

**Центральноукраїнський державний педагогічний
університет імені Володимира Винниченка
Міністерства освіти і науки України**

А.І. Ткачук

**ФІЗИЧНІ ОСНОВИ
ЕЛЕМЕНТНОЇ БАЗИ
СУЧАСНИХ ЕОМ**

КУРС ЛЕКЦІЙ

**навчально-методичний посібник
для студентів закладів вищої освіти
за освітнім рівнем "бакалавр"**

Кропивницький – 2022

УДК 621.382.049.77:53(075.8)

ББК 32.844я73

Т-48

Фізичні основи елементної бази сучасних ЕОМ. Курс лекцій: Навчально-методичний посібник для студентів закладів вищої освіти за освітнім рівнем "бакалавр" / А.І. Ткачук. Кропивницький: РВВ ЦДПУ ім. В. Винниченка. 2022. 204 с.

Навчально-методичний посібник містить курс лекцій та питання, що виносяться на практичні заняття з дисципліни "Фізичні основи елементної бази сучасних ЕОМ" для студентів закладів вищої освіти за освітнім рівнем "бакалавр".

Рецензенти: *Сальник І.В.* – докторка педагогічних наук, професорка, професорка кафедри фізики, біології та методик їхнього навчання Центральноукраїнського державного педагогічного університету імені Володимира Винниченка

Баранюк О.Ф. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри математики, статистики та інформаційних технологій Центральноукраїнського державного педагогічного університету імені Володимира Винниченка

Друкується за рішенням Методичної ради Центральноукраїнського державного педагогічного університету імені Володимира Винниченка, протокол № 1 від 22 вересня 2021 р.

Вступ

Зміст навчальної дисципліни "Фізичні основи елементної бази сучасних ЕОМ", що розкривається в курсі лекцій даного навчально-методичного посібника, направлено на вивчення фізичних явищ і процесів, які реалізуються в елементах сучасної обчислювальної техніки при записі, передачі, обробці та відтворенні інформації.

Предметом вивчення навчальної дисципліни "Фізичні основи елементної бази сучасних ЕОМ" є фізичні основи функціонування елементів, блоків та вузлів сучасних комп'ютерних систем та перспективи їх розвитку. Розглядаються принципи побудови і функціонування логічних та запам'ятовуючих елементів, електронної пам'яті, інтерфейсних контролерів. Вивчаються проблеми швидкодії комп'ютерів, нові фізичні принципи створення потужних комп'ютерів та супер-ЕОМ. Дисципліна "Фізичні основи елементної бази сучасних ЕОМ" є дисципліною, яка узагальнює та систематизує знання студентів, отримані з інших курсів за спеціальністю, а також знайомить з новими фізичними методами запису та обробки інформації.

Метою курсу є: формування та розвиток у студентів наукових знань і вмінь, необхідних і достатніх для розуміння явищ і процесів, які відбуваються у природі та техніці; дати студентам теоретичні знання та відомості про фізичні основи функціонування елементів, вузлів та блоків сучасних комп'ютерних систем, а також розглянути перспективні напрямки розвитку комп'ютерних систем; ознайомити студентів з деяким схемотехнічними рішеннями, що застосовуються для обробки інформації в сучасних комп'ютерних системах.

У результаті вивчення навчальної дисципліни у студента мають бути сформовані такі **компетентності**: ЗК1. Здатність до абстрактного мислення, аналізу та синтезу. ЗК5. Здатність вчитися і оволодівати сучасними знаннями. ЗК6. Здатність до пошуку та аналізу інформації з різних. ЗК9. Здатність розробляти проекти та управляти ними. ФК2. Здатність до виявлення закономірностей випадкових явищ, застосування методів статистичної обробки даних та оцінювання стохастичних процесів реального світу. ФК4. Здатність опанувати сучасні технології математичного моделювання об'єктів, процесів і явищ. ФК17. Здатність застосовувати засоби комп'ютерної графіки та мультимедійних технологій у процесі розв'язання прикладних задач.

Програмні результати навчання:

- ПРН1. Здобувати систематичні знання в галузі комп'ютерних наук, аналізувати проблеми з точки зору сучасних наукових парадигм, осмислювати і робити обґрунтовані висновки з наукової і навчальної літератури та результатів експериментів.
- ПРН6. Розуміти основні етапи та стадії творчого процесу, формулювати мету і задачі для їх досягнення в області комп'ютерних наук, проявляти допитливість, схильність до ризику, вміння мислити, надихатись новими ідеями, втілювати їх, запалювати ними оточуючих, комбінувати та експериментувати.
- ПРН9. Ефективно використовувати сучасний математичний апарат в професійній діяльності для розв'язання задач теоретичного та прикладного характеру в процесі аналізу, синтезу та проектування інформаційних систем.

Лекція № 1

Тема: "Вступ до курсу. Основні поняття, історія розвитку та елементна база електронної обчислювальної техніки"

ПЛАН

- 1.1. Комп'ютер та інформація.
- 1.2. Експоненціальний розвиток і закон Мура.
- 1.3. Роль напівпровідникових матеріалів в елементній базі сучасних ЕОМ.
- 1.4. Основні напрямки розвитку НВІС: кремнієві МОНП-структури, арсенід-галієві та метал-НП структури.

1.1. Комп'ютер та інформація

Комп'ютер (англ. computer – "обчислювач") або **електронно-обчислювальна машина (ЕОМ)** – програмно-керований пристрій для обробки інформації, – обчислювальна машина, призначена для передачі, зберігання та обробки інформації за заздалегідь визначеними алгоритмами. Комп'ютери використовуються й для управління інформацією, проте, як ці завдання, так і розв'язання будь-яких задач зводяться в ньому до якихось послідовних **обчислень** (процесів отримання числових результатів за допомогою дій над числами).

Фактично, **комп'ютер** є універсальним засобом управління, автоматизації, обробки даних, якими можуть бути не лише числа, але і тексти, сигнали, зображення, представлені в цифровій формі. Він сприймає дискретну вхідну інформацію, оброблює її відповідно переліку збережених в середині нього команд і генерує вихідну інформацію (цей перелік команд називається комп'ютерною програмою, а місце її збереження – пам'яттю комп'ютера). Комп'ютеру необхідно надавати інформацію в двійкових числах, тобто перш ніж надати комп'ютеру інформацію, її треба попередньо оцифрувати – представити у вигляді ланцюжків чисел, причому ці числа будуть складені лише з двох елементів – 0 і 1 (є струм – немає струму). Саме двійкове подання інформації лежить в основі будь-якого сучасного цифрового комп'ютера. Так, **біт (bit)** – це одиниця інформації в комп'ютері представляє собою двійковий розряд, який може приймати значення 0 або 1. Кількість двійкових розрядів часто використовується як характеристика "обчислювальної потужності" мікропроцесора, тобто говорять про те, скільки біт одночасно обробляє пристрій або програма. Чим більше це число, тим потужніше відповідний мікропроцесор. **Байт (byte)** – одиниця зберігання та передачі даних у комп'ютері. Байт складається з 8 бітів, що дозволяє отримати 256 різних комбінацій 1 і 0. Цього з надлишком вистачає, щоб закодувати букви алфавітів, цифри і ряд інших символів. Кожній комбінації з 8 біт ставиться у відповідність одна літера, цифра або інший символ, зрозумілий людині.

Фізично комп'ютер може функціонувати за рахунок переміщення будь-яких механічних частин, руху електронів, фотонів, або завдяки використанню ефектів будь-яких ін. фізичних явищ. Найчастіше під терміном "комп'ютер" розуміють систему, побудовану з використанням **електронних пристроїв** (пристроїв, що виготовлені з використанням **електронних компонентів** – резисторів, конденсаторів, солєноїдів, діодів, транзисторів, світлодіодів та ін.), як функціональних елементів.

В цілому, **обчислювальну машину (ОМ)** можна розглядати як сукупність технічних і програмних засобів, що призначена для автоматизованої обробки дис-

кретних даних за заданим алгоритмом; а **алгоритм** – як кінцевий набір розпоряджень, що визначає розв'язання задачі за допомогою кінцевої кількості операцій. На ранніх етапах розвитку ОМ реалізували переважно обчислювальні алгоритми, що і знайшло віддзеркалення в самому понятті "обчислювальна машина". Зберігання, обробка і комутація сигналів в ОМ в основному реалізується електронними схемами. Тому для ОМ довгий час використовувалася аббревіатура ЕОМ. Цей термін з'явився у перших ЕОМ для їх відмінності від механічних і електромеханічних рахунково-обчислювальних пристроїв. У зв'язку з успіхами мікроелектроніки використання в ОМ складних електронних пристроїв – **надвеликих інтегральних схем (НВІС)**, стало загальноприйнятим і звичним. Крім того, ОМ містить не тільки пристрої зберігання й обробки інформації, але і пристрої вводу та виводу. Якщо пристрої зберігання й обробки інформації реалізують на базі НВІС, то пристрої вводу та виводу разом з електронними компонентами містять електромеханічні, оптоелектронні та ін. вузли.

В даний час аббревіатура ЕОМ використовується більше як формальний і правовий термін, щоб показати відмінність від історичного попередника – **механічної обчислювальної машини (МОМ)**, а також в історичному сенсі – для позначення комп'ютерної техніки 1940-1980-х рр., чи великих обчислювальних пристроїв, на відміну від персональних. Також, може використовуватись застарілий термін **ЦОМ (цифрова обчислювальна машина)** на протигагу **АОМ (аналогова обчислювальна машина)** та **ГОМ (гібридна обчислювальна машина)**. У ХХІ ст. словосполучення ЕОМ майже витіснене з побутового вжитку, в той час як більш поширений термін "комп'ютер".

Власне, **інформація** – це відомості (не залежно від форми їх представлення), що сприймаються людиною та (або) спеціальними пристроями як віддзеркалення фактів матеріального або духовного світу в процесі комунікації.

Інформацію можна класифікувати за:

1) способом сприйняття людьми:

- **візуальна** – сприймається зоровими аналізаторами;
- **аудіо** – сприймається слуховими аналізаторами;
- **смакова** – сприймається смаковими аналізаторами;
- **нюхова** – сприймається нюховими аналізаторами;
- **тактильна** – сприймається шкірними аналізаторами і т.д.;

2) формою подання:

- **текстова** – передана у вигляді символів, які позначають лексеми мови;
- **числова** – у вигляді цифр і знаків, що позначають математичні дії;
- **графічна** – у формі зображень подій, предметів, графіків;
- **звукова** – акустичним шляхом (усна або у вигляді запису з передачею лексем мови) і т.д.;

3) призначенням:

- **масова** – містить тривіальні відомості і оперує набором понять, зрозумілим більшій частині соціуму;
- **спеціальна** – містить специфічний набір понять, при використанні відбувається передача відомостей, які можуть бути не зрозумілі основній масі соціуму, але необхідні і зрозумілі в рамках вузької соціальної групи, де використовується дана інформація;
- **особиста** – набір відомостей про яку-небудь особистість, що визначає соціальний стан і типи соціальних взаємодій всередині популяції.

В історії розвитку цивілізації відбулося кілька **інформаційних революцій** – перетворень соціальних (суспільних) відношень в наслідок змін в області обробки, збереження та передачі інформації.

Перша інформаційна революція (VI-III тис. до н.е.) пов'язана з **винаходом писемності**, що призвело до гігантського якісного і кількісного стрибка. З'явилася можливість передачі знань від покоління до поколінь.

Друга інформаційна революція (середина XVI ст.) викликана **винаходом друкарства**, яке радикально змінило індустріальне суспільство, культуру, організацію діяльності.

Третя інформаційна революція (кінець XIX ст.) зумовлена **відкриттям електрики**, завдяки чому з'явилися телеграф, телефон, радіо, що дозволило оперативно передавати і накопичувати інформацію в будь-якому обсязі.

Четверта інформаційна революція (70-і рр.. XX ст.) пов'язана з **винаходом мікропроцесорної технології** та **появою персонального комп'ютера**. На мікропроцесорах та інтегральних схемах створюються комп'ютери, комп'ютерні мережі, системи передачі даних (інформаційні комунікації). Цей період характеризують три фундаментальні інновації: перехід від механічних та електричних засобів перетворення інформації до електронних; мініатюризація всіх вузлів, пристроїв, приладів, машин; створення програмно-керованих пристроїв і процесів.

Потреба у зберіганні, перетворення та передачі інформації у людини з'явилася значно раніше, ніж був створений телеграфний апарат, перша телефонна станція й ЕОМ. Фактично весь досвід, всі знання, накопичені людством, так чи інакше, сприяли появі обчислювальної техніки. Історія створення ЕОМ починається далеко в минулому і пов'язана з розвитком практично всіх сторін життя та діяльності людини. Скільки існує людська цивілізація, стільки часу використовується певна автоматизація обчислень.

Історія розвитку комп'ютерної техніки налічує вже близько восьми десятиліть. За цей час змінилося багато поколінь ЕОМ. Кожне наступне покоління відрізнялося новими елементами (електронні лампи, транзистори, інтегральні схеми), технологія виготовлення яких була принципово іншою. В даний час існує загальноприйнята класифікація поколінь ЕОМ.

На роль першої в історії електронної обчислювальної машини в різні періоди претендувало декілька розробок. Загальним у них було використання схем на базі електронновакуумних ламп замість електромеханічних реле. Передбачалося, що електронні ключі будуть значно надійніші, оскільки в них відсутні рухомі частини, проте технологія того часу була настільки недосконалою, що за надійністю електронні лампи виявилися ненабагато кращими, ніж реле. Проте у електронних компонентів була одна важлива перевага: **виконані на них ключі могли перемикатися приблизно в тисячу разів швидше за свої електромеханічні аналоги**.

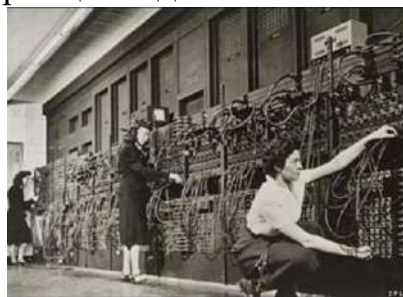
Перше покоління (початок 40-х – середина 50-х рр. XX ст.) – **ЕОМ з елементною базою на електровacuумних лампах**, які відрізнялися великими габаритами та споживанням енергії, малою швидкістю, низькою надійністю, програмуванням в кодах. Фактично, першими комп'ютерами слід вважати британський **Colossus I** та американський **ENIAC**. **Colossus I** став першою обчислювальною машиною на лампах, яка була створена англійцями в 1943 р. для розкодування німецьких військових шифрів (до складу команди розробників входив Алан Тьюрінг). Машина була виконана у вигляді восьми стійок заввишки 2,3 м, а загальна довжина її складала 5,5 м. У логічних схемах машини і в системі оптичного зчитування інформації використовувалося 2400 електронних ламп. Інформація зчитува-

лася з п'яти довгих паперових кілець, що оберталися із швидкістю 5000 символів/с. Фактично, **Colossus I** був одним з перших програмованих електронних цифрових комп'ютерів. **ENIAC** (Electronic Numeric Integrator, Analyzer and Computer) був пристроєм для розрахунку артилерійських таблиць балістики (рис. 1.1, а), що важив майже 30 тонн, займав площу до 170 м² та мав електричну потужність до 150 кВт. Комп'ютер містив 17468 вакуумних ламп шістнадцяти типів, 7200 кристалічних кремнієвих діодів і 4100 магнітних елементів, 1500 реле, 70000 резисторів та 10000 конденсаторів, що містилися вони в шафах загальним обсягом близько 100 м³. Мав продуктивність до 300 операцій множення та 5000 операцій додавання в секунду, при цьому обчислення виконувались у десятковій системі.

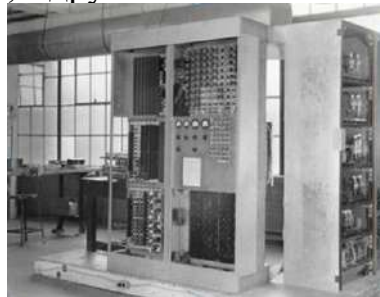
Ще одним видатним представником I-го покоління ЕОМ є **EDVAC** (Electronic Discrete Variable Computer), який вже був двійковим послідовним комп'ютером зі схемами додавання, віднімання, множення, а також з програмною реалізацією ділення. Всього у комп'ютері було близько 6000 електронних ламп і 12000 діодів, споживана потужність складала близько 56 кВт. Машина займала 45,5 м² і важила майже 8 т (рис. 1.1, б). Пристрій "швидкої" пам'яті **EDVAC** складався не з ламп, а з двох наборів по 64 акустичних "ультразвукових ліній затримки" на основі ртутних трубок; загальний обсяг оперативної пам'яті складав 1000 (пізніше 1024) 44-розрядних слів, що у сучасних одиницях дорівнює приблизно 5,5 кілобайт. У якості "повільної" пам'яті передбачалося фіксувати числа і команди на магнітному дроті, однак цей метод виявився ненадійним, і довелося повернутися до телетайпних стрічок. З машиною працювали 30 осіб персоналу кожну 8-годинну зміну.

UNIVAC (Universal Automatic Computer) представляла собою електронний пристрій з програмами (рис. 1.1, в), що зберігалися у пам'яті, які вводилися туди вже не з перфокарт, а з допомогою магнітної стрічки; це забезпечувало високу швидкість читання і запису інформації, а, отже, і більш високу швидкодію машини в цілому. Одна стрічка могла утримувати мільйон символів, записаних в двійковій формі. Стрічки могли зберігати і програми, і проміжні дані.

Друге покоління ЕОМ (кінець 50-х – початок 60-х рр.) вже було *на перших складних напівпровідникових елементах – транзисторах*, з більш покращеними технічними характеристикам та використанням алгоритмічної мови для програмування (наприклад, Atlas Guidance Computer, що був запущений в 1957 р. і використовувався при управлінні запуском ракети "Atlas"; вітчизняні ЕОМ "Урал-2" (1958 р.), БЕСМ-2, "Мінськ-1" та "Урал-3" (1959 р.)). Транзистор замінював 40 електронних ламп і при цьому працював з більшою швидкістю (час перемикання близько 0,3 мс), виділяв дуже мало тепла та майже не споживав електроенергії. Одночасно з процесом заміни електронних ламп транзисторами вдосконалювалися методи зберігання інформації: як пристрої пам'яті стали застосовуватися магнітні сердечники і магнітні барабани, а вже в 60-ті роки набуло поширення зберігання інформації на дисках. Фактично, з другим поколінням ЕОМ асоціюють таке принци-



а



б



в

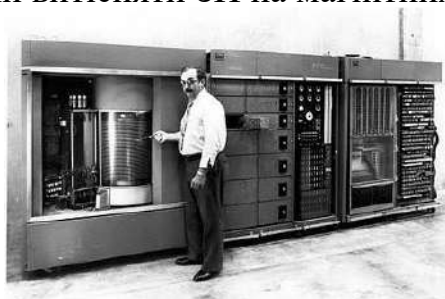
Рис. 1.1. Представники I-го покоління ЕОМ: а) ENIAC; б) EDVAC; в) UNIVAC

ципове технологічне удосконалення, як перехід від пристроїв пам'яті на базі ртутних ліній затримки до пристроїв на магнітних комірках. У *запам'ятовуючих пристроях* (ЗП) на лініях затримки дані зберігалися у вигляді акустичної хвилі, безперервно циркулюючої по кільцю з ліній затримки, а доступ до елемента даних ставав можливим лише у момент проходження відповідної ділянки хвилі поблизу пристрою зчитування/запису. Головною перевагою ЗП на магнітних комірках став вільний доступ до даних, коли у будь-який момент доступний будь-який елемент даних, причому час доступу не залежить від того, який це елемент.

Так, створений в 1957 р. **RAMAC** (рис. 1.2, а) був недорогим комп'ютером з модульною зовнішньою пам'яттю на дисках, комбінованим оперативним запам'ятовуючим пристроєм на магнітних сердечниках і барабанах. І хоча цей комп'ютер ще не був повністю транзисторним, він відрізнявся високою працездатністю і простотою обслуговування та користувався великим попитом на ринку засобів автоматизації діловодства в офісах. Тому для корпоративних замовників терміново випустили вже "великий" RAMAC (IBM-305), для розміщення 5 Мбайт даних йому потрібно було 50 алюмінієвих дисків діаметром 24 дюйми. Створена на основі цієї моделі інформаційна система безвідмовно обробляла масиви запитів на 10 мовах. У 1959 році IBM створила свій перший повністю транзисторний великий універсальний комп'ютер моделі 7090, здатний виконувати 229 тис. операцій за секунду – *транзисторний мейнфрейм*. У 1964 році на основі двох 7090-х мейнфреймів американська авіакомпанія SABRE вперше застосувала автоматизовану систему продажу і бронювання авіаквитків в 65 містах світу.

У 1960 році DEC представила перший у світі міні-комп'ютер – модель **PDP-1** (Programmed Data Processor, програмований процесор даних), комп'ютер з монітором і клавіатурою, який став одним з найпомітніших явищ на ринку. Цей комп'ютер був здатний виконувати 100 тис. операцій в секунду, та займав на підлозі всього 1,5 м² (рис. 1.2, б). PDP-1 став, по суті, першою ігровою платформою завдяки студенту Стіву Расселу, який написав для нього комп'ютерну іграшку Star War! У 1968 році вперше налагодили серійне виробництво міні-комп'ютерів – PDP-8 за ціною близько 10000 дол., розміром з холодильник. Саме цю модель PDP-8 змогли купувати лабораторії, університети і невеликі підприємства.

Третє покоління (кінець 60-х – кінець 70-х рр.) – *малогабаритні ЕОМ на інтегральних схемах*, з багатошаровим друкованим монтажем, що різко знизило габарити ЕОМ, підвищило їх надійність та збільшило продуктивність, з'явився доступ з віддалених терміналів (наприклад, вітчизняні ЕС ЕОМ на інтегральних мікросхемах серії 155 (рис. 1.2, в)). Основні технологічні досягнення зв'язані з переходом від дискретних напівпровідникових елементів до інтегральних мікросхем і початком застосування напівпровідникових запам'ятовуючих пристроїв, що почали витісняти ЗП на магнітних комірках. В перших ЕОМ третього покоління вико-



а



б



в

Рис. 1.2. Представники II-го (а – RAMAC, б – PDP-1) та III-го (в – ЕС-1052) покоління ЕОМ

ристовувалися *інтегральні схеми з малим ступенем інтеграції (small-scale integrated circuits, SSI)*, де на одному кристалі розміщувалось близько 10 транзисторів. Ближче до кінця даного періоду на зміну SSI почали приходити *інтегральні схеми середнього ступеня інтеграції (medium-scale integrated circuits, MSI)*, в яких число транзисторів на кристалі збільшилося на порядки. Виробництво комп'ютерів на інтегральних схемах (мікросхемами їх стали називати пізніше) було набагато дешевше, ніж на транзисторах. Завдяки цьому багато організацій змогли придбати й освоїти такі машини. А це, у свою чергу, призвело до зростання попиту на універсальні ЕОМ, призначені для вирішення різних завдань. У ці роки виробництво комп'ютерів набуло промислового розмаху.

Четверте покоління (з другої половини 70-х – по кінець 80-х рр.) – *персональні комп'ютери на мікропроцесорах та великих інтегральних схемах*, що значно покращило технічні характеристики, зробило масовий випуск персональних комп'ютерів, достатньо дешевих мікроЕОМ, з'явилися потужні багатопроцесорні обчислювальні системи з високою продуктивністю. Фактично, відлік четвертого покоління зазвичай ведуть з переходу на *інтегральні мікросхеми великого (large-scale integration, LSI)*, *надвеликого (very large-scale integration, VLSI)* та *ультравеликого (ultra-large-scale integration, ULSI) ступеня інтеграції*. До перших відносять схеми, що містять понад 1000 транзисторів на кристалі, тоді як число транзисторів на одному кристалі **VLSI** має порядок 10-1000 тис., а **ULSI** – понад 1 млн. (при кількості вентилів – понад 100 тис.). За таких рівнів інтеграції стало можливим умістити в одну мікросхему не тільки центральний процесор, але і обчислювальну машину (ЦП, основну пам'ять і систему вводу/виводу). У ЕОМ і ОС четвертого покоління практично не використовуються ЗП на магнітних комірках і основна пам'ять будується з напівпровідникових ЗП. До цього використання напівпровідникових ЗП обмежувалося лише регістрами і кеш-пам'яттю.

В цей час попередниками IBM PC були Apple II, Radio Shack TRS-80, Atari 400 і 800, Commodore 64 і Commodore PET. А, власне, "народження" персональних комп'ютерів (PC) з повною підставою пов'язують з процесорами Intel. Корпорація була заснована в середині 1968 р., з тих пір Intel перетворилася на найбільшого в світі виробника мікропроцесорів з числом співробітників понад 65 тис. Метою Intel було створення напівпровідникової пам'яті та, щоб вижити, фірма стала брати й сторонні замовлення на розробку напівпровідникових пристроїв. У 1971 р. Intel отримала замовлення на розробку набору з 12 мікросхем для програмованих мікрокалькуляторів, але інженерам Intel створення 12 спеціалізованих чипів здалося громіздким і неефективним. Завдання скорочення номенклатури мікросхем було вирішено шляхом створення "спарки" з напівпровідникової пам'яті та виконавчого пристрою, здатного працювати за командами, що зберігається в ній. Це був прорив у філософії створення обчислювальних засобів: універсальний логічний пристрій у вигляді 4-розрядного центрального процесорного пристрою i4004, пізніше названий мікропроцесором, представляв собою набір з 4 чипів, в числі яких був один чіп, керований командами, що зберігалися в напівпровідниковій внутрішній пам'яті. Як комерційна розробка, мікрокомп'ютер (так тоді називалася мікросхема) з'явився на ринку 11 листопада 1971 р. під назвою 4004: 4-бітний, 2300 транзисторів, тактова частота 60 кГц, вартість – 200 дол. У 1972 р. компанія Intel випустила восьмі бітний мікропроцесор 8008, в 1974 р. – його удосконалену версію Intel-8080, яка до кінця 70-х років стала стандартом для мікрокомп'ютерної індустрії. Вже в 1973 р. у Франції з'явився перший комп'ютер на базі мікропроцесора 8008 – **Micral** (рис. 1.3, а). З різних причин цей процесор не мав успіху в США (у CPSP він був

скопійований і випускався довгий час під назвою 580BM80). Тоді ж група інженерів, що пішла з Intel утворила фірму Zilog, найбільш гучним продуктом якої став Z80, що мав розширений набір команд 8080 і напругою живлення 5 В. На його основі був створений, зокрема, комп'ютер ZX-Spectrum (Sinclair), що став практично прообразом Home PC середини 80-х. У 1981 р. Intel випускає 16-розрядний процесор 8086 і 8088 (аналог 8086, за винятком зовнішньої 8-бітної шини даних – вся периферія тоді була ще 8-бітної). А в серпні 1981 р. IBM представила Personal Computer (PC), що став, у поєднанні з програмним забезпеченням від Microsoft, стандартом для всього парку ПК сучасного світу (рис. 1.3, б). Конфігурація першого IBM PC: процесор Intel 8088 з частотою 4,77 МГц та 29 тисячами транзисторів, 64 кБ оперативної пам'яті, 1 флорпідисковод ємністю 160 кБ.

Apple II відрізнявся тим, що не був цілком закінченим апаратом і там залишалася деяка свобода для доопрацювання безпосередньо користувачем – можна було встановлювати додаткові інтерфейсні плати, плати пам'яті та ін. (рис. 1.3, в). Саме ця особливість, яку згодом стали називати "відкритою архітектурою", стала його основною перевагою. Успіху Apple II сприяли ще дві новинки – розроблений у 1978 р. недорогий накопичувач на гнучких дисках та перша програма для комерційних розрахунків – електронна таблиця VisiCalc.

П'яте покоління ЕОМ (з середини 80-х рр.), пов'язане з: появою комп'ютерів на надскладних мікропроцесорах (**ULSI** з десятками і сотнями мільйонів активних елементів в одному кристалі) з паралельно-векторною структурою, одночасно виконуючих десятки послідовних інструкцій програми; ЕОМ з багатьма десятками паралельно працюючих мікропроцесорів, що дозволяють будувати ефективні системи обробки знань; впровадженням в усі сфери комп'ютерних мереж та їх об'єднань, використанням розподіленої обробки даних, повсюдного застосування комп'ютерних інформаційних технологій, розробки інтелектуальних комп'ютерів. **Відмінними рисами комп'ютерів V-го покоління стали:** 1) нові технології виробництва; 2) відмова від традиційних мов програмування таких, як Кобол і Фортран, на користь мов з підвищеними можливостями маніпулювання символами та з елементами логічного програмування (Пролог і Лісп); 3) акцент на нові архітектури (наприклад, на архітектуру потоку даних); 4) нові способи введення-виведення, зручні для користувача (наприклад, розпізнавання мови і образів, синтезу мови, обробка повідомлень на природній мові); 5) **штучний інтелект**, тобто автоматизація процесів вирішення завдань, отримання висновків, маніпулювання знаннями. Саме на рубежі 80-90-х рр. сформувався альянс Windows-Intel. Коли на початку 1989 р. Intel випустила мікропроцесор i486, який мав вбудований математичний співпроцесор, конвеєр і вбудований кеш першого рівня, виробники комп'ютерів не стали чекати прикладу з боку IBM або Compaq. Почалася гонка, в яку вступили десятки фірм. Але всі нові комп'ютери були надзвичайно схожі один на одного – їх об'єднувала сумісність з Windows і мікропроцесори від Intel.



а



б



в

Рис. 1.3. Представники IV-го покоління: а – Micral, б – IBM PC, в – Apple II

Разом зі зміною поколінь ЕОМ змінювався і характер їх використання. Якщо спочатку вони створювалися і використовувалися в основному для вирішення обчислювальних завдань, то в подальшому сфера їх застосування розширилася. Сюди можна віднести обробку інформації, автоматизації управління виробничо-технологічними та науковими процесами і багато іншого.

Виділяють також **шосте покоління ЕОМ**, до якого відносять, в першу чергу, **нейрокомп'ютери**. Незважаючи на те, що реальне застосування **нейромереж** почалося відносно недавно, нейрокомп'ютинг як науковому напрямку пішов сьомий десяток років, а перший нейрокомп'ютер був побудований в 1958 р. (розробником машини був Френк Розенблатт, який назвав своє дітищу Mark I). Теорія нейромереж визначає, що будь-яку арифметичну або логічну функцію можна реалізувати за допомогою простої нейронної мережі. Власне, **нейрокомп'ютери** – це ЕОМ, які складаються з безлічі працюючих паралельно простих обчислювальних елементів, які називаються "нейронами", що й утворюють "нейромережі", а висока швидкодія досягається саме за рахунок величезної кількості таких "нейронів". Нейрокомп'ютери побудовані за біологічним принципом: нервова система людини складається з окремих клітин – нейронів, кількість яких в головному мозку досягає 100 млрд., при тому, що час спрацювання нейрона – 3 мс. Кожен нейрон виконує досить прості функції, але так як він пов'язаний в середньому з 10-100 тис. інших нейронів, такий колектив успішно забезпечує роботу людського мозку.

Фактично, **шосте і наступні покоління** – це оптоелектронні ОМ з масовим паралелізмом та нейронною структурою, з розподіленою сіткою великого числа (десятки і сотні тисяч) "простих" мікропроцесорів, що моделюють архітектуру нейронних біологічних систем.

В **оптоелектронних комп'ютерах** носієм інформації є світловий потік. Електричні сигнали перетворюються в оптичні і назад. Оптичне випромінювання в якості носія інформації має ряд потенціальних переваг у порівнянні з електричними сигналами: світлові потоки, на відміну від електричних, можуть перетинатися один з одним; світлові потоки можуть бути локалізовані в поперечному напрямку до нанометрових розмірів і передаватися по вільному простору; швидкість поширення світлового сигналу вище швидкості електричного; взаємодія світлових потоків з нелінійними середовищами розподілено по всій середовищі, що дає нові ступені свободи в організації зв'язку і створення паралельних архітектур. В даний час ведуться розробки по створенню комп'ютерів повністю складених з оптичних пристроїв обробки інформації. Сьогодні цей напрямок є найбільш цікавим. Оптичний комп'ютер має небачену продуктивність і зовсім іншу, ніж електронний комп'ютер, архітектуру: за 1 такт тривалістю менше 1 наносекунди (це відповідає тактовій частоті більше 1 ГГц) в ньому можлива обробка масиву даних близько 1 мегабайта і більше. До теперішнього часу вже створені і оптимізовані окремі складові оптичних комп'ютерів. Оптичний комп'ютер розміром з ноутбук може дати користувачеві можливість розмістити в ньому чи не всю інформацію про світ, при цьому комп'ютер зможе вирішувати завдання будь-якої складності.

Квантові комп'ютери – обчислювані пристрої, які працюють на основі квантової механіки. Повномасштабний квантовий комп'ютер – гіпотетичний пристрій, можливість побудови якого пов'язана з серйозним розвитком квантової теорії в області елементарних частинок і складних експериментів; ця робота лежить на краї сучасної фізики. Обмежені квантові комп'ютери вже існують; елементи квантових комп'ютерів можуть застосовуватися для підвищення ефективності обчислень на вже існуючій приладовій базі.

1.2. Експоненціальний розвиток і закон Мура

Головна рушійна сила розвитку комп'ютерної промисловості – здатність виробників поміщати з кожним роком все більшу і більшу кількість транзисторів на мікросхему. Чим більше транзисторів (крихітних електронних перемикачів), тим більше об'єм пам'яті і потужніше процесори. Гордон Мур (Gordon Moore), один із засновників Intel передбачив появу кожного нового покоління мікросхем з інтервалом в 1,5-3 роки. **Закон Мура** говорить про те, що кількість транзисторів на кристалі мікросхеми може подвоюватись кожні 24 місяці (рис. 1.4). По суті, **закон Мура** – це емпіричне спостереження за тим, з якою швидкістю фізики і інженери-технології розвивають напівпровідникові комп'ютерні технології, і передбачення про те, що з такою швидкістю вони працюватимуть і в майбутньому. Незважаючи на деякі коливання в періоді подвоєння, закон Мура продовжує працювати, хоча ще в 2007 р. Мур заявив, що його закон незабаром перестане діяти через атомарну природу речовини та обмеження швидкості світла. Закон Мура також пов'язаний з тим, що деякі економісти називають ефективним циклом. Досягнення в комп'ютерних технологіях (збільшення кількості транзисторів на одній мікросхемі) призводять до продукції кращої якості і нижчих цін. Низькі ціни ведуть до появи нових прикладних програм, які в свою чергу приводять до виникнення нових комп'ютерних ринків і нових компаній. Існування всіх цих компаній веде до конкуренції між ними, яка, у свою чергу, породжує попит на кращі технології. Коло замикається.

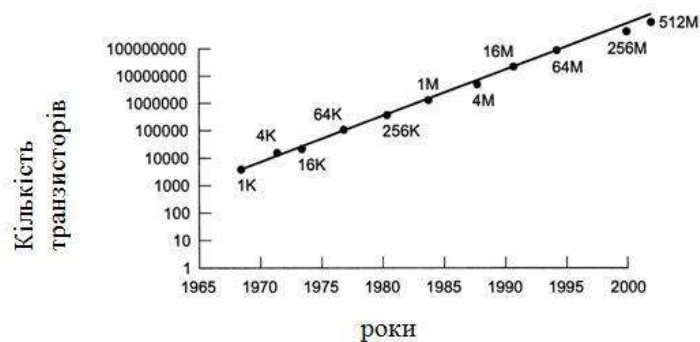
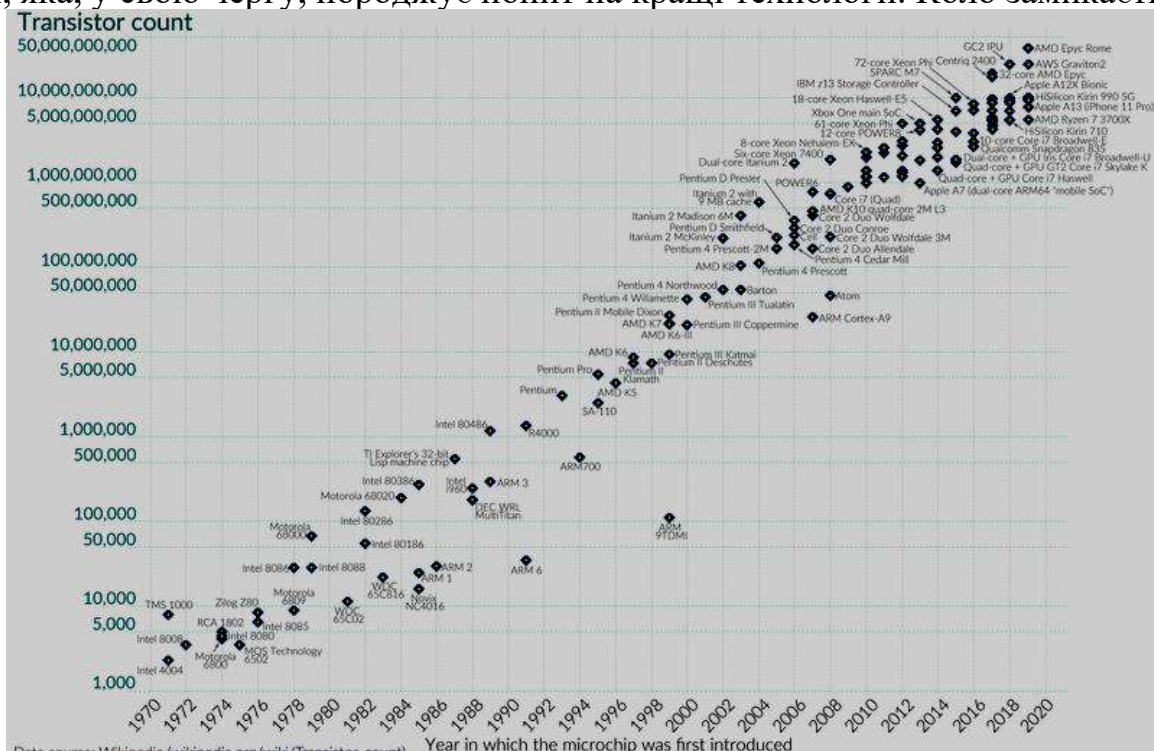


Рис. 1.4 Графічні відображення закону Мура

1.3. Роль напівпровідникових матеріалів в елементній базі сучасних ЕОМ

Напівпровідникові транзистори прийшли на зміну електронним вакуумним лампам в кінці 50-х років. Вони діяли як електричні перемикачі, споживаючи менше електроенергії, виділяючи менше тепла та займаючи менше місця. Транзистори стали лічильниками двійкових чисел, що фіксували два стани – наявність і відсутність струму, тим самим обробляючи інформацію, подану їм саме в такому двійковому вигляді. Цьому передував бурхливий розвиток радіоелектроніки і техніки, особливо радіолокації в період другої світової війни, який дав новий поштовх дослідженням в області напівпровідникових матеріалів і напівпровідникових приладів. Поява в той же період складних багатолампових схем електронних лічильних машин і розвиток авіаційної радіотехніки також привели до необхідності розробки малогабаритного надійного електронного устаткування. Стало зрозумілим, що вирішення цілого ряду серйозних завдань за допомогою радіоламп виявляється або занадто складним, або взагалі практично неможливим. Розвиток техніки поставив учених перед необхідністю створення надійного малогабаритного і малоенергоємного приладу, здатного замінити лампу – напівпровідникового підсилювального приладу. Дослідження проводилися в різних напрямках і завершилися **створенням** в грудні 1947 р. **співробітниками американської корпорації Bell Labs Джоном Бардіном і Уолтером Браттейном точкового германієвого транзистора** (тріода) (рис. 1.5). На рис 1.6 показано сучасний макет точкового біполярного транзистора Бардіна та Браттейна, де трикутник у центрі є прозорою призмкою, по ребрах якої приклеєні смужки фольги – виводи колектора та емітера, а базою слугує металічна основа, на якій закріплений германієвий кристал.

Точковий транзистор, що випускався серійно близько десяти років, виявився тупиковою гілкою розвитку електроніки – на його зміну прийшли германієві площинні транзистори. Теорію електронно-діркового $p-n$ -переходу та площинного транзистора створив у 1948-1950 р. Уільям Шоклі, а перший площинний (планарний) транзистор був виготовлений в квітні 1950 р. методом вирощування з розплаву (Рис. 1.7). За ним "пішли" сплавний транзистор, "електрохімічний" транзистор і дифузійний мезатранзистор. В 1954 р. американська компанія Texas Instruments випустила перший кремнієвий транзистор. А в 1956 році Бардін, Шоклі і Браттейн отримали Нобелівську премію з фізики за відкриття транзисторного ефекту та винахід транзистора. Відкриття процесу мокрого окиснення кремнію зробило можливим випуск 1958 р. перших кремнієвих мезатранзисторів, а у 1959 р. Жан Ерні створив перший кремнієвий планарний транзистор. Кремній витіснив германій, а планарний процес став основною технологією виробництва транзисторів і зробив можливим створення **монолітних інтегральних схем**.



Рис. 1.5. Дж. Бардін, У. Шоклі та У. Браттейн



Рис. 1.6. Макет точкового транзистора Бардіна та Браттейна



Рис. 1.7. Перший планарний транзистор (1950)

В 1951 р. уряд США зажадав, щоб Bell Labs надала ліцензії на свої транзисторні технології всім зацікавленим американським компаніям без стягування платежу за користування (роялті). До літа 1952 р. ліцензію (так звану "книгу за 25 тис. доларів") придбали 26 американських і 14 іноземних компаній, але їхні спроби відтворити точковий транзистор не мали достатнього успіху. Так, компанія Philips завдяки довоєнним зв'язкам із Bell, отримала ліцензію раніше від конкурентів, але серійне виробництво точкових транзисторів почала лише 1953 р., одночасно з сучаснішими сплавними транзисторами.

Поряд з цим, у 50-х – 60-х рр. класична збірка електронного устаткування представляла собою трудомісткий процес, який сповільнювався зростаючою складністю електронних схем. Так, наприклад, комп'ютер типу **CD1604** (1960 р., компанія Control Data Corp.), містив близько 100 тис. діодів і 25 тис. транзисторів, що з'єднувались між собою в ручну під час **навісного монтажу** (способу монтажу електронних схем, при якому розташовані на ізолюючому шасі елементи з'єднувались один з одним провідниками або безпосередньо своїми виводами), що не піддавався автоматизації та давав громіздкі конструкції (Рис. 1.8, а). У масовій електроніці навісний монтаж згодом поступився місцем **наскрізному монтажу** – способу монтажу електронних компонентів при якому вони монтувались у отвори в **друкованій платі** (пластини з діелектрика, на якій або/і всередині якої сформовано хоча б один шар з провідними доріжками), а їхні виводи припаювались до площадок та/або металізованої внутрішньої поверхні отвору, з'єднуючись з елементами провідного рисунка (Рис. 1.8, б, в). Це давало значно більш високий ступінь автоматизації та компактність конструкцій, але не дозволяло оперувати великою кількістю компонентів.

Наступним ступенем розвитку транзистора стало створення **інтегральної схеми (мікросхеми)**, в якій безліч транзисторів і пов'язаних з ними елементів (резисторів, конденсаторів тощо) виготовлялись методом контрольованої дифузії домішок в єдиній кремнієвій матриці невеликого розміру. Ці прилади зробили новий переворот в електроніці та уможливили появу сучасних ЕОМ. Власне, ідею інтегральної схеми ("брусочек без дротів") – інтеграції великої кількості стандартних електронних компонентів у монолітному кристалі напівпровідника вперше запропонував 1952 р. британський радіотехнік Джеффри Даммер, а перші прототипи інтегральних мікросхем з п'яти елементів і генератора (Рис. 1.9) створив та довів їх до серійного випуску в 1958-1959 рр. Джек Кілбі з Texas Instruments. За це він був удостоєний 2000 р. Нобелівської премії з фізики "за особистий вклад у винайдення інтегральної схеми". У 1961 р. американська фірма Fairchild Semiconductor Corporation випустила інтегральні схеми у вільний продаж, і їх відразу стали використовувати у виробництві калькуляторів і комп'ютерів замість окремих транзисторів, що дозволило значно зменшити їхній розмір, та збільшити продуктивність.

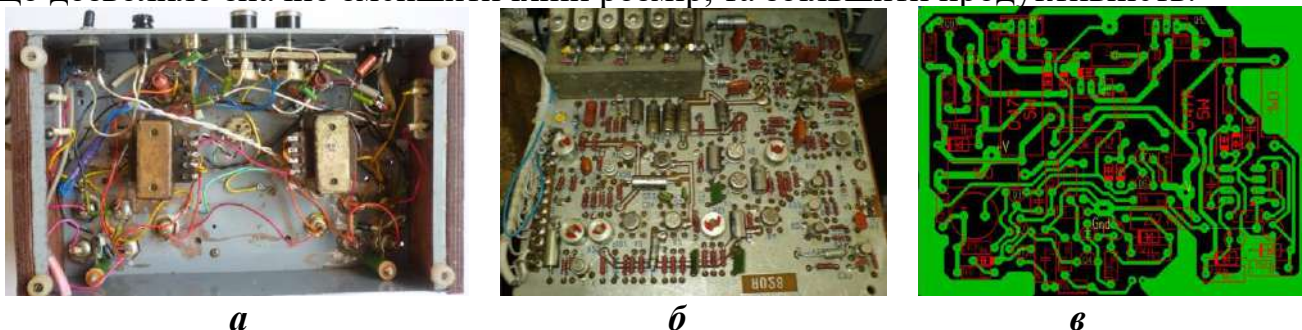


Рис. 1.8. Способи монтажу електронних схем: а – навісний; б, в – монтаж відокремлених деталей з допомогою друкованих плат (вид зверху та знизу)

Подальше вдосконалення та винайдення нових типів транзисторів дало можливість збільшити ступінь інтеграції елементів на одному чипі, завдяки їх компактності, технологічності, довговічності. Так, перший **однополярний польовий транзистор з ізольованим затвором** – **МОН-транзистор (МДН-транзистор)**, був створений в 1959 р. співробітниками Bell Labs Мохамедом Аталюю і Девоном Кангом завдяки розробки технології пасивації кремнію. А в 1963 р. Сі Чжітаном та Френком Уанласом з американської компанії Fairchild Semiconductor International на основі цієї технології було розроблено та створено новий тип логіки на МДН-транзисторах, що поєднав в собі симетричні пари МОН-транзисторів *p*-типу і *n*-типу на одній підкладці – **КМОН-транзистори (комплементарні структури метал-оксид-напівпровідник)**. Це дало можливість досить легко реалізувати цифрові логічні схеми, наприклад КМОН-логічні інвертори, які в статичному режимі не споживають електроенергії, й в подальшому зменшити енергоспоживання мікросхем в ~1 млн. разів в перерахунку на 1 елемент структури.

Тоді ж, з 1963 р. фірми Sylvania і Transitron почали випуск мікросхем на основі **транзисторно-транзисторної логіки (ТТЛ)** – першої широко поширеної технології виготовлення напівпровідникових ІС, в якій транзистори використовуються як для виконання логічних функцій (наприклад, "І", "АБО"), так і для інвертування та посилення вихідного сигналу (на відміну від резисторно-транзисторної та діодно-транзисторної логіки). ТТЛ стала популярною серед розробників електронних систем після того, як в 1965 р. фірма Texas Instruments представила **серію інтегральних мікросхем 7400** (Рис. 1.10), яка стала промисловим стандартом.

Сучасна ІС – це мікроелектронний пристрій, електронна схема довільної складності, виготовлена на напівпровідниковій підкладці (пластині або плівці) й поміщена в нерозбірний герметичний корпус (часто під ІС розуміють власне кристал або плівку з електронною схемою, а під мікросхемою (МС) – ІС, поміщену в корпус) (Рис. 1.11). Велика частина мікросхем виготовляється в корпусах для **поверхневого монтажу**, коли компоненти встановлюються безпосередньо на поверхню друкованої плати без припаювання в отворах, як при **наскрізному** (Рис. 1.12).

Отже, **перевагою інтегральних мікросхем перед дискретними компонентами** стало те, що це мініатюрний електронний пристрій, який виконує функції перетворення й обробки сигналів, і в той же час містить величезне число активних і пасивних елементів (від декількох сот до мільярда й більше). Їх використання дало суттєве **зниження собівартості** (вартість мікросхеми набагато менше, ніж загальна вартість елементів, з яких вона складається) та **підвищення надійності пристрою** (пошук несправностей в схемах з величезного числа елементів – це дуже складна і трудомістка робота). Крім того, з огляду на те, що елементи ІС у багато разів менше дискретних аналогів, їх енергоспоживання також набагато менше, а ККД набагато вищий.

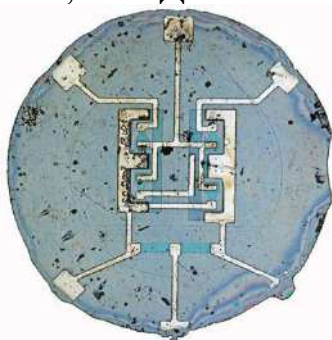


Рис. 1.9. Перша інтегральна схема

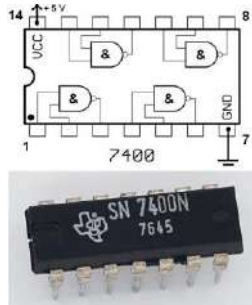


Рис. 1.10. Інтегральна мікросхема з ТТЛ серії 7400

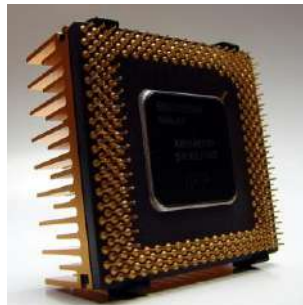


Рис. 1.11. Мікропроцесор Intel Pentium з тепловідводом



Рис. 1.12. Поверхневий монтаж мікросхем

Наступним етапом розвитку друкованих плат з монтованими мікросхемами стали материнські (системні) плати, на яких розмістили основні компоненти комп'ютера, що забезпечують логіку. Фактично, **материнська плата** – це комплекс різних пристроїв, що підтримує роботу системи в цілому. Плата являє собою електронний пристрій, виконаний зі скловолокна, електронні компоненти якого пов'язані між собою металевими доріжками (Рис. 1.13).

До основних компонентів системної плати відносяться такі ІС:

- **інтегральні схеми** (ІС, мікросхеми, чіпи, чіпсети), що представляють собою пластикові або керамічні блоки;
- **мікросхеми постійного запам'ятовуючого пристрою** ROM (ПЗП, Flash), в яку записується BIOS – програма, що керує взаємодією окремих частин комп'ютера;
- **мікросхеми оперативної пам'яті** RAM (ОЗП), призначені для тимчасового зберігання програм і даних;
- **мікросхеми-контролери**, що керують роботою системної шини, портів, вітчестера й інших пристроїв зберігання інформації HDD, FD, CD-ROM.

1.4. Основні напрямки розвитку НВІС: кремнієві МОНП-структури, арсенід-галієві та метал-НП структури

За способом виготовлення ІС поділяються на **напівпровідникові** і **плівкові**. **Напівпровідникові мікросхеми** – це мікросхеми, у яких інтегральні елементи (транзистори, діоди, резистори, конденсатори) виготовляються у поверхневому шарі напівпровідникової пластини. **Плівкові мікросхеми** – це мікросхеми, елементи якої виготовлені у вигляді різноманітних плівок, нанесених на діелектричну основу. На практиці застосовуються також гібридні мікросхеми, які поєднують у собі обидва зазначені вище методи виготовлення. Переважна більшість мікросхем виготовляються за напівпровідниковими інтегральними технологіями.

Інтегральна мікросхема, як і транзистор, резистор, конденсатор тощо, виготовляється як окремий виріб і також є елементом електронного пристрою. За масою і геометричними розмірами інтегральна мікросхема мало відрізняється від дискретних транзисторів і резисторів. З іншого боку інтегральна мікросхема якісно новий вид електронних елементів. Якщо дискретні елементи можуть виконувати окремі елементарні операції обробки інформації тільки у сукупності з іншими елементами, у складі якогось пристрою, то інтегральні мікросхеми обробляють величезні потоки інформації за складними алгоритмами самостійно. Незважаючи на те, що функціональна складність інтегральних мікросхем незмірно більша ніж у дискретних елементів, інші показники якості – маса, геометричні розміри, надійність, вартість тощо не тільки не гірші, а у багатьох випадках навіть кращі за аналогічні показники дискретних елементів. Під час проектування і виготовлення мікросхем віддається перевага **активним елементам**, у першу чергу **транзисторам**, над **пасивними елементами** – **резисторами** і **конденсаторами**. Це пояснюється тим, що транзистори займають на кристалі значно меншу площу, ніж пасивні елементи, особливо зі значними номінальними значеннями, тому пасивні елементи замінюються активними скрізь, де для цього є найменша можливість. Цей принцип діаметрально протилежний принципу добору елементів у пристроях, побудованих на дискретних елементах, де намагаються мінімізувати кількість транзисторів, оскільки вартість дискретних транзисторів набагато більша вартості пасивних елементів. Інтегральні елементи, розміщені поряд на кристалі напівпровідникового мате-

ріалу, мають високу ступінь ідентичності характеристик, оскільки розміри інтегральних елементів становлять мікрметри і частки мікрметра, тому на таких відстанях електрофізичні властивості напівпровідникового матеріалу майже не змінюються. Крім того, параметри таких сусідніх елементів ідентично залежать від температури. Такі властивості інтегральних елементів дають змогу зменшити вплив розкиду параметрів елементів і зміни температури. Характерною особливістю напівпровідникових інтегральних технологій є також їх нездатність створювати індуктивні елементи і, особливо, трансформатори, тому під час розробки інтегральних мікросхем намагаються уникати використовувати індуктивності і реалізують потрібні функції без них. У більшості випадків це вдається.

За ступенем інтеграції (за сумарною кількістю елементів, які входять у цю мікросхему) напівпровідникові інтегральні мікросхеми прийнято поділяти на ІС:

- *першого ступеня інтеграції* – до 10 елементів;
- *другого ступеня інтеграції* – від 11 до 1000 елементів;
- *третього ступеня інтеграції* – від 1001 до 10000 елементів (*великі інтегральні мікросхеми – ВІС*);
- *четвертого ступеня інтеграції* – від 10001 до 1000000 елементів (*надвеликі інтегральні мікросхеми – НВІС*) (Рис. 1.14);
- *ультравеликі інтегральні схеми (УВІС)* – до 1 мільярда елементів в напівпровідниковому кристалі;
- *гігавеликі інтегральні схеми (ГВІС)* – більше 1 мільярда елементів в напівпровідниковому кристалі.

За функціональним призначенням інтегральні мікросхеми ділять на два великі класи: *цифрові* (або логічні) і *аналогові* (або лінійно-імпульсні).

Цифрові мікросхеми використовують в ЕОМ, пристроях дискретної обробки інформації. За призначенням цифрові мікросхеми можуть бути наступних видів: логічні елементи, тригери, лічильники, регістри, буферні перетворювачі, шифратори, дешифратори, цифрові компаратори, мультиплексори, демультимплексори, суматори, напівсуматори, ключі, арифметико-логічні пристрої, мікроконтролери, мікропроцесори (у тому числі ЦП для комп'ютерів), однокристалні мікрокомп'ютери, мікросхеми і модулі пам'яті, ПЛІС (програмовані логічні інтегральні схеми).

Цифрові інтегральні мікросхеми мають ряд переваг в порівнянні з аналогови-ми. *Зменшене енергоспоживання*, пов'язане із застосуванням в цифровій електроніці імпульсних електричних сигналів. При отриманні і перетворенні таких сигналів активні елементи електронних пристроїв (транзистори) працюють в "ключовому" режимі, тобто транзистор або "відкритий" – що відповідає сигналу високого



Рис. 1.13. Сучасна материнська плата



Рис. 1.14. Надвелика інтегральна мікросхема



Рис. 1.15. НП-пластини діаметром 300 та 450 мм

рівня (1), або "закритий" – (0), в першому випадку на транзисторі немає падіння напруги, в другому – через нього не йде струм. У обох випадках енергоспоживання близьке до 0, на відміну від аналогових пристроїв, в яких велику частину часу транзистори знаходяться в проміжному (резистивному) стані. Крім цього, **висока завадостійкість** цифрових пристроїв пов'язана з великою відмінністю сигналів високого (наприклад, 2,5-5 В) і низького (0-0,5 В) рівня. Помилка можлива при таких перешкодах, коли високий рівень сприймається як низький і навпаки, що мало вірогідно. В цифрових пристроях можливе застосування спеціальних кодів, що дозволяють виправляти помилки. Також, велика відмінність сигналів високого і низького рівня і досить широкий інтервал їх допустимих змін робить цифрову техніку нечутливою до неминучого в інтегральній технології розкиду параметрів елементів, позбавляє від необхідності підбору і налаштування цифрових пристроїв.

Аналогові мікросхеми використовуються для підсилення сигналів низьких і високих частот, як генератори, детектори тощо. Основним елементом аналогових мікросхем є **транзистори** (біполярні чи польові). Різниця в технології виготовлення транзисторів істотно впливає на характеристики мікросхем. Тому нерідко в описі мікросхеми вказують технологію виготовлення, щоб підкреслити тим самим загальну характеристику властивостей і можливостей мікросхеми. У сучасних технологіях поєднують технології біполярних і польових транзисторів, щоб домогтися поліпшення характеристик мікросхем. **За призначенням аналогові мікросхеми** можуть бути наступних видів: операційні підсилювачі, компаратори, генератори сигналів, фільтри (у тому числі на п'єзоефекті), аналогові помножувачі, аналогові атенюатори і регульовані підсилювачі, стабілізатори джерел живлення (стабілізатори напруги і струму), мікросхеми управління імпульсних блоків живлення, перетворювачі сигналів, схеми синхронізації, різні датчики (температури та ін.).

За технологією виготовлення транзисторів мікросхеми поділяються на мікросхеми на однополярних (польових) транзисторах та мікросхеми на біполярних транзисторах. Мікросхеми на однополярних (польових) транзисторах – самі економічні (за споживанням струму), при побудові яких реалізується:

- **МОН-логіка** (метал-оксид-напівпровідник логіка) – логічні електронні мікросхеми формуються з польових транзисторів *n*-МОН або *p*-МОН типу;
- **КМОН-логіка** (комплементарна МОН-логіка) – кожен логічний елемент мікросхеми складається з пари взаємодоповнюючих (комплементарних) польових транзисторів (*n*-МОН і *p*-МОН). Практично всі сучасні серії логічних ІМС виконуються за технологією КМОН.

Для **елементної бази виготовлення логічних вентилів ІС** (базових елементів цифрової схеми, що виконують елементарну логічну операцію, перетворюючи таким чином вхідні логічні сигнали у вихідний логічний сигнал; їх з'єднують між собою таким чином, що вихід використовуваного вентиля повинен бути підключений до одного або до декількох входів інших вентилів) застосовуються також:

- **ТТЛ – транзисторно-транзисторна логіка** – логічний вентиль базується на багатоемітерних біполярних транзисторах на вході;
- **ТТЛШ – транзисторно-транзисторна логіка з діодами Шотткі** – вдосконалена ТТЛ, в якій використовуються біполярні транзистори з ефектом Шотткі;
- **ЕЗЛ – емітерно-зв'язана логіка** – логічний вентиль базується на диференціальному каскаді з біполярних транзисторів, режим роботи яких підібраний так, щоб вони не входили в режим насичення, – що істотно підвищує швидкодію;
- **ІІЛ – інтегрально-інжекційна логіка** на біполярних транзисторах;
- **БіКМОН** – логіка на базі біполярних і комплементарних МОН-транзисторів.

Технологія створення і отримання надвеликих інтегральних включає такі основні напрями: 1) технологію надвеликих кремнієвих схем з мінімальними розмірами в глибокій субмікронній області; 2) технологію надшвидкісних гетеропереходних приладів і інтегральних схем на основі арсеніду галію, германію на кремнії та інших сполук; 3) технологію отримання нанорозмірних приладів, включаючи нанолітографію. **При реалізації цих напрямків передбачається:** 1) створення надчистих монокристалічних напівпровідникових матеріалів і технологічних реагентів, включаючи гази і рідини; 2) забезпечення надчистих виробничих умов в зонах обробки і транспорту пластин; 3) розробка технологічних операцій та створення комплексу обладнання на нових фізичних принципах.

Отримання напівпровідникових надвеликих і більше інтегральних мікросхем, коли всі елементи та міжелементні з'єднання виконані на одному напівпровідниковому кристалі, реалізують за допомогою **планарної технології** – сукупності технологічних операцій при виготовленні планарних (пласких, поверхневих) напівпровідникових приладів та ІС, що включає в себе формування окремих компонентів транзисторів з об'єднанням їх в єдину структуру (Рис. 1.16). **Принципи технології** полягають в тому, що схему формують на підкладці (пластині), отриманій шляхом різання алмазними дисками монокристалу напівпровідника на тонкі пластини. Хімічний склад підкладок, кристалічна структура (аж до міжатомної відстані в підкладках для сучасних процесорів) і кристалографічна орієнтація ретельно контролюються. В ході технологічного процесу в приповерхневому шарі напівпровідникового матеріалу, який є підкладкою або нанесеного на підкладку, утворюють області з різним типом провідності (або різної концентрації), дозуючи концентрацію донорних і акцепторних домішок. Області захищають шаром діелектрика, залишаючи вікна контактів. Поверх шару напівпровідникового матеріалу, з використанням в потрібних місцях прошарків діелектричного матеріалу, наносяться шари провідного матеріалу, що утворює контактні площадки та необхідні з'єднання між областями. Області та шари провідника, напівпровідника і діелектрика в сукупності утворюють структуру напівпровідникового приладу або інтегральної мікросхеми. Особливістю планарної технології є те, що після завершення кожної технологічної операції, відновлюється плоска форма поверхні пластини.

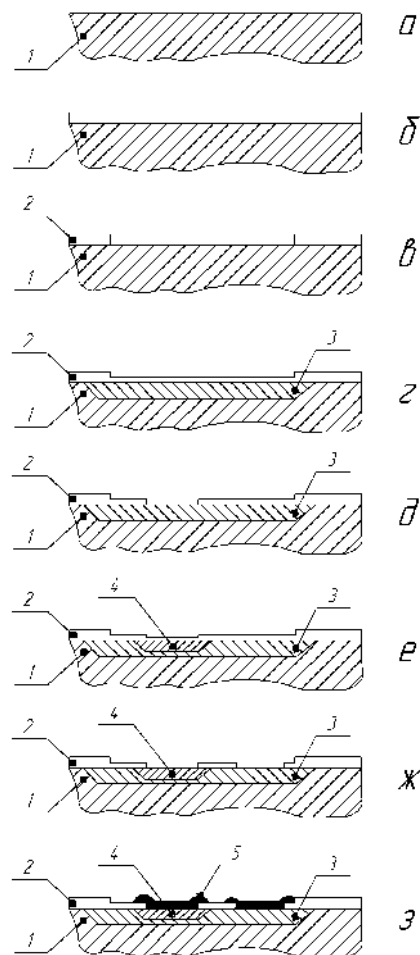


Рис. 1.16. Виготовлення транзистора за планарною технологією: а – вихідна пластина; б – перший окислення; в – перша фотолітографічна обробка; г – створення базової області і друге окислення; д – друга фотолітографічна обробка; е – створення емітерної області і третє окислення; ж – третя фотолітографічна обробка; з – металізація; 1 – напівпровідник з електропровідністю *n*-типу; 2 – маскуюча плівка діоксиду кремнію; 3 – область бази; 4 – область емітера; 5 – металева плівка (електроди)

Як характеристики технологічного процесу планарного виробництва мікросхем визначають **мінімальні контрольовані розміри топології фотоповторювача** (контактні вікна в оксиді кремнію, ширина затворів в транзисторах і т.д.) і, як наслідок, розміри транзисторів (та ін. елементів) на кристалі. Цей параметр, проте, знаходиться у взаємозалежності з рядом інших виробничих можливостей: чистою отриманого напівпровідника (кремнію), характеристиками інжекторів, методами літографії, методами витравлення та напилення.

Так, в 1970-х рр. мінімальний контрольований розмір становив 2-8 мкм, а в 1980-х рр. був зменшений до 0,5-2 мкм. Деякі експериментальні зразки устаткування фотолітографії рентгенівського діапазону забезпечували мінімальний розмір 0,18 мкм. На початку 1990-х рр. процесори (наприклад, ранні Pentium і Pentium Pro) виготовляли за технологією 0,5-0,6 мкм (500-600 нм), потім технологія дійшла до 250-350 нм. Наступні процесори (Pentium II, K6-2+, Athlon) вже робили за технологією 180 нм. У 2002-2004 рр. були освоєні технологічні процеси 90 нм (Winchester AMD 64, Prescott Pentium 4). В середньому, впровадження лідерами індустрії нових технологічних процесів відбувалося кожні 2 роки, при цьому забезпечувалося подвоєння кількості транзисторів на одиницю площі: УФ-технології в 45 і 40 нм (2007 р., процесор Core 2 Duo, відеопроцесори і флеш-пам'ять фірми Samsung), 32 нм (2009 р.), 22 нм (2011 р.), виробництво за 14-нм технологією розпочато в 2014 р., освоєння 7-нм процесів відбулося в 2018-20 рр.

Основні технологічні операції в планарній технології базуються на процесі **літографії**, різновидами якої є: 1) **оптична фотолітографія** з випромінюванням довжиною хвилі $\lambda=310-450$ нм; 2) **ультрафіолетова фотолітографія** на ексимерних (газових) лазерах з $\lambda=157, 193, 248$ нм; 3) **фотолітографія в глибокому ультрафіолеті** (Extreme ultraviolet lithography, EUVL) з $\lambda=10-100$ нм (вже для наноелектроніки); 4) **рентгенівська фотолітографія** з $\lambda=0,1-10$ нм; 5) **електронна літографія**; 6) **іонна літографія**; 7) **нанодруківана літографія** – технологія, що призначена для перенесення зображення на підкладку з полімерним покриттям, яка включає деформацію резисту прес-формою (штампом) з наступним травленням деформованого покриття та формуванням на підкладці наноструктури або елементів електронної схеми розміром менше 10 нм на досить великих площах, що недоступно для всіх інших методів літографії (Рис. 1.17, 1.18).

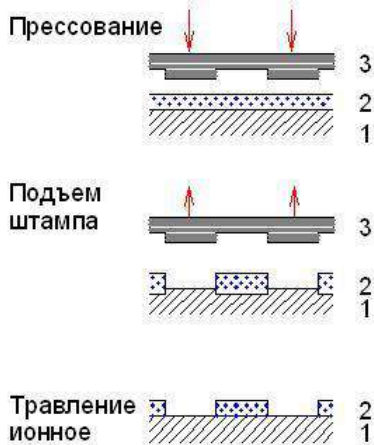


Рис. 1.17. Схема нанодруківаної літографії (за залишки резисту на вдавнених ділянках анізотропно витравлюються): 1) підкладка, 2) резист, 3) штамп

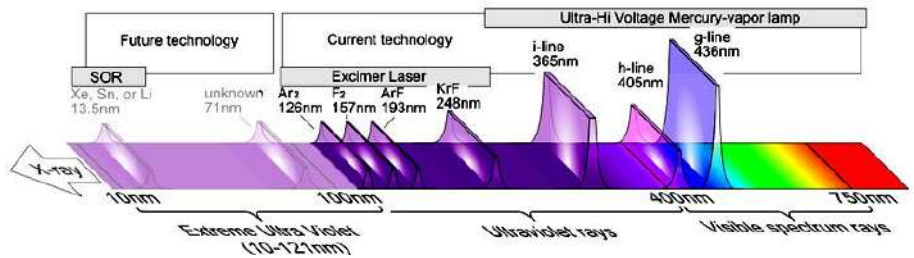


Рис. 1.18. Довжини хвиль експонування в літографії

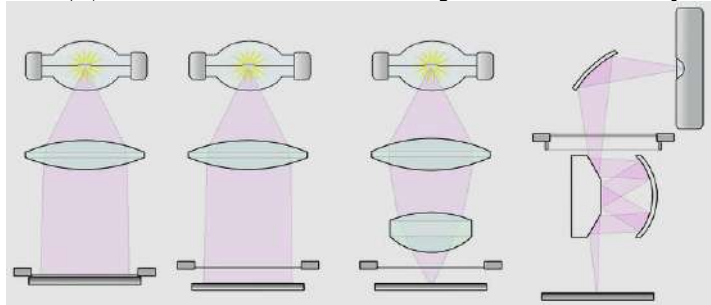


Рис. 1.19. Схеми видів експонування в літографії: контактний метод, експонування з мікрозазором і проекційний метод експонування

При виготовленні мікросхем використовується **метод фотолітографії** (скануючої та проекційної, контактної та безконтактної, на мікропроміжку). **Фотолітографія** – процес вибіркового травлення поверхневого шару з використанням захисної фотомаски. Це дає змогу отримати відповідний "малюнок" на поверхні НП.

Принципова відмінність фотолітографії від інших видів літографії полягає в тому, що експонування (Рис. 1.19) проводиться світлом (видимим або ультрафіолетовим), тоді як в ін. видах літографії для цього використовується рентгенівське випромінювання (**рентгенівська літографія**), потік електронів (**електронно-променева літографія**) або іонів (**іонно-променева літографія**) та ін. **Найменші розміри деталей малюнка, досяжні в фотолітографії (роздільна здатність)**, визначаються: довжиною хвилі використовуваного випромінювання (мінімальний розмір деталей малюнку відповідає половині довжини хвилі й обмежується дифракцією світла), якістю застосовуваної при експонуванні оптики, властивостями фоторезисту та досягають 5 нм. Застосування спеціальних методів (**імерсійної літографії**) теоретично дозволяє отримати роздільну здатність до 11 нм.

Основні етапи процесу фотолітографії на кремнієвій підкладці (Рис. 1.20):

1. На товсту пластину НП наносять тонкий шар матеріалу (окис кремнію), з якого треба сформувати малюнок. На цей шар наноситься **фоторезист** (полімерний світлочутливий матеріал, який при освітленні змінює свої фізико-хімічні властивості – розчинність). Розрізняють **позитивні фоторезисти**, для яких розчиняється освітлена область, і **негативні фоторезисти**, для яких розчиняється неосвітлена область. Вони чутливі до видимого та УФ-випромінювання.
2. Проводиться **експонування** (опромінювання) через **фотошаблон** (скляну або ін. пластину, чи полімерну плівку зі сформованим на її поверхні малюнком елементів схем з матеріалу, що не пропускає актинічного випромінювання, рис. 1.21) контактним чи проекційним методом. На фоторезисті утворюється відповідне до фотошаблону розташування "вікон" для доступу травників.
3. Освітлені ділянки фоторезисту змінюють свою розчинність і їх можна видалити (позитивний процес) хімічним способом (травленням). Звільнені від фоторезисту ділянки також видаляються.
4. Заключна стадія – видалення залишків фоторезисту.

За джерелом випромінювання літографії поділяють на такі, що використовують: ртутну лампу (близько 400 нм); лазер KrF (248 нм), лазер ArF (193 нм), лазер F₂ (157 нм); EUV літографія (близько 13 нм; промислове обладнання компанії ASML); рентгенівська літографія (менше 1 нм; тільки експериментальні зразки).

При **імерсійній літографії** з 2006 р. (Рис. 1.22) простір між останньою лінзою та експонованою пластиною заповнюється не повітрям, а рідиною (високоочищеною водою). Через більший показник заломлення рідини (1 для повітря і 1,33 (1,44) для води) покращується роздільна здатність на 30-40 %. Intel використовує імерсійну літографію, починаючи з техпроцесу 32-нм, а AMD – вже з 45-нм.

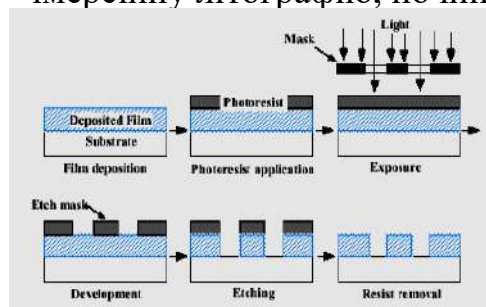


Рис. 1.20. Основні етапи процесу фотолітографії



Рис. 1.21. Застосування фотошаблону

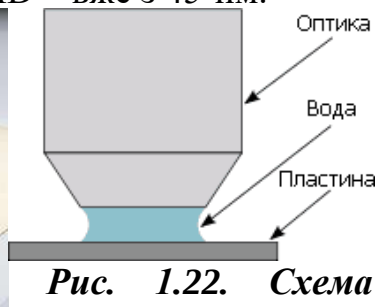


Рис. 1.22. Схема імерсійної фотолітографії

Лекція № 2

Тема: "Фізичні основи електропровідності металів і напівпровідників"

ПЛАН

- 2.1. Класичні уявлення про носії зарядів та електропровідність речовин.
- 2.2. Кристалічні та аморфні структури твердих тіл.
- 2.3. Основи квантової механіки та зонної теорії твердого тіла.
- 2.4. Власна і домішкова провідність, фотопровідність напівпровідників.

2.1. Класичні уявлення про носії зарядів та електропровідність речовин

Електричний заряд – це фізична величина, яка характеризує здатність тіл створювати **електромагнітні поля** та брати участь в **електромагнітній взаємодії** (рис. 2.1). Електричний заряд позначають латинськими літерами q або великою буквою Q . Одиницею вимірювання електричного заряду в **Міжнародній системі одиниць (SI)** є **Кулон (Кл, C)**. Один кулон дорівнює кількості електричного заряду, який проходить через поперечний переріз провідника при силі струму один ампер за одну секунду: $1 \text{ Кл} = 1 \text{ А} \cdot \text{с}$. Спрямований рух електричних зарядів в провіднику створює в ньому електричний струм, а навколо нього – магнітне поле (рис. 2.2).

Кожен **електричний заряд** має **дискретний характер** і визначається певною **сукупністю елементарних електричних зарядів** – **електричний заряд Q завжди кратний елементарному електричному заряду q_0** : $Q = n \cdot q_0$.

Елементарний електричний заряд (позначається q_0 або e) – це фундаментальна фізична константа, яка чисельно **дорівнює абсолютному значенню заряду електрону**. Згідно останніх змін визначень основних одиниць в системі SI, які набули чинності у 2019 році, **величина елементарного електричного заряду e** точно дорівнює $1,602176634 \times 10^{-19} \text{ А} \cdot \text{с}$ (Кл).

Сама **Міжнародна система одиниць** тепер ґрунтується на **семи основних одиницях вимірювання**: **секунда (с)**, **метр (м)**, **кілограм (кг)**, **Ампер (А)**, **Кельвін (К)**, **моль**, **Кандела (кд)**; через які може бути виражена будь-яка **одиниця SI**, в тому числі такі **похідні одиниці**, як:

- **швидкість світла у вакуумі c** тепер точно дорівнює 299792458 м/с ;
- **стала Планка h** точно дорівнює $6,62607015 \times 10^{-34} \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ (Дж·с);

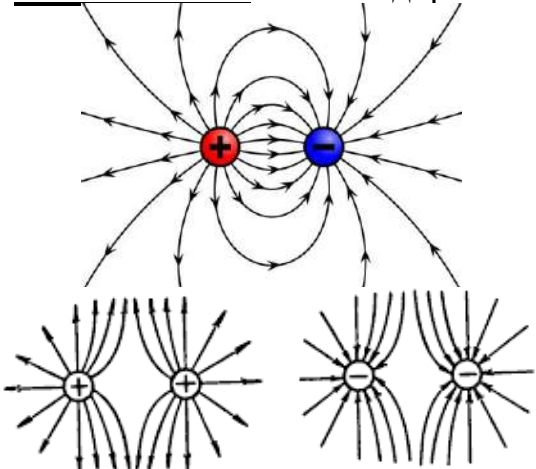


Рис. 2.1. Зображення електричного поля взаємодіючих різноіменних та однойменних зарядів

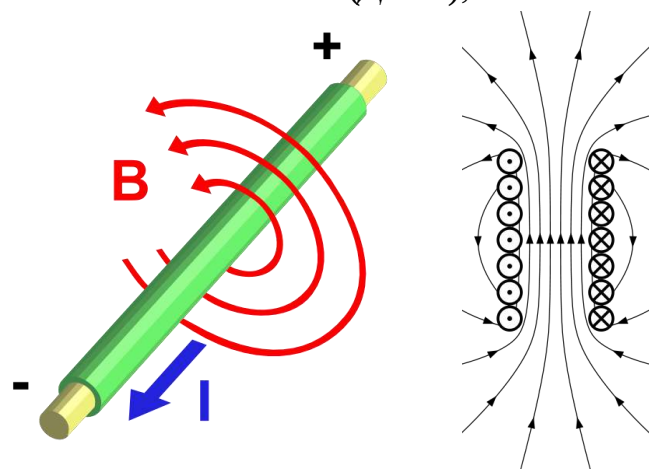


Рис. 2.2. Електричний струм (I), проходячи через провідник, створює навколо нього магнітне поле (B)

- стала Больцмана k_B точно дорівнює $1,380649 \times 10^{-23}$ Дж/К;
- стала Авогадро N_A точно дорівнює $6,02214076 \times 10^{23}$ моль⁻¹, де моль – одиниця кількості речовини (стала Авогадро визначає кількість в одному молі специфічних однотипних структурних формульних одиниць-елементів, з котрих складається речовина (атомів, молекул, іонів, електронів, протонів, нейтронів або інших реальних частинок).

Електрон (e^-) – це стабільна (час життя понад 10^{28} років), негативно заряджена елементарна частинка, що входить до складу всіх атомів (рис. 2.3). Електрон належить до родини лептонів (рис. 2.4), має елементарний електричний заряд $-e = -1,602176634 \times 10^{-19}$ Кл, спін $\hbar/2 = \hbar/4\pi$ та масу спокою $m_e = 9,109554(906) \times 10^{-31}$ кг. Електрон є лептоном першого покоління, що бере участь в електромагнітній, слабкій та гравітаційній взаємодіях.

Протон (p^+) є стабільною (час життя $>10^{31}$ років) позитивно зарядженою елементарною частинкою атомного ядра будь-якого хімічного елемента. Це "збірна" елементарна частинка (баріон) зі спіном $\hbar/2$, що складається з двох верхніх u-кварків і одного нижнього d-кварка, які обмінюються глюонами (рис. 2.5, а), та має заряд $+e = +1,602176634 \times 10^{-19}$ Кл і масу спокою $m_p = 1,672621924 \times 10^{-27}$ кг. Його ізотопічний спін теж дорівнює $1/2$, оскільки протон складає ізотопічний дублет з другим головним компонентом атомного ядра – нейтроном (n^0 , $q=0$, спін $\hbar/2$, ізотопічний спін $-1/2$, $m_n = 1,674927498 \times 10^{-27}$ кг, $n = p^+ + e^- + \nu_e$) (рис. 1.5, б). Протони беруть участь у всіх типах взаємодії: сильній, електромагнітній, слабкій та гравітаційній. Кварки мають дробовий електричний заряд – $1/3$ або $2/3$ елементарного.

Кількість електронів у електрично нейтральному атомі будь якого хімічного елемента дорівнює кількості протонів в ядрі цього атома. Кількість електронів в

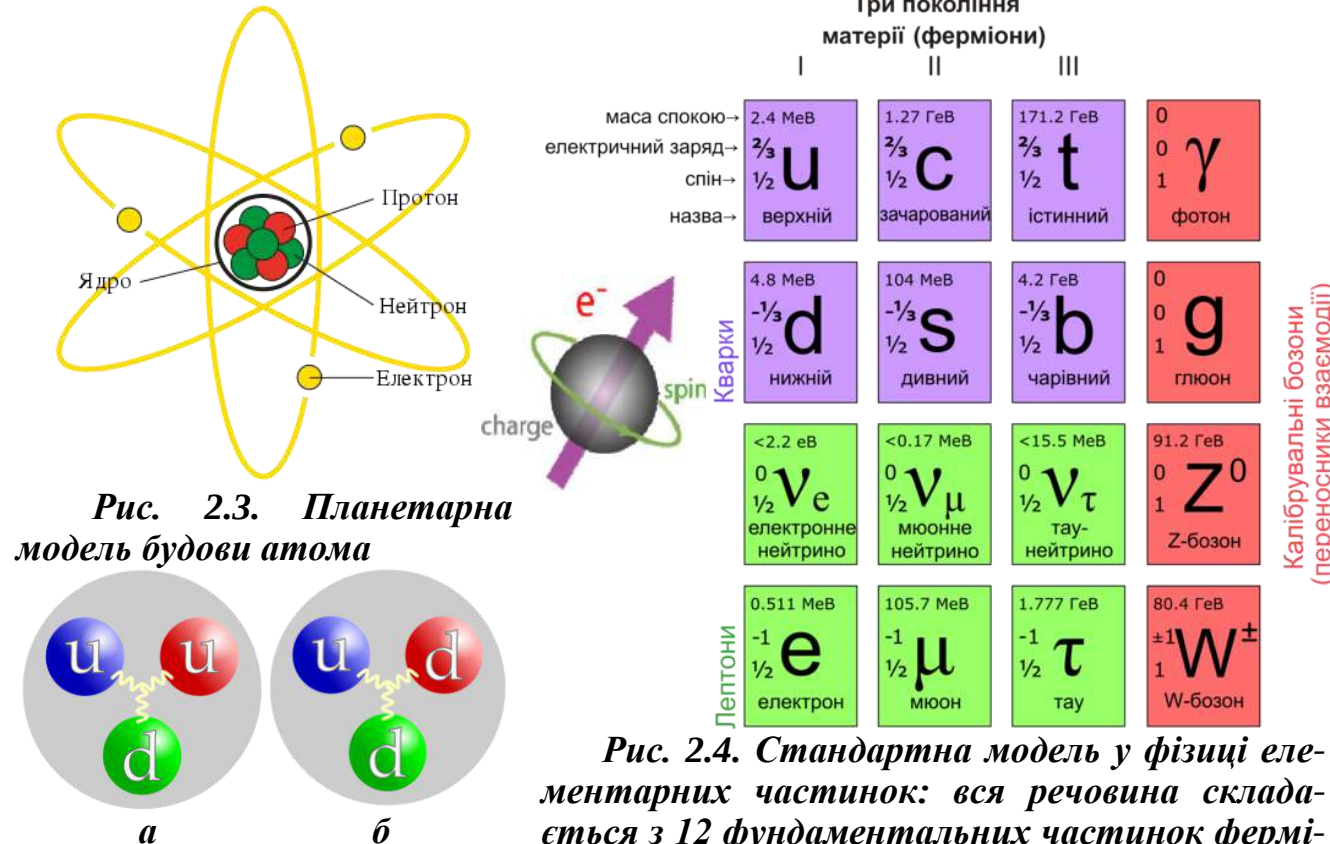


Рис. 2.4. Стандартна модель у фізиці елементарних частинок: вся речовина складається з 12 фундаментальних частинок ферміонів – 6 лептонів (електрон, мюон, тау-лептон, і три сорти нейтрино) та 6 кварків (u, d, s, c, b, t), переносниками взаємодії між якими є бозони (8 глюонів, 3 важкі калібрувальні бозони (W^+ , W^- , Z^0) та фотон)

Рис. 2.5 Будова нуклонів: а – протона (2 u-кварки, 1 d-кварк і глюони); б – нейтрона (1 u-кварк, 2 d-кварки і глюони)

атомах різних речовин є неоднаковою. Наприклад, в атомі *Гідрогену* (*H*), найлегшого і найпростішого елемента за будовою, навколо ядра з одного протона "обертається" тільки один електрон, а в атомі *Купруму* (*Cu*) – 29 електронів (рис. 2.6). При цьому, порядковий номер хімічного елементу в Періодичній системі хімічних елементів Д.І. Менделєєва (рис. 2.7) також чисельно дорівнює кількості протонів в його ядрі, й відповідно кількості електронів на "орбітах" навколо його ядра. Так, *Ферум* (*Fe*) в періодичній системі має порядковий номер 26, а значить його ядро складається з 26 протонів (і 56-26=30 нейтронів), а на орбітах перебуває 26 електронів.

Отже, оскільки додатний заряд ядра Q_j в електрично нейтральному атомі хімічного елементу визначається як сума додатних зарядів $+e$ всіх протонів N в цьому ядрі $Q_j = +e \cdot N$, то сумарний від'ємний заряд електронів Q_e в цьому атомі буде $Q_e = -e \cdot N$. Якщо атом втрачає один або кілька електронів, то позитивна енергія ядра переважає і атом перетворюється на позитивний іон. Якщо атом приймає один або кілька надлишкових електронів, він перетворюється на негативний іон. Процес перетворення атомів на іони називають іонізацією (рис. 2.8).

В металах атоми перебувають досить близько один до одного. Через це, електрони з зовнішніх орбіт, що досить слабо пов'язані зі своїм ядром, потрапляючи під дію тяжіння сусідніх ядер, "колективізуються" й рухаються хаотично в об'ємі всього металу (рис. 2.9). Такі електрони ще називаються вільними електронами, а їх сукупність в цьому об'ємі – електронним газом.

Атоми низки речовин міцно утримують електрони близько до ядра і не дають їм вільно виходити з атомів. Такі речовини погано проводять електрику, їх називають діелектриками.

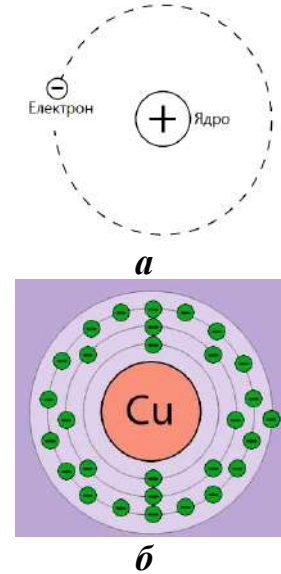


Рис. 2.6. Схе-
ма будови ато-
ма: а – гідрогену;
б – купруму

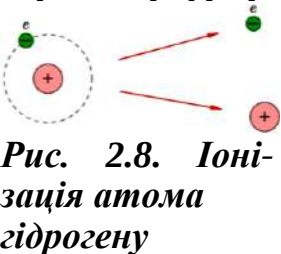


Рис. 2.8. Іоні-
зація атома
гідрогену

Г р у п а																	
Період	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV	XV	XVI	XVII
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
3	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
4	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
6	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
7	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
8	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
9	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
11	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
13	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
14	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
15	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
16	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
17	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
18	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
19	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
20	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
21	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
22	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
23	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
24	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
25	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
26	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
27	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
28	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
29	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
31	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
32	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
33	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
34	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
35	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
36	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
37	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
38	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
39	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
40	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
41	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
42	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
43	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
44	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
45	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
46	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
47	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
48	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
49	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
50	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
51	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
52	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
53	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
54	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
55	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
56	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
57	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
58	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
59	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
60	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
61	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
62	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
63	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
64	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
65	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
66	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
67	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
68	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
69	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
70	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
71	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
72	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
73	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
74	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
75	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
76	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
77	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
78	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
79	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
80	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
81	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
82	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
83	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
84	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
85	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
86	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
87	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
88	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
89	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
90	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17</

У звичайному стані вільні електрони перебувають у безладному русі. Якщо під дією різних причин змусити вільні електрони переміщатися в одному напрямку, то такий упорядкований (спрямований) рух вільних електронів у металевих провідниках є електричним струмом провідності (рис. 2.10). Тому, вільні електрони є вільними носіями електричного заряду в металевих провідниках (провідниках першого роду). У провідниках другого роду – електролітах (водні розчини солей, кислот) – електричний струм пов'язаний із рухом позитивних і негативних іонів, що впорядковано переміщуються під дією прикладеного поля.

Якщо зовнішнього електричного поля немає, то вільні електричні заряди в металевому провіднику перебувають у тепловому безладному русі зі швидкістю $\sim 10^5$ м/с (при 20 °С), в результаті чого кількість електрики, що проходить через будь-який переріз провідника, у середньому дорівнює нулю (рис. 2.10, а).

Якщо в замкнутому електричному колі (рис. 2.10, в) до металевого провідника з площею поперечного перерізу S та довжиною l прикладене зовнішнє електричне поле з напруженістю E (різниця потенціалів або напруга $U=E \cdot l$) від джерела струму, то, внаслідок упорядкованого руху вільних носіїв заряду (електронів), кількість електрики, що проходить через будь-який переріз провідника, у середньому вже не дорівнює нулю (рис. 2.10, б). При цьому, під дією електричного поля вільні електрони провідника здійснюють прискорений рух у напрямку, протилежному вектору E . Рух електронів відбувається доти, доки вони не зіткнуться з іонами кристалічної решітки провідника. При цьому швидкість електронів падає до нуля, після чого процес прискорення електронів повторюється знову. Оскільки рух електронів рівноприскорений, то їхня середня швидкість становить: $V_{\text{ср}} = V_{\text{max}} / 2$, де V_{max} – максимальна швидкість електронів перед зіткненням з іонами.

Для кількісної оцінки електричного струму введено поняття сила струму I , що дорівнює кількості електрики, яка проходить через поперечний переріз провідника за одиницю часу:

$$I = \Delta q / \Delta t. \quad (2.1)$$

Одиницею сили струму є Ампер (А). Сила струму дорівнює 1 А, якщо через поперечний переріз провідника за 1 с проходить електричний заряд в 1 Кл:

$$[I] = 1 \text{ Кл} / 1 \text{ с} = 1 \text{ А}. \quad (2.2)$$

Постійним струмом називають струм, що незмінний у часі за значенням і напрямком:

$$I = q / t. \quad (2.3)$$

Струм визначається як упорядкованою швидкістю носіїв заряду, так і їхньою щільністю. Позитивним вважають напрямок струму, у якому переміщуються позитивні заряди, – протилежний руху електронів в провіднику (рис. 2.10, в).

Густина струму J визначається як величина заряду, що протікає через одиничну площу поперечного перерізу провідника за одиницю часу. В однорідному провіднику струм рівномірно розподіляється перерізом, тому: $J = I / S$. (2.4)

Одиницею густини струму є А/м².

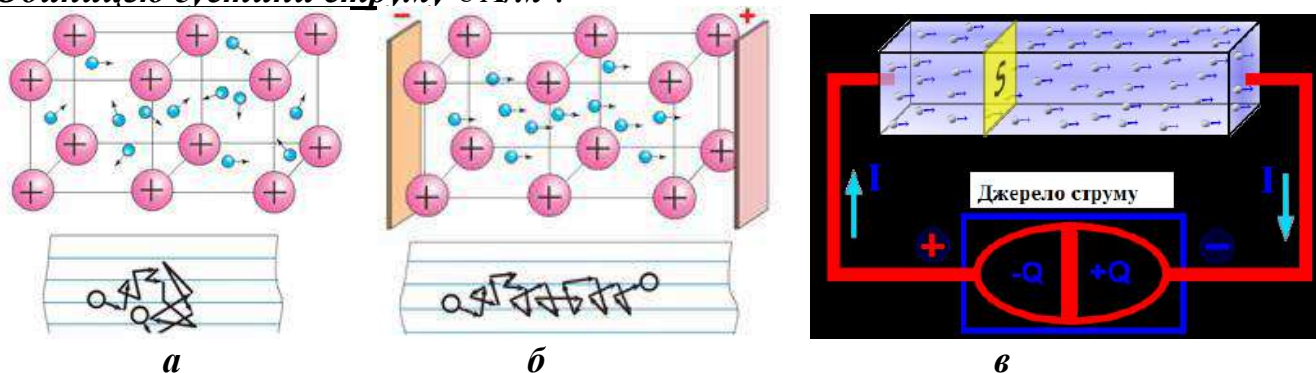


Рис. 2.10. Безладний (а) та упорядкований (б) рух вільних електронів у металевих провідниках; в – замкнуте електричне коло

Основними законами постійного струму є:

1. Закон Ома для ділянки кола (рис. 2.11): **сила струму I** в провіднику (на ділянці кола) прямо пропорційна прикладеній до нього **напрузі U** : $I=U/R$, (2.5) де R ($[R] = 1 \text{ Ом}$) – **електричний опір провідника**, що залежить від його матеріалу (**питомого опору ρ , Ом·м (Ом·см)** – величина, що чисельно дорівнює опору куба зробленого з даного матеріалу з ребром 1 метр), **площі поперечного перерізу S** та **довжини l** – $R=(\rho \cdot l)/S$. Це властивість провідника створювати перешкоди проходженню електричного струму, та величина, яка характеризує спроможність провідника перетворювати електричну енергію на теплову. Його **причиною є розсіяння електронів на окремих атомах та неоднорідностях** (динамічних (фононах, викликаних тепловим коливанням атомів) та статичних (точкових і протяжних) дефектах кристалічної ґратки) **речовини провідника**, по якому тече струм.

2. Закон Ома для повного кола: **сила струму I** в повному електричному колі дорівнює відношенню **електрорушійної сили (ЕРС) джерела струму $\mathcal{E}$** до **повного опору кола $R+r$** (рис. 2.12): $I=\mathcal{E}/(R+r)$, (2.6)

де r – внутрішній опір джерела струму, R – зовнішній опір кола (результуючий опір навантажень і провідників, що їх з'єднують). **Джерело струму (живлення)** – це елемент електричного кола, в якому зосереджена його **ЕРС**, – у якому діють сторонні сили, що розділяють заряди. **ЕРС джерела струму ($[\mathcal{E}] = 1 \text{ В}$)** – скалярна фізична величина, яка характеризує енергетичні властивості джерела струму і дорівнює відношенню **роботи сторонніх сил $A_{ст}$** із переміщення **позитивного заряду q** всередині джерела до значення цього заряду – $\mathcal{E}=A_{ст}/q$ (рис. 2.13). До джерел живлення належать гальванічні елементи, електрохімічні батареї, акумулятори, термопари, сонячні батареї, електричні генератори тощо. Розрізняють **первинні джерела живлення**, які безпосередньо перетворюють інші види енергії в електричну і **вторинні джерела живлення**, які виконують роль проміжних перетворювачів електричної енергії, такі як блоки живлення електронних приладів, трансформатори тощо.

3. Закон Джоуля-Ленца: кількість теплоти $Q_{мен}$, що виділяється в провіднику зі струмом, прямо пропорційна силі струму I , напрузі U й часу t проходження струму через провідник – $A=Q_{мен}=I \cdot U \cdot t$, – частина енергії рухомих вільних носіїв заряду передається коливанням атомів провідника і переходить у його тепло.

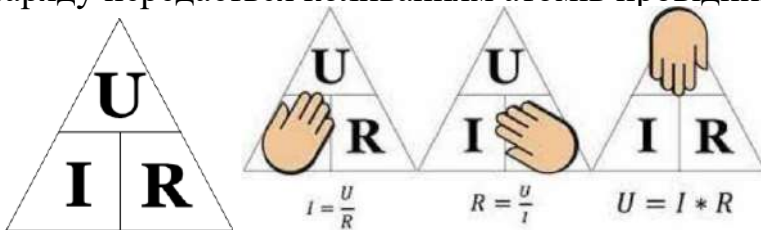


Рис. 2.11. Діаграма, що допомагає запам'ятати закон Ома для ділянки кола. Потрібно закрити шукану величину, і два інших символи дадуть формулу для її обчислення

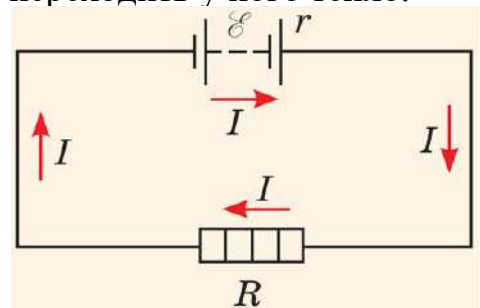


Рис. 2.12. Замкнуте (повне) електричне коло

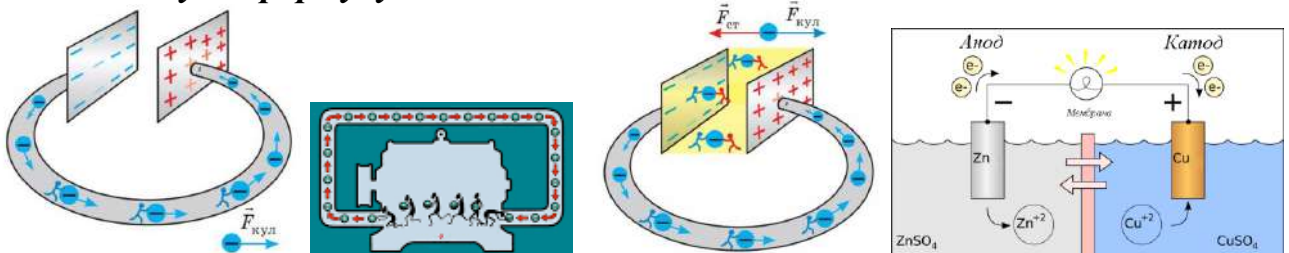


Рис. 2.13. Робота сторонніх сил в джерелі струму

Величиною, оберненою електричному опору є електропровідність G – здатність речовини проводити електричний струм: $G=1/R$. (2.7)

Розмірністю й одиноцею електропровідності є Сименс (См, який еквівалентний $Ом^{-1}$). Використовують також питому електропровідність γ (можуть ще позначати буквою σ), яка обернено пропорційна питомому опору ρ : $\gamma=1/\rho$. (2.8)

Питома електропровідність в системі SI вимірюється в сименсах на метр (См/м).

В залежності від величини питомого опору при кімнатній температурі (20 °С або 293 К) (див. табл. 2.1), всі матеріали, що використовуються в твердотільних електронних компонентах сучасної комп'ютерної електроніки та ЕОМ, поділяються на такі основні групи:

- 1) ізолятори або діелектрики – $\rho \sim 10^8\text{-}10^{17} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ($\gamma \sim 10^{-17}\text{-}10^{-8} \text{ См/м}$) – це речовини, що не проводять електричний струм, оскільки у них заряди не можуть вільно пересуватися з однієї частини об'єму матеріалу в іншу (зв'язані заряди);
- 2) напівпровідники – $\rho \sim 10^{-5}\text{-}10^8 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ($\gamma \sim 10^{-8}\text{-}10^5 \text{ См/м}$) – це речовини, що мають сильну залежність питомої електропровідності (концентрації вільних носіїв заряду) як від внутрішніх факторів – температури, концентрації домішок та інших дефектів кристалічної решітки, так і від зовнішніх впливів – дії світла, електричного чи магнітного поля, іонізуючого випромінювання тощо;
- 3) провідники – $\rho \sim 10^{-8}\text{-}10^{-5} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ($\gamma \sim 10^5\text{-}10^8 \text{ См/м}$) – це речовини, що добре проводять електричний струм, оскільки мають велику концентрацію вільних носіїв заряду, що можуть вільно переміщуватись в середині їх об'єму. До них відносяться практично всі метали, деякі напівметали, окремі алотропні форми карбону, велика кількість сплавів, та електроліти;
- 4) надпровідники – $\rho \sim 0 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ – це речовини, у яких опір різко падає до нуля, коли матеріал охолоджується нижче його критичної температури. Вони можуть нескінченно довго підтримувати струм в петлі проводу після зникнення поля E .

Таблиця 2.1.
Питомий опір деяких речовин при 20 °С

Матеріал	Питомий опір (Ом·м)
срібло	$1,59 \times 10^{-8}$
мідь	$1,75 \times 10^{-8}$
золото	$2,44 \times 10^{-8}$
алюміній	$2,82 \times 10^{-8}$
залізо	$9,8 \times 10^{-8}$
платина	11×10^{-8}
олово	$11,5 \times 10^{-8}$
графіт	$3,5 \times 10^{-5}$
германій	0,46
кремній	близько 10^3
скло	$10^{10} \text{ — } 10^{14}$
гума	близько 10^{13}
сірка	близько 10^{15}

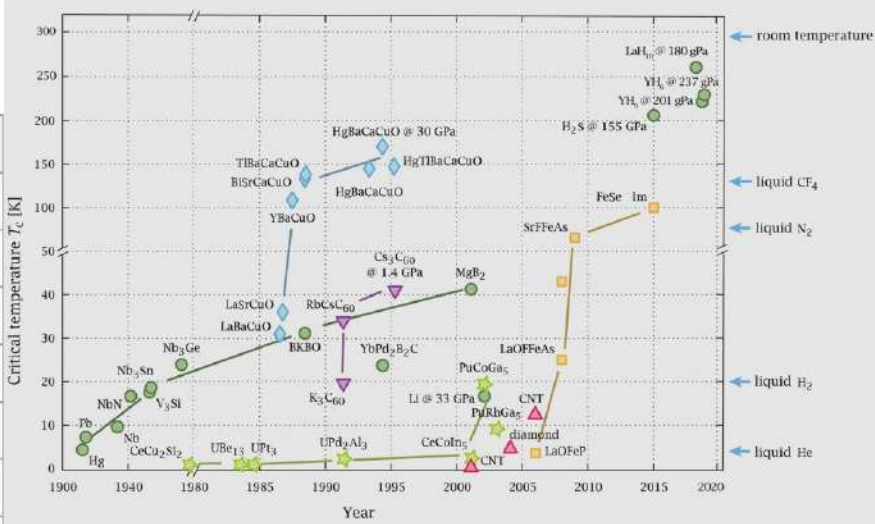


Рис. 2.14. Дослідження надпровідності за роками

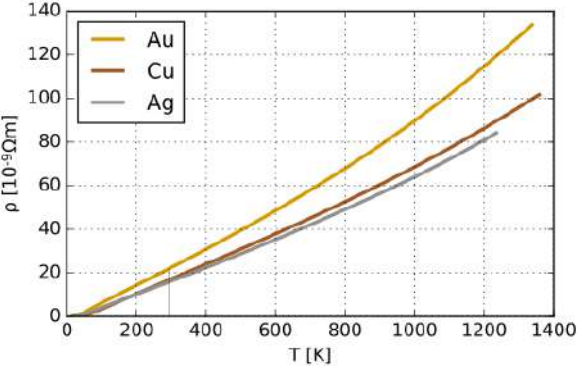


Рис. 2.15. Температурна залежність опору Au, Cu і Ag

Електричний опір більшості матеріалів залежить від їх температури. Питомий опір провідників зростає зі збільшенням температури (рис. 2.15). Це явище зумовлене посиленням хаотичного руху атомів, а отже збільшенням частоти розсіювання вільних носіїв заряду (електронів). При високих температурах питомий опір ρ металу збільшується лінійно з температурою. Якщо температура провідника T не змінюється занадто сильно, зазвичай використовується лінійне наближення:

$$\rho(T)=\rho_0\cdot[1+ \alpha\cdot(T-T_0)] , \tag{2.9}$$

де $\rho(T)$ – питомий електричний опір при температурі T ; ρ_0 – питомий опір при початковій температурі T_0 ; α ($[K^{-1}]$) – температурний коефіцієнт електричного опору, – емпіричний параметр, встановлений для даної еталонної температури T_0 на основі даних вимірювань (див. табл. 2.2); еталонна температура T_0 є фіксованою базовою температурою (зазвичай кімнатною температурою). В електроніці використовуються, зокрема, резистори із спеціальних металевих сплавів з низьким значенням α , як манганінових чи константанових сплавів та напівпровідникових компонентів з великими додатними чи від’ємними значеннями α (термістори).

При зниженні температури електричний опір металевого провідника поступово зменшується. У звичайних провідниках, таких як мідь або срібло, це зниження обмежене домішками та іншими дефектами. Навіть біля абсолютного нуля (0 К або -273,15 °С) реальний зразок нормального провідника виявляє деякий опір.

Температурна залежність питомого опору провідників при низьких температурах визначається Правилom Матієсена: $\rho(T)=\rho_0+a\cdot T^2+b\cdot T^5$, (2.10)

де параметри ρ_0 , a і b є характеристиками конкретного металу. Параметр ρ_0 називається залишковим опором. Його величина визначається чистотою металу, оскільки він зумовлений розсіянням електронів на нейтральних домішках. Квадратичний член зумовлений електрон-електронним розсіянням. Член, пропорційний п'ятому степеню температури, зумовлений розсіянням на теплових коливаннях решітки (фононах). При дуже низьких температурах опір металів малий. У випадку ідеального металу він повинен був би прямувати до нуля, проте завдяки домішкам певний опір залишається. При збільшенні температури опір зростає спочатку завдяки електрон-електронному розсіянню. При ще вищих температурах домінантним каналом розсіяння стає розсіяння на коливаннях кристалічної ґратки.

Для напівпровідників питомий опір здебільшого зменшується при підвищенні температури, через зростання концентрації носіїв заряду. У власних напівпровідників (не легованих домішками) питомий електричний опір $\rho_{\text{нп}}$ спадає з підвищенням температури за експоненціальним законом: $\rho_{\text{нп}}=\rho_0\cdot\exp(-\beta T)$. (2.11)

Отже, два чинники обумовлюють величину електропровідності речовини: концентрація наявних носіїв заряду і легкість, з якою вони рухаються кристалом під дією прикладеного електричного поля (рухливість носіїв заряду – u або μ). Величина рухливості, як правило, убуває з ростом температури, особливо при високих температурах. У напівпровіднику кількість носіїв швидко збільшується зі зростанням температури, особливо в діапазоні високих температур, призводячи до швидкого падіння опору. Тому метал – це провідник з практично постійною кількістю вільних носіїв заряду, а чистий напівпровідник – провідник, в якому кількість вільних носіїв заряду швидко збільшується з ростом температури (рис. 2.16).

Таблица 2.2.

Значення α для окремих металів і сплавів

Матеріал	Залізо	Вольфрам	Алюміній	Мідь	Срібло	Платина	Манганін	Константан
α $[K^{-1}]$	$6,5\cdot 10^{-3}$	$4,5\cdot 10^{-3}$	$4,4\cdot 10^{-3}$	$4,3\cdot 10^{-3}$	$4,1\cdot 10^{-3}$	$3,9\cdot 10^{-3}$	$3\cdot 10^{-5}$	$2\cdot 10^{-5}$

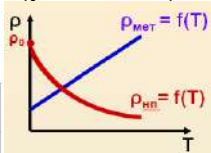


Рис. 2.16

2.2. Кристалічні та аморфні структури твердих тіл

Речовини у природі можуть перебувати у чотирьох агрегатних станах: твердому, рідкому, газоподібному та плазменому. На відміну від рідких та газоподібних тіл, тверді тіла володіють пружністю форми – при зміні форми під дією зовнішньої сили в твердих тілах виникають внутрішні пружні сили, які намагаються повернути їх до початкової форми. Оскільки, за сталої температури тверді тіла володіють здатністю зберігати свою форму та розміри, то вони надзвичайно широко застосовуються в комп'ютерній електроніці. Тверді тіла, що трапляються в природі, є або кристалічними, або аморфними.

Сукупність атомів твердого тіла, яка утворює структуру з далеким порядком у розташуванні атомів, без дефектів і необмежену у просторі, називають ідеальною кристалічною решіткою (граткою).

Реальну структуру з далеким порядком, обмежену у просторі і, до певної міри, дефектну називають монокристалом або просто кристалом (рис. 2.17, а).

Сукупність атомів твердого тіла, яка утворює випадкову сітку атомів (довжина та просторова орієнтація валентних зв'язків – випадкові величини) з частково насиченими валентними зв'язками називають аморфною структурою (рис. 2.17, б). Умовна межа між кристалічною і аморфною структурами: якщо впорядковане розташування атомів спостерігається на протязі 8-10 міжатомних відстаней і більше, така структура має властивості кристалу, якщо менше – це структура з ближнім порядком і властивостями аморфної речовини.

Залежно від швидкості охолодження деякі речовини із рідкого стану можуть переходити як в аморфний, так й у кристалічний стани. Проте, в поведінці твердих тіл під впливом зовнішніх дій спостерігаються суттєві відмінності. Наприклад, аморфні тіла, на відміну від кристалічних, не володіють певною температурою плавлення; стосовно будь-яких зовнішніх дій вони повністю ізотропні, тобто досліджувані властивості не залежать від напрямку прикладеної дії.

Кристали ж по-різному проводять теплоту та електричний струм у різних напрямках. Від напрямку в кристалах залежать також механічні, оптичні та ін. властивості. Залежність фізичних властивостей від напрямку всередині кристалу називається анізотропією. Отже, всі кристалічні тіла – анізотропні.

Правильна геометрична форма є істотною зовнішньою ознакою будь-якого кристалічного тіла в природних умовах. Кристалом називається тверде тіло, обмежене в силу своїх внутрішніх властивостей плоскими поверхневими гранями (у вигляді правильних багатокутників). Зовнішня симетрія кристалів обумовлена внутрішньою, мікроскопічною симетрією розташування атомів.

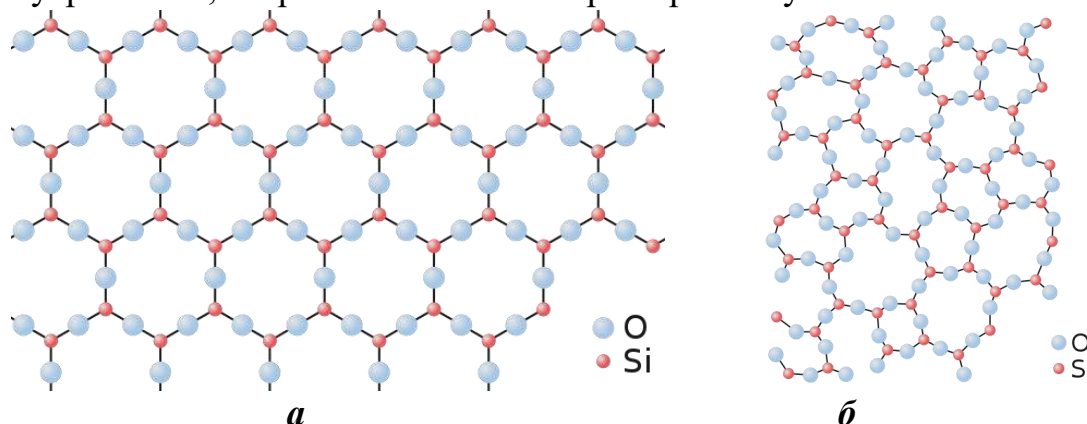


Рис. 2.17. Розташування атомів у кристалічному кварці (а) та аморфному склі (б), що складаються з одних і тих же атомів Оксигену (O) та Силіцію (Si)

Причиною геометрично правильної зовнішньої форми кристала є його геометрично правильна внутрішня будова – просторова решітка (ґратка). Просторова решітка – це абстракція, – наявність кристалічної решітки слід розуміти таким чином, що у просторі, який займає кристал, спостерігається правильне, закономірне чергування атомів або іонів і, якщо їх з'єднати уявними прямими, то отримаємо просторову решітку, у вузлах якої розташовуються атоми або іони.

Загальна властивість, яка однозначно показує, як просторова решітка визначає макроскопічну форму кристала, називається – симетрією. Симетрія визначає закони розташування структурних елементів в просторових решітках, взаємне розташування граней макроскопічного кристалу, встановлює, якими фізичними властивостями може володіти кристал і якими просторовими напрямками в ньому ці властивості виявляються. Властивість симетрії є проявом загальних фундаментальних законів природи. Взагалі під симетрією слід розуміти здатність фігури закономірно повторювати в собі свої частини.

Структурна симетрія твердих тіл має визначальне значення для їх електрофізичних властивостей. Точкова симетрія (наявність чи відсутність центра симетрії, порядок осей симетрії, дзеркальні площини і т.п.) має визначальне значення для ряду властивостей діелектриків. Для металів та напівпровідників найважливішою є трансляційна симетрія – необмежено повторюване паралельне перенесення елементарної комірки (базису ґратки) у певному напрямку та на певну відстань, яка називається періодом трансляції. Отже, в кристалах їх структура (просторове розташування структурних елементів – атомів, молекул чи йонів) повністю повторюється через певну відстань, яка ще називається періодом решітки а.

Термін "моноатомна решітка" використовується для опису ґраток, що виникають у тому випадку, коли для їх заповнення потрібний базис, що містить єдиний тип атомів. Найбільш типовим видом структури ґратки для кристалів елементарних напівпровідників (*Si, Ge, C*) є структура алмазу (рис. 2.18, б). У разі бінарних напівпровідників, таких як *GaAs*, найбільш типовою є структура цинкової обманки (рис. 2.18, в).

В цілому, Кристалічна решітка об'ємного твердого тіла складається з великої кількості однакових елементарних комірок, утворених структурними елементами. За Браве існує 14 типів просторових елементарних комірок, які характеризуються симетрією семи різних класів або сингоній (рис. 2.19):

1. Триклинна – відзначається трьома нерівними осями й трьома нерівними кутами (рис. 2.19, а).

2. Моноклинна – характеризується трьома нерівними осями, одна з яких перпендикулярна до двох інших (рис. 2.19, б) та може мати одну пару площин із атомом у центрі (рис. 2.19, в).

3. Орторомбічна – має три нерівні взаємно перпендикулярні осі. При цьому можливе утворення чотирьох різних просторових решіток (рис. 2.19, г, д, е, є).

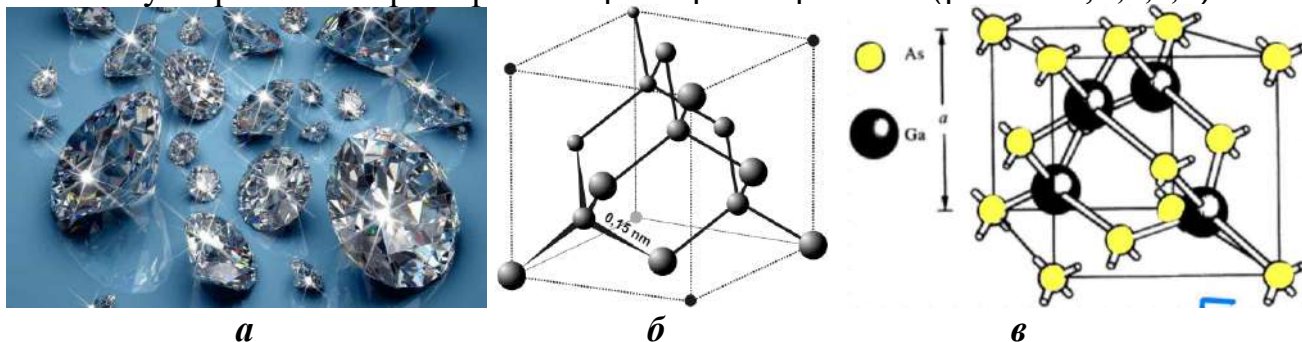


Рис. 2.15. Елементарні комірки алмазу (а) та цинкової обманки (б)

4. Гексагональна – має дві різні осі, розташовані під кутом 120° , і третю нерівну, перпендикулярну до них (рис. 2.19, ж).

5. Ромбоедрична – характеризується трьома однаковими осями, які утворюють між собою рівні кути (рис. 2.19, з).

6. Тетрагональна – відзначається трьома взаємно перпендикулярними осями, дві з яких однакові. Можливе утворення двох видів просторових решіток (рис. 2.19, и, i).

7. Кубічна – має три рівні осі, розташовані під прямими кутами одна відносно іншої, та утворює три види просторових решіток (рис. 2.19, і, й, к).

Якщо тверде тіло складається з великої кількості невпорядковано розміщених кристаликів, то воно називається полікристалічним. Полікристалічні тіла – анізотропні. Окремі кристалики називаються монокристалами. Монокристалом буде й зразок, який в усьому об'ємі буде мати єдину кристалічну решітку. Часто одна й та ж речовина може перебувати як у кристалічному, так і в аморфному стані. Наприклад, SiO_2 може бути кристалічною речовиною – кварцом, але може бути й в аморфній формі – у вигляді кремнезему (рис. 2.17). При цьому простежуються чіткі зміни й у внутрішній структурі цих речовин. В основі кристалічної решітки кварцу містяться тільки правильні шестикутники, внутрішня будова кремнезему хоч і нагадує кристалічну решітку, але має вигляд невпорядкованості: поряд з шестикутниками у ній трапляються п'яти- й семикутники.

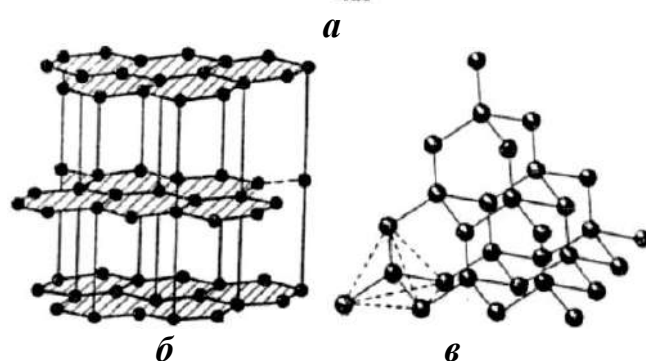
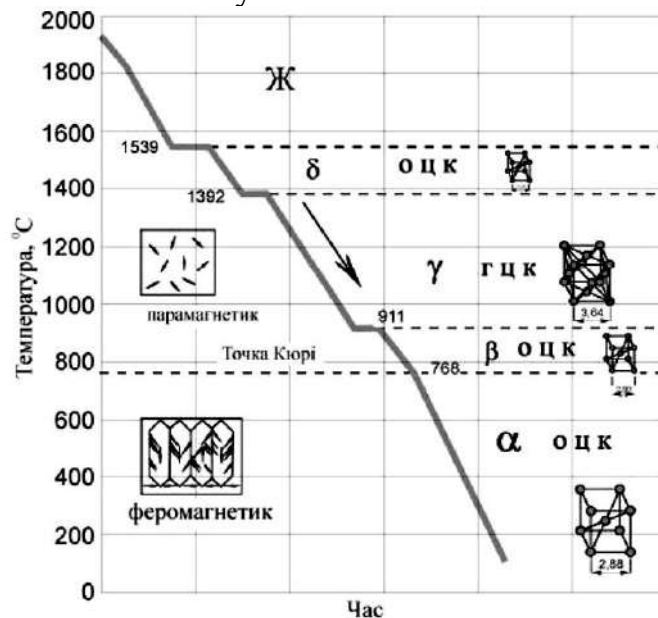
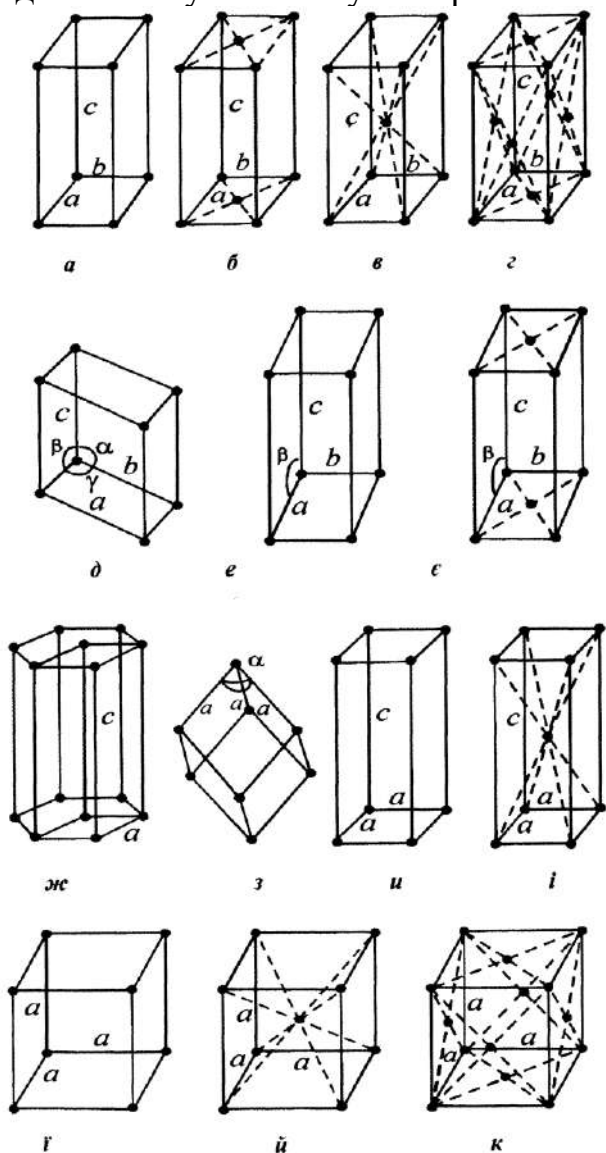


Рис. 2.20. Поліморфізм Fe (а – крива охолодження і критичні точки чистого заліза) та вуглецю (б – схематичне зображення ґратки графіту, в – ґратки алмазу)

Рис. 2.19. Елементарні комірки Браве

Аморфні тіла при низьких температурах за своїми властивостями нагадують тверді тіла, але із збільшенням температури поступово пом'якшуються, а їхні властивості все більше наближаються до рідин. Здатність одного й того ж кристала утворювати декілька різних кристалічних структур називається поліморфізмом. Такі перетворення кристалічної решітки можуть відбуватись під дією температури й тиску. Поліморфізм поширений серед багатьох металів (рис. 2.20) та має важливе практичне значення, оскільки впливає на поведінку металів і сплавів при їхньому нагріві й охолодженні під час термічної обробки та при експлуатації деталей, які повинні витримувати широкий діапазон температур.

Види хімічних зв'язків у твердих тілах

У вузлах кристалів можуть розміщуватись атоми, молекули або іони. Типи зв'язків між молекулами й атомами в кристалічному тілі визначаються характером розподілу електронів. Умовно можна назвати чотири типи зв'язків між частинками в кристалах: атомний, металевий, іонний та молекулярний.

1. Атомні кристали утворюються тоді, коли між атомами кристала виникають ковалентні (або гомеополарні) зв'язки – кожен два сусідні атоми зв'язуються один з одним парою електронів, – по одному від кожного атома. У цьому випадку кожен з цієї пари електронів належить одночасно обома зв'язаним між собою атомам. Ці електрони рухаються спільною орбітою навколо ядер обох атомів одночасно. В такому русі навколо ядер можуть брати участь тільки зовнішні, валентні електрони. В атомах деяких речовин їх може бути кілька.

Класичним прикладом атомного кристала є кристал алмазу, який складається з нейтральних атомів Карбону (C), або кристали кремнію, германію тощо. Структура вказаних кристалів характеризується тим, що в кристалічній решітці кожен атом має чотирьох найближчих сусідів (рис. 2.21). Ковалентний зв'язок зводиться до парних електронних зв'язків між даним атомом і кожним з найближчих сусідніх атомів. Розглядуваний атом вуглецю "виділяє" на кожен зв'язок один з своїх валентних електронів. Кожен з сусідніх атомів також "виділяє" по одному електрону на кожен зв'язок. Отже, всі валентні електрони атомів вуглецю беруть участь у зв'язку і кожен валентний електрон міцно утримується між двома атомними залишками. Ковалентні сили забезпечують найміцніший зв'язок атомів у єдину кристалічну решітку. Тому атомні кристали характеризуються великою твердістю, високою температурою плавлення і великою теплою випаровування. В напівпровідниках переважним типом хімічного зв'язку між атомами є саме ковалентний або ковалентно-іонний.

2. Металеві кристали (рис. 2.22). Характерною ознакою металів є наявність слабо зв'язаних (вільних) електронів. Саме цим пояснюються високі електро- й теплопровідність, значна пластичність. Кристалічна решітка металів утворюється додатними іонами металу, які містяться в її вузлах. Оскільки між пози-

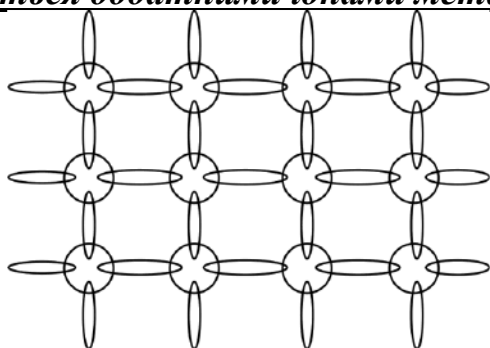


Рис. 2.21. Схема утворення ковалентних зв'язків у кристалах

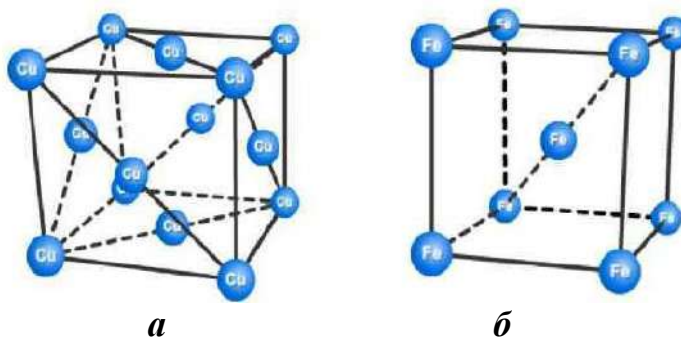


Рис. 2.22. Металічні кристалічні ґратки: а – гранецентричні кристалічні ґратки міді; б – об'ємноцентричні кристалічні ґратки заліза

тивно зарядженими іонами діють сили відштовхування, то, здавалося б, така решітка має розсіпатися. Стійкість металевої решітки пояснюється тим, що атоми металів легко втрачають зовнішні електрони, які рухаються в об'ємі всього металу, утворюючи своєрідний електронний газ. Ці спільні для всього кристалу електрони і створюють необхідні зв'язки, які формують кристалічну решітку металу. Таким чином, електрони та додатні іони металу взаємно зв'язують одні одних; електрони не можуть залишити метал завдяки притяганням до позитивно заряджених атомів металу, а кристалічна решітка, утворена з цих атомів, є надійною структурою завдяки зв'язуючій дії електронного газу.

3. Іонні кристали, у вузлах решітки яких містяться позитивно та негативно заряджені іони. Сили взаємодії між ними переважно електростатичні. Наприклад, у кристалах кухонної солі NaCl – атом натрію легко втрачає один електрон, який приєднується до атома хлору. Таким чином, утворюється два іони із зарядами протилежних знаків, які розміщуються у вузлах кристалічної решітки так, що відстань між протилежно зарядженими іонами менша, ніж між однойменно зарядженими (рис. 2.23). У таких кристалах електричні сили притягання між іонами переважають сили відштовхування та утримують їх у вузлах решітки. Крім кухонної солі, типовими іонними кристалами є KCl , CaF_2 , LiF та інші. Іонні кристали слабо розширюються при нагріванні та мають високу температуру плавлення, що свідчить про значну міцність іонного зв'язку. Чим більший заряд іона, тим вища температура плавлення іонного кристалу.

4. Молекулярні кристали, у вузлах решітки яких містяться молекули речовини, зв'язок між якими забезпечується силами молекулярної взаємодії (рис. 2.24). Внаслідок того, що ці сили слабкіші від сил іонного і ковалентного зв'язку, молекулярні кристали менш міцні. Суттєво відрізняються й інші фізичні характеристики молекулярних кристалів: вони плавляться при відносно низькій температурі (усі молекулярні гази – гелій, водень, кисень, азот), мають великі коефіцієнти термічного розширення, малу теплоту сублімації, що забезпечує легке випаровування (CO_2 , нафталін тощо). Більшість молекулярних кристалів при нормальній температурі – діелектрики.

В той же час, всі однофазні тверді кристалічні тіла являють собою або сполуку, або твердий розчин.

1. Сполуки визначаються стехіометричною формулою, з допомогою якої задається строге співвідношення між числами атомів елементів, що входять до складу сполуки. Сполука має кристалічну решітку, яка відрізняється від решіток утворюючих її елементів. Наприклад, сполука антимоніду індію InSb має кубічну решітку, а елементи, з яких вона утворена мають: In – тетрагональну решітку, Sb – ромбоєдричну. Для сполуки характерне строге розташування атомів, з яких вона складається, в елементарній комірі. Наприклад, кристалічна решітка сполуки InSb (структурний тип сфалерит) складається з двох г.ц.к.-підрешіток,

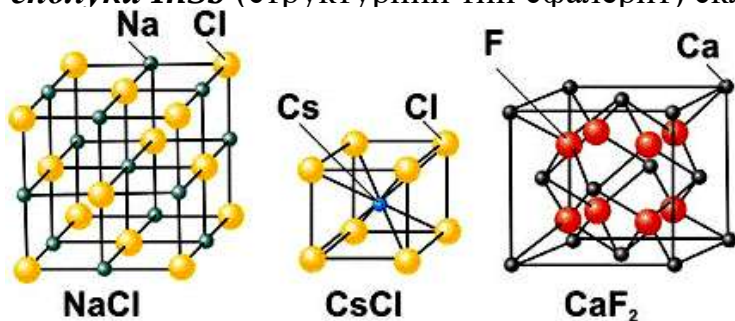


Рис. 2.23. Моделі іонних кристалічних ґраток

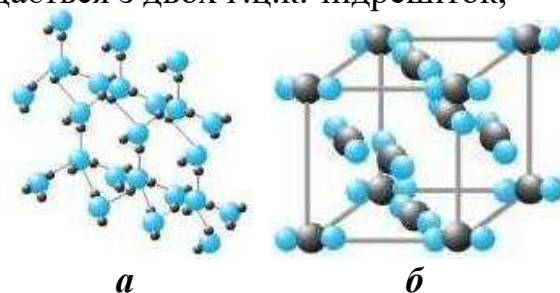


Рис. 2.24. Моделі молекулярних кристалічних ґраток: а – вода (лід); б – твердий вуглекислий газ

зсунутих відносно один одного на $1/4$ об'ємної діагоналі, кожна з яких заповнюється своїм сортом атомів: одна – **In**, друга – **Sb** (рис. 2.25).

2. **Тверді розчини.** В твердих розчинах, як і в рідких, для атомів речовини, що розчиняється, характерне випадкове розташування атомів в решітці розчинника, а не строго визначене, як в сполуках. Взаємодіючі речовини (розчинник і та, що розчинюється) можуть мати як необмежену, так і обмежену розчинність один в одному з різним ступенем цього обмеження та різною температурною залежністю межі розчинності. Таким чином, тверді розчини існують не при певному числовому співвідношенні своїх компонентів, а в інтервалі концентрацій, величина якого визначається межею розчинності. Крім того, при утворенні твердого розчину тип кристалічної решітки розчинника зберігається, стала решітки змінюється. Отже, **тверді розчини** – твердотільні дво- або багатокомпонентні однорідні системи змінного складу (наприклад, типу A_xB_{1-x} – $Ni_{49}Sb_{51}$), в яких атоми компонентів, змішуючись в різних співвідношеннях ($0 \leq x \leq 1$), утворюють загальну кристалічну решітку, характерну для одного з компонентів.

На основі розчинника (хімічного елемента) можливі такі **типи твердих розчинів**: 1) **розчини заміщення (віднімання)** – атоми елемента, що розчиняється, займають позиції атомів розчинника у вузлах ґратки, тобто, заміщують їх (рис. 2.26, б), наприклад, твердий розчин **Ge-Si**; 2) **розчини проникнення (вкорінення)** – атоми елемента, що розчиняється, займають міжвузлові позиції в ґратці розчинника, вкорінюючись між його атомами (рис. 2.26, в), наприклад, **Ge(Li)**, **Si(Li)**; 3) якщо **тверді розчини утворюються на основі сполуки АВ**, то крім **розчинів заміщення** (з атомами третього хімічного елемента, рис. 2.26, д) та **проникнення**, утворюються ще **розчини віднімання** – один з елементів, що утворює сполуку, присутній в кількості, яка перевищує формульну, але при цьому займає в ґратці сполуки приналежні йому позиції, а відповідна частина позицій іншого елемента залишається вакантною (рис. 2.26, е), наприклад, $Ni_{49}Sb_{51}$, In_2Te_3 .

З напівпровідникових сполук **АВ** можливо також отримувати **багатокомпонентні напівпровідникові тверді розчини**, заміщуючи частину атомів **А** або/та **В** елементами з тієї ж підгрупи. Наприклад, якщо взяти дві напівпровідникові сполуки з різними металевими компонентами **АС** і **ВС**, в яких елементи **А** і **В** знаходяться в одній і тій же підгрупі періодичної системи, та "змішати" їх, то це призведе до утворення **твердого розчину** $A_{1-x}B_xC$ в області його існування. **Область існування** – це частина фазової діаграми, в якій утворюється неперервний ряд твердих розчинів і яка має тим більшу протяжність, чим менша відмінність між періодами ґраток змішуваних сполук та чим менша відмінність між ступенями іонності хімічних зв'язків, тобто чим менша відмінність між різницями електровід'ємностей в змішуваних сполуках. Прикладами твердих розчинів із заміщенням компонента **А** можуть бути: $AlAs + GaAs \rightarrow Al_xGa_{1-x}As$ для сполук $A^{III}B^V$, $CdTe + HgTe \rightarrow Cd_xHg_{1-x}Te$ для сполук $A^{II}B^{VI}$.

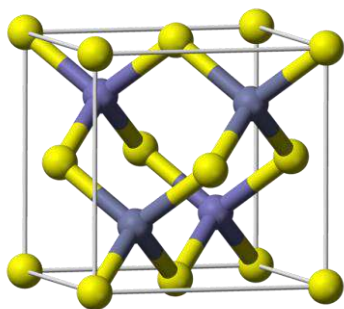


Рис. 2.25. Кубічна решітка сполуки InSb

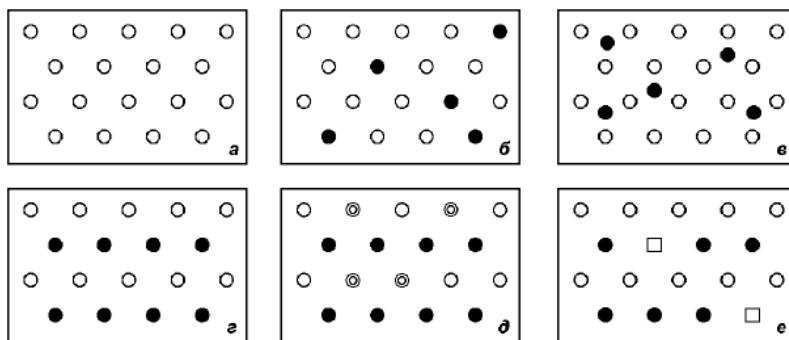


Рис. 2.26. Типи твердих розчинів: а, б, в – розчинник – хімічний елемент; г, д, е – розчинник – сполука АВ

При "змішуванні" напівпровідникових сполук з однаковими атомами A та різними атомами B , розташованими в одні і тій же підгрупі періодичної системи, також утворюються напівпровідникові тверді розчини. Наприклад $GaSb_{1-y}As_y$ ($GaSb+GaAs$) та $CdSe_{1-y}Te_y$ ($CdSe+CdTe$).

Можливе одночасне заміщення одразу двох компонент сполуки атомами із відповідної групи періодичної системи з утворенням четверного твердого розчину. Наприклад, $(GaAs)_{1-x}(InP)_x$ ($GaAs+InP$).

Отже, всі напівпровідники можуть бути поділені на кристалічні і некристалічні. До числа некристалічних напівпровідників відносять: 1) аморфні напівпровідники ($\alpha-Si$, $\alpha-Ge$, Se , Te , Sb); 2) рідкі напівпровідники (розплави Se , Te , розплави оксидів, сульфідів, селенідів і телуридів деяких металів; 3) склоподібні напівпровідники (скло – сильно переохолоджена рідина з дуже великою в'язкістю). Найбільш поширеними серед склоподібних напівпровідників є халькогенідні (сплави P , As , Sb , Bi з S , Se , Te , наприклад As_2Se_3 , As_2S_3 , As_2Te_3) та оксидні (V_2O_5 – P_2O_5 – MeO_x). Тут Me – метали $I-VI$ груп.

Напівпровідники мають, як правило, нещільноупаковану структуру, вони крихкі аж до досить високих температур. Напівпровідники також погано утворюють сплави з матеріалами з іншою природою хімічного зв'язку.

Загальною рисою некристалічних напівпровідників є відсутність дальнього порядку в розташуванні атомів, в результаті чого виявляються суттєві зміни в енергетичному спектрі та низька рухливість носіїв струму. Найближче оточення та міжатомні відстані в некристалічних напівпровідниках майже не відрізняються від їх кристалічних аналогів. Тому напівпровідникові властивості матеріалів обумовлені ближнім порядком (типом зв'язку), а не дальнім порядком (кристалічною структурою матеріалів).

Серед кристалічних напівпровідників виділяють часто групи зі схожими тими чи іншими властивостями. Так, в залежності від кількості компонентів, що входять до складу речовини, виділяють:

1) елементарні (гомеополярні) напівпровідники: Бор (B), Карбон (C), Силіцій (Si), Фосфор (P), Сульфур (S), Германій (Ge), Арсен (As), сіре Олово ($\alpha-Sn$), Стибій (Sb), Бісмут (Bi), Телур (Te), Селен (Se), Йод (I). Найважливішими представниками цієї групи є кремній і германій, які мають кубічну структуру типу алмазу, де кожний атом оточений 4 найближчими сусідами;

2) гетерополярні напівпровідники (бінарні, трикомпонентні, чотирикомпонентні і т.д.). Серед бінарних виділяють, в першу чергу, групу сполук з однаковою стехіометричною формулою, тобто утворені з елементів, що розташовуються в одних і тих же групах періодичної системи елементів Д.І. Менделєєва:

а) алмазоподібні напівпровідники. Їх стехіометрична формула – $A^N B^{8-N}$, де A і B – компоненти сполуки, N – номер групи компонента A в періодичній таблиці Менделєєва. Компоненти цих сполук розташовані симетрично відносно IV групи в таблиці Менделєєва. Сполуки мають гранецентровану кубічну решітку та кристалізуються в структурах типу алмазу або сфалериту (цинкова обманка), або гексагональну решітку і кристалізуються в структуру типу вюртциту. Фізичні властивості сполук елементів VI групи в значній мірі визначаються концентрацією власних точкових дефектів структури, що проявляють електричну активність (центри розсіяння та рекомбінацій). До напівпровідників $A^N B^{8-N}$ відносяться:

$A^{III} B^V$ – GaP , $GaSb$, $GaAs$, InP , $InSb$, $AlSb$ (структура сфалериту типу цинкової обманки) – гетерополярні кристали з ковалентно-іонним зв'язком та не дуже малим ефективним зарядом;

$A^{II}B^{VI}$ – *CdSe, CdS, CdTe, HgTe, ZnS, ZnSe* (структура сфалериту) – деякі з наведених напівпровідників існують в двох кристалічних модифікаціях;

A^IB^{VII} – *CuBr, AgI* (кубічна структура типу сфалериту);

$A^{IV}B^{IV}$ – β -*SiC* (структура сфалериту);

б) халькогенідні елементи четвертої групи. Їх стехіометрична формула $A^{IV}B^{VI}$, а типові представники *PbS, PbSe, PbTe, SnS, SnTe*. Ці матеріали мають гранецентровану кубічну решітку типу *NaCl* або слабко спотворені структури на її основі. Вони мають вузьку заборонену зону та використовуються як джерела та приймачі ІЧ-випромінювання. Власні точкові дефекти структури в $A^{IV}B^{VI}$ мають низьку енергію іонізації та проявляють електричну активність.

в) халькогеніди елементів п'ятої групи. Їх стехіометрична формула $A_2^VB_3^{VI}$. До цієї групи відносяться халькогеніди (миш'яку) арсену (*As₂S₃, As₂Se₃, As₂Te₃*), що кристалізуються в структури з моноклинною решіткою; халькогеніди (сурми) стибію (*Sb₂Se₃, Sb₂S₃*) – сполуки з ромбічною решіткою; халькогеніди (вісмуту) бісмуту (*Bi₂Te₃, Bi₂Se₃*) – сполуки з ромбоєдричною решіткою. Халькогеніди стибію та бісмуту використовуються для створення напівпровідникових термоелектричних генераторів.

Серед гетерополярних напівпровідників також виділяють наступні групи:

1. Магнітні напівпровідники. У всіх цих матеріалів наявні атоми з частково заповненими *d*- і *f*-оболонками (атоми перехідних металів та рідкоземельних елементів). Відмінною особливістю багатьох з них є виникнення магнітного впорядкування при низьких температурах. Ця група включає такі сполуки, як, наприклад, *EuS, EuSe, MnTe*, прості (*NiO, CoO, FeO, ZnO, EuO, Cu₂O*) та складні окисли перехідних металів, наприклад, ферити типу *MeO·Fe₂O₃* або *MeFe₂O₄* (*ZnFe₂O₄, MnFe₂O₄*), що кристалізуються в структурі шпінелі. Ці матеріали знаходять застосування в радіотехнічних приладах, оптичних пристроях, керованих магнітним полем, та в хвилеводних пристроях НВЧ. Оксидні напівпровідники (*NiO, ZnO, EuO, Cu₂O*) використовуються як різноманітні датчики – температури, хімічного складу газу.

2. Напівпровідники-сегнетоелектрики. Особливістю цієї групи кристалів є наявність електричних моментів в кристалі та виникнення спонтанної поляризації при зниженні температури. Типовим прикладом цих матеріалів є напівпровідники зі структурою перовскіту та стехіометричною формулою ABO_3 . До цієї групи також відносяться й деякі сполуки $A^{IV}B^{VI}$ – *GeTe* і *SnTe*. Використовуються ці матеріали при створенні запам'ятовуючих та нелінійно-оптичних пристроїв, в якості п'єзодатчиків.

3. Органічні напівпровідники: антрацен, нафталін, фталоціанін.

Структурні дефекти кристалів

Всі природні і синтезовані монокристали та ще в більшому степені кристали полікристалів відрізняються від ідеальних тим, що містять різні порушення структури кристалу. Порушення ідеальної трансляції симетрії кристала називаються структурними дефектами, які виявляють суттєвий вплив на більшість параметрів твердих тіл. До таких параметрів належать: електропровідність, фотопровідність, теплопровідність, швидкість дифузії, магнетизм, твердість, міцність і пластичність, щільність та ін. Залежність цих параметрів твердого тіла від структурних дефектів може виявитись настільки великою, що в підсумку вони будуть визначатись не стільки вихідною структурою матеріалу, скільки типом і числом структурних дефектів в ньому. Менш чутливими до структурних дефектів є такі

параметри, як: температура плавлення, діелектрична проникність, парамагнітні і діамагнітні характеристики, модулі пружності.

Структурні дефекти можуть бути розділені на дві основні групи: **власні дефекти** та **домішки** з атомів інших хімічних елементів (рис. 2.27). Якщо за основу класифікації прийняти розміри та протяжність областей ґратки кристала, на які поширюється дія дефектів, то **всі структурні дефекти можуть бути розділені на**: 1) **точкові**: (вакансії, міжвузлові атоми основної речовини, домішкові атоми в вузлах та міжвузлях, антиструктурні дефекти, комплекси з простих точкових дефектів); 2) **лінійні дефекти** (дислокації); 3) **двомірні дефекти** (малокутові границі, границі зерен та блоків, двійникові границі, дефекти упаковки); 4) **об'ємні порушення** (зональні напруження, пори, включення другої фази).

Основна відмінність точкових дефектів від лінійних, двомірних та об'ємних дефектів полягає в тому, що вони можуть існувати в кристалі як в термодинамічній рівновазі, так і в метастабільному стані при кінцевій температурі. Лінійні, двомірні та об'ємні дефекти є метастабільними утвореннями, що виникають при рості, механічній деформації або при термічній обробці кристала. Отже, теоретично можливо отримати кристал, що містить тільки точкові дефекти.

Дефекти можуть переміщуватись по кристалу, взаємодіяти один з одним, з утворенням нових, більш складних, або, навпаки, більш простих, ніж вихідні, дефектів внаслідок зовнішніх впливів, й навіть "анігілювати" – взаємознищуватись. Це явище призводить до зміни з плином часу властивостей матеріалу, з якого виготовляється прилад, що призводить до зміни вихідних параметрів приладу в процесі його роботи (**деградації** або **"старіння" приладу**). При отриманні матеріалів для виготовлення напівпровідникових приладів врахування цього ефекту та зведення його до мінімально можливого є надзвичайно важливим.



Рис. 2.27. Класифікації дефектів в кристалічних напівпровідниках

Точкові структурні дефекти утворюються внаслідок того, що окремі атоми, набувши достатньої енергії, залишають вузол кристалічної решітки й переходять у простір між вузлами (рис. 2.28, б) або залишають кристал взагалі (рис. 2.28, а). Такі точкові дефекти називають відповідно: **міжвузловими атомами** та **вакансіями**, (**дефектами Шотткі**). Обидва види дефектів **спричинюють зміщення сусідніх атомів відносно їх нормального положення, викликають порушення правильності будови решітки**. Навіть найчистіші речовини мають незначну кількість домішок іншої речовини. Точкові дефекти можуть утворюватись у тому разі, коли **сторонні атоми займають деякі місця у вузлах кристалічної решітки** (рис. 2.28, в), або якщо **сторонній атом осідає між вузлами решітки** (рис. 2.28, г). **Точкові дефекти здатні впливати на фізичні властивості** металів та напівпровідників (електропровідність, магнітні властивості тощо), від їхньої кількості залежить швидкість дифузії у металах та сплавах, твердих розчинах.

Вакансія – це найпростіший точковий структурний дефект, що являю собою вільний вузол ґратки, який повинен бути зайнятий атомом або іоном в досконалому кристалі. Вакансії позначаються $V_A, V_B, \dots$, де індекси $A, B \dots$ вказують тип відсутнього атома. Наприклад, в **GaAs** V_{Ga} і V_{As} – вакансії **Ga** і **As**, відповідно. Утворення вакансій супроводжується пружною деформацією ґратки. Сусідні з вакансією атоми зближуються, зміщуючись в напрямку центру пустого вузла.

Вакансії, що виникають за рахунок уходу атома з вузла на поверхню кристалу або на будь яку границю всередині кристалу, також називають **дефектами Шотткі** (іноді дефектом Шотткі називають пару з катіонної та аніонної вакансії, і тоді це складний парний дефект).

Міжвузловим називається **атом (іон)**, що розташовується у міжвузлі. A_i позначає атом A у міжвузлі. Ймовірність розміщення атома в міжвузлі визначається перед усім відносним об'ємом міжвузля (пустоти) та розміром міжвузлового атома. Найбільш суттєву роль в типових напівпровідниках зі структурою типу алмазу, сфалериту та вюртциту відіграють октаедричні й тетраедричні пустоти, що знаходяться між атомами, центри яких розташовані відповідно в вершинах октаедра й тетраедра. Парний дефект (вакансія + міжвузловий атом), що виникає за рахунок переходу атома з вузла ґратки в міжвузля, ще називають **дефектом по Френкеля**.

Прості точкові дефекти в хімічних сполуках більш різноманітні, ніж в елементарних речовинах. Крім вакансій та міжвузлових атомів, в сполуках важливу роль відіграють так звані **антиструктурні дефекти** – дефекти, які утворюються при взаємному обміні місцями атомів елементів, що утворюють сполуку. Такі дефекти найбільш часто виникають в сполуках, в яких розміри та електровід'ємність атомів, що їх утворюють, близькі, тобто роль іонної складової зв'язку невелика. Антиструктурне розупорядкування спостерігається, наприклад, **Bi_2Te_3** . В іонних кристалах антиструктурні дефекти практично не зустрічаються. Особливістю сполук є також **утворення точкових дефектів при відхиленні складу від стехіометричного в області гомогенності**. Відхилення від стехіометрії призводить до утворення вакансій в більшості напівпровідників (утворюються тверді розчини віднімання), але можуть утворюватись й міжвузлові атоми. Наприклад, в **GaAs** надлишок **Ga** створює вакансії **As**, а надлишок **As** призводить до появи вакансій **Ga** та, крім того, до міжвузлових атомів **As**. Однак в цьому випадку вакансію та міжвузловий атом не можна об'єднати в один парний дефект, оскільки вакансія **Ga** та міжвузловий атом **As** не можуть "анігілювати".

Точкові дефекти можуть переміщуватись по кристалу шляхом дифузії, взаємодіяти один з одним та з іншими дефектами.

Вакансії та міжвузлові атоми можуть виникати та зникати в процесі руху та перетину дислокацій, що утворюються при пластичній деформації кристалу.

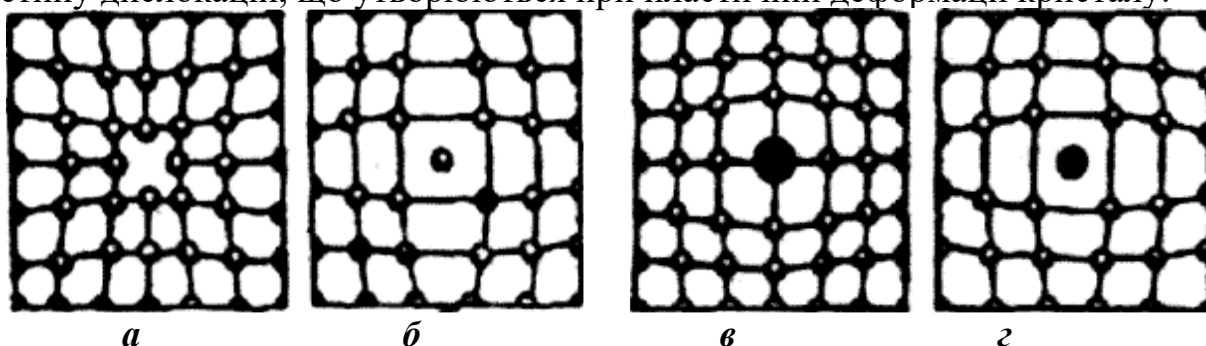


Рис. 2.28. Схеми утворення точкових дефектів: вакансія (а), міжвузловий атом (б); сторонній атом у вузлі решітки (в); сторонній атом між вузлами решітки (з)

При будь якій кінцевій температурі кристал містить рівноважні вакансії та міжвузлові атоми, при цьому їх концентрація визначається енергією дефектоутворення й температурою кристалу (є експоненціальною функцією температури). Підвищена, в порівнянні з рівноважною, концентрація дефектів при низьких температурах може бути отримана в наслідок закалювання (швидкого охолодження) кристалу. Закалювання може різко змінити механічні та електричні властивості матеріалу. Різке охолодження матеріалу від високих температур до кімнатної зберігає деяку частину надлишкових теплових вакансій. Чим більша швидкість охолодження і чим досконаліше кристал, ти більша частина вакансій зберігається в метастабільному стані. При сильно нерівноважних умовах охолодження можливе пересичення кристалу вакансіями, тоді вони можуть об'єднуватись та утворювати пори, що іноді переростають у "від'ємні" кристали (пора в кристалі, що має ту ж форму, що й сам кристал).

Дислокації – це лінійні дефекти (мають малі розміри у двох вимірах та значну протяжність у третьому вимірі) кристалічної ґратки типу обриву або зсуву атомних площин, що порушують правильність їх чергування. Енергія утворення дислокацій суттєво вище енергії утворення точкових дефектів, тому вони не можуть існувати у вимірюваних концентраціях як термодинамічно стійкі дефекти. Вони легко утворюються при вирощуванні монокристалів або епітаксійних плівок, що супроводжується термічними, механічними та концентраційними напруженнями, які призводять до пластичної деформації кристалу. Частина дислокацій може зберегтись в кристалі навіть після самого ретельного відпалу. Оскільки дислокації при невеликих концентраціях розподілені по об'єму кристалу нерівномірно, то порушення властивостей кристалу, що обумовлені їх наявністю, локалізовані в невеликих об'ємах, які оточують дислокації. Тому кінетика процесів, що протікають поблизу цих дефектів, буде іншою, ніж в об'ємі кристалу, де дислокації відсутні. Розрізняють прості (лінійні (крайові)) й гвинтові (спіральні)) та змішані дислокації (рис. 2.29). У випадку лінійної дислокації зсув відбувається вздовж плоскої поверхні (рис. 2.30), а гвинтової – зсув йде за гвинтовою поверхнею (рис. 2.31). Дислокації оточені полями пружних напруг, що викликають спотворення кристалічної решітки. Енергія спотворення решітки є однією з найважливіших характеристик дислокацій будь-якого типу. Важливою характеристикою дислокацій є їхня густина – це сумарна довжина дислокації, що припадає на одиницю об'єму кристалу. Густина дислокацій визначається експериментально (з допомогою мікроскопа) підрахунком числа виходів дислокацій на одиниці площі поверхні після хімічного травлення досліджуваної поверхні спеціальними травниками.

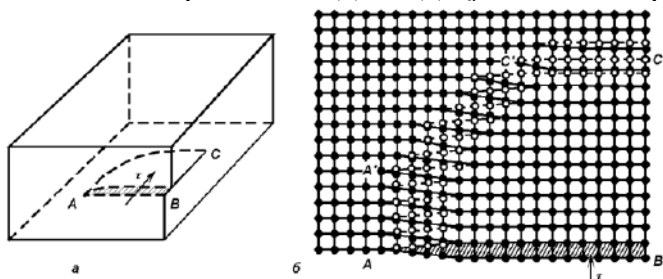


Рис. 2.29. а – зсув, що створив змішану дислокацію; б – змішана дислокація в простій кубічній ґратці. Крайова площина ковзання співпадає з площиною креслення; чорні кружки – атоми під площиною ковзання, білі – атоми над нею; заштрихована ділянка – сходи́нка, що утворилась в результаті зсуву

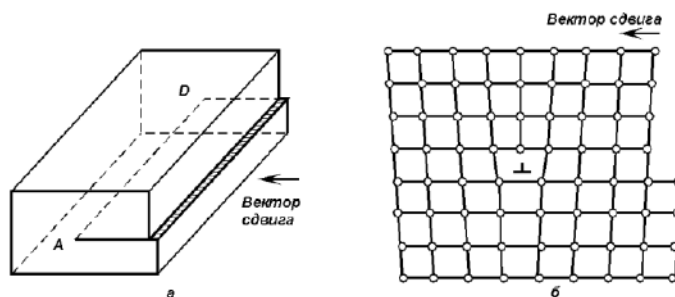


Рис. 2.30. а – схема утворення крайової дислокації, б – розташування атомів навколо крайової дислокації в простій кубічній ґратці

Властивості дислокацій: 1) дислокації не можуть обриватись в середині кристалу й повинні або замикатися самі на себе, або розгалужуватись на інші дислокації, або виходити на поверхню кристалу; 2) енергія дислокації, яка витрачається на викривлення ґратки при утворенні дислокації, складається з пружної енергії викривлення ґратки та непружної енергії ядра дислокації (область радіусом в декілька міжатомних відстаней (5-10 ангстрем), де викривлення ґратки настільки великі, що не можуть бути описані в рамках теорії пружності); 3) під дією зовнішніх сил дислокації можуть переміщуватись ковзанням та переповзанням (рис. 2.33), при цьому дислокації пересуваються як вздовж площин ковзання, так і перпендикулярно їм відповідно; 4) так як поля пружних напруг навколо окремих дислокацій можуть перекриватись, то дислокації можуть взаємодіяти одна з одною (притягуватись, відштовхуватись), якщо ці взаємодії призводять до зменшення пружної енергії кристалу; 5) число різних типів дислокацій в реальному кристалі обмежене; 6) взаємодія дислокацій з точковими дефектами – прагнення до зменшення вільної енергії кристалу викликає ефективну взаємодію дислокацій з точковими дефектами й перед усім з домішковими атомами, в результаті чого атоми домішки розподіляються в ґратці, як правило групуючись поблизу дислокацій та утворюючи так звані атмосфери Коттрелла.

Крім того, дислокації визначають концентрацію точкових дефектів в напівпровідникових монокристалах, оскільки є їх "джерелом" та "стоком". Області збільшених міжатомних відстаней є потенціальними "стоками", міжвузлових атомів та "джерелами" вакансій в кристалі, а області стиснених міжатомних відстаней – навпаки. Точкові дефекти з'являються також і при перетині дислокацій, що окремо рухаються, і при "анігіляції" дислокацій, що рухаються в паралельних площинах ковзання. Дислокації збільшують швидкість дифузії атомів в кристалі, прискорюючи ефекти "старіння" матеріалу й інші процеси, що протікають за участі дифузії. Згущення хмар Коттрелла навколо дислокацій може призвести до утворення включень другої фази. В деяких випадках дислокації можуть відігравати визначальну роль в процесах росту кристалів.

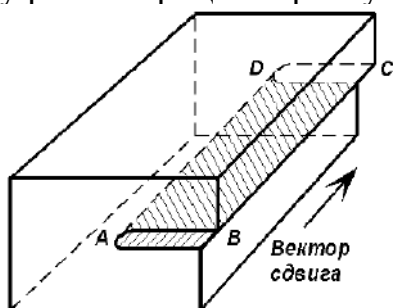


Рис. 2.31. Схема утворення гвинтової дислокації

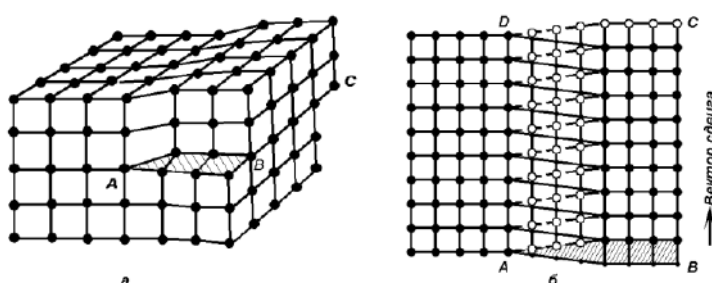


Рис. 2.32. а – гвинтова дислокація, б – розташування атомів на гвинтовій поверхні вздовж гвинтової дислокації

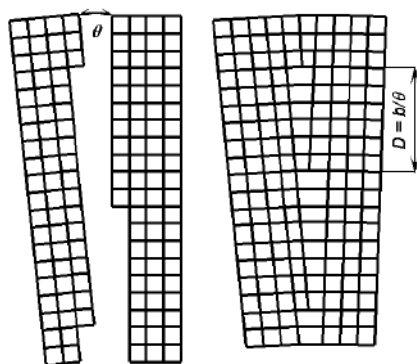


Рис. 2.34. Дислокаційні малокутові границі

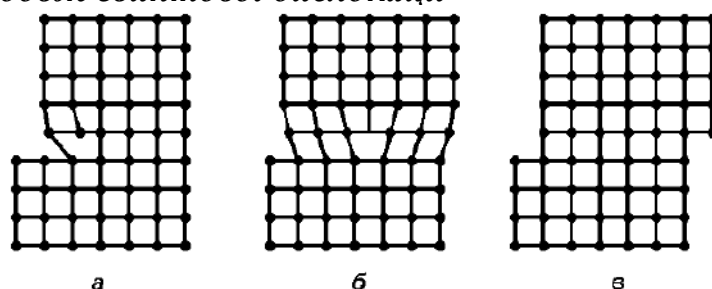


Рис. 2.33. Схема пластичного ковзання, що здійснюється шляхом переміщення крайової дислокації

Поверхневі дефекти достатньо малі лише в одному вимірі. Вони являють собою поверхні розділу між окремими зернами або блоками полікристалічного матеріалу. Зерна частіше розорієнтовані одне відносно одного на певний кут. У межах кожного блоку решітка майже ідеальна, якщо не враховувати точкові спотворення. Розміри зерен і блоків істотно впливають на властивості металів. Границі між окремими зернами (кристалітами) утворюють перехідну ділянку шириною у декілька міжатомних відстаней, в якій решітка одного кристалу, що має певну кристалографічну орієнтацію, переходить у решітку другого кристалу з іншою кристалографічною орієнтацією. Тому на межі зерен атоми розташовані менш упорядковано, ніж в об'ємі зерна. Уздовж границь зерен концентруються й домішки, що ще більше порушує правильний порядок розташування атомів.

Малокутовою границею називається сукупність дислокацій, які утворюються на границі з'єднання при зрощуванні різним чином орієнтованих монокристалічних блоків (зерен) з малим кутом розорієнтування ($2-5^\circ$). На рис. 2.34 показана найпростіша дислокаційна модель малокутової границі для випадку, коли вистроєні в ряд крайові дислокації утворюють просту похилу границю блоків, симетрично розорієнтованих на кут θ . Аналіз полів напружень взаємодіючих дислокацій показує, що така система однакових крайових дислокацій, розташованих в паралельних площинах ковзання, утворює дислокаційну сітку, яка найбільш стійка в кристалі. Область пружного викривлення ґратки поблизу **МКГ** не поширюється далеко в глиб кристалічних блоків й обмежена в основному шаром, товщина якого дорівнює відстані між дислокаціями. Якщо сусідні блоку повернуті один відносно одного на кут θ навколо осі, яка перпендикулярна до площини границі блоку, то границя складається із сукупності гвинтових дислокацій і називається границею кручення. Границі блоків загального типу включають в себе й нахил (сукупність крайових дислокацій) та кручення (сукупність гвинтових дислокацій).

Чим більший кут розорієнтації, тим частіше розташовані дислокації на границі між блоками. І нарешті, при великій розорієнтації $\theta > 10-12^\circ$ малокутові границі перетворюються в звичайні границі між зернами (рис. 2.35). Границі зерен в полікристалічному зливку утворюються в результаті одночасного розростання декількох кристалічних зародків. В більшості випадків зерна кристалів, що ростуть, мають хаотичну кристалографічну орієнтацію.

В умовах, що несприятливі для ковзання, пластична деформація кристалів може призводити до утворення не дислокацій, а двійників або дефектів упаковки, що являють собою дефекти, при наявності яких відбувається порушення кристалографічної орієнтації частин кристалу внаслідок порушення порядку чергування атомних площин. На рис. 2.36 показано двійникування на прикладі двовірної гра-

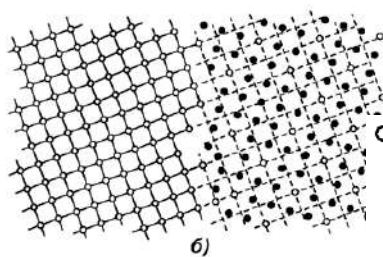
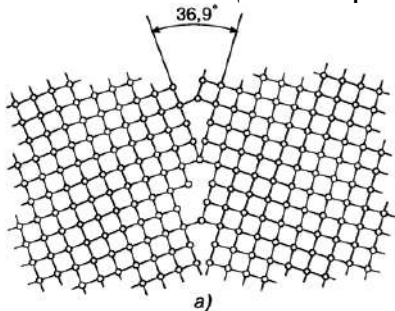


Рис. 2.35. Багатокутова границя в полікристалі: а – міжзернова границя між двома квадратними ґратками зерен ($\theta = 36,9^\circ$); б – ця границя може бути представлена ґраткою співпадаючих вузлів

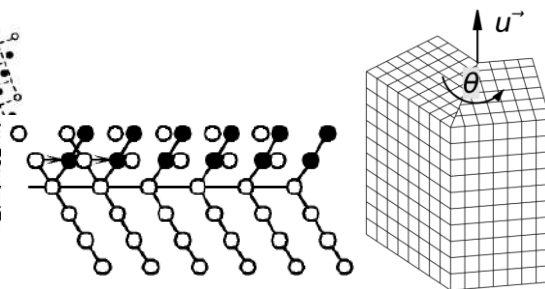


Рис. 2.36. Схема виникнення двійників границі в кристалі

тки. Світлими кружками на ньому представлені положення атомів до двійникування, чорними – після двійникування. Величина зміщення атомів в кожній з паралельних площин пропорційна відстані даної площини від площини двійникування. Так як при двійникуванні зберігаються незмінними всі міжатомні відстані, а кути між зв'язками змінюються тільки в одному граничному шарі, то виникнення двійникування границі потребує невеликої енергії. Двійникування напівпровідникових кристалів є дуже поширеним дефектом структури. Як правило, цей дефект викликається тими ж причинами, що й утворення дислокацій, і часто породжується їх скупченням. Виникнення двійників сприяють також скупчення домішок на фронті кристалізації, відхилення напрямку росту від напрямку температурного градієнту та механічні напруження.

Дефект упаковки являє собою порушення правильного чергування шарів ґратки, що може бути створено шляхом додавання (дефект упаковки типу вкорінення) або віднімання шару (дефект упаковки типу віднімання).

Об'ємні структурні дефекти. При макроскопічно неоднорідному характері поля зовнішніх сил, що діють на кристал, в ньому можуть виникати **зональні пружні напруження**. Ці напруження, що врівноважуються в макрооб'ємах кристалу, суттєво впливають на його властивості, а при певних умовах можуть викликати пластичну деформацію, тріщино-утворення й навіть руйнування кристалу. Зональні напруження виникають при вирощуванні кристалів внаслідок наявності термічних напруг. При рості кристалу з рідкої фази відвід тепла від його зовнішніх шарів зазвичай відбувається швидше, ніж від шарів, що знаходяться в середині. Більш гарячі внутрішні шари заважають зовнішнім шарам скоротитися. В результаті виникають термопружні напруження, що стискають у внутрішніх об'ємах та розтягують у зовнішніх. Якщо ці напруження перевищують модуль пружності матеріалу (напруження, що викликає деформацію, рівну 0,2 % від довжини або іншого розміру кристалу), то вони викличуть пластичну деформацію, яка повністю або частково зніме термічні напруження. Зональні термічні напруження виникають також і при швидкому охолодженні вирощуваного кристалу від температури росту до кімнатної температури. Зональні напруження виникають й на границі підкладки та епітаксійної плівки (шару), що вирощується з матеріалу, відмінного від матеріалу підкладки. Крім пружної деформації, в епітаксійній плівці може відбуватись і пластична деформація, що викликана зональними напруженнями. Найбільш суттєвими факторами, що впливають на процес пластичної деформації, є товщина плівки та різниця коефіцієнтів термічного розширення матеріалів плівки й підкладки.

Пори – це об'ємні пустоти макроскопічних розмірів в кристалічній ґратці, до появи яких призводять скупчення багатьох вакансій. Пори можуть утворюватись в процесі вирощування кристалів або при радіаційному опроміненні кристалів.

Включення другої фази – це частки макроскопічних розмірів, склад яких відрізняється від складу основної речовини (рис. 2.37). В кристалах можуть зустрічатись включення другої фази **двох типів**: включення одного з компонентів сполуки, що утворюється при вирощуванні монокристалів (наприклад, **Pb** в **PbTe**), та включення макроскопічних часток чужорідної фази, що утворюються при вирощуванні легованих кристалів (**CdTe** в кристалах **PbTe**, легованих кадмієм).



Рис. 2.37. Включення другої фази в різних кристалах

2.3. Основи квантової механіки та зонної теорії твердого тіла

Електрон, як один з основних вільних носіїв заряду, також є центральним об'єктом квантової механіки, що вивчає явища, які відбуваються у мікросвіті, розміри якого коливаються в межах 10^{-8} - 10^{-16} м. В квантовій механіці описується поведінка електронів, ядер, атомів, молекул у різних середовищах, взаємодія електромагнітного випромінювання з речовиною. Термін "квантова" пов'язаний з дискретними порціями (квантами), які теорія надає певним фізичним величинам, наприклад, електрони у атомах можуть перебувати тільки на певних орбіталах із певними значеннями енергії.

Корпускулярно-хвильовий дуалізм (гіпотеза Луї де Бройля) – будь-яка елементарна частинка має хвильові властивості, а будь-яка хвиля має властивості, характерні для частинки. При цьому, рух будь-якої частинки з імпульсом $p = m \cdot v$ описується хвильовим процесом, довжина хвилі λ якого: $\lambda = h / p$, (2.12) де $h = 6,62607015 \times 10^{-34}$ Дж·с – стала Планка; $v = \lambda \cdot \nu$ – швидкість хвильового процесу; ν – частота коливань хвильового процесу. Гіпотеза де Бройля з'явилася тоді, коли стало відомо, що електромагнітні хвилі випромінюються й поглинаються порціями – квантами з енергією $\Delta E = h \cdot \nu$ (рис. 2.38). Тобто, хвилі демонструють властивості, які раніше приписувалися лише частинкам.

Одним з парадоксальних проявів хвильових властивостей мікрочастинок (електронів, протонів, нейтронів) є принцип (співвідношення) невизначеності Гейзенберга, що відображає спроби фізиків описати поведінку мікрочастинок з допомогою характеристик, використовуваних в макросвіті (імпульс, координата). Принцип невизначеності є фундаментальною засадою квантової механіки, яка стверджує, що принципово неможливо одночасно виміряти з довільною точністю координати ($\Delta x, \Delta y, \Delta z$) й імпульси ($\Delta p_x, \Delta p_y, \Delta p_z$) квантового об'єкта:

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2}, \quad \Delta y \cdot \Delta p_y \geq \frac{\hbar}{2}, \quad \Delta z \cdot \Delta p_z \geq \frac{\hbar}{2}, \quad (2.13)$$

де $\hbar = \frac{h}{2\pi} \approx 1,05457180 \times 10^{-34}$ Дж·с – стала Дірака (зведена стала Планка).

Це твердження справедливе не лише щодо вимірювання, а й щодо теоретичної побудови квантового стану системи. Тобто, неможливо побудувати такий квантовий стан, в якому система одночасно характеризувалася б точними значеннями координати та імпульсу – чим точніше ми задаємо координату, тим менш точно нам відомий імпульс. Якщо навпаки, імпульс відомий точно, нічого не можна сказати про стан частинки в просторі. Через це електрон, протон чи будь-яку іншу частинку або фізичну систему, неможливо сфокусувати в просторі до розмірів менших за половину довжини хвилі. Аналогічна нерівність також пов'язує час (Δt) і енергію (ΔE) квантової системи: $\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$. (2.14)

Тобто, для того щоб абсолютно точно вказати енергію будь-якого стану квантової системи, необхідно, щоб цей стан існував нескінченно довго.

Отже, при описі мікрочастинок їх стан можна охарактеризувати лише з певною точністю. Можна сказати що опис носить імовірнісний характер. Тобто, про те, що дана квантово-механічна система знаходиться в тому чи іншому стані, можна говорити тільки з певною ймовірністю.

Кожній квантово-механічній системі можна поставити у відповідність хвильову функцію $\Psi(x, y, z, t)$, квадрат модуля якої $|\Psi(x, y, z, t)|^2$ представляє ймовір-

ність виявити частинку в деякій точці в даний момент часу, а сама хвильова функція Ψ представляє амплітуду ймовірності. Якщо стан квантово-механічної системи може реалізовуватися двома способами Ψ_1 і Ψ_2 , то її загальний стан може описуватися на основі суми хвильових функцій, якими характеризується система:

$$\Psi = \Psi_1 + \Psi_2. \quad (2.15)$$

Згідно ще одного положення квантової механіки – золотого правила Фермі, яке стверджує, що при квантово-механічних переходах виконується закон збереження енергії (енергія не виникає з нічого і не зникає в нікуди, а може лише перетворюватися з однієї форми на іншу), описується механізм випромінювання чи поглинання електромагнітної хвилі (світла) квантово-механічною системою, при якому: енергія кінцевого стану E_2 повинна дорівнювати сумі енергій початкового стану E_1 й поглинутого кванта ΔE або ж різниці енергій початкового стану й енергії випроміненого кванта: $E_2 = E_1 + \Delta E$, $E_1 = E_2 - \Delta E$. (2.16)

У цьому полягають основні припущення квантової механіки, які дозволяють пояснити і описати основні властивості і особливості квантових систем.

Таким чином, найважливішою властивістю атомів і молекул як квантово-механічних систем, що складаються з пов'язаних між собою мікрочастинок, є те, що останні можуть приймати лише певні дозволені (дискретні) значення енергії. Поряд з цим, згідно вдосконаленої планетарної моделі Бора, в атомі гідрогену (рис. 2.39) рух електрона навколо ядра відбувається по строго визначених "орбітах", при цьому, на довжині орбіти укладається ціле число довжин хвиль де

Бройля (рис. 2.40): $2 \cdot \pi \cdot r = n \cdot \lambda = n \cdot \frac{h}{p} = n \cdot \frac{h}{m \cdot v}$, де $n = 1, 2, 3, \dots$ (2.17)

При випромінюванні кванта світла, енергія атома гідрогену змінюється на величину $\Delta E = h \cdot \nu = \hbar \cdot \omega$, де $\omega = 2 \cdot \pi \cdot \nu$ – циклічна частота світла. Але енергія атома гідрогену може мати лише конкретні значення. Таким чином, атом гідрогену в найнижчому основному стані ($n=1$) не може випромінювати світло, бо не може зменшити своєї енергії. Якщо атом водню перебуває в першому збудженому стані ($n=2$), то при випромінюванні він може перейти лише в основний стан ($n=1$). При цьому енергія E_ϕ випроміненого кванту світла (фотона) дорівнює різниці $E_\phi = h \cdot \nu = \Delta E = E_2 - E_1$. Атом у другому збудженому стані ($n=3$) може перейти лише в основний стан ($n=1$) і перший збуджений ($n=2$) (рис. 2.38), і так далі. При поглинанні світла атомом гідрогену відбуваються схожі процеси. Атом в основному стані має енергію E_1 і може перейти в стани з енергією E_2 (E_3 , E_4 , ..., E_m). При цьому поглинаються виключно лише ті фони, які мають енергії $\Delta E = h \cdot \nu = E_m - E_1$. Таким чином, спектр поглинання й спектр випромінювання атома гідрогену складається із серії тонких ліній (рис. 2.40), які згущуються до певної частоти (межі серії), а на вищих частотах перетворюється на неперервний

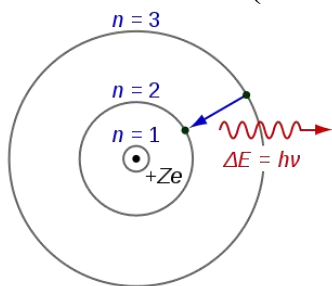


Рис. 2.38. Випромінювання електромагнітної хвилі

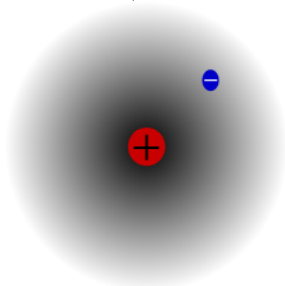


Рис. 2.39. Протон оточений електронною хмарою в атомі гідрогену

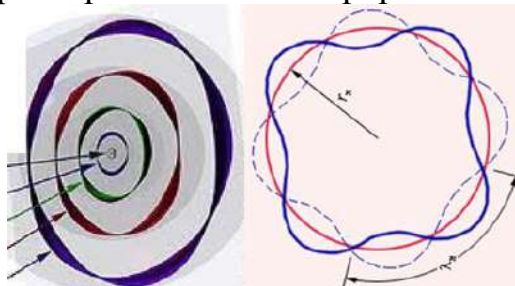


Рис. 2.40. Укладання цілого числа довжин хвиль де Бройля на довжині орбіти

спектр, оскільки високоенергетичні збудження відповідають іонізації атома, коли електрон, який відривається від ядра, може мати довільну енергію.

Лінійчатий спектр атома гідрогену та інших водневоподібних атомів і йонів (складаються з ядра та одного електрона – це важкі ізотопи водню (*дейтерій* ^2H , *третій* ^3H), та іони елементів з атомним номером $Z \geq 2$, які втратили всі електрони крім одного – He^+ , Li^{2+} , Be^{3+} та ін.) складається з ліній випромінювання з довжинами хвиль λ , які визначаються за формулою Рідберга:

$$\frac{1}{\lambda} = R \cdot Z^2 \cdot \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right), \quad (2.18)$$

де λ – довжина хвилі електромагнітної випромінювання (світла) у вакуумі; $R \approx 1,0974 \times 10^7 \text{ м}^{-1}$ – стала Рідберга для хімічного елемента, що розглядається; Z – атомний номер, або число протонів у ядрі атома даного елемента; n і $m > n$ – цілі числа (головні квантові числа). У спектрі атома гідрогену виділяють (рис. 2.41, 2.42): 1) серію Лаймана ($n=1$), яка розташована в ультрафіолетовій області спектру; 2) серію Бальмера ($n=2$), перші лінії якої лежать в оптичному діапазоні, а її межа ($\lambda=364,6 \text{ нм}$) розташована в ближньому ультрафіолеті; 3) серію Паашена ($n=3$), що (як і всі наступні серії) лежить на інфрачервоній ділянці спектру; 4) серію Брекета ($n=4$); 5) серію Пфунда ($n=5$); 6) серію Гемпфрі ($n=6$) та ін.

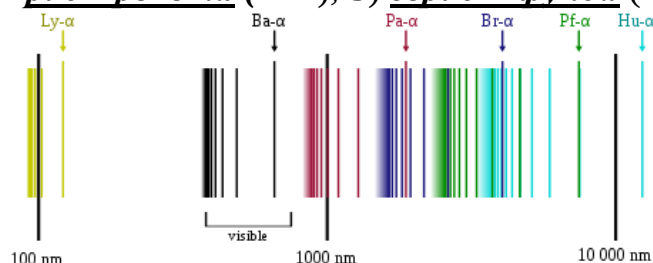


Рис. 2.40. Спектральні лінії атома водню

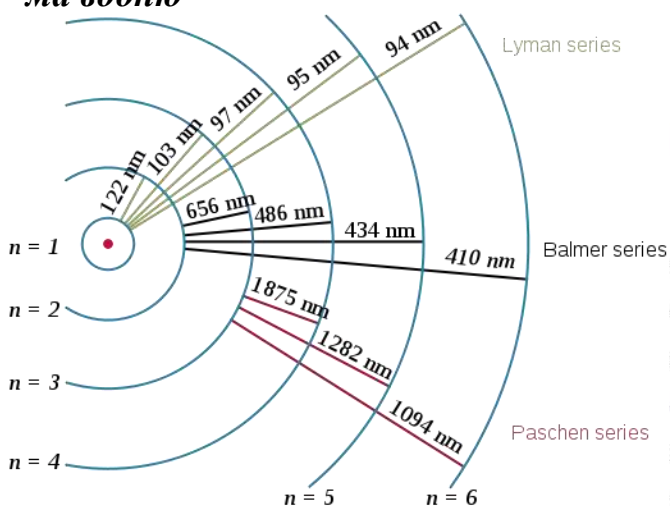


Рис. 2.41. Спектр електронних станів і відповідні довжини хвиль для атома гідрогену (водню)

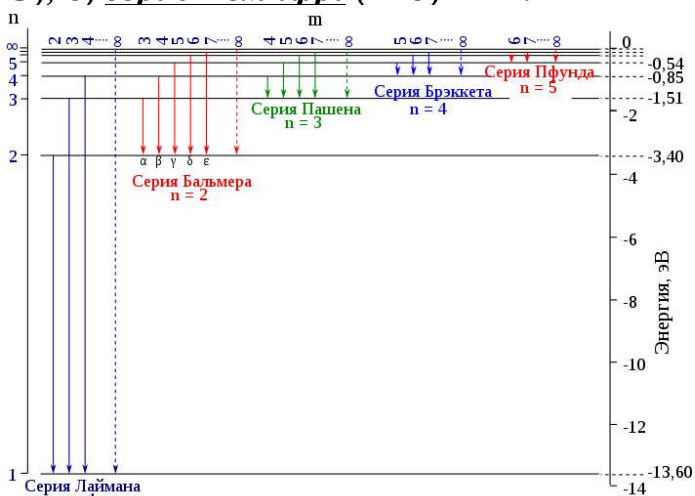


Рис. 2.42. Схема енергетичних рівнів атома водню і спектральні серії

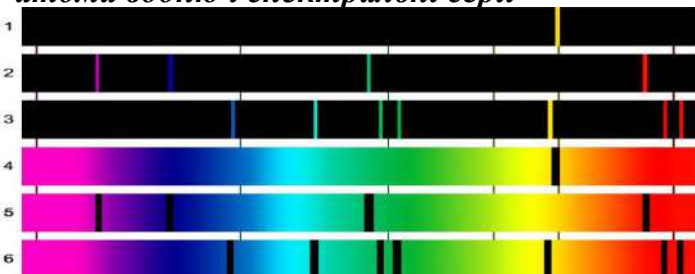


Рис. 2.43. Спектри випромінювання: 1 – натрію, 2 – водню, 3 – гелію. Спектри поглинання: 4 – натрію, 5 – водню, 6 – гелію

Основи зонної теорії твердого тіла

Зонна теорія твердого тіла – це квантово-механічна теорія руху електронів в твердому тілі. Вільні електрони можуть мати будь-яку енергію – їх енергетичний спектр безперервний. Однак, електрони, що належать ізольованим атомам, відповідно до квантово-механічних уявлень, мають певні дискретні значення енергії. У твердому тілі енергетичний спектр електронів суттєво інший, він складається з окремих дозволених енергетичних зон, розділених зонами заборонених енергій.

Для встановлення властивостей кристала необхідно знати характер взаємодії всіх його структурних елементів: атомів, іонів, молекул, атомних ядер, електронів. Зрозуміло, що точно описати таку взаємодію надзвичайно складно. Пам'ятаючи, що для вивчення фізичних властивостей кристалів насамперед треба мати відомості про стан валентних електронів у кристалі, слід розуміти, що це значно спрощує дану задачу, хоча й не дає можливості розв'язати її точно. Це так звана багатоелектронна задача, яку зводять до задачі про рух одного електрона у періодичному полі – усередненому і узгодженому полі всіх ядер та електронів. Використовуючи наближення сильно зв'язаних електронів, в основі якого лежить припущення, що енергія зв'язку електрона з атомами твердого тіла значно більша їх кінетичної енергії переміщення в кристалічній решітці. Для якісного уявлення про походження енергетичних рівнів електронів в твердих тілах розглянемо уявний процес утворення кристала шляхом зближення атомів, енергетичні рівні яких відомі.

Нехай спочатку є N ізольованих однакових атомів якої-небудь речовини. Кожен електрон будь-якого атома володіє одним з дозволених значень енергії, тобто займає один з дозволених енергетичних рівнів. Електрони підкоряються принципу заборони Паулі так, що на кожному енергетичному рівні може перебувати не більше двох електронів з протилежними спінами. Уявлятимемо утворення кристала шляхом послідовного приєднання атомів до довільно вибраного атома. Розглянемо, що відбувається з кожним із двох довільно вибраних енергетичних рівнів, наприклад p і s 1-го атома (рис. 2.44) при наближенні до нього 2-го атома. Коли атоми зближуватимуться настільки, що 1-й атом опиниться під дією помітних електричних і магнітних полів 2-го атома, то кожен енергетичний рівень (p і s) 1-го атома розділиться на два нові рівні (ефект Штарка). На енергетичній діаграмі один з нових енергетичних рівнів розташується вище, інший – нижче за початковий рівень енергії. З якісного боку розділення початкового атомного рівня на два рівні можна пояснити тим, що в системі з двох атомів змінився характер силових взаємодій між електронами і ядрами: разом з притяганням електронів до ядер атомів 1 і 2 з'явилося відштовхування між електронними оболонками атомів. Енергії взаємодії, що враховує притягання, відповідає нижче розташований рівень, оскільки зв'язок електрона зі своїм ядром ослаблюється, а енергії взаємодії, що враховує відштовхування, – вище розташований рівень.

Аналогічно у системі з трьох атомів початковий рівень атома 1 розщеплюється на три рівні, тому у системі з N атомів початковий рівень розщепиться на N рівнів, близьких за величиною, а кількість їх буде дорівнювати числу взаємодіючих атомів. Рівні енергії електрона в кристалі утворюють енергетичну зону, тобто повна енергія електрона в кристалі характеризується мінімальним і максимальним значеннями енергії. Величина розщеплювання для різних рівнів неоднакова. Рівні, заповнені в атомі ближчими до ядра (внутрішніми) електронами, розщеплюються менше, ніж рівні, заповнені валентними (зовнішніми) електронами.

Окрім розщеплювання рівнів при зближенні атомів, відбувається їх зміщення і розширення, так, що утворюються зони. Рівень опускається тим сильніше, чим вище він розташований в ізольованому атомі, оскільки із зростанням енергії розміри електронної хмарини збільшуються (рис. 2.44). Починаючи з деяких відстаней при зближенні атомів між електронними оболонками атомів виникають сили відштовхування, потенціальна енергія взаємодії електронів стає позитивною та швидко зростає, що призводить до підйому рівня енергії. При малих відстанях між атомами може відбутися перекривання зон (рис. 2.44), що відповідають

двом сусіднім рівням атома. Кількість рівнів у такій зоні, що злилася, дорівнює сумі рівнів, на які розщеплюються обидва рівні атома.

Енергетична зона або сукупність декількох енергетичних зон, що перекриваються, котрі утворилися в результаті розщеплювання з якого-небудь одного або декількох енергетичних рівнів ізольованих атомів при об'єднанні їх в кристали, називається дозволеною зоною. Інтервали значень енергії, якими не може володіти електрон в ідеальному кристалі, називається забороненою зоною. Ширина забороненої зони – це різниця енергій між нижнім рівнем однієї дозволеної зони і верхнім рівнем сусідньої дозволеної зони.

Ширина енергетичних зон залежить від відстані між атомами (постійної кристалічної решітки) і не залежить від розміру кристала. Із зростанням енергії ширина дозволених зон збільшується, відповідно до цього ширина заборонених зон – зменшується. Зміна міжатомних відстаней може приводити інколи як до звуження забороненої зони, так і до її розширення залежно від конкретного ходу кривих на схемі енергетичних зон та унаслідок змін області покриття хвильових функцій електронів. Тому вплив зовнішнього тиску, що позначається на міжатомних відстанях, іноді приводить до розширення забороненої зони, а іноді – до її звуження. У разі зон, що не перекриваються, ширина забороненої зони із збільшенням тиску зменшується, а у разі зон, що перекриваються, збільшується. Необхідно відмітити, що енергетична зона не має ніяких просторових розмірів, вона є лише фізичним поняттям, згідно якому електрони твердого тіла можуть володіти набором енергій в певних межах.

Електрони в твердому тілі знаходяться або на орбітах своїх атомів, або в просторі між атомами. У кристалі атоми зближуються настільки, що електронні хмари валентних електронів перекриваються, тому електрони набувають здатності переходити від одного атома до іншого шляхом тунельного просочування крізь потенціальний бар'єр, що розділяє атоми.

На рис. 2.45. приведений енергетичний спектр електронних станів у кристалі разом з потенціальними кривими, що виражають залежність потенціальної енергії електрона від відстані його від ядра. Атоми відокремлені один від одного потенціальними бар'єрами шириною d_0 . Висота бар'єрів для електронів, що перебувають на різних рівнях, різна й дорівнює $E-U$ (E – повна енергія електрона на різних рівнях, U – максимальна потенціальна енергія електрона, яка дещо нижча за максимальне значення E_c дозволеної зони для валентних електронів). Потенціальний бар'єр перешкоджає вільному переходу електронів від одного атома до іншого, якщо їх енергетичні рівні лежать нижче рівня U .

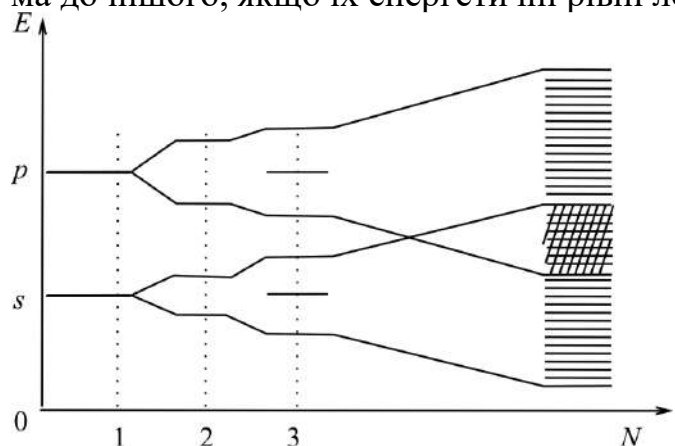


Рис. 2.44. Розщеплення атомного енергетичного рівня в системі зв'язаних атомів

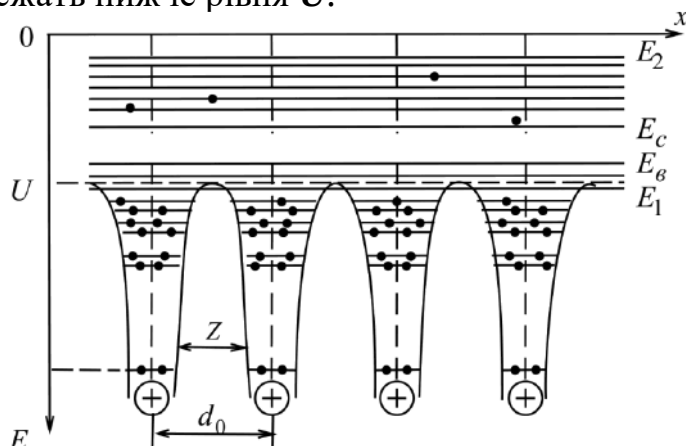


Рис. 2.45. Одновірний вигляд енергетичного спектра електронних станів у валентному кристалі

Валентні електрони, рівні яких лежать вище рівня U , здатні практично безперешкодно переходити від одного атома до іншого та вільно рухатись кристалом.

Те ж саме можна сказати і про електрони, що потрапляють в дозволону зону, рівні якої не зайняті електронами і лежать вище рівня U .

Якщо енергія електрона менша потенціального бар'єру U , то в класичній теорії перехід через такий бар'єр неможливий, оскільки кінетична енергія електрона повинна бути позитивною. Квантова ж теорія розглядає можливість проходження електрона від атома до атома крізь потенціальний бар'єр без зміни повної енергії E унаслідок тунельного ефекту. Суть його полягає в тому, що за наявності двох і більше близько розташованих потенціальних ям є визначена, не рівна нулеві ймовірність знаходження електрона в будь-якій з них. Ймовірність тунельного ефекту для валентних електронів значно більша, ніж для електронів внутрішніх електронних шарів. З цього слідує, що валентні електрони в кристалі не локалізовані у межах певного атома, а переходять від одного атома до іншого. Час його перебування у вузлі кристалічної решітки має порядок 10^{-15} с. Перехід валентного електрона від одного атома до іншого відбувається без зміни його енергії.

При утворенні кристала має місце не тільки зменшення висоти потенціального бар'єру між атомами, але й відбувається зміна енергетичних рівнів електронів у атомах. Оскільки електрон в ізольованому атомі у стаціонарному стані може перебувати як завгодно довго, то на основі співвідношення невизначеностей $\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar$ дійдемо висновку, що ширина енергетичного рівня для стаціонарного стану як завгодно мала. Відомо, що для збудженого стану електрона ($\Delta t \approx 10^{-8}$ с) ізольованого атома $\Delta E \approx 10^{-7}$ eV ($1 \text{ eV} = 1,602176634 \cdot 10^{-19}$ Дж). Ширина ж енергетичного рівня в кристалі $\Delta E \geq \frac{\hbar}{\Delta t} \approx 1 \text{ eV}$ ($\Delta E = h\nu$, де $h \approx 6,626 \cdot 10^{-24}$ Дж·с $\approx 4,136 \cdot 10^{-15}$ eV·с – стала

Планка, ν – частота коливань). Звідки слідує, що енергетичний рівень електрона при утворенні кристала з окремих атомів розщеплюється в енергетичну смугу або енергетичну зону. Розщеплення в зону зазнають не лише стаціонарні, але й збуджені енергетичні рівні. Таким чином замість системи дискретних рівнів енергії, якими характеризуються окремі атоми, у кристалі з'являється система енергетичних зон, ширина яких не залежить від зовнішніх розмірів кристала, а визначається природою кристалу. Однак, густина розташування енергетичних рівнів в кожній зоні залежить від розмірів твердого тіла. Чим більше атомів містить кристал, тим густіше розташовуються рівні в зоні. Якщо врахувати, що 1 см^3 твердого тіла містить близько 10^{22} атомів, то при ширині валентної зони в 1 eV рівні у ній розташовуються на відстані 10^{-22} eV. В твердому тілі значних розмірів енергетичні рівні в зонах розташовані практично неперервно. Однак той факт, що число рівнів в зоні є все ж таки кінцевим, відіграє важливу роль у визначенні характеру розташування електронів за станами.

Графік залежності $E(k)$ у найпростішому випадку для одномірного кристалу (рис. 2.46) утворюється сукупністю суцільних ліній, які показують квазінеперервну змінну енергію дозволених зон та ліній пунктирних, що представляють заборонені зони. Кожна із дозволених зон утворюється близько розташованими дискретними рівнями, кількість яких дорівнює числу атомів у зразку кристала. Область k -простору, всередині якого енергія електрона в кристалі змінюється квазінеперервно, називається зоною Бріллюена. На межі цих зон енергія зазнає розриву.

Заповнення енергетичних зон електронами

При абсолютному нулі енергія кристала повинна бути мінімальною, при цьому вважається, що рівні заповнюються в порядку зростання їх енергій. При за-

повненні електронами енергетичних рівнів у зонах враховується принцип Паулі. При цьому можливі два випадки: 1) якщо рівень енергії електрона, при розщепленні якого утворилась дана зона, заповнений в цьому атомі одним електроном або порожній, то й відповідна зона буде наполовину або цілком незаповненою; 2) якщо ж відповідний рівень в атомі заповнений двома електронами, то зона повністю заповнена.

У разі ж перекриття зон, число рівнів в зоні буде більшим кількості електронів на рівнях і зона виявляється частково заповненою. У разі виродження на кожному енергетичному рівні може перебувати два електрони.

Дозволена зона, в якій при абсолютному нулі температури всі енергетичні рівні зайняті електронами, називається заповненою зоною. Верхня, із заповнених зон (зона найбільших енергій), називається валентною зоною E_v . Найвищий заповнений енергетичний рівень (валентної зони) при $T=0\text{ K}$ називається рівнем Фермі. Іноді й валентна зона може бути лише частково заповнена електронами, якщо на останньому зайнятому рівні в атомі знаходиться тільки один електрон або має місце перекривання зон. Дозволена зона, в якій відсутні електрони при абсолютному нулі температури, називається вільною зоною (зоною провідності) E_c .

За характером заповнення зон електронами при абсолютному нулі температури всі тверді тіла можна розділити на три класи (рис. 2.47):

1) тіла, що мають тільки цілком заповнені та абсолютно вільні енергетичні зони (рис. 2.47, а);

2) тіла, у яких над цілком заповненими нижніми зонами є зона з частково заповненими нижніми енергетичними рівнями (рис. 2.47, б);

3) тіла з повністю заповненою верхньою зоною, яка перекривається з розташованою над нею вільною зоною (рис. 2.47, в).

Розподіл електронів за рівнями, як і розподіл вільних електронів, підкоряється квантовій статистиці Фермі-Дірака, що враховує принцип заборони Паулі.

Вона стверджує, що ймовірність $f\left(\frac{dn}{n}\right)$ заповнення електронами даного рівня визначається співвідношенням

$$f = \frac{1}{\exp\left(\frac{E - F}{k_B T}\right) + 1}, \quad (2.19)$$

де f – функція Фермі, $k_B \approx 1,381 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К} \approx 8,617 \cdot 10^{-5} \text{ еВ/К}$ – стала Больцмана, E – енергія електрона, F – рівень Фермі, T – абсолютна температура. Функція Фермі має зміст тільки для тих значень енергії електрона, де є рівні, дозволені для електронів. Для з'ясування фізичного змісту рівня Фермі розглянемо властивості

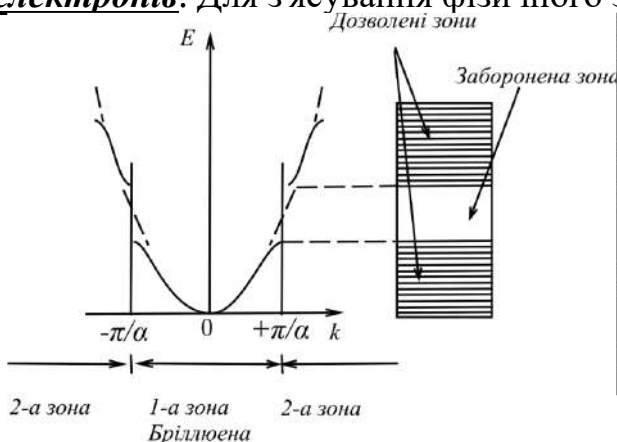


Рис. 2.46. Зони Бріллюена для випадку одномірного кристалу

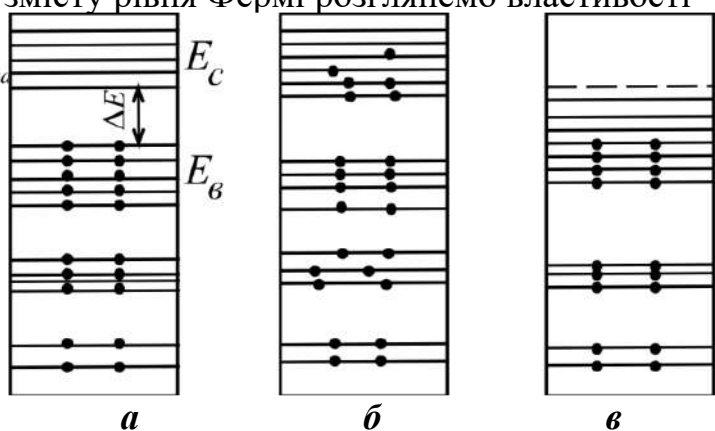


Рис. 2.47. Можливі варіанти заповнення зон у кристалах

функції Фермі. При абсолютному нулі ($T=0$) всі енергетичні рівні, що лежать нижче рівня Фермі, зайняті електронами, оскільки при $E < F$ ймовірність заповнення дорівнює одиниці ($f=1$), а рівні, що лежать вище рівня Фермі ($E > F$), – вільні, оскільки $f=0$. Рівень Фермі є енергетичним рівнем, ймовірність заповнення якого при температурі, відмінній від абсолютного нуля, дорівнює $f=0,5$. При $T > 0$ частина електронів в результаті теплового руху перейде в стани з енергією, яка більша енергії Фермі ($E > F$), й відповідно частина станів, що знаходяться нижче рівня Фермі, виявиться вільною. В цьому випадку число часток, що перейшли на більш високі енергетичні рівні, буде рівне кількості утворених вільних станів в області $E < F$. Фізично рівнем Фермі є електрохімічний потенціал електронного газу з розрахунку на один електрон, тобто робота, яку необхідно затратити для зміни числа електронів в газі на 1 при умові сталості об'єму та температури.

Класифікація твердих тіл за зонною теорією

Залежно від ступеня заповнення валентної зони електронами і ширини забороненої зони всі тверді тіла поділяють на ізолятори (діелектрики), провідники та напівпровідники.

Тверді тіла, що мають при абсолютному нулі температури цілком заповнену валентну зону (E_v) і ширину забороненої зони E_g або $\Delta E > 3 \text{ eV}$ (рис. 2.48, а), називаються діелектриками. Тіла, що мають зону провідності (E_c) з частково заповненими нижніми енергетичними рівнями або перекриття зон та ширину забороненої зони, близьку до нуля, називаються провідниками (рис. 2.48, б, в). Тіла, що мають при $T=0 \text{ K}$ повністю заповнені валентні зони і ширину забороненої зони E_g не більше 3 eV (рис. 2.48, г), називаються напівпровідниками. Існують також безщільні напівпровідники, у яких $E_g=0$ (наприклад HgTe і HgSe).

В діелектриках зовнішнє електричне поле, якщо воно не досить велике, не в змозі спричинити електричний струм, оскільки всі рівні валентної зони зайняті, а поле не здатне підняти електрони у вище розміщену вільну зону. У провідниках (металах) навіть слабе зовнішнє електричне поле здатне перевести електрони на сусідні вільні верхні рівні в одній енергетичній зоні, при цьому з'являється переважний рух електронів проти поля, що зумовлює виникнення електроструму.

У напівпровідниках при температурі, відмінній від нуля, або при їх освітленні деяке число електронів, розташованих біля верхньої межі заповненої валентної зони, може набути енергію, достатню для подолання забороненої зони, і перейти у вільну зону. При цьому у валентній зоні звільняються деякі рівні та вини-

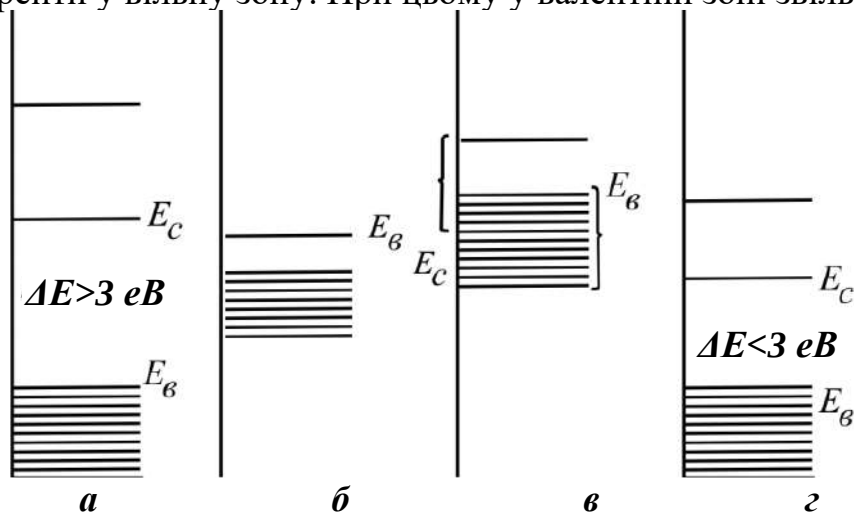


Рис. 2.48. Енергетичні зони діелектрика (а), провідника (б, в) та напівпровідника (г)

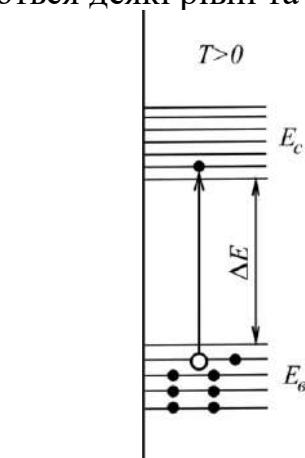


Рис. 2.49. Утворення електрона як вільного носія заряду на зонній діаграмі напівпровідника

кають дірки (дірка – це незайнятий електроном енергетичний стан у валентній зоні), а вільна зона перетворюється на частково заповнену зону (рис. 2.49). Вільна зона, на рівнях якої при збудженні (наприклад, при термічному, оптичному тощо) можуть знаходитися електрони, називається зоною провідності. Зазвичай зоною провідності є нижня вільна зона. При прикладанні зовнішнього поля до напівпровідника електрони в зоні провідності й електрони валентної зони, в якій є вільні рівні, можуть змінювати свої енергетичні стани і створювати струм.

Домішкові рівні у напівпровідниках

Енергетичні спектри, зображені на рис. 2.47-2.49, є характерними для кристалів з ідеальними періодичними решітками. У реальних кристалах існують порушення періодичності кристалічної решітки, спричинені різного роду дефектами: домішковими атомами в вузлах та міжвузлях, пустими вузлами в решітках (вакансіями), атомами або іонами основної речовини, що знаходяться в міжвузлях, тріщинами, дислокаціями, двомірними дефектами та об'ємними порушеннями.

Якщо в кристалі є дефекти, то електричне поле, що створюється ними, може захопити електрон, подібно до того як електрон захоплюється вільними іонами. Такий локалізований поблизу дефекту електрон має енергію, що може відповідати деякому значенню енергії забороненої зони, а в енергетичному спектрі кристала з'являється дискретний спектр локальних рівнів у забороненій зоні. Локальними ці рівні називаються тому, що вони виникають не у всіх кристалічних решітках, а тільки в місцях розташування дефектів.

Локальні рівні спричиняють істотний вплив на характер явищ, що відбуваються в напівпровідниках і діелектриках: електропровідність, фотоефект, люмінесценцію, оптичне поглинання й інше. Для металів же дефекти решіток (локальні рівні) є додатковими центрами розсіювання електронів і впливають лише на рухливість вільних носіїв заряду. Утворені дефектами локальні рівні у нормальному стані можуть бути вільними або зайнятими електронами.

Дефект кристалічної решітки, у якому в незбудженому стані локальний рівень зайнятий і при збудженні здатний віддати електрон в зону провідності, називається донором, а домішка, атоми якої є донорами, називається донорною домішкою. Дефект решітки, в якому при незбудженому стані існує незайнятий локальний рівень, а при збудженні здатний захопити електрон з валентної зони, називається акцептором, а домішка, атоми якої є акцепторами, називається акцепторною домішкою. Як приклади, розглянемо кристал кремнію (Si) з домішкою арсену (As) та з домішкою алюмінію (Al) (рис. 2.50). Уявимо, що один із вузлів в кристалі Si заміщений атомом As, що має п'ять валентних електронів (рис. 2.50, а). Чотири з них братимуть участь в утворенні ковалентного зв'язку з найближчими сусідніми атомами кремнію. П'ятий електрон, не приймаючи участі в утворенні парно-електронного зв'язку, взаємодіятиме з атомами кремнію, і в результаті він виявляється порівняно слабо пов'язаним з іоном арсену силами кулонівської взаємодії. Щоб відірвати його від атома арсену і перетворити на вільний носій заряду, потрібна значно менша кількість енергії, ніж для вивільнення електрона з валентного зв'язку (зони). А це означає, що донорні рівні E_D , на яких знаходиться електрони, повинні розташовуватися в забороненій зоні поблизу дна зони провідності. При дуже низьких температурах надлишкові електрони перебувають на цих рівнях, але вже при незначному підвищенні температури отримують достатню енергію для переходу в зону провідності. Мінімальна енергія, яку необхідно надати електрону, що знаходиться на донорному рівні, щоб перевести його в зону провідності, називається енергією іонізації донора (ΔE_D) (рис. 2.50, а).

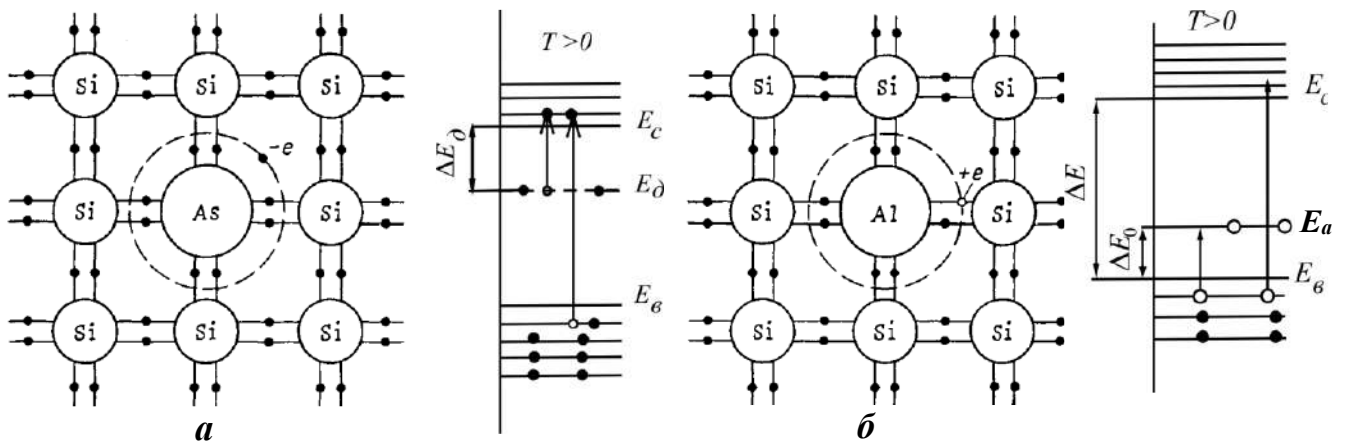


Рис. 2.50. Утворення вільних електронів у Si з донорною домішкою As (а) та у Si з акцепторною домішкою Al (б). Праворуч від площинних моделей кристалів приведені відповідні зонні енергетичні діаграми

У випадку **акцепторної домішки** один з вузлів решітки **Si** заміщений атомом **Al** – елементом третьої групи періодичної системи (рис. 2.50, б). В цьому випадку у домішкового атома не вистачає одного електрона для заповнення валентного зв'язку з атомом кремнію, розташованого поряд з акцепторною домішкою. При невеликому тепловому збудженні електрон одного із сусідніх валентних зв'язків кремнію може перейти в цей вільний зв'язок атома алюмінію, тому **з'являється дірка у валентній зоні**. Оскільки перехід електронів з валентних зв'язків **Si** до атома **Al** не вимагає великих енергій у порівнянні з енергією вивільнення електрона в зону провідності, то введення атома алюмінію в кристалічну решітку кремнію призводить до появи **вільного акцепторного рівня E_a поблизу стелі валентної зони**, який заповнюється одним з валентних електронів валентної зони **при невеликому підвищенні температури, освітленні** або **при дії інших випромінювань**. Мінімальна енергія, яку необхідно надати електрону валентної зони, щоб перевести його на акцепторний рівень, називається **енергією іонізації акцептора (ΔE_a)**.

У напівпровідниках можуть одночасно знаходитися як домішки донорного типу, здатні давати електрони у вільну зону, так й акцепторного типу, здатні приєднувати електрони, що перейшли з валентної зони або з донорних рівнів (рис. 2.51). Електрони із зони провідності й дірки з валентної зони можуть переходити на локальні рівні домішкових центрів. Зникнення електрона або дірки внаслідок переходу його на локальний рівень дефекту кристалічної решітки називається **захопленням носія заряду**. Якщо захоплений електрон через деякий час викидається тепловим рухом назад в зону провідності, а захоплена дірка – у валентну зону, то таке захоплення електрона або дірки називається **прилипанням**. Якщо ж в результаті захоплення зникає пара електрон-дірка, то це називається **рекомбінацією**.

Якщо домішкові атоми розташовані достатньо далеко один від одного, так що не взаємодіють між собою, то вони утворюють **локальні домішкові рівні** електронів, розташовані в забороненій зоні. Ці рівні **не розщеплені**. Однак **при достатньо високих концентраціях атомів домішки** необхідно враховувати їх взаємодію, при цьому хвильові функції електронів сусідніх домішкових атомів помітно перекриваються, а **рівні домішкових атомів розщеплюються** і утворюють **домішкову зону рівнів**. **При великих концентраціях домішок домішкова зона, розширюючись, може перекриватися із зоною провідності або з валентною зоною** (рис. 2.52). Крім того, **у напівпровідниках при збільшенні концентрації домішки має місце зниження енергії іонізації домішкових центрів**. При достатньо великих концентраціях атомів домішки **енергія іонізації їх**

наближається до нуля. У найпоширеніших елементарних напівпровідниках германію та кремнію з донорними домішками елементів V групи це відбувається при концентраціях 10^{23} м^{-3} і 10^{24} м^{-3} відповідно.

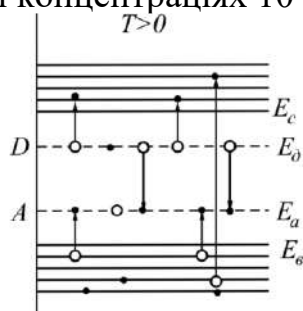


Рис. 2.51. Утворення вільних носіїв заряду у напівпровідниках, що мають домішки донорного й акцепторного типу

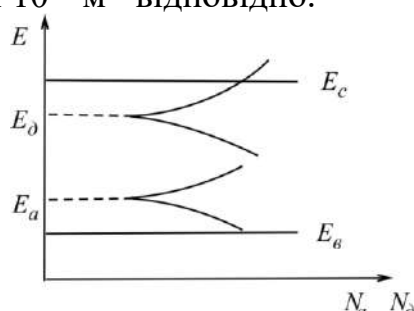


Рис. 2.52. Злиття донорної та акцепторної зони з зоною провідності й валентною зоною при збільшенні концентрації домішок.

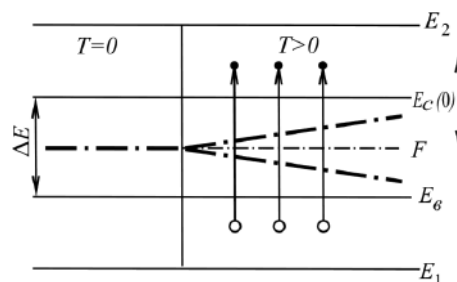


Рис. 2.53. Положення рівня Фермі у власних напівпровідниках

2.4. Власна і домішкова провідність, фотопровідність напівпровідників

Напівпровідник, що не містить донорів і акцепторів, називається власним. Напівпровідник, що має донорні та/або акцепторні домішки, називається домішковим. Домішковий напівпровідник, в якому концентрація іонізованих донорів і акцепторів рівна за величиною, називається скомпенсованим.

Існує два типи напівпровідникових речовин: іонні й електронні. У іонних напівпровідниках струм переноситься іонами речовини, внаслідок чого склад і структура іонного напівпровідника змінюється при проходженні через нього електричного струму. В електронних напівпровідниках електропровідність обумовлена переміщенням електронів, тому перенесення речовини при проходженні струму не відбувається. До електронних напівпровідників відноситься величезна кількість різних речовин: 13 простих речовин (елементарні напівпровідники) — Бор (B), Карбон (C), Силіцій (Si), Фосфор (P), Сірка (S), Германій (Ge), Арсен (As), сіре Олово (α -Sn), Стибій (Sb), Бісмут (Bi), Телур (Te), Селен (Se), Йод (I). Напівпровідниковими властивостями володіють багато бінарних сполук: $A^I B^{VII}$ — AgCl, CuBr та ін.; $A^{II} B^{VI}$ — CdSe, CdTe, ZnS, CdS, HgTe, ZnSe та інші; $A^{III} B^V$ — GaP, GaSb, GaAs, InP, InSb, AlSb та ін.; $A^{IV} B^{IV}$ — PbS, PbSe, PbTe, SnS, SnTe та ін.; а також багатокомпонентні тверді розчини — InGaSb, PbSnTeSe, CdMnZnTe тощо.

У напівпровідниках при $T=0 \text{ K}$ і за відсутності інших зовнішніх дій електрони і дірки провідності відсутні. При підвищенні температури напівпровідника (або при будь-якому іншому способі збудження) починаються переходи електронів з донорних рівнів в зону провідності, з валентної зони на акцепторні рівні або з валентної зони в зону провідності. При цьому виникають електрони провідності та дірки провідності, а при прикладанні зовнішньої напруги до напівпровідника в колі з'являється струм. Електропровідність напівпровідника, обумовлена генерацією пар (виникненням пари електрон провідності — дірка провідності в результаті дії теплоти, світла, електричного поля, іонізуючого випромінювання і т. д.), називається власною електропровідністю. Вільні носії заряду, які утворюються завдяки переходу електронів з валентної зони в зону провідності напівпровідника, називаються власними носіями (рис. 2.49).

Електропровідність напівпровідника, обумовлена іонізацією атомів донорної та/або акцепторної домішок (при будь-якому способі збудження), назива-

ється домішковою електропровідністю, а вільні носії заряду, які утворюються завдяки переходу електронів з донорних рівнів в зону провідності або з валентної зони на акцепторні рівні, називаються домішковими носіями (рис. 2.50).

Питома електропровідність власного напівпровідника (власна електропровідність) складається з електронної та діркової провідності й обчислюється за формулою:

$$\gamma = q_0 \cdot n_i \cdot (u_n + u_p), \quad (2.20)$$

де n_i – концентрація вільних електронів, яка для власного напівпровідника дорівнює концентрації вільних дірок; u_n , u_p – відповідно рухливості електронів і дірок (тобто середня швидкість їх переміщення вздовж електричного поля при напруженості $E = 1 \text{ В/м}$).

У напівпровідниках з донорною домішкою в інтервалі низьких температур, коли середня енергія теплових коливань кристалічної решітки $k_B \cdot T \ll E_g$, переходами електронів з валентної зони в зону провідності можна нехтувати і вважати, що всі електрони провідності з'являються внаслідок іонізації донорної домішки. У цьому випадку концентрація вільних електронів переважає над концентрацією вільних дірок ($n \gg p$), а електропровідність такого напівпровідника обумовлена в основному переміщенням електронів провідності – електронна провідність (n-типу). При низьких температурах для питомої електропровідності напівпровідника з донорною домішкою можна записати: $\gamma = q_0 \cdot n_i \cdot u_n$. (2.21)

У напівпровідниках з акцепторною домішкою при низькій температурі переважає концентрація вільних дірок над концентрацією вільних електронів ($p \gg n$), а електропровідність їх в основному обумовлена переміщенням дірок провідності – діркова електропровідність (p-типу). При низьких температурах для питомої електропровідності напівпровідника з акцепторною домішкою можна записати:

$$\gamma = q_0 \cdot n_i \cdot u_p. \quad (2.22)$$

При вищих температурах в домішкових напівпровідниках помітно зростає й концентрація власних носіїв заряду, тому їх провідність обумовлюється власними і домішковими носіями заряду. Для домішкової електропровідності характерна досить помітна залежність від концентрації домішок. Наприклад, при зміні концентрації домішки в Ge в 30 разів, домішкова електропровідність змінюється в 10^7 разів. Домішкові носії заряду в напівпровідниках можуть створюватися і різного роду дефектами. Наприклад, атом Si в міжвузлях діє як донор, а пустий вузол – як акцептор. Якщо в домішковий напівпровідник, що володіє електронною електропровідністю, ввести акцепторні домішки, то вони захоплюватимуть електрони, зменшуючи тим самим концентрацію домішкових носіїв заряду. Те ж саме відбувається і при введенні донорних домішок в домішковий напівпровідник з дірковою електропровідністю.

Електрони і дірки провідності можуть бути основними або неосновними носіями заряду. Рухомі носії заряду, концентрація яких в даному напівпровіднику переважає: електрони в напівпровіднику n-типу і дірки в напівпровіднику p-типу, називаються основними носіями заряду. Рухомі ж носії заряду, концентрація яких в даному напівпровіднику менша, ніж концентрація основних носіїв заряду: електрони в напівпровіднику p-типу і дірки в напівпровіднику n-типу, називаються неосновними носіями заряду.

У напівпровіднику при даній температурі в результаті теплого збурдження існує певна концентрація вільних носіїв заряду в умовах термодинамічної рівноваги з кристалічною ґраткою, як результат дії двох процесів, що конкурують між собою – генерації і рекомбінації рухомих носіїв заряду. Цій концентрації відповідає певне значення питомої електропровідності напівпровідника.

Концентрація рівноважних носіїв заряду і положення рівня Фермі у власному напівпровіднику

Напівпровідник є власним, якщо впливом домішок для нього можна знехтувати. В ньому вільні носії заряду виникають тільки за рахунок розриву валентних зв'язків, тому: $n_0 = p_0$. Це співвідношення виражає собою умову електронейтральності власного напівпровідника, по якій сумарний заряд всіх заряджених часток кристалу повинен бути рівний нулю. Ця вимога визначає положення рівня Фермі. Носії заряду, що генеруються тепловим рухом, називаються рівноважними. Рівноважна концентрація носіїв заряду – це концентрація рухомих носіїв заряду в напівпровідниках в умовах термодинамічної рівноваги. У власному напівпровіднику при деякій сталій температурі рівноважні концентрації електронів n і дірок p рівні та набагато менші кількості рівнів у енергетичних зонах. Тому електрони в зоні провідності займають енергетичні рівні поблизу її нижньої межі, а дірки у валентній зоні – поблизу її верхньої межі (рис. 2.53). Тому концентрації електронів n і дірок p у власному напівпровіднику визначаються концентрацією електронів біля дна зони провідності й концентрацією дірок поблизу верху валентної зони. Електрони дна зони провідності і дірки верху валентної зони підкоряються статистиці Фермі-Дірака. Запишемо функцію Фермі-Дірака, відраховуючи енергію електронів, що перебувають у зоні провідності вгору від дна зони провідності, прийнятої за нуль, а енергію дірок, що знаходяться у валентній зоні, – вниз від дна зони провідності. Для електронів та дірок відповідно одержимо:

$$f_n = \frac{1}{\exp\left(\frac{E - F}{k_B T}\right) + 1}; \quad f_p = 1 - f_n = \frac{1}{\exp\left(-\frac{E - F}{k_B T}\right) + 1}. \quad (2.23)$$

У власних напівпровідниках кількість електронів, що переходять у зону провідності, звичайно, значно менша кількості енергетичних рівнів в зоні провідності, тому лише мала частина рівнів зони провідності зайнята електронами, тобто $f_n \ll 1$.

Таким чином, електронний газ в зоні провідності та дірковий газ у валентній зоні є зазвичай газами невинродженими ($f_n \ll 1$), а відповідні напівпровідники називаються невинродженими напівпровідниками. Носії заряду в таких напівпровідниках підкоряються статистиці Максвелла-Больцмана. Із зростанням енергії E функція f_n досить швидко убуває. Якщо умова $f_n \ll 1$ у напівпровідниках не виконується, то стан називається винродженням. Для винродженого стану середня енергія електронів напівпровідника, як і металу, не залежить від температури. На відміну від винродженого стану в невинродженому напівпровіднику середня енергія електронів залежить від температури і зростає з її збільшенням.

Концентрації електронів в зоні провідності та дірок у валентній зоні визначаються виразами:

$$n = N_c \cdot \exp\left(\frac{F}{k_B T}\right), \quad p = N_v \cdot \exp\left(-\frac{\Delta E + F}{k_B T}\right), \quad (2.24)$$

де $N_c = 2(2\pi m_n^* k_B T)^{3/2} h^{-3}$, $N_v = 2(2\pi m_p^* k_B T)^{3/2} h^{-3}$ – ефективна густина станів відповідно в зоні провідності й у валентній зонах; m_n^* , m_p^* – ефективні маси електрона та дірки; E – енергія, відносно рівня E_c , умовно прийнятого за нуль; ΔE – ширина забороненої зони; F – рівень Фермі; f_n , f_p – функція Фермі-Дірака для електронів та для дірок. Якщо вважати, що $m_n^* = m_p^* = m_0$, то при $T = 300 \text{ K}$ – $N_c = N_v = 2,5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Це складає приблизно 1/2000 числа атомів в 1 см^3 .

Для власного напівпровідника $n = p$, тому:
$$F = -\frac{\Delta E}{2} - \frac{3}{4} k_B T \cdot \ln\left(\frac{m_n^*}{m_p^*}\right). \quad (2.25)$$

При $T = 0\text{ K}$, тобто при абсолютному нулі рівень Фермі у власному напівпровіднику розташовується посередині забороненої зони. З підвищенням температури рівень Фермі зміщується вгору до зони провідності, якщо $m_p^* > m_n^*$, або вниз до валентної зони, якщо $m_p^* < m_n^*$. Якщо ж $m_p^* = m_n^*$, то рівень Фермі при будь-якій температурі проходить посередині забороненої зони. Зазвичай $m_p^* > m_n^*$, тому рівень Фермі у власному напівпровіднику дещо зміщений відносно середини забороненої зони – він розташований ближче до зони провідності і при підвищенні температури зміщується вгору.

Визначимо власну концентрацію носіїв заряду ($n = p = n_i$):

$$n_i = \sqrt{np} = \sqrt{N_c \cdot N_v \cdot \exp\left(-\frac{\Delta E}{k_B T}\right)} = B \cdot \exp\left(-\frac{\Delta E}{2k_B T}\right), \quad (2.26)$$

де $B = (N_c \cdot N_v)^{\frac{1}{2}}$. Вираз (2.26) визначає температурну залежність концентрації носіїв заряду у власному напівпровіднику. Величина B слабо залежить від температури. Для багатьох напівпровідників з підвищенням температури ширина забороненої зони зменшується за лінійним законом: $\Delta E = \Delta E_0 - \alpha T$, (2.27) де ΔE_0 – ширина забороненої зони при 0 K ; α – постійний коефіцієнт для даного напівпровідника. Існують дві фізичні причини, що пояснюють температурну залежність ширини забороненої зони. Перша з них полягає в тому, що зі зміною температури змінюється амплітуда коливань атомів кристалічної решітки, унаслідок чого зі збільшенням температури ширина забороненої зони зменшується. Друга причина тісно пов'язана з першою та полягає в тому, що зміна температури призводить до зміни об'єму напівпровідника, тобто до зміни міжатомних відстаней. Ця обставина викликає у одного типу напівпровідника зі збільшенням температури звуження забороненої зони, в іншого – її розширення. Унаслідок одночасної дії цих фізичних чинників, що конкурують один з одним, остаточний ефект залежить від того, який з них переважає.

Якщо врахувати температурну залежність ширини забороненої зони напівпровідника, то для n_i отримаємо:
$$n_i = B \cdot \exp\left(\frac{\alpha}{2T}\right) \cdot \exp\left(-\frac{\Delta E}{2k_B T}\right). \quad (2.28)$$

Концентрація рівноважних носіїв заряду і положення рівня Фермі у домішковому напівпровіднику

У домішковому напівпровіднику в забороненій зоні є донорні та/або акцепторні рівні. Тому при визначенні положення рівня Фермі та концентрації носіїв заряду треба враховувати не тільки вільні носії, але й електрони на акцепторних і дірки на донорних рівнях. Імовірність заповнення домішкових рівнів електронами визначається функцією Фермі-Дірака:

$$f_n = \frac{1}{\exp\left(\frac{E_n - F}{k_B T}\right) + 1}, \quad (2.29)$$

де E_n – енергія електронів на домішкових рівнях.

Кількість електронів в одиниці об'єму на акцепторних рівнях, для яких енергія $E_n = E_a = -(\Delta E - \Delta E_a)$, може бути виражена $n_a = N_a \cdot f_p$, де N_a – кількість акцепторних рівнів (атомів) в одиниці об'єму. Аналогічно концентрація дірок на донорних рівнях для яких $p_d = N_d - n_d$, де N_d – кількість рівнів (атомів) донорної домішки в одиниці об'єму; n_d – кількість електронів в одиниці об'єму на донорних рівнях, для яких енергія $E_n = E_d = -\Delta E_d$, а $n_d = N_d \cdot f_n$. Виходячи з вимоги електричної нейтральності всього напівпровідника, сумарний заряд всіх заряджених частинок повинен бути рівним нулю, тому маємо: $n + n_a = p + p_d$. (2.30)

1. Донорний напівпровідник (n-типу). При низьких температурах можна нехтувати порівняно незначною кількістю переходів електронів з валентної зони в зону провідності й розглядати тільки перехід електронів з донорних рівнів в зону провідності. При цьому концентрація електронів в зоні провідності буде дорівнювати концентрації дірок на донорних рівнях ($n_n = p_d$).

Якщо концентрація вільних електронів n_n невелика $f_n \ll 1$, то концентрація електронів в зоні провідності донорного напівпровідника (n-типу) обчислюється аналогічно концентрації для власного напівпровідника за формулою (2.24), але

$$\text{з іншим значенням рівня Фермі: } n_n = N_c \cdot \exp\left(\frac{F_n}{k_B T}\right), \quad (2.31)$$

$$\text{аналогічно для дірок } p_d = N_d \cdot \exp\left(-\frac{\Delta E_d + F_n}{k_B T}\right). \quad (2.32)$$

Прирівнявши вирази (2.31) та (2.32), після логарифмування отримаємо:

$$F_n = -\frac{\Delta E_d}{2} + \frac{1}{2} k_B T \cdot \ln\left(\frac{N_d}{N_c}\right). \quad (2.33)$$

При $T=0 \text{ K}$, $\Rightarrow F_n = -\frac{\Delta E_d}{2}$ тобто при абсолютному нулі рівень Фермі в донорному напівпровіднику розташовується посередині між донорними рівнями і дном зони провідності (рис. 2.54). З підвищенням температури, поки $N_c < N_d$, рівень Фермі піднімається до дна вільної зони, а при вищих температурах, коли $N_c > N_d$, рівень Фермі опускається до середини забороненої зони. Останнє спостерігається тому, що при високих температурах починається помітний перехід електронів із валентної зони в зону провідності і зростає концентрація власних носіїв n_i . Область слабкої іонізації домішки ще називають областю виморожування.

Оскільки $n_n = p_d = n$, то $n^2 = n_n p_d$, тобто $n = \sqrt{n_n p_d}$ тому, підставивши значення n_n і p_d з виразів (2.31) і (2.32) у останню формулу, отримаємо співвідношення для визначення температурної залежності концентрації вільних електронів донорного напівпровідника при порівняно низьких температурах і частковій іонізації домішкових атомів:

$$n = \sqrt{n_n p_d} = \sqrt{N_c \cdot N_d} \cdot \exp\left(-\frac{\Delta E_d}{2k_B T}\right), \quad (2.34)$$

де величина виразу під коренем квадратним слабо залежна від температури порівняно з експоненціальним множником.

При вищих температурах, коли концентрація власних носіїв ще невелика ($n_i \ll N_d$), а всі електрони з донорних рівнів перейшли в зону провідності, то концентрація електронів в зоні провідності n стає рівною концентрації донорної домішки: $n = N_d$ при $k_B T > \Delta E_d$. Ця область температур носить назву області виснаження домішки (область повної іонізації домішки). В області виснаження домішки концентрація основних носіїв заряду (електронів) залишається постійною ($n = N_d$), концентрація ж неосновних носіїв заряду (дірок) різко зростає із зростанням температури згідно закону діючих мас, (добуток рівноважних концентрацій основних і неосновних носіїв в даному напівпровіднику дорівнює квадрату концентрації власних носіїв в цьому напівпровіднику):

$$np = n_i^2; \quad p = \frac{n_i^2}{n} = \frac{N_c N_d}{N_d} \exp\left(-\frac{\Delta E}{k_B T}\right). \quad (2.35)$$

При подальшому підвищенні температури разом із зростанням концентрації дірок буде рости концентрація електронів, поки не порівняється з концентрацією

р. У цьому випадку провідність напівпровідника з домішкової перетворюється на власну. Область температур, в якій концентрація носіїв заряду в напівпровіднику визначається термічною генерацією пар носіїв заряду і практично не залежить від дефектів кристалічної решітки, є областю температур власної електропровідності напівпровідників. Температура T_i переходу від виснаження домішки до власної провідності залежить від концентрації домішки для даного напівпровідника і від ширини забороненої зони. Перехід до власної провідності відбувається при тим вищій температурі, чим ширша заборонена зона і чим більша концентрація домішки, та чим менше значення ефективних мас носіїв заряду.

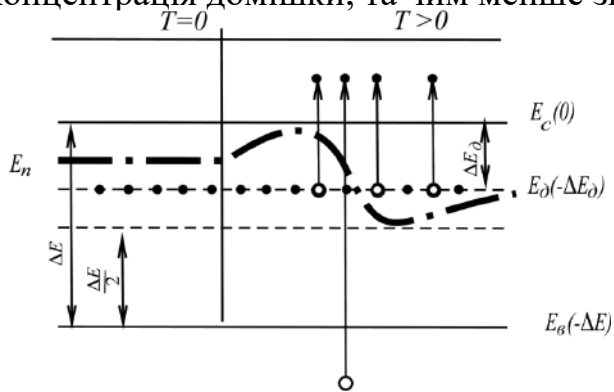


Рис. 2.54. Положення рівня Фермі в донорному напівпровіднику

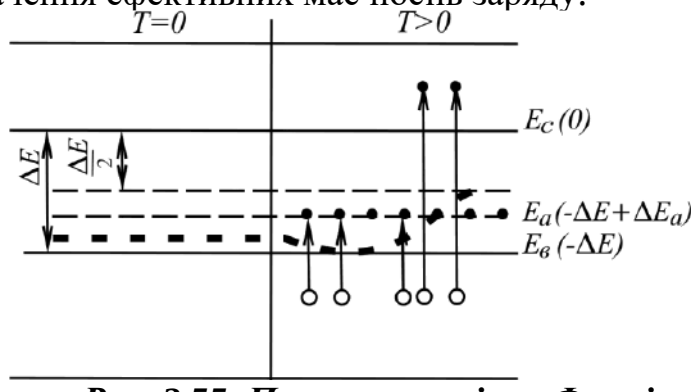


Рис. 2.55. Положення рівня Фермі в акцепторному напівпровіднику

2. Акцепторний напівпровідник (р-типу). При не досить високих температурах можна нехтувати порівняно слабким переходом електронів з валентної зони в зону провідності та розглядати тільки перехід електронів з валентної зони на акцепторні рівні E_a (рис. 2.55).

При цьому концентрація дірок у валентній зоні p_p дорівнює концентрації електронів на акцепторних рівнях n_a ($p_p = n_a$). Оскільки при низьких температурах кількість електронів на акцепторних рівнях мала, то у формулі (2.29) можна нехтувати одиницею в знаменнику і записати для концентрації електронів на акцепторних рівнях:

$$n_a = N_a \cdot f_p = N_a \cdot \exp\left(\frac{\Delta E - \Delta E_a + F_p}{k_B T}\right), \quad (2.36)$$

де F_p – рівень Фермі в напівпровіднику з дірковою провідністю.

Концентрація дірок у валентній зоні діркового напівпровідника при $f_p \ll 1$ обчислюється аналогічно концентрації для власного напівпровідника, але з іншим значенням рівня Фермі:

$$p_p = N_v \cdot \exp\left(\frac{E_v - F_p}{k_B T}\right) = N_v \cdot \exp\left(-\frac{\Delta E - F_p}{k_B T}\right). \quad (2.37)$$

Прирівнявши (2.36) і (2.37), прологарифмувавши і перетворивши отримаємо

$$F_p = -\left(\Delta E - \frac{\Delta E_a}{2}\right) - \frac{1}{2} k_B T \cdot \ln\left(\frac{N_a}{N_v}\right). \quad (2.38)$$

При $T=0 \text{ K} \Rightarrow F_p = -\left(\Delta E - \frac{\Delta E_a}{2}\right)$, а це значить, що при температурі абсолютного нуля рівень Фермі проходить посередині між акцепторними рівнями E_a і вершиною валентної зони E_v . З підвищенням температури ($T>0 \text{ K}$), поки $N_a > N_v$, рівень Фермі наближається ближче до стелі валентної зони, а при вищих температурах, коли $N_a < N_v$ – піднімається вгору і наближається до середини забороненої зони (рис. 2.55), оскільки при високих температурах починають відігравати роль переходи електронів з валентної зони в зону провідності.

Оскільки $p_p = n_a = p$, $p^2 = p_p \cdot n_a$, тоді $p = \sqrt{p_p \cdot n_a}$, а підставивши значення n_a і p_p з виразів (2.36) і (2.37), отримаємо співвідношення для температурної залежності концентрації вільних дірок акцепторного напівпровідника при порівняно низьких температурах і частковій іонізації акцепторних атомів:

$$p = \sqrt{n_a p_p} = \sqrt{N_a \cdot N_p} \cdot \exp\left(\frac{\Delta E_a}{2k_B T}\right). \quad (2.39)$$

При вищих температурах, але ще таких, що концентрація власних носіїв мала ($n_i \ll N_a$), всі акцепторні рівні заповнюються електронами, що перейшли з валентної зони (область виснаження домішки). В області виснаження домішки концентрація дірок p стає рівною концентрації акцепторної домішки: $p = N_a$ при $k_B \cdot T > \Delta E_a$, а концентрація електронів різко зростає із зростанням температури згідно закону діючих мас:

$$np = n_i^2; \quad n = \frac{n_i^2}{N_a} = \frac{n_i^2}{p} = \frac{N_c N_v}{N_a} \exp\left(\frac{\Delta E}{k_B T}\right). \quad (2.40)$$

Подальше підвищення температури призводить до виникнення все більшої кількості власних носіїв дірок та електронів, а при деякій температурі, коли $n = p$, провідність напівпровідника з домішкової перетворюється на власну.

Фотопровідність напівпровідників

Вільні носії заряду в напівпровідниках можуть створюватись не лише тепловою дією на них, а й іншими процесами: зіткненням зі швидкими електронами, α -частинками, іонізацією під дією світла та інших випромінювань. Оскільки вільні носії в цьому випадку виникають за рахунок безпосереднього поглинання енергії, то теплова енергія кристалічної решітки практично залишається незмінною. При цьому порушується теплова рівновага між решіткою та вільними носіями заряду. Електрони або дірки провідності (вільні носії заряду), котрі не перебувають у термодинамічній рівновазі, називаються нерівноважними носіями заряду. Кількість нерівноважних носіїв заряду зазвичай невелика, а запасена ними надлишкова енергія в порівнянні з енергією кристалічної решітки досить мала, тому накладання та зняття зовнішнього збудження не впливає на концентрацію рівноважних носіїв заряду, а повна концентрація носіїв заряду n - або p -типу дорівнює сумі концентрацій рівноважних (n_0, p_0) і нерівноважних ($\Delta n, \Delta p$) носіїв заряду:

$$n = n_0 + \Delta n; \quad p = p_0 + \Delta p. \quad (2.41)$$

При виникненні нерівноважних носіїв заряду змінюється повна концентрація носіїв заряду, а отже, і положення рівня Фермі. Аналогічно співвідношенням

$$(2.36), (2.37), \text{ можна записати: } n = N_c \cdot \exp\left(\frac{F_n^* - E_c}{kT}\right), \quad p = N_v \cdot \exp\left(\frac{E_v - F_p^*}{kT}\right), \quad (2.42)$$

де F_n^*, F_p^* – квазірівні Фермі для електронів і дірок відповідно. За відсутності термодинамічної рівноваги квазірівні Фермі відіграють ту ж роль, що й рівні Фермі в умовах рівноваги.

Виникнення нерівноважних носіїв заряду призводить до зміни провідності напівпровідника:

$$\gamma = \gamma_m + \Delta\gamma = q_0 \cdot (n_0 \cdot u_n + p_0 \cdot u_p) + q_0 \cdot (\Delta n \cdot u_n + \Delta p \cdot u_p), \quad (2.43)$$

де γ_m – темнова (без дії зовнішніх збуджувачів) провідність; $\Delta\gamma = q_0 \cdot (\Delta n \cdot u_n + \Delta p \cdot u_p)$ – нерівноважна провідність (фотопровідність).

Зміна електричного опору напівпровідника, що обумовлена виключно дією електромагнітного випромінювання і не пов'язана з його нагріванням, називається фоторезистивним ефектом або внутрішнім фотоефектом.

При поглинанні квантів енергії можливі три типи переходів, що призводять до появи фотопровідності (рис. 2.56):

1) перехід 1 (із валентної зони E_v в зону провідності E_c) відповідає власному поглинанню світла (основними атомами кристала), що приводить до утворення вільного електрона і вільної дірки на кожен поглинутий фотон (власна фотопровідність, $\Delta n = \Delta p$);

2) переходи 2 та 3 (переходи всередині зон) не призводять до зміни концентрації носіїв, але можуть змінювати їхню рухливість, а отже електропровідність;

3) перехід 4 (з домішкового рівня E_d у зону провідності E_c) відповідає поглинанню світла локальною недосконалістю в кристалі (наприклад, донорами), при цьому на кожний поглинутий фотон утворюється вільний електрон і дірка, пов'язана з відповідним центром;

4) перехід 5 (з валентної зони E_v на акцепторний рівень E_a) відповідає випадку, коли поглинутий фотон переводить електрон на незайнятий локальний рівень (акцепторний), унаслідок чого утворюється вільна дірка, і зв'язаний електрон.

Якщо нерівноважні носії заряду є неосновними, а їхня концентрація перевищує темнову концентрацію основних носіїв заряду, то при його освітленні змінюється тип провідності напівпровідника.

Для збудження власних атомів напівпровідника (перехід 1) фотон повинен володіти енергією $h \cdot \nu_1 \geq \Delta E$, де ΔE – енергія активації власних атомів; для збудження домішкових атомів (переходи 4 і 5) – $h \cdot \nu_4 \geq \Delta E_d$ та $h \cdot \nu_5 \geq \Delta E_a$, де ΔE_d і ΔE_a – відповідно енергія активації донорних і акцепторних атомів.

Максимальна довжина хвилі або червона межа фотопровідності, при якій фотони є ще фотоелектрично активними, тобто створюють вільні носії заряду, визначається співвідношеннями:

1) для власної фотопровідності:
$$\lambda_{\max} = \frac{c \cdot h}{\Delta E}, \quad (2.44)$$

2) для домішкової фотопровідності:
$$\lambda_{\max \text{ дом}} = \frac{c \cdot h}{\Delta E_{\text{дом}}}. \quad (2.45)$$

Іноді поглинання випромінювання в напівпровідниках викликає зменшення темної провідності. Таке явище називається негативним фоторезистивним ефектом або негативною фотопровідністю. Негативна фотопровідність спостерігається у ряді напівпровідникових матеріалів (*Se, AgBr, Cu₂O* й інших) за певних умов, обумовлених присутністю дефектів і домішок у напівпровідникових кристалах. Якісно явище негативної фотопровідності може бути пояснено наявністю двох локальних рівнів (рис. 2.57), розташованих поблизу дна зони провідності (1) і стелі валентної зони (2). Вони можуть бути утворені атомами домішок, атомами в

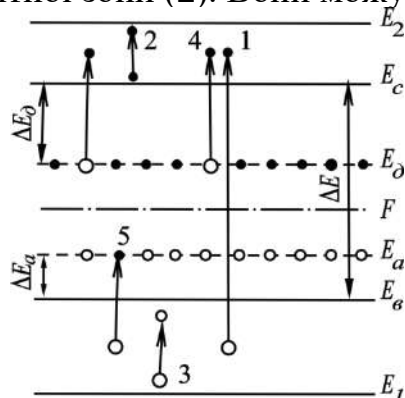


Рис. 2.56. Можливі переходи електронів у напівпровідникові при поглинанні квантів енергії

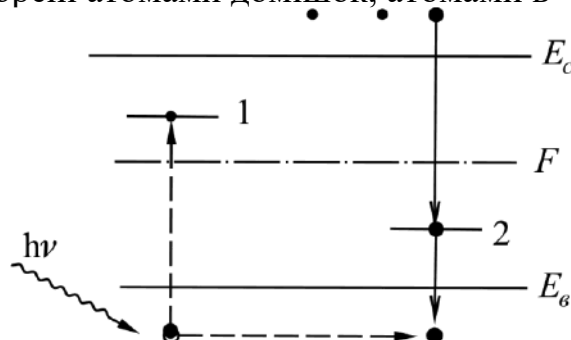


Рис. 2.57. До пояснення явища негативної фотопровідності

міжвузлях, вакансіями негативних іонів й іншими причинами. Нехай у напівпровідникові *n*-типу з темною рівноважною концентрацією електронів n_0 кванти світла з енергією $h \cdot \nu$ збуджують електрони валентної зони, переводячи їх на локальні рівні 1, розташовані між рівнем Фермі та зоною провідності. Якщо теплове збудження електронів з рівнів 1 відбувається повільніше, ніж рекомбінація електронів і дірок через рівень 2, а дірки не можуть безпосередньо рекомбінувати з електронами, що знаходяться на рівнях 1, і концентрація центрів 1 занадто мала, то рекомбінація електронів із зони провідності з дірками через рівні 2 приводить до зменшення темної концентрації n_0 . Концентрація вільних дірок при цьому збільшується повільніше, ніж зменшення концентрації вільних електронів. Тому при такому опроміненні світлом провідність напівпровідника зменшується.

Захоплення та рекомбінація носіїв заряду у напівпровідниках

Якщо електрони та дірки в результаті поглинання фотона стали вільними, то вони залишатимуться вільними до тих пір, поки не будуть захоплені яким-небудь дефектом кристалічної решітки або не приймають участь у створенні електричного струму.

Центри захоплення носіїв, можна розділити на дві групи: 1) центри прилипання, коли захоплений носій має вищу ймовірність перейти знову у вільний стан в результаті теплового збудження, ніж рекомбінувати з носієм протилежного знаку (рис. 2.58, а; 1 і 1' – діркові пастки, 2 і 2' – електронні пастки); 2) центри рекомбінації, коли захоплений носій має більшу ймовірність рекомбінувати з носієм протилежного знаку, ніж знову бути поверненим у стаціонарний стан (рис. 2.28, а: процес захоплення дірки 3 і електрона 4 центрами рекомбінації).

Найпростіші типи процесів рекомбінації показано на рис. 2.28, б: перехід 5 – вільний електрон рекомбінує безпосередньо з діркою (пряма рекомбінація); перехід 6 – електрон захоплюється збудженим центром, що захопив дірку; перехід 7 – дірка захоплюється збудженим центром, що захопив електрон. Рекомбінація може відбуватися й через центри захоплення: перехід 8 – електрон з домішкового центру попадає у валентну зону (захоплення дірки), а потім на рівень, що звільнився на домішковому центрі, попадає електрон із зони провідності; перехід 9 – домішковим центром спочатку захоплюється електрон, а потім дірка.

При рекомбінації носіїв, так само як і при генерації, виконуються закони збереження енергії й імпульсу, при рекомбінації вивільняється енергія, яка може або випромінюватися у вигляді фотонів (випромінювальна рекомбінація), або виділятися у вигляді тепла – фононів (безвипромінювальна рекомбінація), або передаватися вільному електрону (ударна рекомбінація).

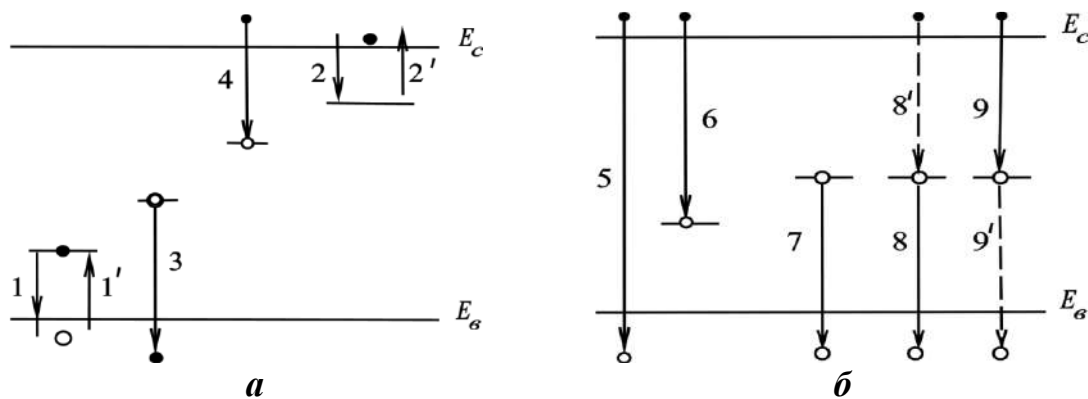


Рис. 2.58. Можливі процеси захоплення та рекомбінації носіїв заряду у напівпровідниках

Лекція № 3

Тема: "Електронні прилади та електронні компоненти. Пасивні елементи комп'ютерної електроніки"

ПЛАН

- 3.1. Електронні прилади та їх основні електронні компоненти.
- 3.2. Резистори.
- 3.3. Конденсатори.
- 3.4. Котушки індуктивності та трансформатори.

3.1. Електронні прилади та їх основні електронні компоненти

Всі сучасні електронні прилади, в першу чергу електронно-обчислювальні машини (ЕОМ) є комплексами технічних, апаратних і програмних засобів, призначених для автоматичної обробки інформації, обчислень (автоматичного виконання математичних операцій), автоматичного управління. При цьому їх основні функціональні елементи (логічні, запам'ятовуючі, індикаційні і ін.) виконані на основі різноманітних електронних елементів (компонентів) (рис. 3.1 – рис. 3.3).

Фактично, електронний прилад – це прилад для перетворення електромагнітної енергії з одного виду в інший, в процесі взаємодії створених в ньому електронних потоків з електромагнітними полями, в середовищі, яке заповнює його внутрішній простір (вакуум, газ, напівпровідниковий матеріал тощо).

В цілому, всі електронні прилади поділяються на електровакуумні прилади (Electro-vacuum devices) та напівпровідникові прилади (Semiconductor devices), складовими частинами (елементами) яких є відповідні електронні компоненти.

Електровакуумний прилад (ЕВП) – електронний прилад, у якому провідність здійснюється через електрони чи іони, що рухаються між електродами у вакуумі чи газі всередині газонепроникної оболонки. Такі оболонки мають назву балон або колба і виготовляються зазвичай зі скла, металу або пластику (іноді вживаються балони метало-скляного типу). Для подачі електричних напруг і сигналів на електроди ЕВП з оболонки виводяться з'єднані з електродами штирі (частина яких зазвичай об'єднується в цокольний роз'єм), за допомогою яких ЕВП підключається до зовнішніх електричних кіл. До ЕВП, струм в яких виникає як результат направленої переміщення потоку електронів (з керуванням його інтенсивністю та напрямку) у вакуумі відносять електронні лампи (діоди) (рис. 3.4, а: 1 – скляна

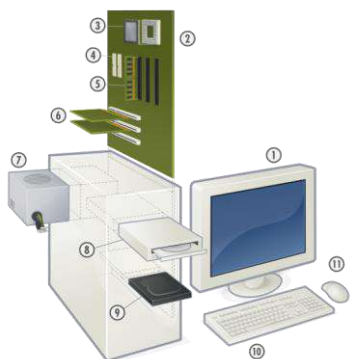


Рис. 3.1. Схема компоновки "класичного" персонального комп'ютера



Рис. 3.2. Мейн-фрейм 2021 року від IBM – LinuxONE III Express



Рис. 3.3. Суперкомп'ютер IBM Blue Gene/P 2007 року в Аргонській національній лабораторії з піковою продуктивністю в 1 петафлопс

колба, 2 – анод, 3 – катод), тріоди, тетроди, пентоди, гексоди, гептоди, октоди, ноноди, комбіновані електронні лампи, що включають дві або більше ламп в одному балоні), електронно-променеві трубки та ін. (див. рис. 3.5, рис. 3.6)

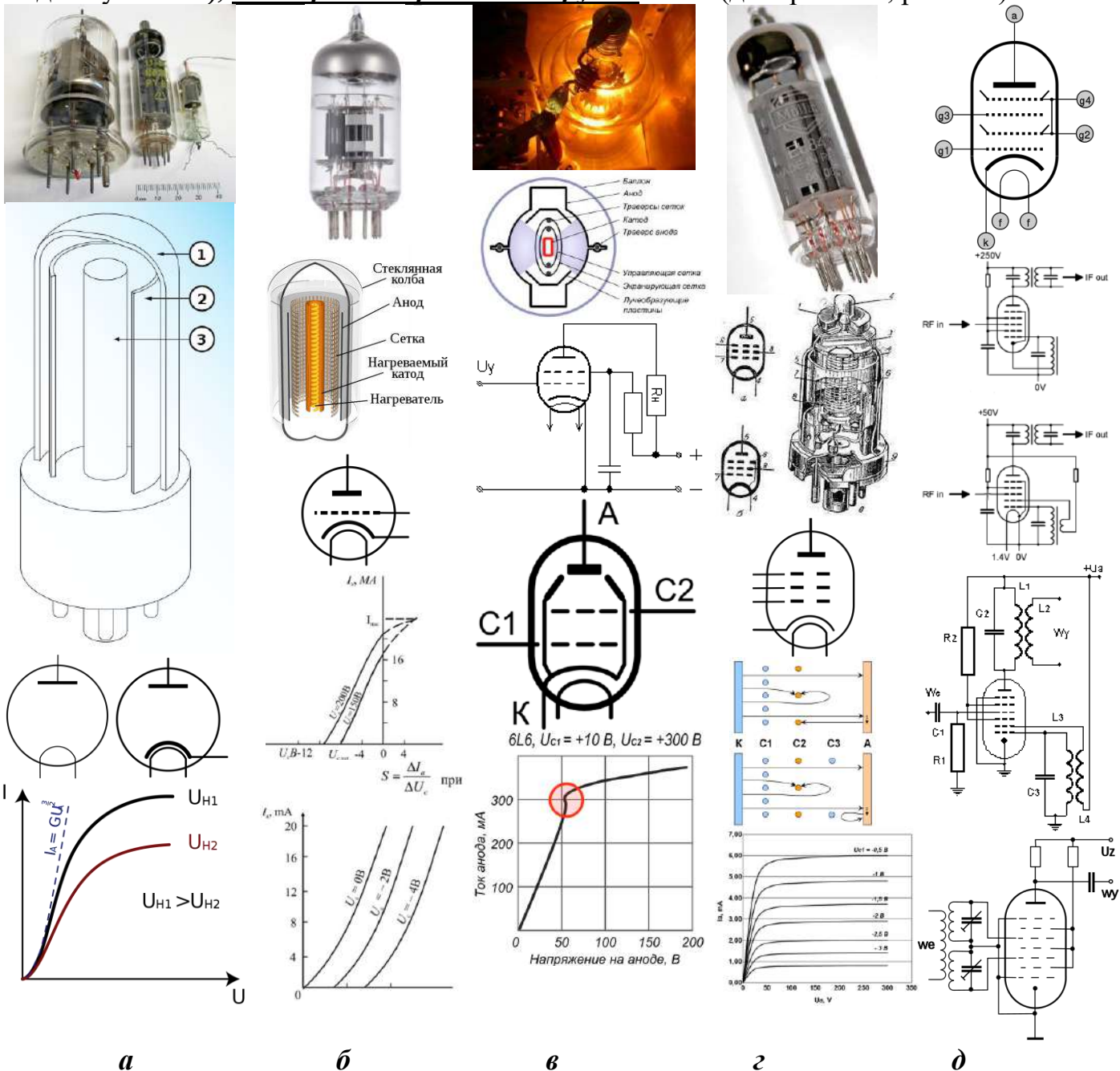


Рис. 3.4. Фото, будова, умовне графічне позначення та воль-амперні характеристики: а – електровакuumного діода; б – електровакuumного тріода; в – електровакuumного тетрода; г – електровакuumного пентода; д – схеми включення електровакuumного гексода, гептода, октода та нонода



Рис. 3.5. Електронно-променева трубка з флуоресцентним люмінофорним екраном



Рис. 3.6. Сучасні електровакuumні прилади та супутні компоненти

Електронні компоненти напівпровідникових приладів виготовляються з напівпровідникових матеріалів (таких як кремній, германій, арсенід галію та ін.) і використовують їх електронні властивості. Напівпровідникові прилади виготовляються як у вигляді одиночних дискретних приладів (що мають певне конструктивно закінчене виконання з ізоляційним корпусним захистом від зовнішніх умов, зовнішніми виводами, та призначені для виконання певних елементарних функцій в пристроях генерування і оброблення сигналів, запису, оброблення, зберігання та відтворення інформації), так і у вигляді інтегральних схем (мікросхем), що виконують певну функцію перетворення й обробки сигналів і мають високу щільність електрично з'єднаних (інтегрованих) елементів – можуть вміщувати десятки мільярдів інтегрованих напівпровідникових приладів, розміщених на одній підкладці. Фактично, більшість електронних компонентів "звичайної" твердотільної електроніки, так само застосовуються і в мікроелектроніці (наноелектроніці), але вже у вигляді мініатюрних пристроїв в інтегральному виконанні. Інтегральні мікросхеми та їх складові компоненти є основною елементною базою сучасної електроніки. Дискретні елементи не конкурують з ними, а доповнюють їх, виконуючи ті функції, які не можуть забезпечити їх інтегровані аналоги. Це, передовсім, забезпечення змінних номіналів (змінні та підлаштовані резистори, конденсатори, котушки індуктивності), великих напруг, струмів, потужностей. Малогабаритні безкорпусні дискретні елементи застосовують як компоненти гібридних інтегральних мікросхем.

Отже, основною елементною базою сучасної комп'ютерної електроніки є твердотільні електронні компоненти, які поділяють на (рис. 3.7):

1. Пасивні компоненти (Passive Components), що функціонують без зовнішніх джерел живлення, а їх властивості (у більшості випадків) не залежать від полярності прикладеної напруги або напрямку струму, що протікає. Вони можуть мати сталі й змінні (регульовані) параметри, та відноситись до таких основних груп: **а) резистори – постійні резистори** (поверхневого чи наскрізного монтажу), **потужні резистори, резисторні масиви, змінні резистори** (реостат, потенціометр, підлаштовний резистор, термістор, вологорезистор, фоторезистор, мемристор, варистор, високоомний дріт), **нагрівальні елементи; б) конденсатори – інтегровані конденсатори** (МДН- (метал-діелектрик-напівпровідник)-конденсатор, рівчаковий конденсатор), **постійні конденсатори** (керамічні, плівкові, електролітичні, алюмінієві електролітичні, танталові електролітичні, ніобієві електролітичні, полімерні, слюдяні, літій-іонні, вакуумні конденсатори, суперконденсатори, в тому числі наноіонні), **змінні конденсатори** (підлаштовний конденсатор, вакуумний змінний конденсатор), **спеціальні конденсатори** (силові конденсатори, конденсатори безпеки, фільтр-конденсатори, світлодіодні конденсатори, моторні конденсатори, фотоконденсатори, резервуарні конденсатори), **масиви конденсаторів, варикапи; в) магнітоіндуктивні прилади** – індуктор, котушка індуктивності, дросель, змінний індуктор, насичений індуктор, трансформатор, магнітний підсилювач (тороїд), феритові фільтри, малі феритові фільтри, мотор/генератор, соленоїд, гучномовець, мікрофон, зумер; **г) мультикомпонентні системи** – RC-фільтр, LC-фільтр; **д) перетворювачі, датчики, детектори** – **положення та руху** (диференційний трансформатор для вимірювання лінійних переміщень, датчик кута повороту, вал-енкодер, інклінометр, датчик руху, витратомір або потоковий лічильник), **сили, крутного моменту** (тензодатчик, акселерометр), **термічні** (термопара, термістор, детектор температури, болометр, термореле, модуль Пельтьє), **магнітного поля** (магніторезистор,

магнітометр), вологості (гігрометр); **е) антени** – елементарний диполь, хвильовий канал, фазована антенна решітка, антенна петля, параболічна антена, логіперіодична антена, біконічна антена, опромінювач; **є) коливальні** – осцилятори, резонатори, кварцові фільтри; **ж) комутаційні елементи** – провідники, роз'єми, конектори, макетні плати та ін. (наприклад, радіатори).

2. **Активні компоненти**, функціонування яких пов'язане зі споживанням енергії від зовнішніх джерел живлення постійної чи змінної напруги: **а) діоди** – випрямляючі діоди, діодні мости, діоди Шоттки, діоди Зенера або стабілітрони, трансили, супресори, варикапи, варактори, лазерні діоди, світлодіоди, фотодіоди (лавинні фотодіоди, сонячні комірки, фотоелектричні комірки, фотомагнітні батареї або панелі), діаки, тригерні діоди, діоди постійного струму, тунельні діоди та ін.; **б) транзистори** – польові транзистори (МОН- (метал-оксид-напівпровідник) транзистори – МОН-транзистори з затвором *p*-типу, МОН-транзистори з затвором *n*-типу, комплементарні МОН-транзистори, силові МОН-транзистори; мультизатворні польові транзистори, полові транзистори з *fin*-затвором; тонкоплівкові транзистори; польові транзистори з керуючим *p-n*-переходом; метал-напівпровідник польові транзистори; транзистори з високою рухливістю електронів), біполярні транзистори (в тому числі фототранзистори або фотодетектори), композитні транзистори (біполярні комплементарні МОН-транзистори, біполярні транзистори із ізольованим затвором та ін.; **в) тиристори** – власне тиристори, тріаки, одноперехідні транзистори, програмовані однопровідникові транзистори, статичноіндуковані тиристори; **г) інтегральні схеми** – інтегральні мікросхеми (МОН інтегральні мікросхеми, гібридні інтегральні мікросхеми, інтегральні мікросхеми змішаного сигналу, тривимірні інтегральні мікросхеми), цифрові інтегральні схеми, аналогові інтегральні схеми (датчики Холла, датчики струму) та ін.

3. **Електромеханічні компоненти** – електричні з'єднувачі, перемикачі, реле, соленоїди тощо.

4. **Оптоелектронні компоненти** – світлодіоди, фотосенсори, дисплеї, лазери.

Крім того, використовуються: запобіжники для захисту від перенапруги і короткого замикання; для подачі сигналу – лампочки і динаміки (гучномовці); для формування сигналу – мікрофон, відеокамера, датчики; для прийняття радіосигналу електронному пристрою (приймачу) потрібна антена, а для роботи поза електричної мережі – електричні акумулятори та інші джерела живлення.

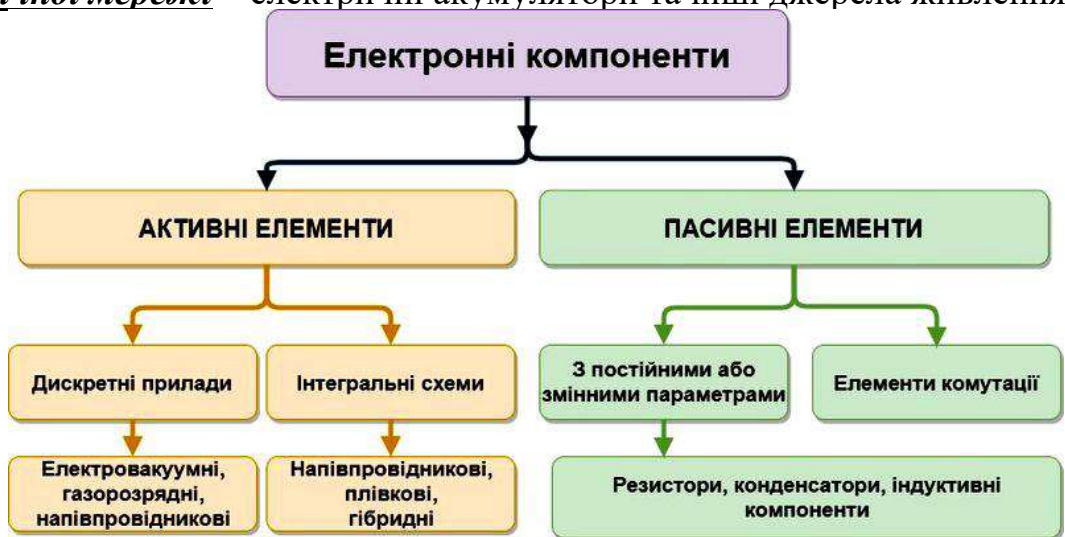


Рис. 3.7. Електронні компоненти, що є основною елементною базою сучасної комп'ютерної електроніки

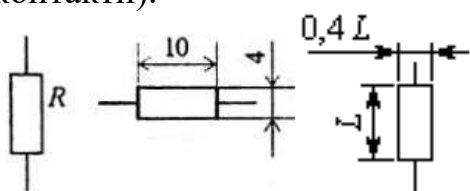
3.2. Резистори

Резистор – це елемент електричного кола, який має власний опір. Практично ні одна електрична схема не обходиться без цих елементів.

Основною властивістю резистора є перетворення електричної енергії в тепло, хоча в більшості пристроїв ця властивість не тільки не використовується, а іноді є шкідливою. Функціональним призначенням резисторів є регулювання і розподілення електричної енергії між колами й елементами електронного пристрою.

Найбільш широке розповсюдження здобули **резистори постійного опору**, рідше **змінні резистори** (опір яких може регулюватися рухомим контактом). Умовне позначення резисторів, правила їхнього креслення на схемах та зовнішній вигляд резисторів показано на рис. 3.8.

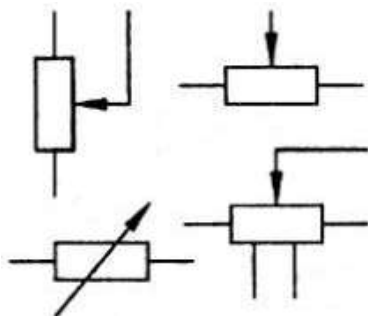
В залежності від виду резистивного елемента, **резистори** поділяються на **дротові** та **бездротові**. **Бездротові резистори** підрозділяють на **тонкошарові** та **композиційні**. **Тонкошарові** у свою чергу підрозділяються на **металоокисні**, **металізовані**, **вуглецеві** та **боровуглецеві**. **Композиційні резистори** бувають **плівкові** та **об'ємні**. Матеріал і технологія виготовлення резисторів суттєво впливають на параметри та властивості резисторів. Так, дротові резистори мають високі точність виготовлення та температурну стабільність. Але поруч з цим вони відносно низькочастотні. На високих частотах слід використовувати бездротові резистори. **Дротові резистори** виготовляють з високоомного дроту (манганін, константан, ніхром), що намотаний на діелектричний каркас. **Бездротові резистори** виготовляють з високоомного матеріалу (метал, оксидні з'єднання) шляхом його наплення на ізоляційну основу (керамічний стержень, на кінцях якого закріплені вивідні контакти).



а



б



в



г



д

Рис. 3.8. Резистори: а) постійний резистор (умовне позначення) та розміри умовного позначення резистора; б) постійний резистор на схемах імпортованих приладів; в) постійні резистори (зовнішній вигляд); г) змінний резистор (умовне позначення); д) змінні резистори (зовнішній вигляд)

Основним параметром резистора є його електричний опір R . Опір є коефіцієнтом пропорційності у співвідношенні між струмом I_R , який тече через резистор, та напругою U_R , яка прикладена до резистора R :

$$U_R = R \cdot I_R, \quad I_R = U_R / R \quad (3.1)$$

Зі співвідношень (3.1), які є законом Ома для ділянки електричного кола, видно основну дію резистора, а саме: резистори перетворюють напругу у струм або струм у напругу. Так, якщо до резистора з опором R прикладена напруга U_R , то через резистор тече струм I_R (рис. 3.9). Навпаки, якщо через резистор з опором R тече струм I_R , то на резисторі виникає падіння напруги U_R (рис. 3.10).

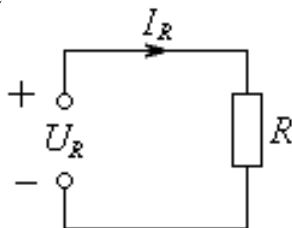


Рис. 3.9. Резистор R під напругою

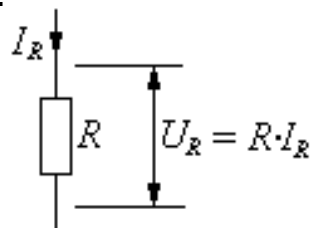


Рис. 3.10. Резистор R під струмом

Розмірністю й одиницею опору є Ом. Опір в 1 Ом є відносно малим і тому поруч з одиницею "Ом" застосовуються також найбільше розповсюджені одиниці кілоом (кОм) та мегаом (МОм): $1 \text{ кОм} = 10^3 \text{ Ом}$; $1 \text{ МОм} = 10^6 \text{ Ом}$.

Резистор під напругою завжди виділяє потужність P у вигляді тепла Q :

$$P = U_R \cdot I_R = U_R^2 / R = I_R^2 \cdot R, \quad Q = U_R \cdot I_R \cdot t, \quad (3.2)$$

де U_R та I_R – середньоквадратичні значення відповідно до напруги й струму; t – час проходження струму через резистор.

Власне, електричний опір R резистора залежить від електричних властивостей його робочого матеріалу – питомого опору ρ (в системі SI питомий опір рівний опору провідника завдовжки 1 м з поперечним перерізом 1 м^2), довжини провідника l та площі його поперечного перерізу S : $R = (\rho \cdot l) / S$. (3.3)

Резистор також характеризується провідністю, яка є зворотною величиною до опору:

$$G = 1/R. \quad (3.4)$$

Розмірністю й одиницею провідності є сименс (См). Використовуються також мілісименс (мСм) та мікросименс (мкСм): $1 \text{ мСм} = 10^{-3} \text{ См}$; $1 \text{ мкСм} = 10^{-6} \text{ См}$.

При послідовному з'єднанні резисторів (рис. 3.11) сила струму у всіх резисторах однакова: $I_1 = I_2 = I$. За законом Ома, напруги U_1 і U_2 на резисторах рівні $U_1 = I \cdot R_1$, $U_2 = I \cdot R_2$. Загальна напруга U на обох резисторах дорівнює сумі напруги U_1 і U_2 :

$$U = U_1 + U_2 = I \cdot (R_1 + R_2) = I \cdot R, \quad (3.5)$$

де R – електричний опір всього кола. Звідси випливає: $R = R_1 + R_2 + \dots + R_N$. (3.6)

При з'єднанні резисторів послідовно їх еквівалентною схемою буде резистор з опором, рівним сумі опорів окремих резисторів. Цей результат правильний для будь-якої кількості послідовно з'єднаних резисторів.

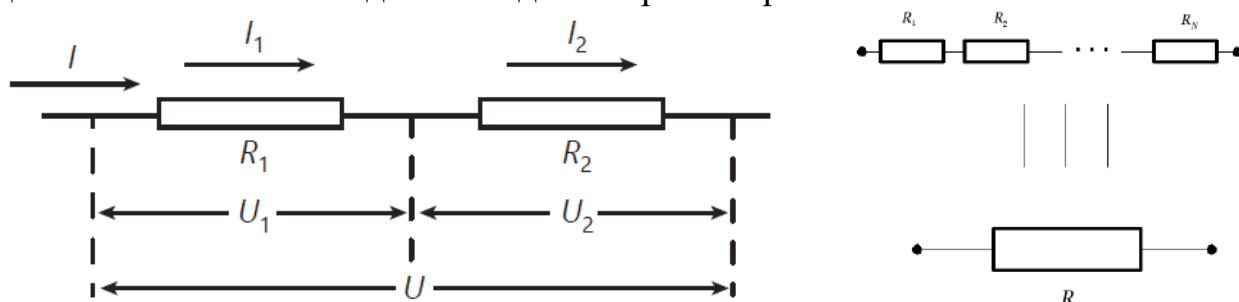


Рис. 3.11. Схема (еквівалентна схема) послідовного з'єднання резисторів

При паралельному з'єднанні резисторів (рис. 3.12), напруга U_1 і U_2 на обох резисторах однакова: $U_1=U_2=U$. Сума струмів I_1+I_2 , що проходять по обох резисторах, дорівнює струму в нерозгалуженому колі: $I=I_1+I_2$. Цей результат пов'язаний із тим, що в точках розгалуження струмів (вузли A і B) у колі постійного струму не можуть накопичуватися заряди. Наприклад, до вузла A за час t приходить заряд $I \cdot t$, а виходить із вузла за той самий час заряд $I_1 \cdot t + I_2 \cdot t$. Отже, $I \cdot t = I_1 \cdot t + I_2 \cdot t$. Записуючи на підставі закону Ома:

$$I_1 = \frac{U}{R_1}, \quad I_2 = \frac{U}{R_2}, \quad I_3 = \frac{U}{R}, \quad (3.7)$$

де R – електричний опір всього кола, отримаємо:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad \text{або} \quad \frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_N} \quad (3.8)$$

При паралельному з'єднанні резисторів величина, обернена загальному опорі кола, дорівнює сумі величин, обернених опорам паралельно включених резисторів. Цей результат є правильним для будь-якої кількості паралельно з'єднаних резисторів.

Формули для послідовного і паралельного з'єднання провідників дають змогу в багатьох випадках розраховувати опір складного кола, що складається з багатьох резисторів. Так, при змішаному з'єднанні резисторів, коли схема (рис. 3.13) складається з двох паралельно з'єднаних блоків, один з яких складається з послідовно з'єднаних резисторів R_1 та R_2 загальним опором R_1+R_2 , інший – з резистора R_3 ; загальна провідність буде становити

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{(R_1 + R_2)} + \frac{1}{R_3}. \quad (3.9)$$

Таким чином загальний опір можна обчислити за рівнянням

$$R = \frac{R_3(R_1 + R_2)}{R_1 + R_2 + R_3}. \quad (3.10)$$

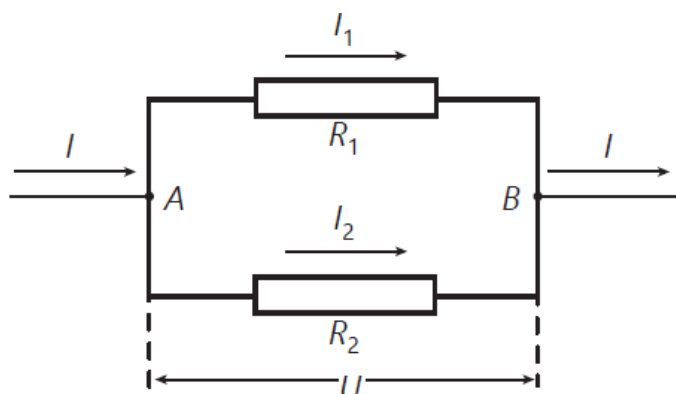


Рис. 3.12. Схема паралельного з'єднання резисторів

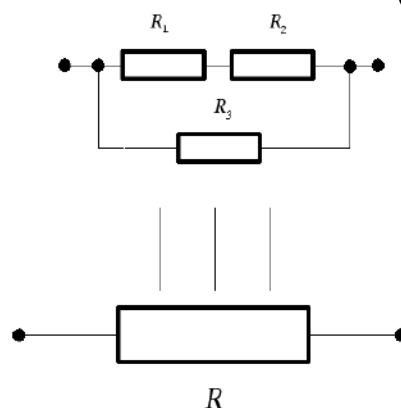


Рис. 3.13. Схема змішаного сполучення резисторів

Основними характеристиками резисторів є номінальний опір R , допуск номінального опору (точність виготовлення), номінальна потужність розсіювання P (найбільша потужність, яку резистор може тривалий час витримувати і розсіювати у вигляді тепла при збереженні інших параметрів) та відхилення дійсного опору від номінального. Умовні позначення цих параметрів наносяться на резистори. Вони стандартизовані і подані в табл. 3.1 – 3.3.

Маркування потужності можна визначити за розміром елемента. На схемах в середині умовного графічного позначення вказують символічне позначення потужності (рис. 3.14). На резисторах типу МЛТ, потужність вказувалася, починаючи від одного вата: МЛТ-1 МЛТ-2 і МЛТ-3 відповідно.

Опис маркування значення номінального опору буває трьох видів.

Перший – це цифрове маркування резисторів. Він використовується тільки для елементів, номінал яких менше 999 Ом. Наприклад, такий запис номінального опору буде мати наступний вигляд: **15; 150; 200**. При цьому за замовчуванням прийнято, що номінал записаний в омах.

Другий вид – символічний (цифрово-буквену) кодування. При цьому виді маркування виключається такий символ, як кома. Замість неї використовують букви латинського алфавіту **R(E), K, M**. В тому випадку, коли при записі номінального опору використовується літера **R(E)**, необхідно помножити число на 1; якщо **K** – то помножити на 1000; якщо літера **M** – то необхідно помножити на 1000000. Наприклад, номінальний опір **150R** означає 150 Ом; **5K6** означає 5600 Ом; **1M5** означає 1500 кОм.

Таблиця 3.1.

Номінальні опори резисторів з допуском ± 5 % (ряд E 24)

1,0	1,5	2,2	3,3	4,7	6,8
1,1	1,6	2,4	3,6	5,1	7,5
1,2	1,8	2,7	3,9	5,6	8,2
1,3	2,0	3,0	4,3	6,2	9,1

Таблиця 3.2.

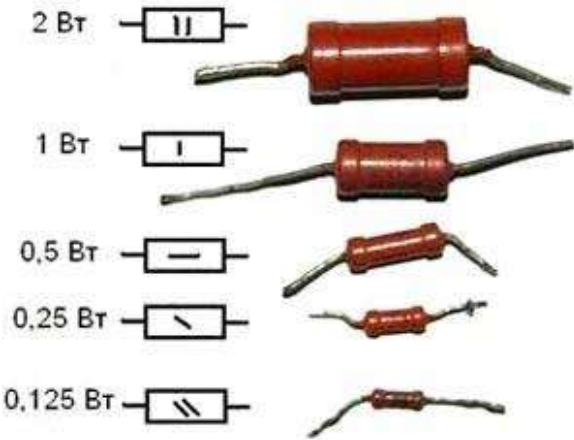
Допуски номіналів резисторів

Допуск, %	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	20	30
Позначення	Ж	У	Д	Р	Л	И	С	В	Ф

Таблиця 3.3.

Позначення потужностей резисторів на схемах

Потужність, Вт	0,25	0,5	1	2	3	4	5	---
Позначення на схемі								---



Позначення за ГОСТ 2.728-74	Опис
	Постійний резистор без вказання номінальної потужності розсіювання
	Постійний резистор з номінальною потужністю розсіювання 0,05 Вт
	Постійний резистор з номінальною потужністю розсіювання 0,125 Вт
	Постійний резистор з номінальною потужністю розсіювання 0,25 Вт
	Постійний резистор з номінальною потужністю розсіювання 0,5 Вт
	Постійний резистор з номінальною потужністю розсіювання 1 Вт
	Постійний резистор з номінальною потужністю розсіювання 2 Вт
	Постійний резистор з номінальною потужністю розсіювання 5 Вт
	Постійний резистор з номінальною потужністю розсіювання 10 Вт

Рис. 3.14. Маркування потужності резистора

Кольорове маркування номіналу опору резисторів (рис. 3.15). Відповідно до ГОСТ 28883-90 (ІЕС 62-74) кольорове маркування наноситься у вигляді 3, 4, 5 або 6 кольорових смуг (кілець). Для декодування такого виду позначень необхідно визначити початок відліку. В сучасних елементах остання смуга буває або золотистого або сріблястого кольорів. Ця смуга означає точність резистора (5 % або 10 %), якщо маркування складається з трьох смуг, точність (допустиме відхилення) таких елементів складає $\pm 20\%$. У всіх типах колірної коду 1 і 2 смуги – це значення елемента. Коли штрихування складається з 3-4 смуг, то третя позначає число, на яке потрібно помножити номінальне значення (якщо нанесено чотири кільця, то перші три позначають значення опору, а четверте – допустиме відхилення). Якщо кодова штрихування резисторів містить 5 смуг, то перші три позначають номінал опору, четверта означає множник, п'ята смуга – точність (допустиме відхилення). Якщо є шість кілець, то це точний резистор і перші три кільця позначають опір, четверте – множник, п'яте – допустиме відхилення, шосте – надійність елемента або температурний коефіцієнт опору (це кільце може знаходитись на самому краю резистора).

Маркування SMD (прилади, що монтуються на поверхню плати) резисторів ділиться на три типи: з 3 цифр, з 4 цифрами та з 3 символами. У першому випадку перші 2 цифри позначають номінал елемента у Ом, а остання – кількість нулів. Наведемо приклад: цифри на опорі 102 будуть означати 1000 Ом (рис. 3.16). У другому типі перші 3 цифри вказують номінал елемента в Ом, остання – кількість нулів. Код на резисторі 5602 означає 56000 Ом (56 кОм). Третій вид запису означає: перші 2 цифри – це номінал Ом, який взято з кодової таблиці, а останній символ – множник: S= 10^{-2} ; R= 10^{-1} ; B=10; C= 10^2 ; D= 10^3 ; E= 10^4 ; F= 10^5 .

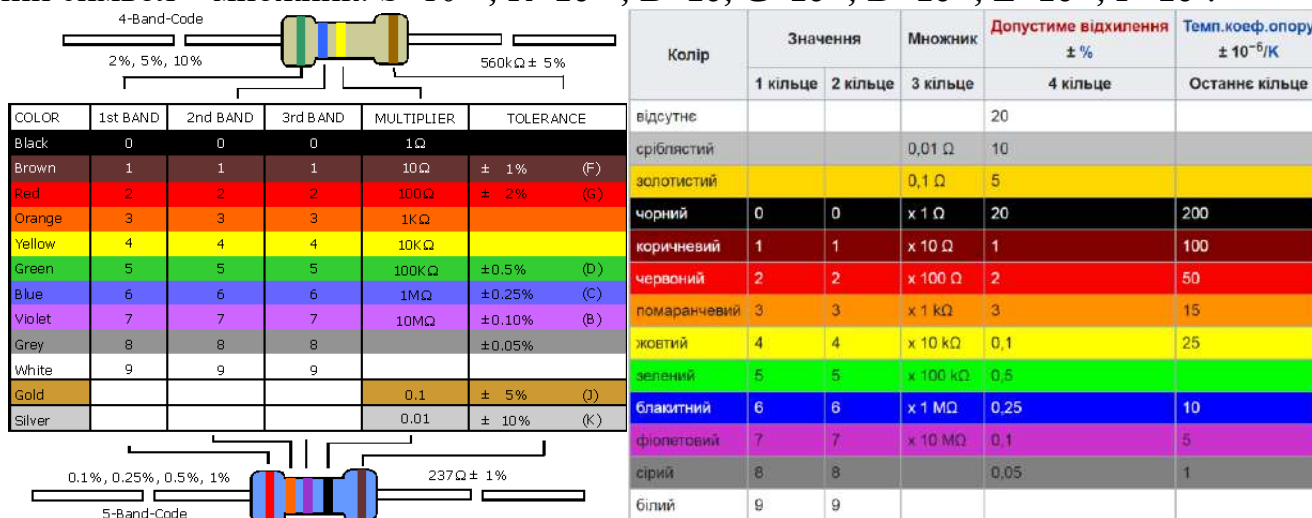


Рис. 3.15. Кольорове маркування номіналу опорів резисторів



Рис. 3.16. SMD резистор

3.3. Конденсатори

Конденсатори – елементи з двох чи більше електродів (обкладинок), які розділені діелектриком, товщина якого менша у порівнянні з розміром обкладинок. Така система має взаємну електричну ємність і здатна зберігати електричний заряд. **Конденсатор** є **пасивним електронним компонентом** і широко застосову-

ється в електронних схемах для блокування постійного струму, пропускаючи змінний струм. Конденсатори використовуються як фільтри при перетворенні змінного струму на постійний. При з'єднанні конденсатора з котушкою індуктивності утворюється коливальний контур, який використовується у пристроях прийому-передачі. За допомогою конденсаторів можна отримувати імпульси великої потужності, наприклад, у фотоспалахах. Оскільки конденсатор здатний довгий час зберігати заряд, то його можна використовувати як елемент пам'яті. Цей принцип використовує динамічна оперативна пам'ять.

Основна класифікація конденсаторів проводиться за типом діелектрика в конденсаторі. Тип діелектрика визначає основні електричні параметри конденсаторів: опір ізоляції, стабільність ємності, величину втрат тощо.

За видом діелектрика розрізняють:

- ✓ вакуумні конденсатори (обкладки без діелектрика знаходяться у вакуумі);
- ✓ конденсатори з газоподібним діелектриком;
- ✓ конденсатори з рідким діелектриком;
- ✓ конденсатори з твердим неорганічним діелектриком: скляні, слюдяні, керамічні, тонкошарові із неорганічних плівок (K10, K15, K26, K32,);
- ✓ конденсатори з твердим органічним діелектриком: паперові, металопаперові, плівкові, комбіновані (K41, K42, K71, K72);
- ✓ електролітичні та оксидо-напівпровідникові конденсатори. Як діелектрик використовується шар оксиду металу. Наприклад для конденсаторів оксидо-алюмінієвих (K50) це Al_2O_3 , а для оксидо-танталових (K51) – Ta_2O_5 . Однією обкладинкою слугує металева фольга (анод), а друга (катод) – це або електроліт (у електролітичних конденсаторах) або шар напівпровідника (у оксидо-напівпровідникових), нанесений безпосередньо на оксидний шар. Анод виготовляється, в залежності від типу конденсатора, з алюмінієвої, ніобієвої чи танталової фольги. Такі конденсатори відрізняються від інших типів перш за все своєю великою питомою ємністю, але здатні працювати при відносно низьких напругах і мають значні діелектричні втрати.

Крім того, конденсатори розрізняються за можливістю зміни своєї ємності:

- постійні конденсатори – основний клас конденсаторів, який має сталу ємність (окрім як зменшення з часом використання);
- змінні конденсатори — конденсатори, які дозволяють зміни ємності в процесі функціонування апаратури. Керування ємністю може відбуватися механічно, електричною напругою (варіконди) та температурою (термоконденсатори). Використовуються, наприклад, у радіоприймачах для налаштування частоти резонансного контуру;
- конденсатори підлаштування – конденсатори, ємність яких змінюється при разовому чи періодичному регулюванні і не змінюється в процесі функціонування апаратури. Їх використовують для підлаштування та вирівнювання початкових ємностей сполучених контурів, для періодичного підлаштування та регулювання ланцюгів схем, де потрібна незначна зміна ємності.

В залежності від призначення конденсатори можна умовно розділити на конденсатори загального та спеціального призначення. Конденсатори загального призначення використовуються практично у більшості видів і класів апаратури. Традиційно до них відносять найбільш розповсюджені низьковольтні конденсатори, до яких не висуваються особливі вимоги. Решта конденсаторів є спеціальними. До них відносяться високовольтні, імпульсні, дозиметричні, пускові та інші конденсатори. За способом монтажу конденсатори поділяються на елементи наві-

сного монтажу поверхневого (друкованого), а також для використання у складі мікросхем та мікромодулів. Виводи конденсаторів для навісного монтажу можуть бути жорсткими або м'якими, аксіальними або радіальними з дроту чи стрічки, у вигляді пелюсток, кабельного вводу, шпильок чи опорних гвинтів. У більшості конденсаторів одна з обкладинок сполучається з корпусом, який служить другим виводом. За формою обкладинок конденсатори бувають: плоскі, циліндричні, сферичні, рулонні та ін. (див. табл. 3.4).

Основною властивістю конденсатора є накопичення енергії електричного поля, оскільки цей елемент являє собою дві струмопровідні поверхні, які відділені одна від одної діелектриком (рис. 3.17, 3.18). При підключенні до джерела постійної напруги відбувається зарядження конденсатора: вільні електрони пластини, з'єднаної з позитивним полюсом джерела, переходять через джерело на пластину, з'єднану з його негативним полюсом. Цей процес закінчиться, коли різниця потенціалів між пластинами буде дорівнювати напрузі між затискачами джерела. У результаті одна пластина конденсатора отримує заряд $+Q$, а друга $-Q$. При цьому заряд і напруга між пластинами пов'язані співвідношенням $Q=C \cdot U$.

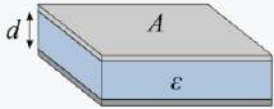
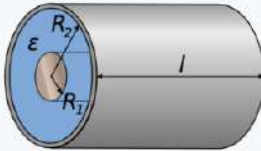
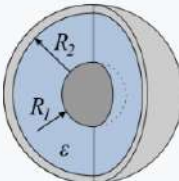
Основною характеристикою конденсатора є його електрична ємність C (точніше номінальна ємність), яка визначає накопичений заряд:

$$C=Q/U_C \; , \tag{3.11}$$

Тобто, електрична ємність тіла визначає заряд, який потрібно передати тілу, щоб викликати підвищення його потенціалу на 1 В. Одиницею ємності, що випливає з формули (3.11), є кулон на вольт, або фарада (Ф): $[C]=1 \text{ Кл}/1 \text{ В}=1 \text{ Ф}$. Ємність в 1 фараду дуже велика. Тому застосовуються десяткові дробові одиниці: мікрофарада (мкФ), нанофарада (нФ) та пікофарада (пФ): $1 \text{ мкФ}=10^{-6} \text{ Ф}$; $1 \text{ нФ}=10^{-9} \text{ Ф}$; $1 \text{ пФ}=10^{-12} \text{ Ф}$.

Таблиця 3.4.

Види конденсаторів за формою обкладинок

Назва	Ємність	Електричне поле	Схема
Плоский конденсатор	$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \cdot \frac{A}{d}$	$E = \frac{Q}{\varepsilon_0 \varepsilon_r A}$	
Циліндричний конденсатор	$C = 2\pi\varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{l}{\ln(R_2/R_1)}$	$E(r) = \frac{Q}{2\pi r l \varepsilon_0 \varepsilon_r}$	
Сферичний конденсатор	$C = 4\pi\varepsilon_0 \varepsilon_r \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)^{-1}$	$E(r) = \frac{Q}{4\pi r^2 \varepsilon_0 \varepsilon_r}$	
Сфера	$C = 4\pi\varepsilon_0 \varepsilon_r R_1$		

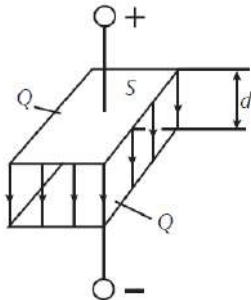


Рис. 3.17. Конструкція плоского конденсатора

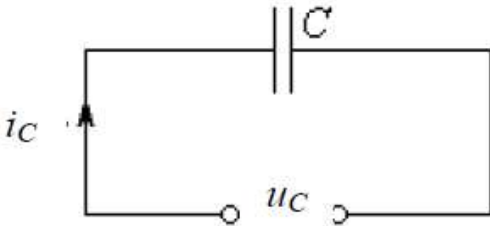


Рис. 3.18. Конденсатор під напругою



Рис. 3.19. Сучасні електролітичні конденсатори

Отже, електрична ємність конденсатора визначає заряд, який потрібно надати одній із його пластин, щоб викликати підвищення напруги між пластинами на 1 В. Для знаходження заряду Q за заданою напругою потрібно знати ємність конденсатора. У випадку плоского конденсатора: $C = (\epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot S) / d$, (3.12)

де ϵ_r – відносна діелектрична проникність діелектрика, який роз'єднує пластини конденсатора; ϵ_0 – діелектрична стала; S – площа однієї пластини, m^2 ; d – відстань між пластинами, m .

Матеріал діелектрика визначає і тип конденсатора, і його властивості. За типом діелектрика конденсатори бувають паперові, слюдяні, керамічні та електролітичні. Найбільшу ємність за інших рівних умов мають електролітичні конденсатори (сотні тисяч мкФ). Самими високочастотними конденсаторами є керамічні. Типові значення ємності конденсаторів складають від одиниць пікофарад до сотень мікрофарад. Але існують конденсатори з ємністю десятків фарад.

Конденсатор має також частотно залежний опір, який дорівнює:

$$|X_C| = 1/(\omega C) = 1/(2\pi f C). \quad (3.13)$$

Для отримання великих ємностей конденсатори з'єднують паралельно (рис. 3.20). Загальна ємність батареї паралельно з'єднаних конденсаторів дорівнює сумі ємностей всіх конденсаторів, які входять у батарею:

$$C_{\text{заг}} = C_1 + C_2 + \dots + C_n. \quad (3.14)$$

При послідовному з'єднанні конденсаторів (рис. 3.21) заряди усіх конденсаторів однакові. Загальна ємність батареї послідовно з'єднаних конденсаторів дорівнює:

$$C = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}}. \quad (3.15)$$

Ця ємність завжди менша мінімальної ємності конденсатора, який входить в батарею. Але при послідовному з'єднанні зменшується загроза пробоем конденсаторів, оскільки на кожний конденсатор надходить лише частина різниці потенціалів джерела напруги.

У разі змішаного з'єднання конденсаторів розрахунок зводиться до визначення ємності еквівалентного конденсатора, яким можна замінити весь ланцюг,

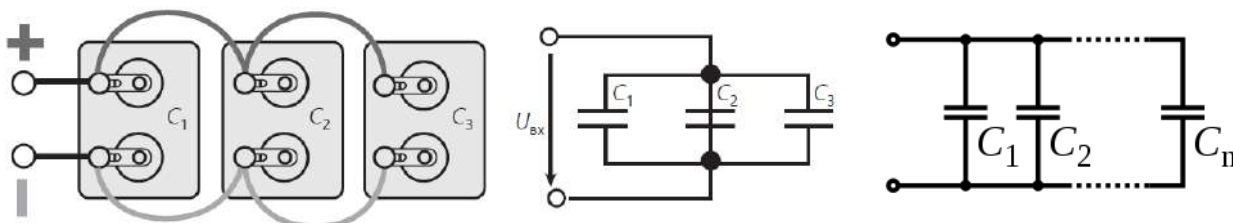


Рис. 3.20. Паралельне з'єднання конденсаторів

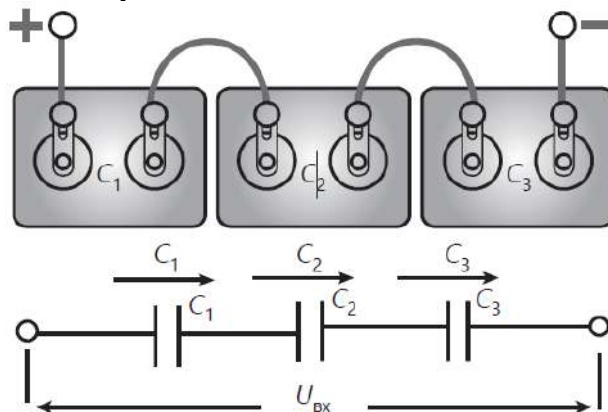


Рис. 3.21. Послідовне з'єднання конденсаторів

визначення величини напруги і (або) заряду на кожному конденсаторі. Розрахунок еквівалентної ємності батареї змішаного з'єднання ведуть методом "згортання" ланцюга з боку зворотного від джерела. В результаті перетворень у схемі ланцюга залишиться один конденсатор із ємністю $C_{екв}$ (рис. 3.22).

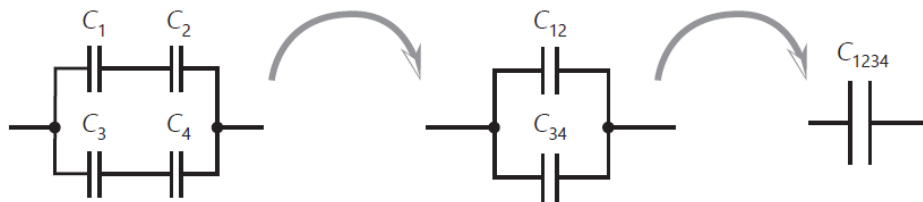


Рис. 3.22. Схема перетворення батареї змішаного з'єднання

Послідовне і паралельне з'єднання конденсаторів є повною протилежністю послідовного і паралельного з'єднання резисторів. Якщо послідовне з'єднання резисторів збільшує загальний опір, то послідовне з'єднання конденсаторів навпаки, зменшує загальну ємність. Якщо паралельне з'єднання резисторів зменшує загальний опір, то паралельне з'єднання конденсаторів навпаки, збільшує загальну ємність.

Іншою не менш важливою характеристикою конденсаторів є номінальна напруга – значення електричної напруги, при якому він може працювати у заданих умовах під час строку служби із зберіганням параметрів у допустимих межах. Номінальна напруга залежить від конструкції конденсатора і властивостей застосованих матеріалів. При експлуатації напруга на конденсаторі не повинна перевищувати допустимої. Для більшості типів конденсаторів із збільшенням температури допустима напруга знижується. Напругу, при якій впродовж 1-5 с виникає пробій, називають пробивною напругою. Допустиму робочу напругу обирають у 3-10 разів меншою за пробивну.

Умовні графічні позначення конденсаторів на електричних схемах повинні відповідати ГОСТ 2.728-74 (таблиця 3.5) або міжнародному стандарту IEEE 315-1975. Літерне позначення конденсаторів на електричних схемах відповідно ГОСТ 2.710-81 складається з латинської літери "С" і порядкового номера елемента (цифрове позначення), починаючи з одиниці, в межах групи елементів, наприклад: C1, C2, ..., Cn.

Номінальні значення ємностей стандартизовані. Міжнародною електротехнічною комісією (ІЕС) для ємностей встановлено 7 рядів переважних чисел серії Е: Е3, Е6, Е12, Е24, рідше Е48, Е96, Е192. Номінальну ємність вказують у вигляді конкретного значення, вираженого у пікофарадах (пФ) або мікрофарадах (мФ). При ємності до 0,01 мкФ, вона вказується у пікофарадах, при цьому можна не вказувати одиницю вимірювання (пФ). При зазначенні номіналу ємності в інших одиницях вказують одиницю вимірювання. Фактичне значення ємності може відрізнятися від номінального на величину відхилення.

Для електrolітичних конденсаторів, а також для високовольтичних конденсаторів на схемах, після вказання номіналу ємності, вказують їх максимальну робочу напругу у вольтах (В) чи кіловольтах (кВ). Наприклад: "10 мкФ × 10 В".

Маркування конденсаторів може бути літерно-цифровим, яке включає умовне позначення (тип) конденсатора, номінальну напругу, ємність, відхилення ємності, групу ТКЕ (температурний коефіцієнт ємності, який характеризує залежність ємності конденсатора від температури), місяць та рік виготовлення.

Кодоване значення ємності містить 3-4 знаки. Літера коду позначає десяткову крапку. Номінальну ємність від 0 до 999 пФ виражають в пікофарадах з позначенням літерою "р" (наприклад, 150р); від 1000 до 999999 пФ – в нанофарадах з

позначенням літерою "п" (наприклад, п150); від 1 до 999 мкФ – в мікрофарадах з позначенням літерою "μ" (наприклад, 1μ5); від 1000 до 999999 мкФ – в міліфарадах з позначенням літерою "m" (наприклад m100); більше цього значення – у фарадах з позначенням літерою "F".

Після значення номінальної ємності конденсатора вказується кодова літера відхилення ємності, за нею – кодова літера групи ТКЄ. Так, 33pKL означає, що конденсатор має ємність 33 пФ з допуском $\pm 10\%$ та температурною нестабільністю – $75 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Далі може бути вказана кодова літера номінальної напруги.

Таблиця 3.5

Умовні графічні позначення конденсаторів

Позначення за ГОСТ 2.728-74	Опис
	Конденсатор сталої ємності
	Поляризований конденсатор
	Поляризований електролітичний конденсатор
	Підлаштувальний конденсатор змінної ємності
	Конденсатор змінної ємності



Рис. 3.23. Зовнішній вигляд різних типів конденсаторів

3.4. Котушки індуктивності та трансформатори

Котушка індуктивності – елемент електричного кола, що являє собою сукупність витків, призначений для використання його індуктивності. Котушка індуктивності має вигляд звернутого у спіраль ізолюваного дроту, що має значну індуктивність при відносно великій електричній провідності та малому активному опорі. Дріт може намотуватись на каркас з діелектрика циліндричної, тороїдальної або прямокутної форми. Котушки призначені для перетворення енергії змінного електричного поля в енергію змінного магнітного поля і навпаки, створення реактивного індуктивного опору змінному струму. За використанням котушки поділяють на: контурні, зв'язку і дроселі. Перші використовують у коливальних конту-

рах, другі – для зв’язку електричних кіл, треті – для розділення постійного та змінного струмів. За характером зміни індуктивності котушки бувають постійної індуктивності, підстроювальні, зі змінною індуктивністю (варіометри), які відрізняються від підстроювальних ширшим діапазоном зміни номіналу.

Для збільшення індуктивності котушка здебільшого намотується на феромагнітне осердя з електротехнічної сталі, пермалою, карбонільного заліза, феритів. Трансформаторне залізо використовують на відносно низьких частотах, не перевищуючих верхню межу звукового діапазону. На вищих частотах використовують котушки з феритовим осердям. Котушку без осердя називають соленоїдом. Осердя використовують також для зміни індуктивності резонансних контурів в невеликих межах. Спеціальні котушки, що використовуються в певних електричних колах, називають дроселями.

До основних параметрів котушок індуктивності належать: номінальне значення індуктивності, допустиме відхилення індуктивності, максимальний струм котушки, опір втрат, номінальна добротність, температурний коефіцієнт індуктивності (TKL), власна ємність, робочий діапазон температур. Їх найважливішою характеристикою є індуктивність. У колах змінного струму котушки і дроселі поводяться як резистори, опір яких зростає із збільшенням частоти. Оскільки котушки працюють на високих частотах і призначені переважно для створення в електричних колах реактивного індуктивного опору змінному струмові, забезпечення між ними електромагнітного зв’язку, високої вибірковості коливальних контурів, то для них основними є частотні характеристики, які виражають залежності їх реактивного та активного опорів, а також опору втрат у власній ємності та добротності від частоти. Реактивний опір котушки змінному струмові прямо пропорційно збільшується зі збільшенням частоти струму.

Індуктивність L вимірюють у генрі ($Гн$), мілігенрі ($1 мГн = 10^{-3} Гн$), мікрогенрі ($1 мкГн = 10^{-6} Гн$), наногенрі ($1 нГн = 10^{-9} Гн$) та пікогенрі ($1 пГн = 10^{-12} Гн$). Індуктивність котушок, що використовуються в коливальних контурах радіомовних приймачів, залежно від діапазону частот становить від часток і одиниць мікрогенрі (УКВ і КВ) до декількох мілігенрі (ДВ).

У радіоприймальної і радіопередавальній апаратурі нерідко застосовують котушки з регульованою індуктивністю, які є основним органом налаштування коливального контуру в широкому діапазоні частот. Частина витків такої котушки намотують на каркасі більшого діаметру, а іншу частину – на каркасі меншого діаметру. Малу котушку поміщають всередину великої і закріплюють на валу, вісь якого перпендикулярна осі великої котушки, а виводи обмоток з’єднують послідовно. При повороті валика взаємний вплив котушок змінюється, а в результаті змінюється і індуктивність. Такі пристрої отримали назву варіометрів. Умовні зображення і позначення котушок на схемах наведено на рисунку 3.24.

Котушка індуктивності має частотно залежний опір, який дорівнює:

$$|X_L| = \omega L = 2\pi f L. \quad (3.16)$$

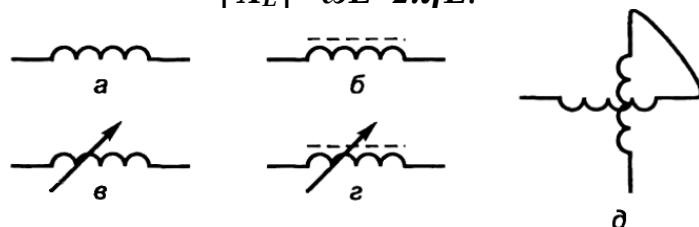


Рис. 3.24. Умовні зображення котушок на схемах: а, б – котушки за відсутності та наявності магнітодіелектричного осердя; в, г – підстроювальні котушки; д – варіометр

В електричних схемах при послідовному сполученні котушок індуктивності (рис. 3.25) струм, що протікає через кожну котушку однаковий, а загальна індуктивність L дорівнює сумі індуктивностей всіх сполучених котушок:

$$L = L_1 + L_2 + \dots + L_n. \tag{3.17}$$

При паралельному сполученні котушок індуктивності (рис. 3.25) напруга на всіх котушках є однаковою, а загальна індуктивність L дорівнює:

$$L = \frac{1}{\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \dots + \frac{1}{L_n}}. \tag{3.18}$$

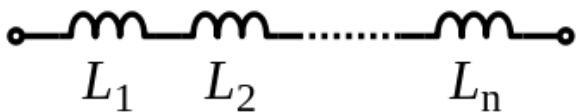


Рис. 3.25. Схема послідовного сполучення котушок індуктивності

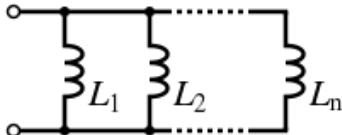


Рис. 3.26. Схема паралельного сполучення декількох котушок індуктивності

В електронних пристроях використовують переважно однофазні трансформатори малої потужності. **Трансформатор** – статичний електромагнітний пристрій, що має дві або більше індуктивнозв'язані обмотки і призначений для перетворення за допомогою електромагнітної індукції однієї або кількох систем (напруг) змінного струму в одну або декілька інших систем (напруг) змінного струму без зміни частоти системи (напруги) змінного струму. Найбільше розповсюдження здобули мережеві трансформатори живлення, узгоджувальні трансформатори, а також імпульсні трансформатори (рис. 3.27 – рис. 3.29).

Для живлення різних вузлів електроприладів потрібні найрізноманітніші напруги. В основі блоків електроживлення у пристроях, які потребують кілька напруг різної величини, використовуються мережевий трансформатор живлення з декількома вторинними обмотками. Трансформатори на 50-60 Гц є однією з найважливіших деталей багатьох приладів. Розмір трансформатора можна зменшити, якщо збільшити частоту змінного струму. Тому сучасні імпульсні блоки живлення при однаковій потужності є значно легшими. У схемах живлення сучасних радіотехнічних та електронних пристроїв широко застосовуються високочастотні імпульсні трансформатори. В імпульсних блоках живлення змінну напругу мережі спершу випрямляють, а потім за допомогою інвертора перетворюють на високочастотні імпульси. Система управління за допомогою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) дозволяє стабілізувати напругу. Після чого імпульси високої частоти подаються на імпульсний трансформатор, на виході з якого, після випрямлення і фільт-



Рис. 3.27. Внутрішня будова силового трансформатора



Рис. 3.28. Мережеві трансформатори живлення



Рис. 3.29. Імпульсний трансформатор (С) в імпульсному блоці живлення персонального комп'ютера. D – дросель групової стабілізації

рації отримують стабільну постійну напругу. Незважаючи на свої недоліки мережевий трансформатор живлення на 50-60 Гц, продовжують використовувати в схемах живлення, в тих випадках, коли необхідно забезпечити мінімальний рівень високочастотних перешкод, наприклад при високоякісному звуковідтворенні.

Узгоджувальний трансформатор призначений для вмикання між двома колами з різними імпедансами з метою оптимізації потужності сигналу, що пересилається. Одночасно узгоджувальний трансформатор забезпечує створення гальванічної розв'язки між ділянками схем. Узгоджувальні трансформатори за особливостями використання поділяють на вхідні, вихідні та проміжні.

Трансформатори призначені для перетворення первинної перемінної напруги у вторинну перемінну напругу. Трансформатор складається в найпростішому випадку з двох магнітнозв'язаних котушок: N_1 та N_2 , які називають **обмотками** (рис. 3.30). Магнітні потоки цих котушок зчеплені, через що трансформатор перетворює **первинну (вхідну) напругу** U_1 у **вторинну (вихідну) напругу** U_2 . Основним **параметром трансформатора** є **коефіцієнт трансформації**: $n=N_2/N_1$, (3.19) де N_1 та N_2 – число витків первинної та вторинної обмоток відповідно. Через напруги коефіцієнт трансформації визначається як відношення: $n=U_2/U_1$. (3.20)

Якщо $n < 1$, тобто $U_2 < U_1$, то **трансформатор знижуючий** (він зменшує напругу). При $n > 1$ ($U_2 > U_1$), **трансформатор підвищуючий** (збільшує напругу). При $n = 1$ ($U_2 = U_1$), **трансформатор розподільний**. Він гальванічно розриває первинне та вторинне кола, не змінюючи напруги.

Феромагнітне осердя застосовують для збільшення магнітного потоку і зв'язку між котушками, що приводить до зростання потужності, яка віддається у вторинне коло трансформатора. **Коефіцієнт корисної дії трансформатора** визначається при підключеному навантаженні R_n (рис. 3.31): $\eta = P_2/P_1$, (3.21) де P_2 – потужність, що віддається навантаженню; P_1 – потужність, споживана трансформатором від мережі. Втрати потужності в трансформаторі зумовлені втратами в міді обмоток і в осерді на вихрові струми та гістерезис. **ККД** малопотужних трансформаторів звичайно дорівнює $\eta=0,6-0,8$. Потужні трансформатори конструюють таким чином, щоб отримати високий **ККД**, він може дорівнювати значенням $\eta=0,95-0,98$. Опір навантаження перераховується у первинну обмотку за формулою $R_{n1} = n^2 R_n$, де R_{n1} – опір, перерахований у первинну обмотку. Якщо вторинна обмотка не одна (рис. 3.32), то потужність первинної обмотки P_1 складається з суми потужностей усіх вторинних обмоток: $P_1=P_{21}+P_{22}+...+P_{2s}$. (3.22)

Основними параметрами трансформатора є **коефіцієнт трансформації** та **потужність**. Коефіцієнт трансформації визначається співвідношенням витків вторинної та первинної обмоток, а потужність – об'ємом осердя. Чим більше об'єм, тим потужніше трансформатор.

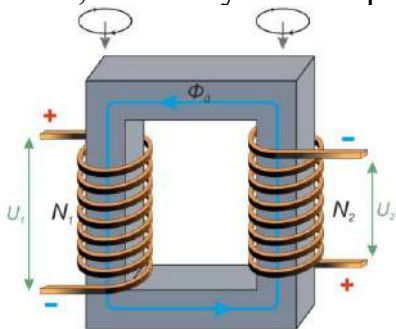


Рис. 3.30. Графічне зображення роботи трансформатора

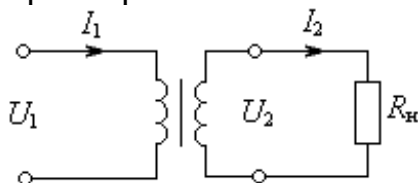


Рис. 3.31. Трансформатор під навантаженням

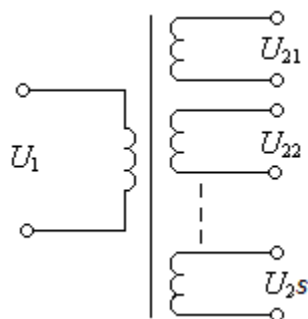


Рис. 3.32. Трансформатор з багатьма вторинними обмотками

Лекція № 4

Тема: "Напівпровідникові резистори та діоди"

ПЛАН

- 4.1. Напівпровідникові резистори.
- 4.2. Напівпровідникові діоди.

4.1. Напівпровідникові резистори

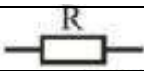
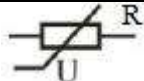
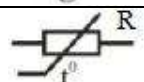
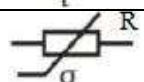
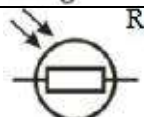
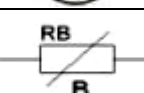
Класифікація та умовне позначення напівпровідникових резисторів

В цілому, оскільки резистор – це пасивний елемент електричного кола, що призначений для використання властивостей свого електричного опору, то напівпровідникові резистори – це напівпровідникові прилади з двома виводами з однорідного напівпровідника без *p-n-переходів*, в яких використовуються різні види залежностей опору слабколегованих напівпровідників від дії температури, електромагнітного випромінювання, прикладеної напруги, магнітного поля, механічних навантажень тощо. Ці резистори можуть бути як лінійними, так і мати значну нелінійність вольт-амперної характеристики. В основному напівпровідникові резистори використовуються в складі інтегральних мікросхем, де інші типи резисторів застосувати важче. За допомогою напівпровідникових резисторів вирішується широкий круг задач по вимірюванню електричних, неелектричних і магнітних величин, по виконанню систем і пристроїв автоматичного управління, захисту приладів і пристроїв від перевантажень за струмом і напругою і т.п.

Згідно прийнятої класифікації, напівпровідникові резистори поділяються на (див. табл. 4.1): а) лінійні напівпровідникові резистори – питомий опір мало залежить від напруженості електричного поля та густини електричного струму; б) варистори – опір залежить від прикладеної напруги; в) терморезистори – опір істотно залежить від температури; г) тензорезистори – опір істотно залежить від деформації резистора (механічної напруги); д) фоторезистори – опір істотно залежить від рівня освітленості; е) магніторезистори – опір істотно залежить від величини напруженості магнітного поля. Перші дві групи напівпровідникових резисторів відповідно до цієї класифікації – лінійні резистори і варистори – мають електричні характеристики, слабо залежні від зовнішніх чинників: температури навколишнього середовища, вібрації, вологості, освітленості та ін. Для решти груп

Таблиця 4.1.

Умовні позначення напівпровідникових резисторів

Типи резисторів	Умовне позначення
Лінійні резистори	
Варистори	
Терморезистори (термістри, позистори)	
Тензорезистори	
Фоторезистори	
Магніторезистори	

напівпровідникових резисторів, навпаки, характерна сильна залежність їх електричних характеристик від зовнішніх чинників.

Лінійний резистор – напівпровідниковий елемент, в якому зазвичай використовується слабколегований кремній або арсенід галію. Опір лінійного резистора практично сталий в широкому діапазоні зміни напруг і струмів. Лінійні резистори знайшли широке застосування в інтегральних мікросхемах.

Варистор – це напівпровідниковий резистор, опір якого залежить від прикладеної напруги, що має нелінійну симетричну вольт-амперну характеристику (ВАХ). Варистори виготовляють спіканням при температурі +1700 °С напівпровідника (переважно з порошкоподібного карбіду кремнію **SiC** або оксиду цинку **ZnO**) та сполучної речовини (глини, рідке скло, лаки, смоли та ін.). Після цього поверхню отриманого елемента металізують та припаюють до неї виводи. Конструктивно варистори виготовляються у вигляді дисків, таблеток, стрижнів (Рис. 4.1, 4.2). Широке розповсюдження отримали стрижневі налаштовувані варистори з рухомим контактом.

Нелінійність вольт-амперної характеристики варисторів (рис. 4.4) обумовлена локальним нагрівом дотичних граней численних кристалів карбіду кремнію (оксиду цинку) при проходженні через них струму (рис. 4.3). При локальному підвищенні температури на межах кристалів опір останніх різко знижується, що призводить до подальшого зменшення загального опору варисторів при великій напрузі.

Основні параметри варисторів:

- 1) **коефіцієнт нелінійності λ** , який визначається відношенням опору постійного струму (статичного) **R** до опору змінного струму (динамічного) **r**:

$$\lambda = \frac{R}{r} = \frac{U/I}{dU/dI}, \quad (4.1)$$

де **U** і **I** – напруга і струм варистора. Для різних типів варисторів $\lambda=2-100$, так коефіцієнт нелінійності у варисторів на основі **SiC** лежить в межах 2-10, та 20-100 у варисторів на основі **ZnO**;

- 2) **максимальна допустима напруга $U_{\text{МАХ доп}}$** (від 10-40 В до 10-30 кВ);
- 3) **номінальна потужність розсіювання $P_{\text{НОМ}}$** ($P_{\text{НОМ}}=1-3$ Вт);
- 4) **температурний коефіцієнт опору $ТКО$** ($ТКО$ в середньому $5 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$), негативна величина якого характеризує відносну зміну опору резистора при зміні температури на 1 К;
- 5) **гранична максимальна робоча температура $t_{p \text{ МАХ}}$** ($t_{p \text{ МАХ}}= 60-70 \text{ }^\circ\text{C}$).



Рис. 4.2. Варистор (385 В)

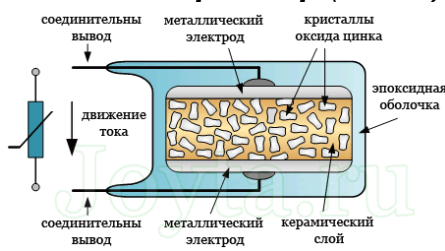


Рис. 4.3. Внутрішня будова варистора

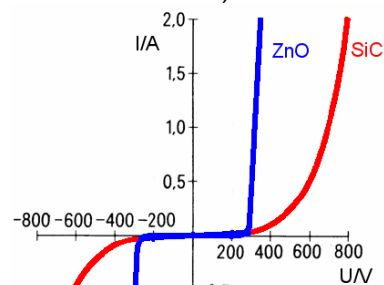


Рис. 4.4. Вольт-амперні характеристики варисторів на основах ZnO і SiC

Рис. 4.1. Види варисторів

Низьковольтні варистори виготовляють під робочу напругу від 3 до 200 В та струм від 0,1 мА до 1 А; високовольтні варистори – під робочу напругу до 20 кВ. Варистори застосовують для стабілізації та регулювання низькочастотних струмів і напруги; в аналогових обчислювальних машинах – для реалізації підняття до степеня, добування коренів та інших математичних дій; для захисту від перенапруги (наприклад, високовольтні лінії електропередачі, лінії зв'язку, електричні прилади) та ін. Високовольтні варистори застосовують для виготовлення обмежувачів перенапруги. Як електричні компоненти, варистори дешеві і надійні, здатні витримувати значні електричні перевантаження, можуть працювати на високій частоті (до 500 кГц). Серед недоліків – значний низькочастотний шум та старіння (зміна параметрів з часом і при коливаннях температури).

Отже, в практиці використовується властивість варисторів до значного зменшення загального опору при зростанні напруги і відповідно до зростання струму, що проходять через варистор. Вони використовуються для захисту від перенапруг в колах на постійному і змінному струмі з частотою до декількох кілогерц (рис. 4.5), в стабілізаторах і обмежувачах напруги в різних схемах автоматики. Так, при перенапрузі струм протікає через $F1 - RU - F2$, що призводить до перегорання одного з запобіжників. При тривалому імпульсі значного струму відбувається перегрів та перегорання варистора.

Терморезистори – це напівпровідникові резистори, в яких використовується залежність електричного опору напівпровідника від температури. Розрізняють два типи терморезисторів: **термістор**, опір якого із зростанням температури падає (з негативним температурним коефіцієнтом опору TKO), і **позистор**, у якого опір з підвищенням температури зростає (з позитивним TKO). Терморезистори випускаються у вигляді циліндрів, стрижнів, трубок, дисків, пластин, шайб або намистин, що отримують методами керамічної технології, тобто шляхом випалення заготовок при високій температурі. Їх розміри варіюються від декількох мкм до декількох см (рис. 4.6-4.10). Терморезистори з негативним TKO виготовляють із суміші полікристалічних оксидів перехідних металів (наприклад, MnO , CoO , NiO , CuO), легованих Ge і Si , напівпровідників типу $A^{III}B^V$, скловидних напівпровідників та інших матеріалів. Розрізняють **терморезистори низькотемпературні** (розраховані на роботу при температурах нижче 170 К), **середньотемпературні** (170-510 К) і **високотемпературні** (вище 570 К). Крім того, існують терморезистори, призначені для роботи при 4,2 К й нижче та при 900-1300 К.

Основна частина **термісторів**, що випускаються промисловістю, виготовлена з полікристалічних окисних напівпровідників – з оксидів металів. У термісторах опір змінюється або під впливом тепла, що виділяється в них при проходженні електричного струму, або в результаті зміни температури навколишнього середовища в якому знаходиться терморезистор. Зменшення опору напівпровідника із збільшенням температури може бути обумовлене наступними причинами – збільшенням концентрації носіїв заряду і збільшенням їх рухливості.

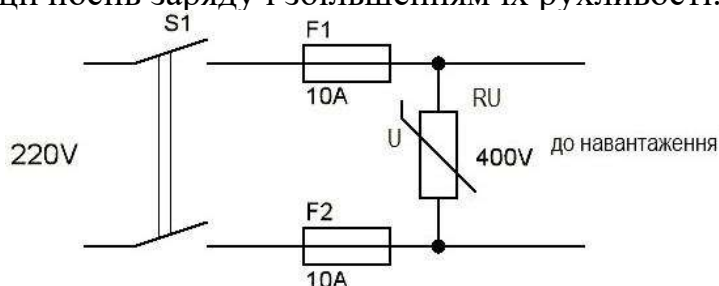


Рис. 4.5. Принципова електрична схема включення варистора в електроприладах для захисту від перенапруг



Рис. 4.6. Терморезистори різної форми

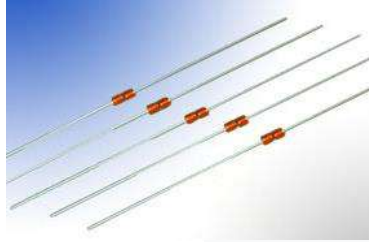


Рис. 4.7. Термістори з аксіальними виводами



Рис. 4.8. Датчик температури на основі термістора

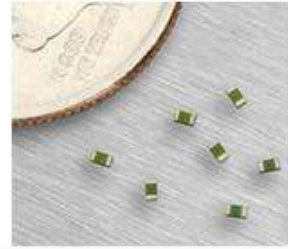


Рис. 4.9. SMD-термістори



Рис. 4.10. Позистор MZ72 9RM270V (PTC 9 Ohm 270V 2pin)

Матеріалом для виготовлення позисторів служить титан-барієва кераміка з домішкою рідкоземельних елементів. Такий матеріал має аномальну температурну залежність: у вузькому діапазоні температур його питомий опір збільшується на декілька порядків із збільшенням температури. Конструктивно позистор оформляють аналогічно термісторам.

Основні параметри терморезисторів:

- 1) **номінальний опір** – опір при певній температурі (зазвичай 20 °C) (від декількох Ом до декількох кОм з допустимим відхиленням від номінального опору ± 5 , ± 10 і ± 20 %);
- 2) **температурний коефіцієнт опору терморезистора** – показує відносну зміну опору терморезистора при зміні температури на один градус. Температурний коефіцієнт опору залежить від температури, тому його записують з індексом, який вказує температуру, при якій має місце дане значення. Значення **TKO** при кімнатній температурі різних термісторів знаходиться в межах $(0,8-6) \cdot 10^{-2} \text{ K}^{-1}$:

$$TKO|_T = \frac{1}{R} \cdot \frac{dR}{dT}; \quad (4.2)$$

- 3) **максимально допустима температура t_{MAX}** – це температура, при якій ще не відбувається необоротних змін параметрів і характеристик терморезистора;
- 4) **допустима потужність розсіювання $P_{MAX \text{ доп}}$** – це потужність, при якій терморезистор, що знаходиться в спокійному повітрі при температурі 20 °C, розгрівається при проходженні струму до максимально допустимої температури;
- 5) **постійна часу терморезистора τ_T** – це час, протягом якого температура терморезистора зменшується в e разів по відношенню до різниці температур терморезистора і навколишнього середовища (наприклад, при перенесенні терморезистора з повітряного середовища з $t=120$ °C в повітряне середовище з $t=20$ °C). Для різних типів термісторів постійна часу τ_T лежить в межах від 0,5 до 140 с. **Теплова інерційність терморезистора**, що характеризується його постійною часу, визначається конструкцією і розмірами, та залежить від теплопровідності середовища, в якому знаходиться терморезистор.

Температурна характеристика терморезистора **$R=f(t)$** – це залежність його опору від температури (рис. 4.11).

Найбільш широко використовуються середньотемпературні терморезистори із **TKO** від -2,4 %/K до -8,4 %/K та номінальним опором від 1 до 10^6 Ом.

Терморезистори (термістори) застосовують для температурної стабілізації режиму транзисторних підсилювачів, а також в різних пристроях вимірювання, контролю і автоматики (вимірювання контролю і автоматичного регулювання температури, температурної і пожежної сигналізації і ін.). **Позистори переважно використовуються** в пристроях температурного захисту (електродвигунів), як датчики температури перегріву та в пристроях включення пускової обмотки однофазних електродвигунів з короткозамкненим ротором.

Тензорезистор – це напівпровідниковий резистор, в якому використовується залежність електричного опору від механічної деформації. Призначення тензорезисторів – вимірювання тиску і деформацій. Принцип дії напівпровідникового тензорезистора заснований на **тензорезистивному ефекті** – на зміні електричного опору напівпровідника під дією механічних деформацій.

Для виготовлення тензорезисторів найчастіше використовують кремній з електропровідністю **n- і р-типів** (рис. 4.13). Заготовки такого кремнію ріжуть на дрібні пластинки, шліфують, наносять контакти і приєднують виводи. **Деформаційна характеристика тензорезистора** (рис. 4.12) – це залежність відносної зміни опору тензорезистора від відносної деформації.

Основні параметри тензорезисторів:

- 1) **номінальний опір тензорезистора** – це опір без деформації при $t=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (зазвичай має величину від декількох десятків до декількох тисяч Ом);
- 2) **коефіцієнт тензочутливості K** – відношення відносної зміни опору до відносної зміни довжини тензорезистора. Для різних тензорезисторів K лежить в межах від -100 до +200:
$$K = (\Delta R/R) / (\Delta l/l) \quad (4.3)$$
- 3) **гранична деформація тензорезистора.**

Фоторезистор – це напівпровідниковий резистор, опір якого залежить від величини освітленості (рис. 4.14). Він є пасивним компонентом і не має **p-n-переходу**, тому характеризується однаковою провідністю незалежно від напрямку протікання струму. Принцип дії фоторезистора ґрунтується на **ефекті фотопровідності** – явищі зменшення опору напівпровідника у разі збудження носіїв заряду світлом. Саме явище зміни електричного опору напівпровідника під дією випромінювання, називають **фоторезистивним ефектом**, або **внутрішнім фотоелектричним ефектом**. Для виготовлення фоторезисторів використовують напівпровідникові матеріали з шириною забороненої зони, оптимальної для розв'язуваної задачі. Так, для реєстрації видимого світла використовуються фоторезистори з селеніду чи сульфїду кадмію (**CdS**), **Se**. Для реєстрації інфрачервоного випромінювання використовують **Ge** (чистий або легований домішками **Au**, **Cu** або **Zn**), **Si**, **PbS**, **PbSe**, **PbTe**, **InSb**, **InAs**, **HgCdTe**, які охолоджуються до низьких температур.

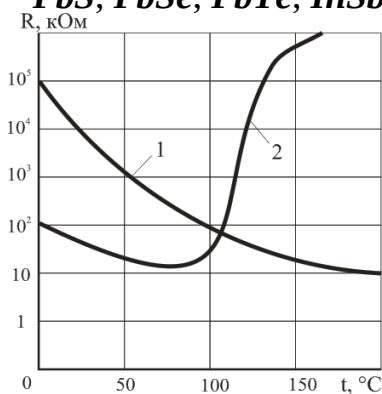


Рис. 4.11. Температурні характеристики терморезисторів: 1 – термістор; 2 – позистор

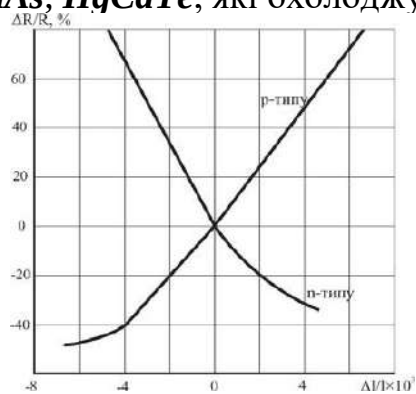


Рис. 4.12. Деформаційні характеристики тензорезисторів з кремнію з електропровідністю р- та n-типів

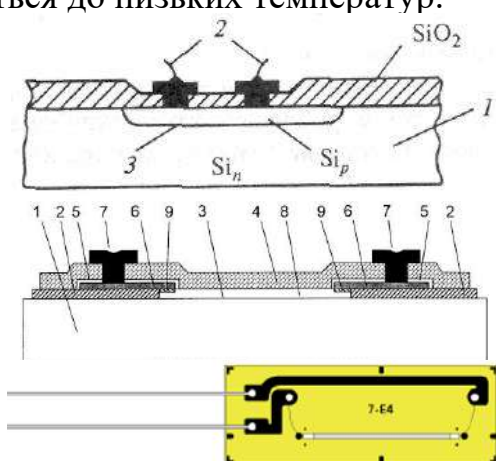


Рис. 4.13. Схеми напівпровідникових тензорезисторів

Основною частиною конструкції фоторезистора є **фоточутливий шар напівпровідника 2** (рис. 4.15, а). Пластинку або плівку напівпровідникового матеріалу **2** наносять тонким шаром на **діелектричну підкладку 1** зі скла (кварцу) або кераміки (чи вирізають у вигляді тонкої пластинки з монокристалу). На поверхню фоточутливого шару наносять **металеві електроди 3** із зовнішніми виводами. Для захисту від вологи світлочутливий шар покривають прозорим лаком. Підкладку з напівпровідниковим шаром розміщують в металічний або пластмасовий захисний корпус, що має вікно для проходження світлового потоку.

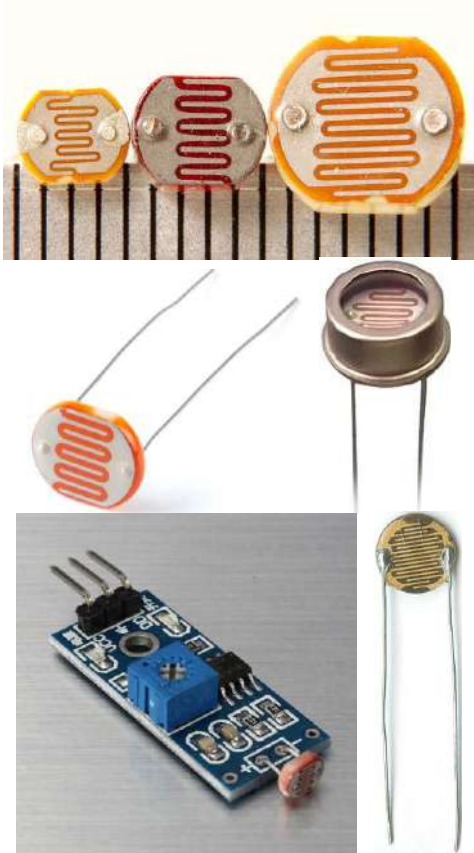


Рис. 4.14. Зовнішній вид фоторезисторів

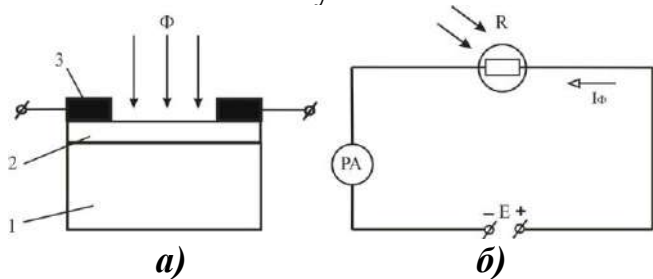


Рис. 4.15. Фоторезистор: а – будова; б – схема увімкнення

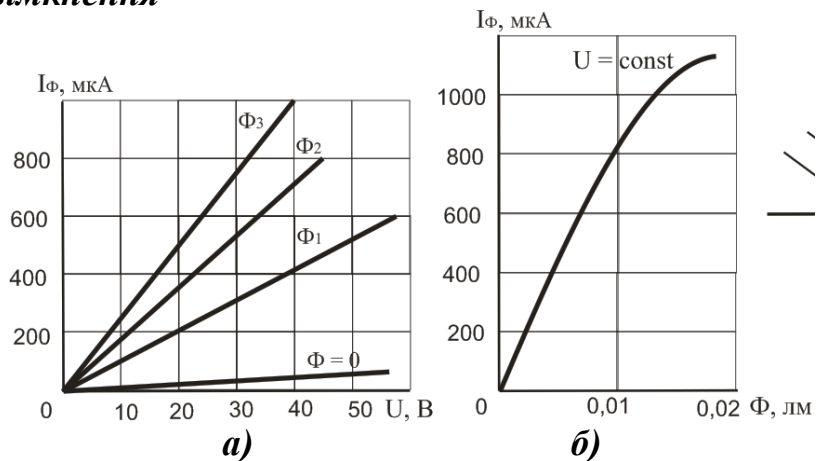


Рис. 4.16. Характеристики фоторезисторів: а – вольт-амперна $I=f(U)$ при $\Phi=const$; б – світлова $I=f(\Phi)$ при $U=const$

Схема увімкнення фоторезистора наведена на рис. 4.15, б. Полярність джерела живлення не грає ролі. Якщо до неосвітленого фоторезистора підключити **джерело живлення E**, то в електричному колі з'явиться невеликий струм, який називають **темновим струмом**, що обумовлений наявністю в неосвітленому напівпровіднику деякої кількості вільних носіїв заряду. При освітленні фоторезистора в ньому відбувається збільшення концентрації вільних носіїв заряду і його опір зменшується; струм у колі зростає. Різниця струмів при наявності та відсутності освітлення називається **фотострумом I_Φ** (рис. 4.16), величина якого залежить від інтенсивності освітлення, величини прикладеної напруги, а також виду та розмірів напівпровідника, що використовується у фоторезисторі.

Основні параметри фоторезисторів:

- 1) **інтегральна чутливість** – відношення зміни напруги на одиницю потужності падаючого випромінювання (при номінальному значенні напруги живлення);
- 2) **питома інтегральна чутливість K_0** – це відношення фотоструму до світлового потоку і до прикладеної напруги: $K_0=I_\Phi/(\Phi \cdot U)$. Для фоторезисторів вона досягає 5000 мкА/лм·В;
- 3) **пори́г чутливості** – величина мінімального сигналу, реєстрованого фоторезистором, віднесена до одиниці смуги робочих частот;

4) **темновий опір R_T** – це опір фоторезистора при відсутності освітлення ($R_T=10^4\text{-}10^{10}$ Ом);

5) **максимальна допустима робоча напруга $U_{P\text{ MAX}}$** ($U_{P\text{ MAX}}\leq 600$ В).

Для фоторезисторів характерна деяка затримка між дією світла і наступною зміною опору, значення якої, як правило, складає близько 10 мс. Час затримки за переходу від освітлених до темних середовищ, є навіть ще більшим, і часто досягає 1 секунди. Ця властивість робить фоторезистори непридатними до вимірювання об'єктів, які швидко блимають, але іноді вони використовуються задля згладжування реакції стиснення аудіосигналу.

Фоторезистори широко застосовуються в пристроях автоматики і вимірювальної техніки, системах керування й сигналізації, фотометрії, оптопарах та ін. Так, фоторезистори використовують у фотореле, які автоматично вмикають вуличне освітлення в сутінках, на турнікетах метро тощо.

Магніторезистор – резистор, основна властивість якого полягає в здатності змінювати свій електричний опір під дією магнітного поля (рис. 4.17-4.19). Магніторезистори характеризуються такими параметрами, як магнітна чутливість, номінальний опір, робочий струм, термостабільність і швидкодія, діапазон робочих температур. Принцип дії **монолітних (кристалічних) магніторезисторів** ґрунтується на ефекті Гауса, який характеризується зростанням опору напівпровідника (або провідника) при поміщенні його в магнітне поле. Магніторезистори містять підкладку з розміщеним на ній **магніточутливим елементом (МЧЕ)**. Підкладка забезпечує механічну міцність приладу. Елемент приклеєний до підкладки і захищений зовні шаром лаку. **МЧЕ** може розміщуватися в оригінальному або стандартному корпусі і забезпечуватися феритовим концентратором магнітного поля або зміщувальним постійним мікромагнітом. Монолітні магніточутливі елементи виготовляються з напівпровідникових матеріалів, що мають високу рухливість носіїв заряду. До таких матеріалів належать антимонід індію (**InSb**) і його сполуки, арсенід індію (**InAs**) та ін. Найбільшого поширення для виготовлення **МЧЕ** отримав евтектичний сплав **InSb-NiSb**, легований телуrom. Залежно від призначення приладу **МЧЕ** можуть мати різну форму. Найвідоміші **МЧЕ** прямокутної форми чи мають вигляд меандру.

Магніторезистивні датчики відрізняються високою чутливістю і дозволяють вимірювати найменші зміни магнітного поля. Вони застосовуються в магнітометрах для вирішення різних завдань: визначення кута повороту, положення об'єкта відносно магнітного поля Землі, вимірювання частоти обертання зубчастих коліс тощо. Зовнішній вигляд деяких модифікацій магніторезисторів показаний на рис. 4.19. Вимірювання кутових переміщень виконується за допомогою датчиків, показаних на рис. 4.19, а. Для вимірювання лінійних переміщень розроблені магнітні лінійки (рис. 4.19, б) з роздільною здатністю до 0,02 мм. Магніторезистори нерідко використовують для визначення положення і переміщення об'єкта (наприклад, в робототехніці), в якості безконтактних потенціометрів і цифрових вимірювачів частоти обертання (енкодерів; рис. 4.19, в), кінцевих і шляхових безконтактних вимикачів (сигналізаторів) з діапазоном спрацьовування від 0 до 100 мм і т.п. (Рис. 4.19, з). У багатьох випадках магніторезистори мають вигляд інтегральних мікросхем (рис. 4.19, д). В останньому випадку магніторезистори доповнюються транзисторними ключами, підсилювачами, схемами термокомпенсації, обробки (лінеаризації) сигналу й іншими електронними компонентами. Електроживлення датчиків зазвичай становить 5-30 В постійного струму для різних модифікацій.

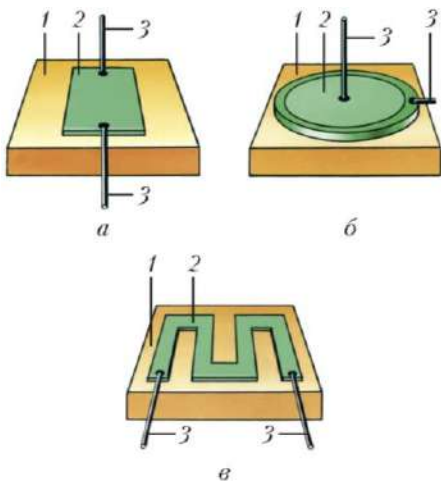


Рис. 4.17. Схема магніторезисторів з резистивним елементом у формі прямокутника (а), диску (б), меандру (в): 1 – підкладка; 2 – резистивний елемент; 3 – стромопідведення



Рис. 4.18. Зовнішній вигляд магніторезисторів та датчиків магнітного поля

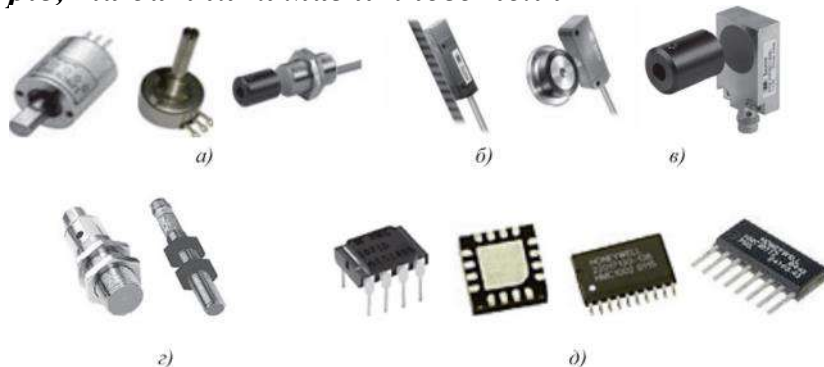


Рис. 4.19. Конструкції магніторезистивних датчиків

4.2. Напівпровідникові діоди

4.2.1. Електронно-дірковий або $p-n$ -перехід

Якщо два напівпровідники з різними типами провідності привести до контакту, то на межі їх поділу буде мати місце різниця (градієнт) концентрації вільних носіїв зарядів одного знаку (рис. 4.20, а), тобто $p_p \gg p_n$ і $n_n \gg n_p$.

За рахунок дифузії електрони з n -області, де їх концентрація вища, будуть переміщуватись в p -область, де їх концентрація нижча, рекомбінуючи там з дірками. Дірки p -області, навпаки, будуть переходити в n -область, рекомбінуючи там з електронами. В результаті таких переміщень на границі поділу напівпровідників в n -області залишаються позитивно заряджені іони (атоми п'ятивалентних домішок, що втратили електрон), а в p -області – негативно заряджені іони акцепторних домішок, які придбали електрони. Треба мати на увазі, що іони є нерухомі. Таким чином, дифузія основних носіїв заряду приводить до створення **приграничного шару I (електронно-діркового або $p-n$ -переходу)**, одна сторона якого заряджена негативно (p -область), а інша – позитивно (n -область). Різниця потенціалів, створена цими зарядами називається **контактною різницею потенціалів** або **потенціальним бар'єром** ϕ_k (рис. 4.20, б). Цей бар'єр спричиняє гальмівну дію для основних і пришвидшуючу – для неосновних носіїв зарядів. У разі відсутності зовнішнього електричного поля внутрішнє поле переходу забезпечує рівність потоків носіїв (одного знаку) зарядів в обох напрямках, тобто рівність нулю сумарного струму через $p-n$ -перехід. Електрони, що приходять до $p-n$ -переходу з боку n -області, відштовхуються від'ємними іонами, а дірки p -області – позитивними іонами. Отже, **$p-n$ -перехід це область на межі поділу двох напівпровідників з різними типами провідності, яка має відповідної ширини область збіднену рухомими носіями зарядів, володіє потенціальним бар'єром і значним внутрішнім опором**. Якщо концентрація домішок в p і n -областях різна, то **$p-n$ -перехід буде більш глибоко проникати в ту область, концентрація домішок в якій менша**, тобто $I_n \neq I_p$. Величина потенціального бар'єру ϕ_k залежить від співвідношення концентрації носіїв зарядів одного знаку з обох сторін переходу і визначається співвідношенням:

$$\phi_k = \phi_T \ln(p_p/p_n) = \phi_T \ln(n_n/n_p), \quad (4.4)$$

де $\phi_T = (k_B \cdot T)/q_0$ – тепловий потенціал, k_B – стала Больцмана, T – температура в гра-

дусах Кельвіна, q_0 – елементарний заряд (електрона). У випадку, коли $T=293$ К (кімнатна температура), $\varphi_T=0,026$ еВ.

Потенціальний бар'єр φ_k кремнієвих напівпровідників має величину $\varphi_k(\text{Si})=0,7-0,8$ еВ, для германієвих – $\varphi_k(\text{Ge})=0,3-0,4$ еВ, а їх ширина – доли мкм.

Якщо до ***p-n-переходу*** підвести зовнішню напругу, полярність якої направлена назустріч контактній різниці потенціалів ***p-n-переходу*** (рис. 4.20, в), то дірки ***p-області***, відштовхуючись від додатного потенціалу зовнішнього джерела, зміщуються до ***p-n-переходу***. Це приводить до часткової їх рекомбінації з негативними іонами акцепторної домішки і звуження ***p-n-переходу*** з боку ***p-області***. Аналогічно, електрони ***n-області***, зміщуючись під впливом негативного полюсу зовнішньої напруги до ***p-n-переходу***, рекомбінують з додатними іонами донорної домішки, звужуючи ***p-n-перехід*** з боку ***n-області***. Це приводить до зниження потенціального бар'єру ***p-n-переходу*** і збільшення дифузійних переміщень через нього основних носіїв зарядів. У даному випадку через ***p-n-перехід*** та у зовнішньому колі протікає електричний струм, який називається ***прямим струмом*** $I_{пр}$, а зовнішня напруга з розглянутою полярністю – ***прямою напругою*** $U_{пр}$. Величина потенціального бар'єру ***p-n-переходу*** зменшиться на величину прямої напруги $\varphi_{p-n}=\varphi_k-U_{пр}$. Розглянутий процес називають ***інжекцією носіїв (зарядів)*** – перенесенням основних носіїв заряду крізь ***p-n-перехід*** у разі зниження його потенціального бар'єру.

Якщо змінити полярність зовнішнього джерела напруги на протилежну (у даному разі ***напругу*** будемо називати ***зворотною*** $U_{зв}$), то основні носії зарядів (дірки ***p-області*** і електрони ***n-області***) будуть притягуватись до відповідних полюсів зовнішнього джерела напруги (рис. 4.20, з). Це призведе до розширення ***p-n-переходу*** і збільшення його потенціального бар'єру на величину зовнішньої напруги $\varphi_{p-n}=\varphi_k+U_{зв}$. Неосновні носії зарядів (електрони ***p-області*** і дірки ***n-області***) будуть відштовхуватись від полюсів зовнішнього джерела напруги і зміщуватися до ***p-n-переходу***. Поле ***p-n-переходу*** чинить на неосновні носії зарядів притягальну дію, а тому вони цим полем (дрейфовим способом) будуть переміщуватись через ***p-n-перехід*** і зумовлювати через нього і у зовнішньому колі струм, який називається ***зворотним струмом*** $I_{зв}$. Явище переміщення носіїв заряду через перехід під дією напруги (електричного поля) називається ***екстракцією***.

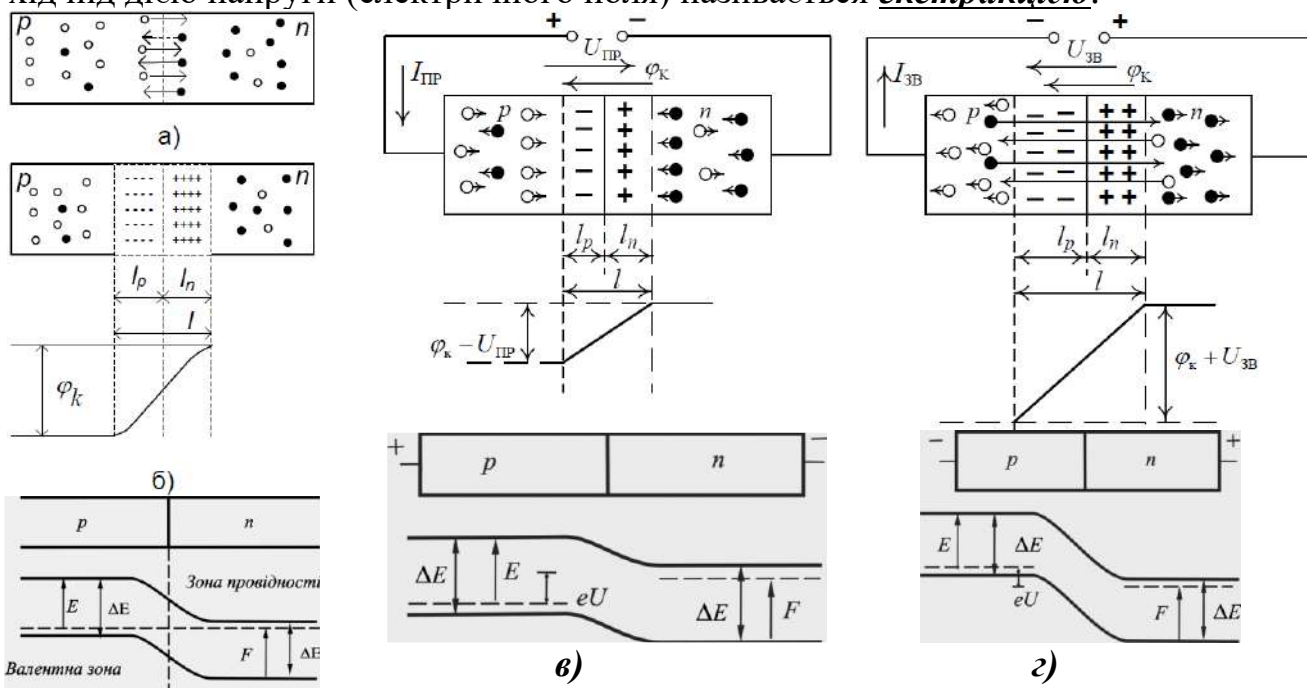


Рис. 4.20. Схема ***p-n-переходу*** та енергетичні рівні електронів в ньому при нульовому (а,б), прямому (в) та зворотному (з) зміщеннях

Таким чином, зворотний струм є струмом неосновних носіїв, які, як відомо, в основному виникають під дією температури. Тому зворотний струм ще називають тепловим. Струм через p-n-перехід визначається залежністю:

$$I_{p-n} = I_0 \cdot \left(e^{\frac{\pm U_{зов}}{\phi_T}} - 1 \right), \quad (4.5)$$

де I_0 – зворотній струм насичення; "+" – відповідає прямій зовнішній напрузі $U_{зов}$; "-" – відповідає зворотній зовнішній напрузі $U_{зов}$; ϕ_T – тепловий потенціал.

Зв'язок між струмом і напругою $I=f(U)$ називається вольт-амперною характеристикою (ВАХ) p-n-переходу. На рис. 4.21 приведена ВАХ p-n-переходу, побудована згідно вище поданого виразу.

Отже, прямий струм p-n-переходу утворюється основними носіями зарядів, а зворотний – неосновними. Через те, що концентрація основних носіїв заряду на декілька порядків перевищує концентрацію неосновних носіїв, прямий струм на декілька порядків більший ніж зворотний. Цим зумовлюється вентильна властивість (одностороння провідність) p-n-переходу. Зворотний струм залежить від температури і може бути визначений залежністю:

$$I_{ЗВ(T_2)} = I_{ЗВ(T_1)} \cdot 2^{\frac{T_2 - T_1}{10}}, \quad (4.6)$$

де $I_{ЗВ(T_2)}$ – струм при температурі T_2 ; $I_{ЗВ(T_1)}$ – струм при температурі T_1 . З наведеного виразу слідує, що зворотний струм подвоюється у разі збільшення температури на кожні 10 °С.

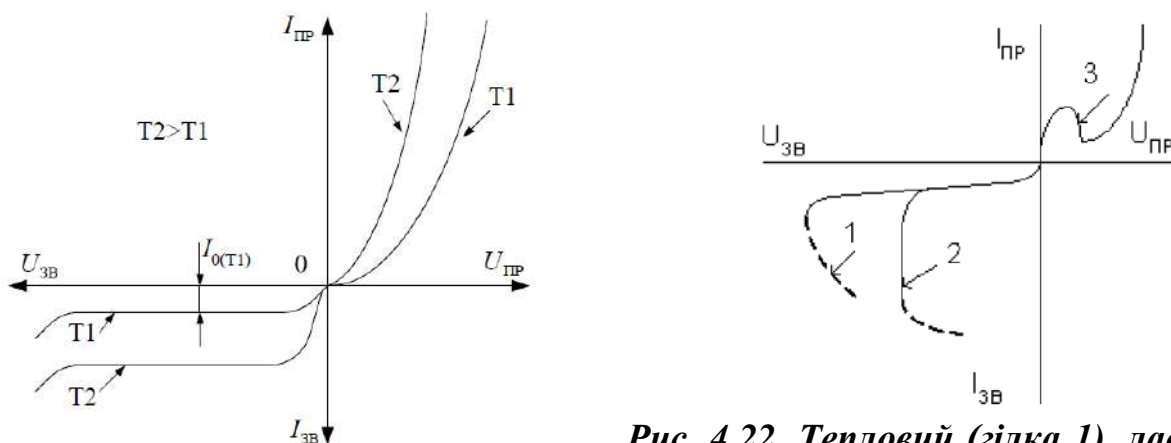


Рис. 4.21. ВАХ p-n-переходу
Рис. 4.22. Тепловий (гілка 1), лавинний (гілка 2) і тунельний (гілка 3) пробіи p-n-переходу

Пробіи p-n переходу

Під пробоєм p-n-переходу розуміють явище різкого збільшення через нього струму. У залежності від причин, які спричиняють зростання струму через p-n-перехід розрізняють тепловий, електричний (лавинний і тунельний) і поверхневий пробіи.

Тепловий пробій зумовлюється збільшенням числа носіїв заряду в p-n-переході за рахунок їх термогенерації, якщо відведення від переходу в навколишній простір в одиницю часу тепла буде меншим ніж його збільшення під дією струму (рис. 4.22, гілка 1). Це приводить до надмірного розігріву p-n-переходу та його розплавлення. Тепловий пробій є незворотним.

Лавинний пробій зумовлений лавинним розмноженням носіїв заряду у разі ударної іонізації атомів швидкими носіями. Сутність його полягає у тому, що неосновні носії зарядів під дією зворотної напруги прискорюються полем p-n-переходу і при русі у ньому зіштовхуються з атомами кристалічних ґраток напівпровідника. При відповідній напруженості електричного поля ці носії заряду набу-

вають енергію достатню для вибивання валентних електронів з атомів силіцію або германію, тобто появи додаткових пар носіїв заряду – електронів і дірок. Останні, в свою чергу, прискорюються і у разі зіткнення з атомами також утворюють додаткові носії заряду. Цей процес може відбуватись у відносно широких ***p-n-переходах*** і носить лавинний характер. Збільшення струму переходу (збільшення рухомих носіїв заряду в ***p-n-переході***) приводить до зменшення його опору, внаслідок чого напруга на ***p-n-переході*** залишається практично незмінною (*гілка 2* на рис. 4.22) при зростанні струму. Цей процес буде зворотнім, якщо зростання струму не спричинить накопиченню тепла в ***p-n-переході***. У разі порушення рівноваги між накопиченням тепла в ***p-n-переході*** і його віддачею в навколишній простір настає тепловий пробій (*пунктирна частина гілки 2*).

В основі **тунельного пробою** лежить явище безпосереднього відриву валентних електронів від атомів кристалічних ґраток під впливом сильного електричного поля. Утворені таким чином додаткові дірки і електрони збільшують струм через ***p-n-перехід***. Тунельний пробій виникає у вузьких ***p-n-переходах***, в яких при порівняно невеликих напругах має місце висока напруженість електричного поля (рис. 4.22, *гілка 3*). У кремнієвих напівпровідниках тунельний пробій настає при напруженості $U_k \geq 4 \cdot 10^5$ В/см, а у германієвих – при $U_k \geq 2 \cdot 10^5$ В/см. ***Тунельний пробій є зворотним.***

Поверхневий пробій виникає там, де перехід виходить на поверхню напівпровідникового кристала і за наявності поверхневого поля, що збільшує напруженість у поверхневих шарах переходу. Розподіл напруженості електричного поля в ***p-n-переході*** може суттєво змінити заряди, що є на поверхні напівпровідника. Поверхневий заряд приводить до збільшення чи зменшення товщини ***p-n-переходу***. Через це на поверхні переходу може наступити пробій при напруженості поля значно меншої тій, яка потрібна для виникнення пробою в об'ємі. Значну роль при виникненні поверхневого пробою відіграють діелектричні властивості середовища, що межує з поверхнею напівпровідника (захисне покриття, забрудненість та ін.). Для зменшення вірогідності поверхневого пробою необхідно використовувати захисне покриття з високою діелектричною сталою.

Напівпровідниковий діод – це електроперетворювальний напівпровідниковий прилад з одним випрямним електричним переходом і двома виводами, в якому використовуються властивості електронно-діркового ***p-n-переходу*** або ***контакту метал-напівпровідник*** (рис. 4.23, 4.24).

Напівпровідникові діоди класифікуються:

- 1) **за призначенням:** випрямні, високочастотні та надвисокочастотні (***ВЧ-*** та ***НВЧ-*** діоди), імпульсні, стабілітрони, тунельні, варикапи, зворотні, фотодіоди, світлодіоди та ін. (табл. 4.2);
- 2) **за конструктивно-технологічними особливостями:** площинні і точкові;
- 3) **за типом вихідного матеріалу:** германієві, кремнієві, арсеніде-галієві, ***InSb***, ***CdS***, ***Hg_{1-x}Cd_xTe***, ***Pb_{1-x}Sn_xTe_{1-y}Se_y*** та ін.

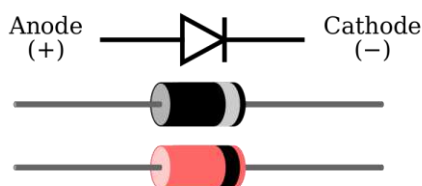


Рис. 4.23. Позначення напівпровідникового діода (вгорі) і відповідне йому маркування корпусу (внизу)

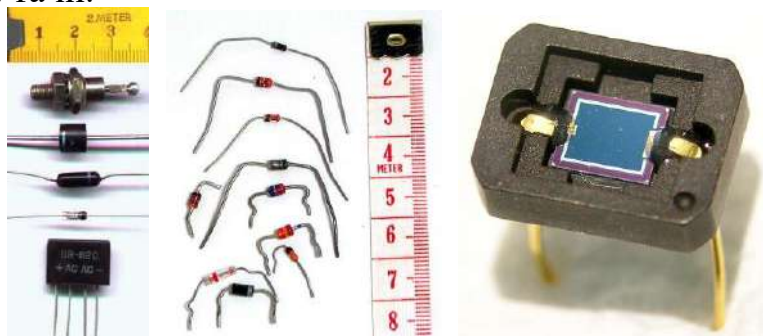


Рис. 4.24. Зовнішній вигляд напівпровідникових діодів

Таблиця 4.2.

Умовні позначення різних типів напівпровідникових діодів

Тип	Умовне позначення
Випрямний	VD
Стабілітрон	VD
Тунельний	VD
Зворотний	VD
Варикап	VD
Діод Шотткі	VD
Фотодіод	
Світлодіод	

У точковому діоді використовується пластинка германію або кремнію з електропровідністю ***n-типу*** (рис. 4.25), завтовшки 0,1-0,6 мм і площею 0,5-1,5 мм²; з пластинкою стикається загострений провідниковий дріт (голка) з нанесеною на його вістря (акцепторною) домішкою. При цьому з голки в основний напівпровідник дифундують домішки, які створюють область з іншим типом електропровідності (***p-область***). Таким чином, в напівпровіднику біля вістря голки утворюється мініатюрний ***p-n-перехід*** напівсферичної форми.

У площинних (планарних) діодах ***p-n-перехід*** утворюється двома напівпровідниками з різними типами електропровідності, причому площа переходу у різних типів діодів лежить в межах від сотих долів квадратного міліметра до декількох десятків квадратних сантиметрів (силові діоди). Площинні діоди виготовляються методами сплаву (вплавлення) або дифузії (рис. 4.26). Так, у пластинку германію ***n-типу*** вплавляють при температурі близько 500 °С краплю індію (рис. 4.26, а), яка (сплавляючись з германієм) утворює шар германію ***p-типу***. Область з електропровідністю ***p-типу*** має вищу концентрацію домішок, ніж основна пластинка, і тому є емітером. До основної пластинки германію і до індію припаюють вивідні дроти, зазвичай з нікелю. Якщо вихідним матеріалом є германій ***p-типу***, то в нього вплавляють сурму і тоді виходить емітерна область ***n-типу***. Дифузійний метод виготовлення ***p-n-переходу*** заснований на тому, що атоми домішок дифундують в основний напівпровідник (рис. 4.26, б). Для створення ***p-шару*** використовують дифузію акцепторного елементу (бору або алюмінію для кремнію, індію для германію) через поверхню вихідного матеріалу.

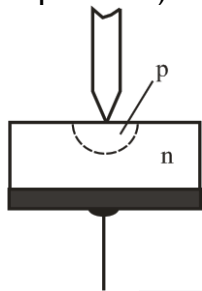


Рис. 4.25. Структура точкових діодів

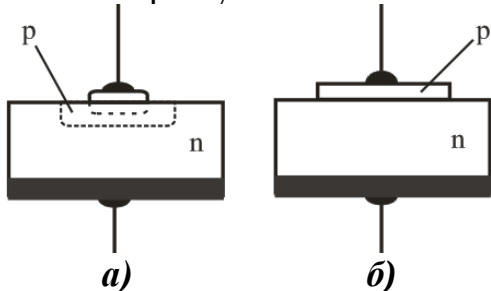


Рис. 4.26. Структура площинних діодів: а – виготовлений сплавним методом; б – виготовлений дифузійним методом

Випрямні діоди призначені для випрямлення змінного струму низької частоти (перетворення змінного струму в постійний) (рис. 4.27, а). Електронно-діркові переходи випрямних діодів мають площинну конструкцію, щоб пропускати великі струми і виконуються на високоомному матеріалі (для втримання великих зворотних напруг). Вони виготовляються на основі несиметричних **p-n-переходів**, що мають дві області (базу та емітер), та добре проводять прямий струм (мають при цьому малий опір) і практично не проводять зворотній струм (мають при цьому дуже високий опір), оскільки прямий струм випрямного діода створюється основними, а зворотний – неосновними носіями заряду. Концентрація основних носіїв заряду на декілька порядків перевищує концентрацію неосновних носіїв, чим й обумовлюються вентильні властивості діода.

Область з малою концентрацією домішок називається **базою** і має опір $r_b = 1-30$ Ом, а область з великою концентрацією домішок – **емітером**. Опір емітера r_e (рис. 4.27, б) через велику концентрацію домішок дуже малий, а тому ним можна нехтувати. Струм через діод визначається виразом:

$$I_{p-n} = I_0 \cdot \left(e^{\frac{\pm U_{зоб} - I_{np} \cdot r_b}{\phi_T}} - 1 \right). \quad (4.7)$$

Збільшення прямої напруги знижує висоту потенціального бар'єру і він перестає впливати на величину прямого струму. Прямий струм через діод буде визначатися лише величиною r_b і лінійно залежати від **прямої напруги** U_{np} (рис. 4.27, в). Збільшення прямої напруги знижує висоту потенціального бар'єру **p-n-переходу** (у силіцієвих діодах потенціальний бар'єр дорівнює приблизно 0,7 еВ), в результаті чого він перестає впливати на величину прямого струму. Цей відрізок ВАХ називається **омічним** і є **робочим**. Значення прямої напруги (U_{np}) відкритих силіцієвих діодів не перевищує 1,5 В, а германієвих 0,5 В.

Основними параметрами випрямних напівпровідникових діодів є:

- 1) прямий струм діода I_{np} , який нормується при певній прямій напрузі;
- 2) максимально допустимий прямий струм $I_{np \max}$ діода;
- 3) $I_{np \text{ ср } \max}$ – максимальне значення середнього прямого струму через діод;
- 4) $I_{зв}$ – зворотній струм через діод при максимальній температурі;
- 5) U_{np} – середнє значення спаду напруги на діоді при $I_{np \text{ ср}}$;
- 6) $U_{зв \max}$ – максимально допустима зворотна напруга, при якій діод ще може нормально працювати тривалий час;
- 7) середній випрямлений струм $I_{вин \text{ ср}}$, який може тривало проходити через діод при допустимій температурі його нагріву;
- 8) $C_{бар}$ – величина бар'єрної ємності при заданій напрузі і частоті;
- 9) $f_{\max}$ – максимальна робоча частота;
- 10) максимально допустима потужність $P_{\max}$, що розсіюється діодом, при якій забезпечується задана надійність діода; 11) ΔT – інтервал робочих температур.

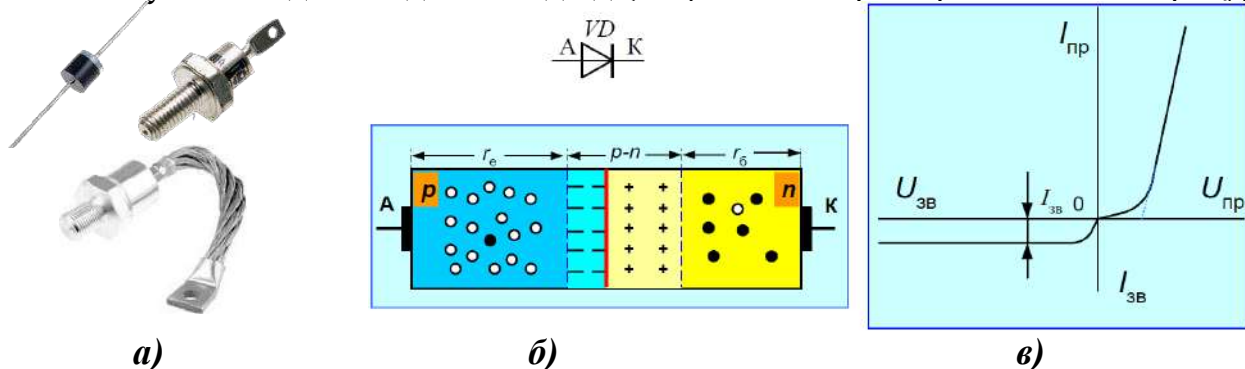


Рис. 4.27. Зовнішній вигляд (а), робоча схема (б) та ВАХ (в) випрямного діоду

Випрямні діоди класифікуються за потужністю і частотою. За потужністю: 1) **малопотужні** ($I_{np\text{ ср max}} \leq 0,3\text{ A}$); 2) **середньої потужності** ($0,3\text{ A} < I_{np\text{ ср max}} \leq 10\text{ A}$); 3) **великої потужності** ($I_{np\text{ ср max}} > 10\text{ A}$). За частотою: 1) **низькочастотні** ($f_{\text{max}} < 10^3\text{ Гц}$); 2) **високочастотні** ($f_{\text{max}} > 10^3\text{ Гц}$).

Для збереження працездатності германієвого діода його температура не повинна перевищувати $+85\text{ }^\circ\text{C}$. Кремнієві діоди можуть працювати при температурі $+150\text{ }^\circ\text{C}$. Падіння напруги при пропусканні прямого струму у германієвих діодів складає $\Delta U_{np}=0,3\text{--}0,6\text{ В}$, у кремнієвих діодів – $\Delta U_{np}=0,8\text{--}1,2\text{ В}$. У разі прикладення до діода зворотної напруги в декілька сотень вольт зовнішнє електричне поле в запираючому шарі стає настільки сильним, що здатне вирвати електрони з валентної зони в зону провідності (ефект Зенера). Зворотний струм при цьому різко збільшується, що викликає нагрів діода, подальше зростання струму і, нарешті, тепловий пробій (руйнування) **p-n-переходу** (рис. 4.28). Допустима зворотна напруга германієвих діодів досягає $100\text{--}400\text{ В}$, а кремнієвих діодів $1000\text{--}1500\text{ В}$.

Випрямні діоди застосовуються для випрямлення змінного струму в постійний, для обмеження паразитних викидів напруги та як елементи електричної розв'язки електричних кіл. **Проста схема для випрямлення змінного струму** показана на рис. 4.29, а. У ній послідовно з'єднані **джерело змінної ЕРС**, **діод VD** і резистор навантаження **R_н**. Ця **схема випрямлення** називається **однонапівперіодною**. Робота випрямляча відбувається наступним чином. Протягом одного півперіоду напруга для діода є прямою і проходить струм, що створює на резисторі **R_н** падіння напруги **U_Р**. Протягом наступного напівперіоду напруга для діода є зворотною, струму практично немає і напруга на резисторі **U_Р=0**. Таким чином, через діод, резистор навантаження проходить пульсуючий струм у вигляді імпульсів, що тривають півперіоду. Цей струм називають **випрямленим струмом**. Він створює на резисторі **R_н** **випрямлену напругу**. Графіки на рис. 4.29, б ілюструють процеси у випрямлячі.

В деякому потужному перетворювальному устаткуванні вимоги до середнього значення прямого струму та зворотної напруги перевищують номінальне значення параметрів існуючих діодів. У цих випадках задача вирішується паралельним або послідовним з'єднанням діодів. **Паралельне з'єднання діодів** застосовують у тому випадку, коли потрібно отримати прямий струм, більший граничного струму одного діода. Для вирівнювання струмів використовують діоди з малою відмінністю характеристик (проводять їх підбір по провідності) або послідовно з діодами включають резистори з опором в одиниці Ом. **Послідовне з'єднання діодів** застосовують для збільшення сумарної допустимої зворотної напруги. Щоб зворотна напруга розподілялася рівномірно між діодами незалежно від їх зворотних опорів, застосовують шунтування (з'єднання в паралель) діодів резисторами.

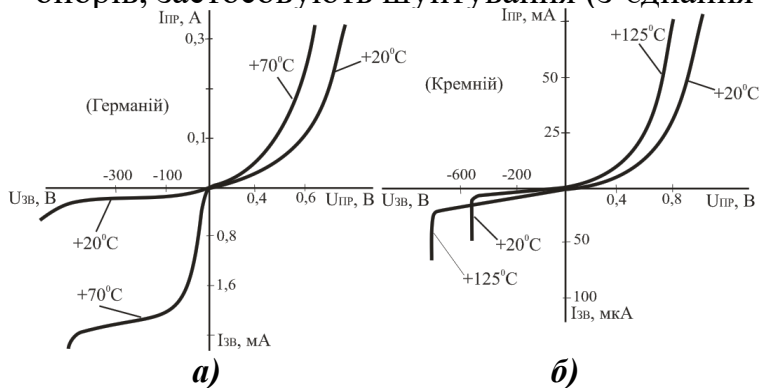


Рис. 4.28. ВАХ випрямних діодів при різних температурах: а – для германієвого діода; б – для кремнієвого діода

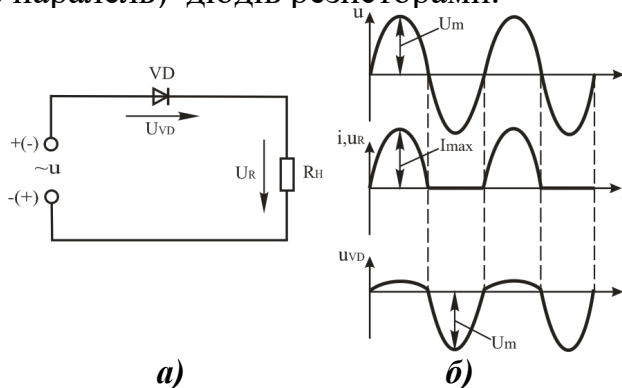


Рис. 4.29. Однофазний однонапівперіодний випрямляч: а – схема; б – часові діаграми роботи

Згідно з ОСТ 11 336.919-81 існує система позначень випрямних діодів, що складається з чотирьох елементів. **Перший елемент** (буква або цифра) вказує вихідний напівпровідниковий матеріал, з якого виготовлений діод: *Г* або *1* – германій, *К* або *2* – кремній, *А* або *3* – арсенід галію, *І* або *4* – фосфід індію. **Другий елемент** – буква, що показує клас або групу діода. **Третій елемент** – число, що визначає призначення або електричні властивості діода. **Четвертий елемент** вказує порядковий номер технологічної розробки діода і позначається від *А* до *Я*. Наприклад, діод *КД202А* розшифровується: *К* – матеріал, кремній, *Д* – діод випрямний, *202* – призначення і номер розробки, *А* – різновид.

Умовне позначення діода (анод і катод) вказує, як потрібно підключати діод на платах пристроїв. Діод має два виводи, один з яких катод (мінус), а інший – анод (плюс). Умовне графічне зображення на корпусі діода наноситься у вигляді стрілки, що вказує прямий напрямок, якщо стрілки немає, то ставиться знак "+". При нанесенні кольорового коду, кольорову мітку, точку або смужку наносять ближче до анода. Для деяких типів діодів використовується кольорове маркування у вигляді крапок і смужок. Так, на верхній грані корпусу **SMD** діодів вказується тип діода, а широка полоса контрастного кольору вказує катод "-" (для більшості імпортних діодів).

Імпульсні діоди мають малий час (велику швидкість) перехідних процесів і призначені для роботи в імпульсних колах (рис. 4.30). Від випрямних діодів вони відрізняються малими ємностями *p-n-переходу* (долі пікофарад), що забезпечує їм малий час перехідних процесів і використання в імпульсних колах. Зменшення ємностей досягається за рахунок зменшення площі *p-n-переходу*, а тому допустимі потужності розсіювання у них невеликі (30-40 мВт).

Основні параметри імпульсних діодів:

1. Ємність діода (долі пФ – одиниці пФ).
2. Максимальна імпульсна пряма напруга $U_{np \text{ i max.}}$.
3. Максимально допустимий імпульсний струм $I_{np \text{ i max.}}$.
4. Час встановлення прямої напруги діода $t_{вст}$ – відрізок часу від моменту подачі імпульсу прямого струму на діод до досягнення заданого значення прямої напруги на ньому. Він залежить від швидкості руху інжектованих у базу через *p-n-перехід* неосновних носіїв заряду, в результаті чого зменшується її опір (долі нс – долі мкс).
5. Час відновлення зворотного опору діода $t_{від}$ – відрізок часу з моменту проходження струму через нуль (після зміни полярності прикладеної напруги) до моменту, коли зворотний струм зменшиться до величини $0,1 \cdot I_0$ (I_0 – струм при прямій напрузі) ($t_{від}$ = долі нс – долі мкс).

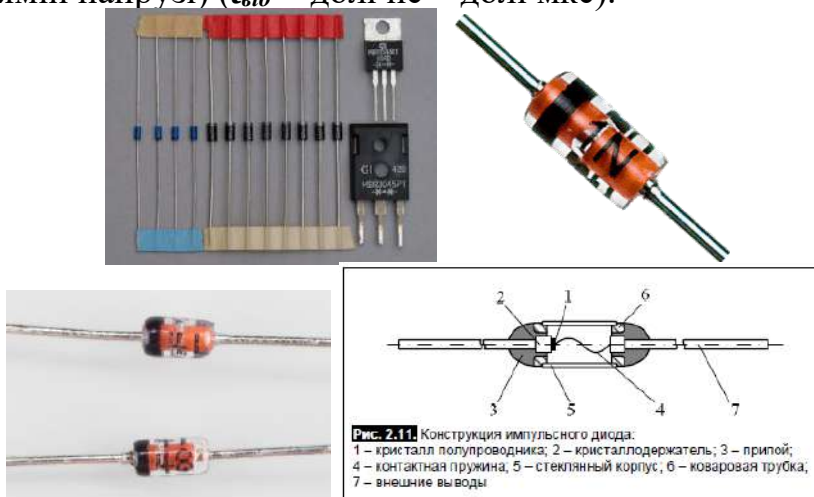


Рис. 4.30. Зовнішній і внутрішній вигляд імпульсних діодів

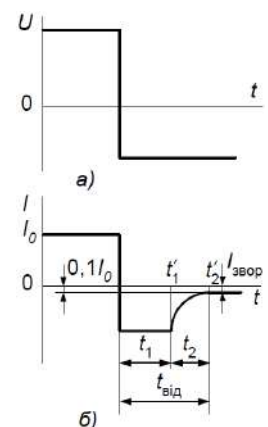


Рис. 4.31. Схема роботи імпульсного діоду

Наявність часу відновлення зумовлене зарядом, накопиченому в базі діода при інжекції. Для запирання діода цей заряд потрібно вивести з бази. Це відбувається за рахунок рекомбінацій і зворотного переходу неосновних носіїв заряду з бази до емітера. Після зміни полярності напруги на діоді деякий час t_1 зворотний струм змінюється мало (рис. 4.31, а, б) і обмежений тільки зовнішнім опором кола. При цьому заряд неосновних носіїв, накопичених під час інжекції в базі діода, розсмоктується. Для підвищення швидкодії (зменшення t_{sid}) імпульсні діоди виготовляються у вигляді точкових структур, що забезпечує мінімальну площу ***p-n-переходу*** і, відповідно, мінімальне значення бар'єрної ємності ($C_{бар}$). Одночасно для одержання мінімального часу відновлення (t_{sid}) імпульсних діодів зменшують товщину їх бази.

В ***діодах Шотткі*** використовується перехід метал-напівпровідник, на відміну від звичайних діодів, де використовується перехід між напівпровідниками ***p-*** і ***n-типу***. Діоди Шотткі виготовляються на основі кремнію (***Si***) або арсеніду галію (***GaAs***). Величина контактної різниці потенціалів (потенціального бар'єру) на межі метал-напівпровідник діода Шотткі залежать від вибору металу для контакту з напівпровідником і може мати величину 0,2-0,4 еВ.

Структура метал-напівпровідник n-типу приведена на рис. 4.32, а. При контакті двох матеріалів з різною роботою виходу електронів, електрони переходять з матеріалу з меншою роботою виходу в матеріал з більшою роботою виходу. Якщо робота виходу електронів у металу більша ніж у напівпровідника, то переважним буде переміщення електронів з напівпровідника у метал. У результаті метал заряджається негативно, а залишені в напівпровіднику додатні іони донорної домішки утворюють у його приграничному шарі додатний потенціал. Таке розмежування зарядів утворює ***контактну різницю потенціалів U_k (потенціальний бар'єр)***, який гальмує подальше переміщення електронів з напівпровідника в метал. Через різку різницю концентрації вільних електронів по обидві сторони від контакту практично все падіння напруги приходить на приконтактну область напівпровідника. Прикладена зовнішня напруга змінює висоту бар'єра тільки з боку напівпровідника. У результаті тонкий приграничний шар напівпровідника збіднюється носіями зарядів і на межі контакту металу з напівпровідником утворюється перехід, аналогічний ***p-n-переходу***. Між металом і напівпровідником виникає контактна різниця потенціалів $U_k = \phi_{0m} - \phi_{0n}$.

Якщо до такого переходу прикласти зворотну напругу, полярність якої співпадає з U_k , то ширина збідненого шару збільшиться, а його опір зросте. Величина зворотного струму діодів Шотткі складає одиниці мікроампер. Якщо прикласти пряму напругу, то вона буде зменшувати ширину і знижувати висоту потенціального бар'єра, в результаті чого через перехід потече струм. Особливістю випрямляючих переходів метал-напівпровідник, на відміну від ***p-n-переходів***, є ***відсутність інжекції неосновних носіїв у напівпровідник при прямих напругах***.

Вольт-амперна характеристика переходу Шотткі (характеристика 1 на рис. 4.32, в) подібна до вольт-амперної характеристики ***p-n-переходу*** (характеристика 2 на рис. 4.32, в), але відрізняється значно меншим падінням напруги. **Перехід метал-напівпровідник** має ряд властивостей відмінних від властивостей напівпровідникового ***p-n-переходу***. До них відносяться: мале падіння напруги при прямому включенні (близько 0,2-0,4 В); бар'єр Шотткі також має меншу електричну ємність переходу, що дає можливість помітно підвищити робочу частоту діодів Шотткі; дуже маленький заряд зворотного встановлення, що пояснюється відсутністю дифузії пов'язаної з інжекцією неосновних носіїв, тому що у них використовуються

тільки основні носії зарядів, і, відповідно, у них немає накопичення неосновних носіїв заряду в його областях при прямій напрузі і, відповідно, розсмоктування цього заряду при зміні знаку напруги. Це збільшує швидкодію діодів Шотткі. Час встановлення зворотного опору таких діодів при використанні силіцію і золота дорівнює не більше 10 нс.

Недоліком діодів Шотткі є те, що, у порівнянні зі звичайними кремнієвими діодами, вони характеризуються більшими зворотними струмами, які зростають при підвищенні температури кристала. Допустима зворотна напруга діодів Шотткі обмежена 1200 В. На практиці вони в основному використовуються в низьковольтних колах при зворотній напрузі одиниці – десятки вольт.

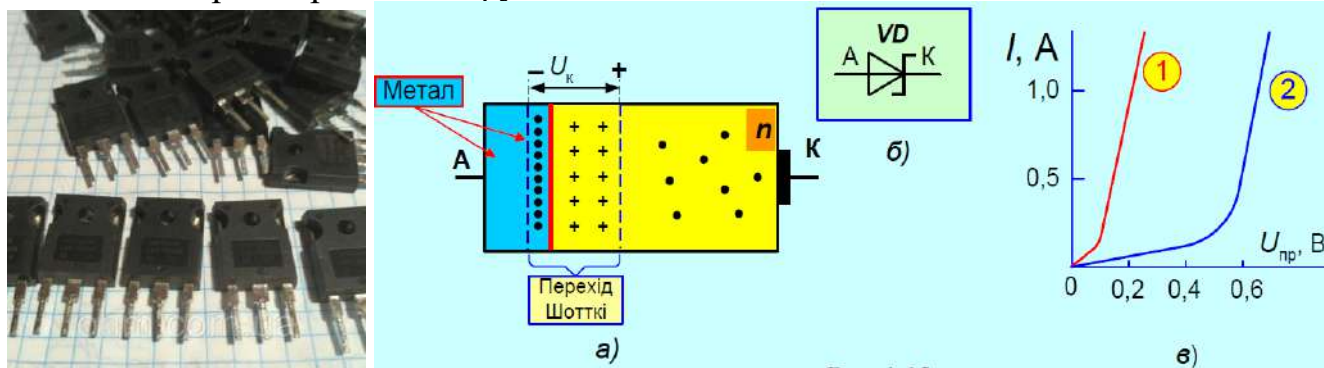


Рис. 4.32. Структура (а) умовне графічне позначення (б) та ВАХ діоду Шотткі

Стабілітрон (діод Зенера) – різновид діодів, що в режимі прямих напруг, проводять струм як звичайні діоди, а при зворотній напрузі струм різко зростає тільки в області напруг близьких до пробою **p-n-переходу** ("зенерівська напруга") Це і є напруга стабілізації. Прилад отримав назву на честь імені його першовідкривача Кларенса Зенера. Стабілітрони застосовуються для стабілізації напруги. У низьковольтних стабілітронів (з малим опором бази) найбільш можливий тунельний пробій, а у стабілітронів з високоомною базою пробій має лавинний характер. На рис. 4.33 наведені умовне графічне зображення стабілітрона та його вольт-амперна характеристика. Робочою ділянкою є зворотна гілка вольт-амперної характеристики.

Основні параметри стабілітронів:

- 1) $U_{ст.ном}$ – номінальна напруга стабілізації (1-1000 В);
- 2) $I_{ст.мін}$ – мінімальний струм стабілітрона (1,0-10 мА);
- 3) $I_{ст.ном}$ – номінальний струм стабілітрона;
- 4) $I_{ст.макс}$ – максимальний струм стабілітрона (0,05 – 2,0 А);
- 5) $r_d = dU_{ст}/dI_{ст}$ – динамічний (диференційний) опір на ділянці стабілізації (0,5-200 Ом);
- 6) $P_{макс}$ – максимально допустима розсіювана потужність;
- 7) $\alpha_{ст} = \pm (\Delta U_{ст}/U_{ст.ном} \cdot \Delta T) \cdot 100 [\%]$ – **температурний коефіцієнт напруги (ТКН)**, який визначається як відношення відносної зміни напруги при зміні температури на ΔT (зазвичай $\Delta T = 1^\circ \text{C}$). Знак **ТКН** стабілітронів залежить від величини напруги (рис. 4.34). Пряма гілка ВАХ стабілітронів має завжди від'ємний **ТКН**. **ТКН** стабілітрона показує на скільки відсотків зміниться стабілізована напруга при зміні температури напівпровідника на 1°C , ($\text{ТКН} = -0,5 \dots +0,2 \text{ } \%/^\circ \text{C}$).

Стабілітрони допускають послідовне увімкнення, при цьому результуюча стабілізуюча напруга дорівнює сумі напруги стабілітронів: $U_{ст} = U_{ст1} + U_{ст2} + \dots$
Паралельне з'єднання стабілітронів недопустиме, оскільки через розкид характеристик і параметрів з усіх паралельно з'єднаних стабілітронів струм виникатиме

тільки водному, який має найменшу стабілізуючу напругу $U_{ст}$, що викликає перегрів стабілітрона. На рисунку 4.35 показана схема послідовного стабілізатора напруги, що виконаний на основі стабілітрона **V1**. Вхідна напруга $U_{вх}$ повинна бути більшою напруги, що потрібна для споживача (напруга стабілізації). При змінах вхідної напруги вихідна (напруга стабілізації $U_{ст}$) буде незмінною, а змінюватиметься струм через стабілітрон та падіння напруги на резисторі **R1**. Сума падіння напруги на опорі та стабілітроні дорівнює вхідній напрузі $U_{вх} = U_{R1} + U_{ст}$.

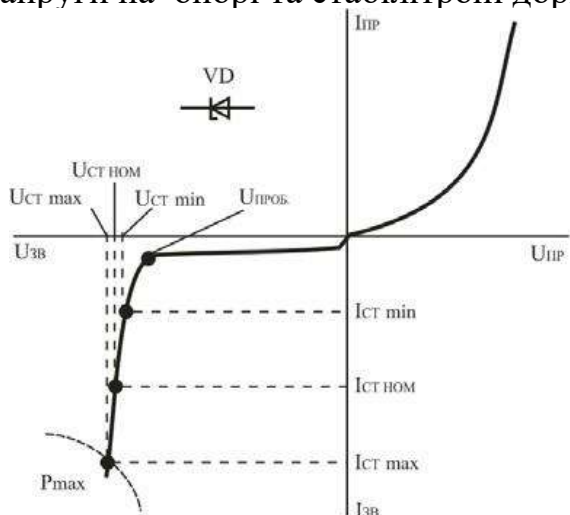


Рис. 4.33. ВАХ стабілітрона та його умовне графічне позначення

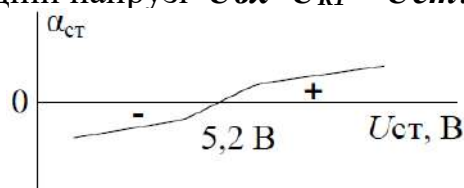


Рис. 4.34. Знак ТКН стабілітронів

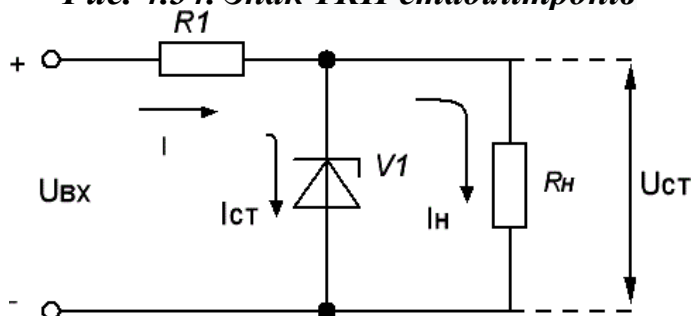


Рис. 4.35. Схема стабілізатора напруги

Варикап – це напівпровідниковий діод, в якому використовується залежність ємності від величини зворотної напруги і який призначений для застосування як елемент з електрично керованою ємністю (рис. 4.36). Варикапи широко застосовуються в різних схемах для автоматичного підстроювання частоти, в параметричних підсилювачах. Варикапи працюють при зворотній напрузі на **p-n-переходах**. Напівпровідниковим матеріалом для виготовлення варикапів є кремній.

Основні параметри варикапів:

- 1) номінальна ємність C_B – ємність при заданій зворотній напрузі ($C_B=10-500$ пФ);
- 2) коефіцієнт перекриття по ємності ($K_C=5-20$) – відношення ємності варикапа при

$$K_C = \frac{C_{MAX}}{C_{MIN}}$$

двох заданих значеннях зворотної напруги

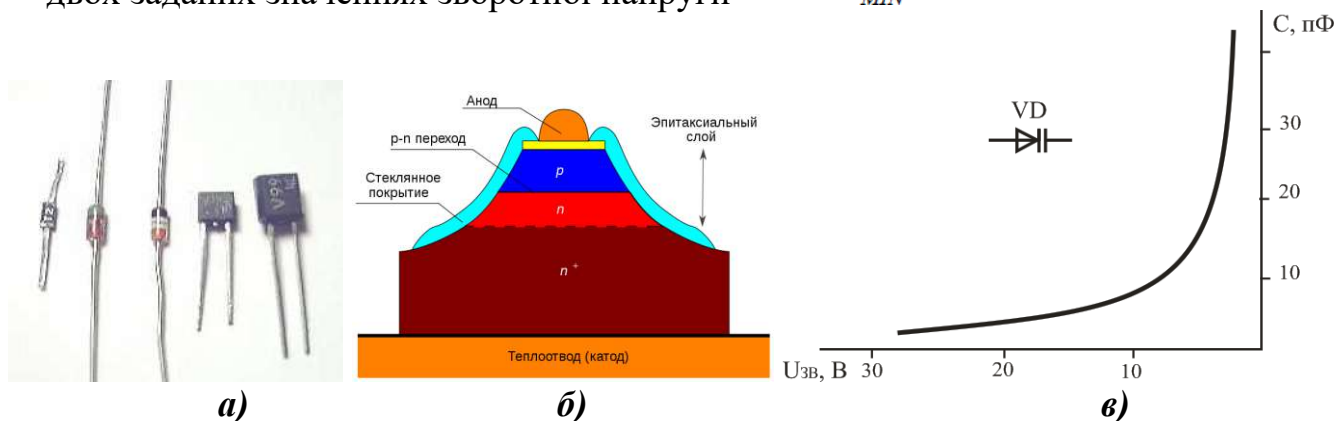


Рис. 4.36. Зовнішній вигляд (а), внутрішня структура (б) та вольт-фарадна характеристика варикапа з його умовним графічним позначенням (в)

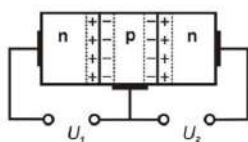
технологічно поділений на три шари з різними типами домішкової провідності, що чергуються між собою (рис. 5.3). Перші транзистори були виготовлені із германію. Сучасні транзистори в більшості виготовляють із **кремнію** та **арсеніду галію**.

Середня частина транзисторної структури називається **базою (Б)** й слугує для керування струмом між двома крайніми частинами – **емітером (Е)** і **колектором (К)**. Електронно-дірковий перехід між емітером і базою називають **емітерним p - n -переходом**, а **p - n -перехід** між базою і колектором – **колекторним p - n -переходом** (рис. 5.3, б). Взаємодія між переходами забезпечується малою товщиною бази, яка не перевищує 1 (мкм) і менша за дифузійну довжину (вільного пробігу) носіїв заряду 5-10 (мкм). Базу виготовляють із слабколегованого напівпровідника з великим опором. Шар емітеру є джерелом носіїв заряду (електронів або дірок), та призначений для інжекції цих носіїв заряду в базу, колектор "збирає" носії зарядів, база "керує". Електроди, які приєднуються до складових шарів структури мають відповідні назви: той, що приєднаний до центрального шару, – база; електроди, які приєднані до зовнішніх шарів, – емітер і колектор. Структура реального транзистора, як правило, несиметрична: концентрація домішки в емітері набагато більша за концентрацію домішки в колекторі, а концентрація основних носіїв у базі набагато менше ніж в колекторі, й тим більше ніж в емітері; площа **колекторного p - n -переходу** набагато більша за площу **емітерного** (рис. 5.3, в). **Технологія виготовлення БТ** може бути різною – з використанням процесів сплавлення, дифузії чи епітаксії, що значною мірою визначає характеристики приладу. Для створення областей **n -типу** використовують легування донорними домішками, а **p -типу** – акцепторними домішками. **БТ** виготовляють у складі інтегральних структур (рис. 5.4), і як дискретні компоненти, які вміщують в герметичні металеві чи полімерні корпуси з трьома виводами від різних областей структури.

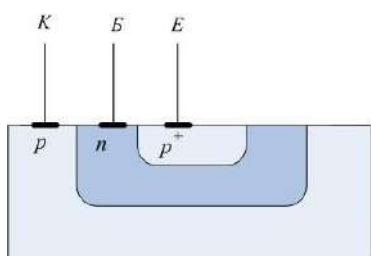
За послідовністю чергування типів провідностей областей напівпровідникової структури **БТ** поділяються на **p - n - p -транзистори** (рис. 5.5, а) та **n - p - n -транзистори** (рис. 5.5, б). На цьому ж рисунку наведено умовні графічні зображення транзисторів двох типів на принципових електричних схемах. На умовному зображенні **емітер зображають стрілкою, спрямованою завжди із p -області до n -області**. За принципом дії транзистори **p - n - p -типу** і **n - p - n -типу** схожі, різняться лише низкою кількісних відмінностей і полярністю прикладених напруг.



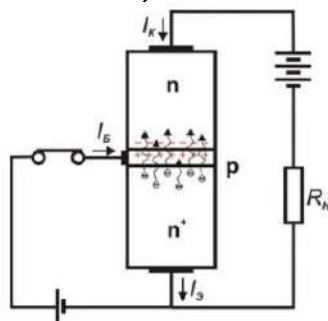
а)



б)



в)



г)

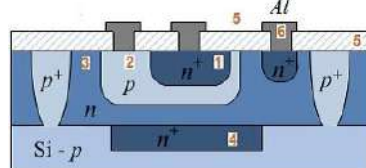
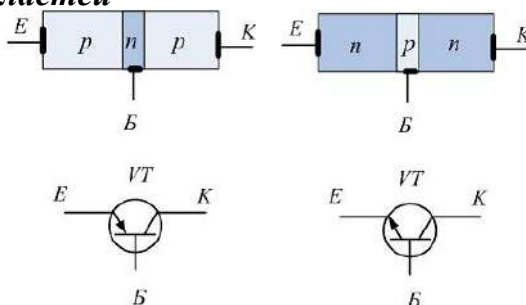


Рис. 5.4. Планарний кремнієвий БТ n - p - n -типу, що складається з емітерної (1), базової (2) і колекторної (3) областей



а)

б)

Рис. 5.3. Зовнішній вигляд (а), умовна схема (б), структура (в) та принцип роботи (г) БТ

Рис. 5.5. Умовні зображення транзисторів: p - n - p (а) і n - p - n (б)

У електричне коло **БТ** вмикають таким чином, що один з його виводів (електродів) є вхідним, другий – вихідним, а третій – спільним для вхідного та вихідного кіл. Залежно від того, який з виводів є спільним для вхідного і вихідного електричних кіл, розрізняють три схеми вмикання біполярного транзистора: зі спільною базою (СБ), зі спільним емітером (СЕ), зі спільним колектором (СК). Ці схеми для транзистора **р-п-р-типу** наведені на рис. 5.6. Для транзистора **п-р-п-типу** в схемах увімкнення змінюються лише полярності напруги та напрям струмів. При будь-якій схемі увімкнення транзистора (при роботі в активному режимі) полярність включення джерел живлення повинна бути вибрана такою, щоб емітерний перехід був зміщений у прямому напрямку, а колекторний – у зворотному. Вхідне, або керуюче, коло служить для управління роботою транзистора. У вихідному, або керованому, колі отримують посилені коливання. Джерело коливань, що підлягають посилюванню, вмикається у вхідне коло, а у вихідне вмикається навантаження.

Концентрація основних носіїв заряду в емітері в багато раз більше концентрації основних носіїв заряду в базі, а їх концентрація в колекторі декілька менше концентрації в емітері. Тому **провідність емітера на декілька порядків вища за провідність бази, а провідність колектора декілька менше провідності емітера**. При цьому, фактична дія біполярного транзистора базується на використанні двох **р-п-переходів** між базою та емітером і базою та колектором (рис. 5.3, б). В області **р-п-переходів** виникають шари просторового заряду, між якими лежить тонка нейтральна база. Якщо між базою й емітером створити напругу в прямому напрямку, то носії заряду інжектуються в базу й дифундують до колектора (рис. 5.3, з). Оскільки вони є неосновними носіями в базі, то легко проникають через **р-п-перехід** між базою й колектором. База виготовляється достатньо тонкою, щоб носії заряду не встигли прорекомбінувати, створивши значний струм бази. Якщо між базою й емітером прикласти запірну напругу, то струм через ділянку колектор-емітер не протікатиме.

Розглянемо більш детально роботу біполярного транзистора на прикладі **р-п-структури** (рис. 5.7), увімкненої за схемою зі спільною базою (рис. 5.6, а). Шари напівпровідників утворюють два **р-п-переходи**: **емітерний** (Π_E) і **колекторний** (Π_K). Полярність зовнішніх джерел (напруга) U_{EB} і U_{KB} вибираються такими, щоб емітерний перехід був зміщений у прямому напрямку, а колекторний – у зворотному. Це приводить до зниження потенціального бар'єру емітерного переходу і збільшення потенціального бар'єру колекторного переходу. В результаті зниження бар'єру емітерного переходу відбувається дифузія дірок з емітера в базу (інжекція основних носіїв із **р-області** емітера в **п-область** бази) і електронів із бази в емітер. Прикладена у зворотному напрямку напруга U_{KB} забезпечує створення екстракції неосновних носіїв з **п-області** бази в **р-область** колектора. Для основного режиму роботи транзистора необхідно, щоб забезпечувалося зміщення емітерного переходу ($U_{EB} < U_{KB}$), це обумовлює екстракцію в колекторному переході і за-

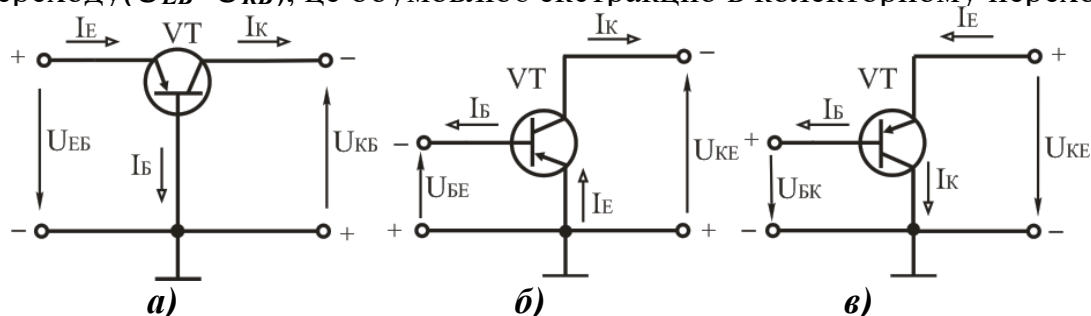


Рис. 5.6. Схеми вмикання біполярних транзисторів: а – зі спільною базою; б – зі спільним емітером; в – зі спільним колектором

безпечує підсилювальні властивості транзистора. Електронною складовою дифузійного струму через емітерний перехід можна нехтувати, тому що $p_p \gg n_n$. Таким чином, струм емітера I_E утворюється в основному за рахунок дифузійного переміщення дірок через емітерний перехід. Під дією сил дифузії дірки рухаються через базу в напрямку колектора, частково рекомбінуючи з електронами бази. Електрони в базі поповнюються з джерела U_{BE} , утворюючи базовий струм I_B . Оскільки база є тонкою і має малу концентрацію домішок, то основна частина дірок інжектованих емітером досягає колекторного переходу. Поле колекторного переходу, зміщеного у зворотному напрямку джерелом U_{KB} , дірки переміщуються (дрейфують) у колекторний шар, створюючи колекторний струм I_K , тобто емітерний струм дорівнює сумі колекторного і базового струмів: $I_E = I_K + I_B$. (5.1)

Відношення колекторного струму I_K транзистора до емітерного струму I_E називається статичним коефіцієнтом передачі струму емітера $\alpha = I_K / I_E$. Коефіцієнт α менший одиниці і знаходиться в межах 0,9-0,999.

На основі наведених виразів можна визначити зв'язки між колекторним і базовим, а також емітерним і базовим струмами:

$$I_K = [\alpha / (1 - \alpha)] \cdot I_B = \beta \cdot I_B ; I_E = [1 / (1 - \alpha)] \cdot I_B = (1 + \beta) \cdot I_B, \quad (5.2)$$

де $\beta = \alpha / (1 - \alpha)$ – коефіцієнт підсилення транзистора за струмом. Коефіцієнт підсилення струму бази для більшості транзисторів знаходиться у межах 50-200.

Присутність у базовій та колекторній областях власних неосновних носіїв заряду, для яких зворотно зміщений перехід є пришвидшуючим, приводить до появи додаткової некерованої складової струму колектора I_{K0} (рис. 5.7). Оскільки основною причиною появи неосновних носіїв заряду є температура, то цей струм ще називають тепловим. У базовому колі тепловий струм направлений назустріч базовому струму, що зменшує його величину. Таким чином, загальний струм колектора складається з керованої ($\beta \cdot I_B$) і некерованої (теплової I_{K0}) складових $I_K = \beta \cdot I_B + I_{K0}$. Базовий струм з урахуванням теплової складової буде дорівнювати:

$$I_B = I_E / (1 + \beta) - I_{K0} = I_K / \beta - I_{K0}. \quad (5.3)$$

У транзисторах ***n-p-n-типу*** назви і функції усіх трьох шарів аналогічні розглянутого ***p-n-p-транзистора***, змінюється тільки тип носіїв заряду і полярність зовнішніх джерел живлення. Схема включення БТ із загальною базою (СБ) має низький вхідний опір, який в багатокаскадних схемах підсилення створює шунтуючу дію на опір навантаження попереднього каскаду і різко знижує підсилення цього каскаду по напрузі та потужності.

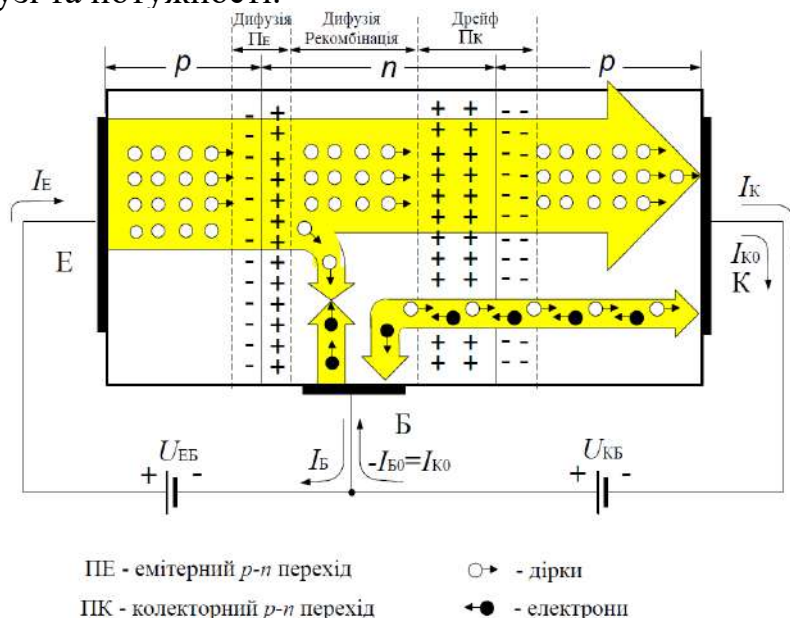


Рис. 5.7. Схема роботи ***p-n-p-транзистора***

На рис. 5.6, б, показана схема транзистора p - n - p -типу, увімкненого за схемою зі спільним емітером (СЕ). В ній загальною точкою вхідного і вихідного кола є емітер. Базова напруга U_{BE} є вхідною і служить для інжекції основних носіїв із p -області емітера в n -область бази. Напруга колектора U_{KE} є вихідною і служить для створення прискорювального поля для перенесення неосновних носіїв з n -області бази в p -область колектора. Оскільки товщина бази незначна то більша частина дірок, що інjektуються емітером, пролітають через базу до колекторного переходу. Тобто подальше процеси протікають аналогічно попередній схемі. Для схеми із загальним емітером статичний коефіцієнт передачі струму α_0 відносно вхідного базового струму визначається з формули $\alpha_0 = I_K / I_B$. Статичний коефіцієнт передачі струму бази α_0 в залежності від типу транзисторів має значення 10-300. Вхідний опір транзисторів у схемі зі СЕ значно більший ніж у схемі з загальною базою. Перевагою схеми зі СЕ також є можливість живлення від одного джерела, так-як на базу і колектор подається напруга одного знаку. Схеми зі СЕ отримали найбільше розповсюдження зокрема в підсилювачах.

На рис. 5.6, в, показана схема транзистора p - n - p -типу, увімкненого за схемою зі спільним колектором (СК). В ній загальною точкою вхідного і вихідного кола є колектор. Базова напруга U_{BK} є вхідною і служить для інжекції основних носіїв із p -області колектора в n -область бази. Напруга колектора U_{KE} є вихідною і служить для створення прискорювального поля для перенесення неосновних носіїв з n -області бази в p -область емітера. Схеми включення транзистора з СЕ і СК схожі, але їх електричні параметри відрізняються по причині різної концентрації домішок в областях переходів. Схеми з СК мають порівняно значний коефіцієнт прямої передачі струму рівний $\alpha_0 + 1$ і великий вхідний опір, але не дозволяють отримати підсилення по напрузі, тому використовуються значно рідше.

Сучасні БТ за робочими характеристиками можна класифікувати:

- 1) за потужністю: *малої* ($P_{MAX} \leq 0,3$ Вт), *середньої* ($0,3$ Вт $< P_{MAX} \leq 1,5$ Вт) і *великої потужності* ($P_{MAX} > 1,5$ Вт);
- 2) за частотою: *низькочастотні* – $f_a < 3$ МГц, *середньочастотні* – 3 МГц $< f_a < 30$ МГц, *високочастотні* – 30 МГц $< f_a < 500$ МГц і *надвисокочастотні* – 500 МГц $< f_a < 20$ ГГц, де f_a – гранична частота транзистора, на якій коефіцієнт передачі вхідного струму зменшується порівняно з коефіцієнтом підсилення на низьких частотах у $\sqrt{2}$ разів (на 3 дБ).

Статичні характеристики біполярних транзисторів

Статичним режимом роботи транзистора називається режим за відсутності навантаження у вихідному колі. Статичними характеристиками транзисторів називають графічно виражені залежності напруги і струму вхідного кола (вхідні ВАХ) і вихідного кола (вихідні ВАХ). Вид характеристик залежить від способу вмикання транзистора (табл. 5.1).

Статичні характеристики транзистора, увімкненого за схемою з СБ.

Вхідною характеристикою є залежність (рис. 5.8, а) – $I_E = f(U_{EB})$ при $U_{KB} = \text{const}$. Вихідною характеристикою є залежність (рис. 5.8, б) $I_K = f(U_{KB})$ при $I_E = \text{const}$. Вихідні ВАХ мають три характерні області: 1 – сильна залежність I_K від U_{KB} (нелінійна початкова область); 2 – слабка залежність I_K від U_{KB} (лінійна область); 3 – пробій колекторного переходу. Особливістю характеристик в області 2 є їх невеликий підйом при збільшенні напруги U_{KB} .

Статичні характеристики транзистора, увімкненого за схемою з СЕ.

Вхідною характеристикою є залежність (рис. 5.9, а) – $I_B = f(U_{BE})$ при $U_{KE} = \text{const}$. Вихідною характеристикою є залежність (рис. 5.9, б) $I_K = f(U_{KE})$ при $I_B = \text{const}$. Вихідні ВАХ мають три характерні області: 1 – сильна залежність I_K від U_{KE} ; 2 – сла-

бка залежність I_K від U_{KE} ; 3 – пробій колекторного переходу. Особливістю характеристик в області 2 є їх невеликий підйом при збільшенні напруги U_{KE} .

Таблиця 5.1.

Параметри основних схем увімкнення транзисторів

Параметр	Схема увімкнення		
	СЕ	СБ	СК
Вхідний опір, R_{BX}	200...2000 Ом	50...100 Ом	10...500 кОм
Вихідний опір, $R_{ВИХ}$	30...70 кОм	0,1...1,0 МОм	50...1000 Ом
Коефіцієнт підсилення за напругою, K_U	30...1000	30...400	≈ 1
Коефіцієнт підсилення за струмом, K_I	10...200	≈ 1	10...200
Коефіцієнт підсилення за потужністю, K_P	3000...30000	30...400	10...200
Фазовий зсув між $U_{ВИХ}$ і $U_{ВХ}$, φ	180^0	0	0

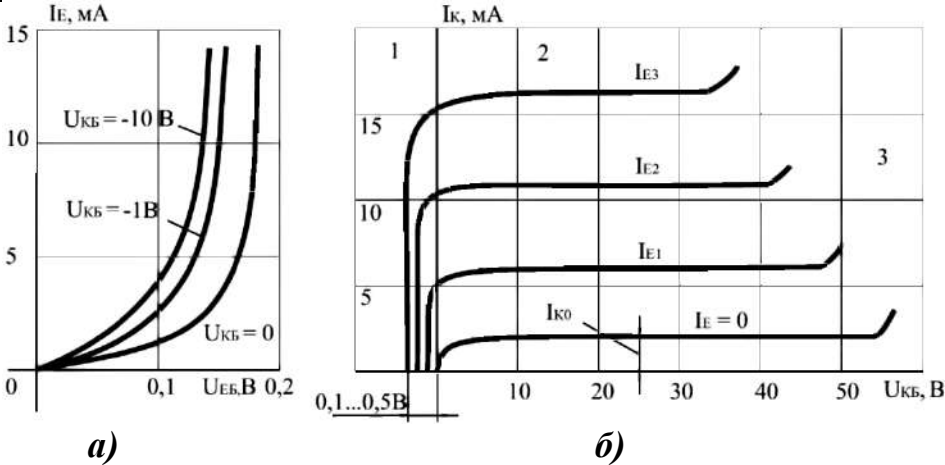


Рис. 5.8. Статичні характеристики БТ, увімкненого за схемою з СБ: а – вхідна; б – вихідна

На основі вхідних та вихідних характеристик визначають **h-параметри транзисторів** – основні параметри БТ, та проводять вибір їх оптимального режиму роботи. В систему h-параметрів входять наступні величини:

1. **Вхідний опір** – $h_{11}=\Delta U_1/\Delta I_1$ при $U_2=const$ є опором транзистора змінному вхідному струму при короткому замиканні на виході, тобто за відсутності вихідної змінної напруги.
2. **Коефіцієнт зворотного зв'язку за напругою** – $h_{12}=\Delta U_1/\Delta U_2$ при $I_1=const$ показує, яка частина вихідної змінної напруги передається на вхід транзистора внаслідок зворотного зв'язку в ньому.
3. **Коефіцієнт посилення за струмом (коефіцієнт передачі струму)** – $h_{21}=\Delta I_2/\Delta I_1$ при $U_2=const$ показує посилення змінного струму транзистором в режимі роботи без навантаження.
4. **Вихідна провідність** – $h_{22}=\Delta I_2/\Delta U_2$ при $I_1=const$ є провідністю для змінного струму між вихідними затискачами транзистора.
5. **Вихідний опір** $R_{ВИХ}=1/h_{22}$.

Електричний стан транзистора, увімкненого за схемою з СЕ, характеризується величинами I_B , I_{BE} , I_K , U_{KE} . Для схеми зі спільним емітером справедливі наступні рівняння: $\Delta U_{BE}=h_{11E}\Delta I_B + h_{12E}\Delta U_{KE}$, $\Delta I_K=h_{21E}\Delta I_B + h_{22E}\Delta U_{KE}$, де

$$\begin{aligned} h_{11E} &= \Delta U_{BE} / \Delta I_B \text{ при } U_{KE}=const ; & h_{12E} &= \Delta U_{BE} / \Delta U_{KE} \text{ при } I_B=const ; \\ h_{21E} &= \Delta I_K / \Delta I_B \text{ при } U_{KE}=const ; & h_{22E} &= \Delta I_K / \Delta U_{KE} \text{ при } I_B=const . \end{aligned} \tag{5.5}$$

Для запобігання перегріву колекторного переходу необхідно, щоб потужність, що виділяється на ньому при проходженні колекторного струму, не перевищувала деякої максимальної величини: $P_K = I_K U_{KE} \leq P_{KMAX}$. (5.6)

Крім того, існують обмеження за колекторною напругою: $U_{KE} \leq U_{KEMAX}$, (5.7)

та колекторним струмом: $I_K \leq I_{KMAX}$, (5.8)

Режими роботи біполярних транзисторів. Біполярний транзистор може працювати в трьох основних режимах, що визначаються полярністю напруги на емітерному та колекторному переходах. При роботі транзистора в **активному режимі** емітерний перехід зміщений у прямому напрямку, а колекторний – у зворотному. У **режимі відтинання** (закритий стан транзистора), емітерний та колекторний переходи транзистора зміщені у зворотному напрямку (обидва **p-n-переходи** закриті). У **режимі насичення** (відкритий стан транзистора), емітерний та колекторний переходи транзистора зміщені у прямому напрямку (обидва **p-n-переходи** відкриті). Режим роботи, у якому транзистор тривалий час знаходиться в режимах відтинання або насичення, називається **ключовим режимом**. У активному режимі транзистор працює як підсилювач сигналу, тобто виконує функцію активного елементу електричної схеми (посилення, генерування і т.п.).

Біполярні транзистори є напівпровідниковими приладами універсального призначення і широко застосовуються в різних підсилювачах, генераторах, в імпульсних і ключових пристроях.

Підсилювальний каскад на БТ. Найбільше застосування для цього знаходить схема увімкнення **БТ з СЕ** (рис. 5.10). Основним елементом схеми є джерело живлення E_K , керований елемент – **VT** та резистор R_K . Ці елементи створюють головне (вхідне) коло підсилювального каскаду, в якому за рахунок протікання керованого струму створюється підсилена змінна напруга на виході схеми. Решта елементів виконує допоміжну роль. Конденсатор C_P є розділяючим. За відсутності цього конденсатора в колі джерела вхідного сигналу створювався б постійний струм від джерела живлення E_K . Резистор R_B увімкнений в коло бази, забезпечує роботу транзистора в режимі спокою, тобто у відсутності вхідного сигналу. Режим спокою забезпечується струмом бази спокою: $I_B \approx E_K / R_B$. За допомогою резистора R_K створюється вхідна напруга, тобто резистор R_K виконує функцію створення напруги, що змінюється, у вихідному колі за рахунок протікання в ній струму, керованого по колу бази. Для колекторного кола підсилювального каскаду можна записати наступне рівняння електричного стану: $E_K = U_{KE} + I_K R_K$, (5.9) тобто сума падіння напруги на резисторі R_K і напруги колектор-емітер U_{KE} транзистора завжди рівна постійній величині – **ЕРС джерела живлення E_K** . Процес підсилення ґрунтується на перетворенні енергії джерела постійної напруги E_K в енер-

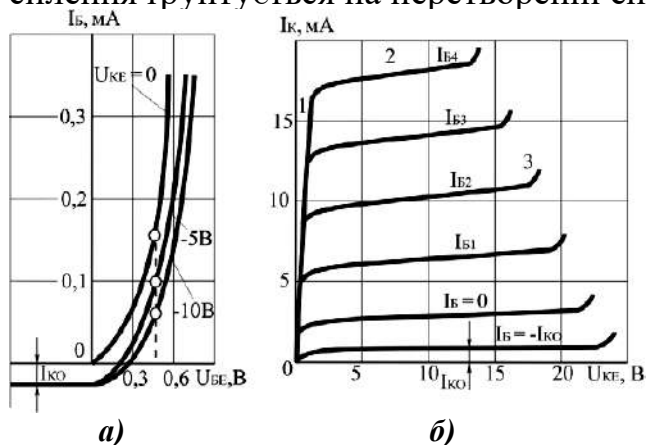


Рис. 5.9. Статичні характеристики БТ, увімкненого за схемою з СЕ: а – вхідна; б – вихідна

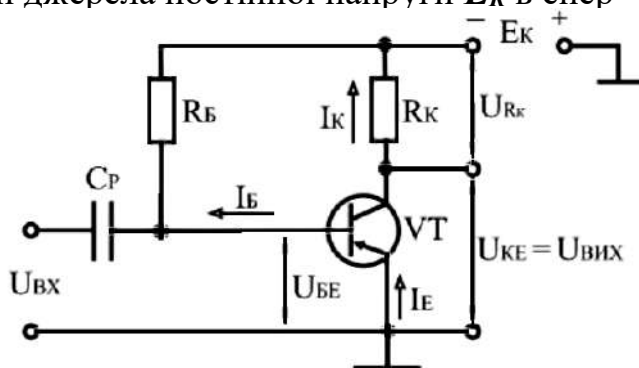


Рис. 5.10. Схема найпростішого підсилювального каскаду на БТ, увімкненого за схемою зі спільним емітером

гію змінної напруги у вихідному колі за рахунок зміни опору керованого елемента (транзистора) у відповідності із законом, що задається вхідним сигналом. При подачі на вхід підсилювального каскаду змінної напруги U_{BX} в базовому колі транзистора створюється змінна складова струму I_B , а значить струм бази буде змінюватись. Зміна струму бази приводить до зміни значення струму колектора ($I_K = \alpha I_B$), а значить, до зміни значень напруги на опорі R_K і U_{KE} . Підсилювальні властивості обумовлені тим, що зміна значень струму колектора в α раз більша, ніж I_B .

Динамічним режимом роботи транзистора називається такий режим, при якому у вихідному колі стоїть навантажувальний резистор, а зміна вхідного струму або напруги буде викликати зміну вихідної напруги.

Розглянемо роботу транзистора, ввімкненого за найбільш поширеною схемою з CE , в динамічному режимі (рис. 5.11). В цій схемі напруга джерела живлення E_K ділиться між ділянкою колектор – емітер (виходом схеми) і навантажувальним опором R_K . За другим законом Кірхгофа: $E_K = U_{RK} + U_{KE}$, де $U_{RK} = I_K R_K$; $U_{KE} = E_K - I_K R_K$.

Рівняння динамічного режиму є рівнянням вихідної динамічної характеристики. Так як це рівняння лінійне, вихідна динамічна характеристика являє собою пряму лінію й будується на вихідних статичних характеристиках (рис. 5.11, б). Вихідна динамічна характеристика AB одержала назву навантажувальної прямої і будується за двома точками. **Точка А** перетину навантажувальної прямої з віссю струмів співпадає з точкою, для якої виконується умова: $I_K = E_K / R_K$, при $U_{KE} = 0$.

Точка В перетину навантажувальної прямої з віссю напруг співпадає з точкою, якій напруга на колекторі визначається умовою: $U_{KE} = E_K$, при цьому $I_K = 0$.

Точка перетину навантажувальної прямої з однієї з віток вихідної статичної характеристики для заданого струму бази називається робочою точкою транзистора (PT). Робоча точка дозволяє визначати струми й напруги, що реально існують у схемі.

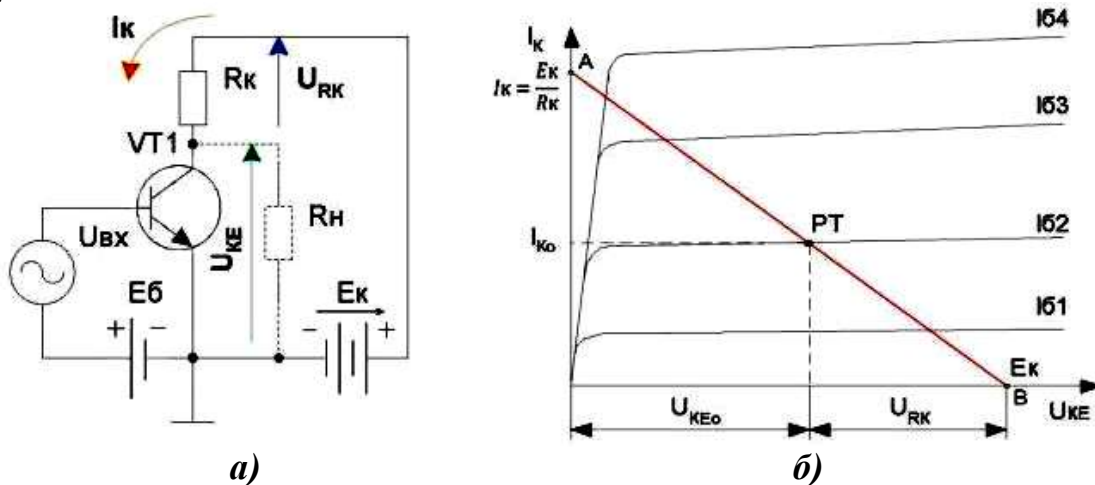


Рис. 5.11. Динамічний режим роботи транзистора: а – схема ввімкнення; б – динамічна характеристика на сімействі статичних вихідних ВАХ

5.2. Польові транзистори

Польовим (уніполярним) транзистором (ПТ) називається електроперетворювальний прилад, в якому керування струмом (електричним опором струмопровідного каналу) здійснюється під впливом поперечного електричного поля, тобто, сила струму, що протікає між двома його електродами (**виток**ом і **сток**ом) регулюється напругою, прикладеною до третього електроду (**затвору**) (рис. 5.12).

До класу польових відносять транзистори, принцип дії яких заснований на використанні носіїв заряду тільки одного знаку (електронів або дірок). Керування струмом в польових транзисторах здійснюється зміною провідності каналу,

через який протікає струм транзистора, під впливом електричного поля. Внаслідок цього транзистори називають польовими. Характерною особливістю всіх польових транзисторів є високий вхідний опір за постійним струмом (10^8 - 10^{14} Ом). У цьому полягає найважливіша відмінність **ПТ** від **БТ**. Тому інколи кажуть, що **ПТ** це прилад, що керується напругою (електричним полем), а **БТ** – прилад, що керується струмом. Також, у **ПТ**, в порівнянні з **БТ**, більша стійкість до радіоактивного (проникаючого) випромінювання (допускається рівень випромінювання на 3-4 порядки більший, ніж для **БТ**), малий рівень власних шумів, малий вплив температури на підсилювальні властивості, технологічність виготовлення, великий динамічний діапазон. У загальному випадку за швидкодією, а отже, частотними властивостями, **ПТ** не мають переваг перед **БТ** – **ПТ** часто використовують у поєднанні з **БТ**, наприклад, великий вхідний опір **ПТ** увімкненого на вході підсилювального каскаду на **БТ** дає змогу узгодити каскад з джерелом вхідного сигналу, що має великий опір.

Виділять дві основні групи ПТ (рис. 5.14):

- 1) **транзистори з керуючим переходом**, що мають об'ємні канали, які являють собою шари однорідного провідника, відокремлені від поверхні випрямними переходами різного типу: а) збідненими шарами **p-n-переходів** – **транзистори з керуючим (затвором) p-n-переходом** (транзистори з каналом **n-типу** та каналом **p-типу**); б) випрямними переходами Шотткі – **транзистори з затворами Шотткі** (з каналом **n-типу** та каналом **p-типу**); в) **ПТ** з гетеропереходами;
- 2) **транзистори з ізольованим затвором** (**МДН-** або **МОН-транзистори**), в яких струм проходить по приповерхневим каналам, що створюються на межі напівпровідника і діелектрика. Такі прилади в свою чергу поділяються на **транзистори з вбудованим каналом** і **транзистори з індукованим каналом**.

Польовий транзистор з керуючим p-n переходом. На рис. 5.15 приведена будова і умовно-графічне позначення **ПТ** з **p-** та **n-**каналами. Канал протікання струму являє собою шар напівпровідника **n-** або **p-типу** і розташований між двома **p-n-переходами**. Канал має контакти із зовнішніми електродами. Електрод (вивід),



Рис. 5.12. Польові транзистори: для монтажу в отвір (а) та для поверхневого монтажу (б)

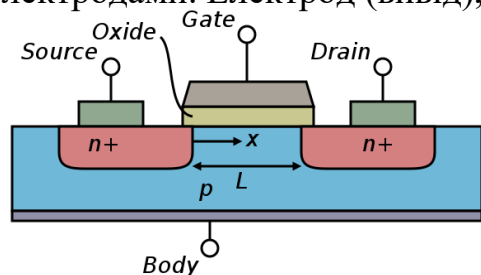


Рис. 5.13. Схема будови метал-оксидного польового транзистора: source – вимік, gate – затвор, drain – стік

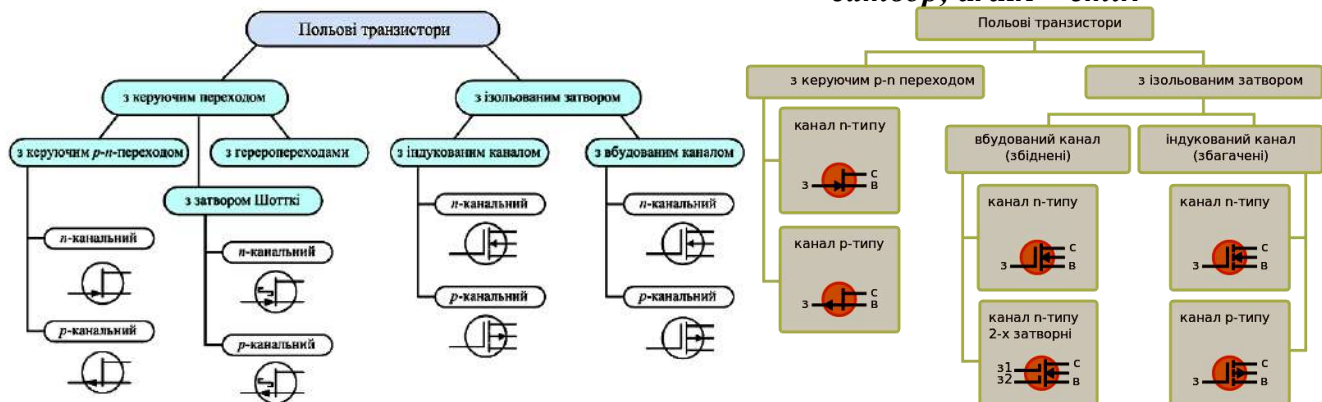


Рис. 5.14. Класифікація ПТ та умовні графічні зображення ПТ різних типів

від якого витікають основні заряди називається **виток** (**B**), а електрод до якого вони стікаються (рухаються), називається **сток** (**C**). На бічні поверхні каналу наносять шар напівпровідника з протилежним (в порівнянні з каналом) типом провідності. Обидва шари електрично з'єднані і мають зовнішній електрод, що називається **затвором** (**З**) або **керуючим електродом**. Між затвором і каналом виникають два **p-n-переходи** (затвор має підвищену концентрацію основних носіїв).

Розглянемо особливості роботи даного типу **ПТ** більш детально. На рис. 5.16 наведений розріз **ПТ** з ідеалізованим каналом **n-типу**, що представляє собою слабо леговану пластину напівпровідника **n-типу**, до якої з двох (або однієї) сторін примикають з'єднані між собою сильно леговані області напівпровідників **p-типу**. Таким чином, на границях поділу таких напівпровідників мають місце **p-n-переходи** шириною **L**. Ці **p-n-переходи** практично знаходяться в області **n-напівпровідника**, тому що $p_p \gg n_n$. Між ними знаходиться **провідний канал** шириною **W**. Канал має контакти із зовнішніми електродами – **виток** (електродом від якого починають рух носії заряду) і **сток** (електродом до якого рухаються носії заряду). В нашому випадку це будуть електрони. Области напівпровідників **p-типу** приєднані до **затвору** (зовнішніх електродів, до яких приєднується джерело керуючої (вхідної) напруги). **Вхідна (керуюча) напруга** $U_{зв}$ подається між затвором і витком (рис. 5.17). При чому на затвор подається зворотна, щодо витоку, напруга – $U_{зв}$ зміщує **p-n-переходи** у зворотному напрямі. **Вихідна напруга** $U_{св}$ подається між стоком і витком й створює в каналі повздовжнє електричне поле, за рахунок якого через канал рухаються основні носії зарядів (електрони), створюючи вихідний **струм стоку** I_c . Принцип дії **ПТ** з **p-n-переходами** базується на зміні **опору провідникового каналу W** за рахунок розширення **p-n-переходів** при зміні (збільшенні) вхідної напруги $U_{зв}$. Оскільки **p-область** має значно більшу концентрацію ніж **n-область**, то зміна ширини **p-n-переходів** відбувається головним чином за рахунок менш легованої **n-області**. При цьому змінюється **ширина провідного каналу W** та його **опір**, що приводить до зміни струму стоку транзистора I_c . Таким чином, змінюючи напругу $U_{зв}$, можна керувати вихідним струмом I_c .

З появою струму I_c в каналі виникає розподілена по каналу напруга, яка зростає у напрямку до стоку і є зворотною до **p-n-переходів**. Через це потенціали точок вздовж каналу зростають у напрямку стоку від нуля до $U_{св}$, що спричиняє розширення переходів від витоку до стоку і відповідно зменшенню ширини провідного каналу та збільшенню його опору. Канал приймає вигляд показаний на рис. 5.17.

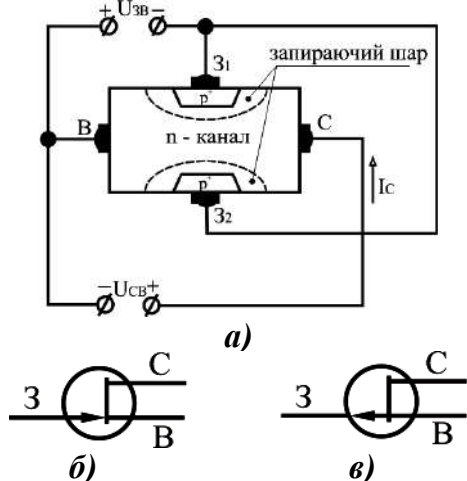


Рис. 5.15. Полевий транзистор: а – будова ПТ з керуючим p-n-переходом (каналом n-типу); б – умовне позначення ПТ з каналом n-типу; в – умовне позначення з каналом p-типу

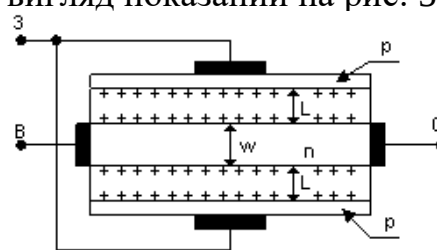


Рис. 5.16. Розріз ПТ з ідеалізованим каналом n-типу

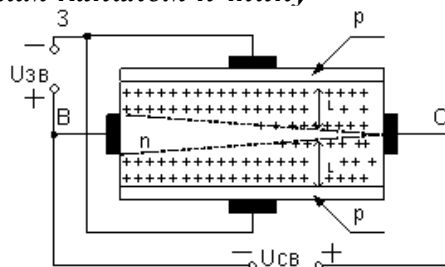


Рис. 5.17. Схема прикладення напруг до ПТ з каналом n-типу

При певній величині напруги U_{CB} за рахунок розширення ***p-n-переходів*** провідний канал W зникає, а його опір стає надто великим. Це приводить до зменшення струму I_C і, як наслідок, розширення каналу (за рахунок зменшення ширини ***p-n-переходів***), а це в свою чергу – до збільшення струму. Таким чином, струм I_C практично залишається незмінним. При одночасній дії U_{CB} та $U_{ЗВ}$ змикання ***p-n-переходів*** відбудеться при менших струмах. Отже, можливі наступні випадки:

- 1) при відсутності напруги на затворі ***p-n-переходи*** закриті власним внутрішнім полем, ширина їх мінімальна, ширина каналу максимальна і струм стоку буде максимальний, тобто: $U_{ЗВ} = 0$; $I_C = I_{Cmax}$;
- 2) при збільшенні закриваючої напруги на затворі ширина ***p-n-переходів*** збільшується, а ширина каналу і струм стоку зменшується: $|U_{ЗВ}| > 0$; $I_{C2} < I_{C1}$;
- 3) при досить великих напругах на затворі ширина ***p-n-переходів*** може збільшитися настільки, що вони перекриються, струм стоку стане рівний нулеві: $|U_{ЗВ}| \gg 0$; $I_{C3} = 0$. Напруга на затворі при якій струм стоку наблизений до нуля, називають ***напругою відтинання*** $U_{ЗВ\text{ відт.}}$.

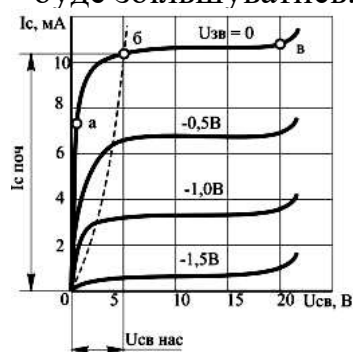
Принцип дії польових транзисторів з ***n-*** і ***p-каналом*** аналогічні і відрізняються лише полярністю напруги джерел живлення.

Для оцінки польового транзистора як активного елемента електронних схем використовують ***стік-затворні*** і ***стокові статичні характеристики*** (рис. 5.18).

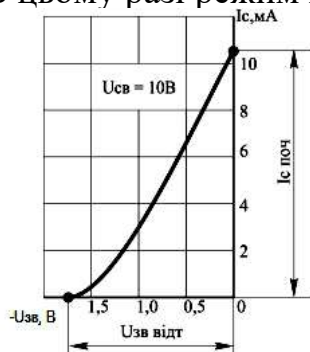
Стік-затворні (вхідні) характеристики, відображають залежність струму стоку від напруги на затворі при фіксованій напрузі стік – витік: $I_C = f(U_{ЗВ}) | U_{CB} = \text{const}$. Стокозатворна характеристика дозволяє визначити напругу відсікання (відтинання) $U_{ЗВ\text{ відт.}}$, при якій струм стоку стає рівним нулеві, та початковий струмстоку $I_{C\text{ поч.}}$, що протікає через канал при $U_{ЗВ} = 0$.

Стокові (вихідні) характеристики відображають залежність струму стоку від напруги на стоці відносно витоку при фіксованій напрузі на затворі: $I_C = f(U_{CB}) | U_{ЗВ} = \text{const}$.

Розглянемо це більш детально на прикладі сімейства статичних стокових характеристик ***ПТ з p-n-переходами*** ($I_C = f(U_{CB}) | U_{ЗВ} = \text{const.}$), наведених на рис. 5.19, а. На ділянках ***AB*** характеристики мають практично лінійні залежності струму I_C від напруги U_{CB} . Подальше збільшення U_{CB} спричиняє ріст I_C , що приводить до звуження провідного каналу W . Таким чином, поява струму I_C породжує умови, які обмежують його подальше зростання (ділянка ***BC***). Починаючи з деякого значення напруги поміж стоком і витоком $U_{CB\text{ н}}$ (крапка ***C***) відбувається змикання ***p-n-переходів***, що приводить до стабілізації струму I_C . Якщо збільшувати зворотну напругу на ***p-n-переходах***, то ширина каналу W буде зменшуватись, а його опір буде збільшуватись. В цьому разі режим насичення настане при меншій напрузі

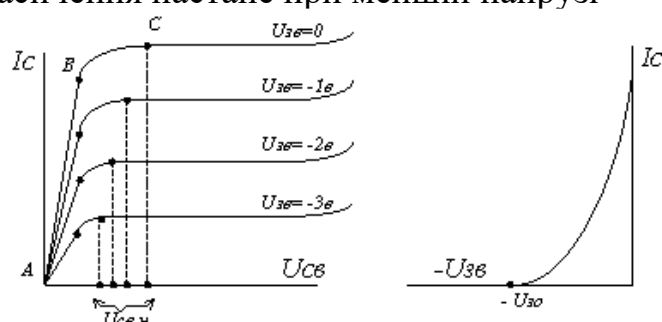


а)

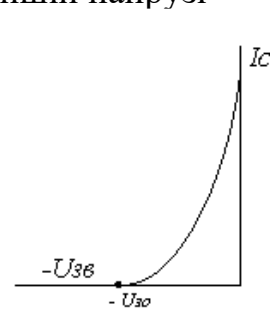


б)

Рис. 5.18. Вольт-амперні характеристики польового транзистора з ***p-n-переходом*** і каналом ***n-типу***: а – ***стокові (вихідні)***; б – ***стік-затворна (вхідна)***



а)



б)

Рис. 5.19. Сімейство статичних стокових характеристик ***ПТ з p-n-переходами*** $I_C = f(U_{CB}) | U_{ЗВ} = \text{const}$ (а); $I_C = f(U_{ЗВ}) | U_{CB} = \text{const}$ (б)

U_{CBH} , а нахил початкового відрізка характеристики зменшиться, що відповідає більшому значенню опору каналу. Подальше збільшення стокової напруги, тобто при $U_{CB} > U_{CBH}$, практично не приводить до зростання I_C . На ділянках AC стокових характеристик **ПТ** можна використовувати як **керований резистор**. В **режимі підсилення** використовують похилі ділянки стокових характеристик ($U_{CB} > U_{CBH}$).

Залежність струму стоку від напруги між затвором і витком при сталій напрузі стік-витік відображається стік-затворною характеристикою (рис. 5.19, б): $I_C = f(U_{ЗВ}) | U_{CB} = \text{const}$. Тут, напруга на затворі, при якій струм зменшується до нуля $U_{ЗВ0}$ є **напругою відтинання** (або **запирання**) $U_{ЗВ}$ відт.

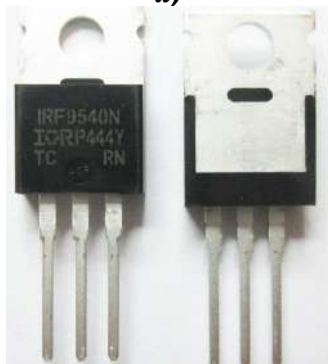
Основні параметри ПТ з р-п переходами:

- 1) максимальний струм стоку I_{Cmax} (при $U_{ЗВ}=0$);
- 2) максимальне значення напруги стік-витік U_{CBmax} ;
- 3) напруга відтинання $U_{ЗВ відт}$;
- 4) крутизна стік-затворної характеристики $S = dI_C/dU_{ЗВ} | U_{CB} = \text{const}$;
- 5) диференційний опір стоку $r_c = dU_{CB}/dI_C | U_{ЗВ} = \text{const}$ (має величину порядку одиниць кОм);
- 6) вихідний опір $r_{BX} = dU_{ЗВ}/dI_C$ — являє собою опір транзистора між стоком і витком (опір каналу) для змінного струму. Вхідний опір польових транзисторів з **р-п-переходом** досить великий (досягає одиниць і десятків МОм), що вигідно відрізняє їх від біполярних транзисторів.

Польовий транзистор з ізованим затвором (МДН-транзистор) — це польовий транзистор, затвор якого відокремлений в електричному відношенні (ізований) від каналу напівпровідника шаром діелектрика. В залежності від виду ізоляції розрізняють **МДН-транзистори** та **МОН-транзистори**. Аббревіатура "**МДН**" розшифровується як "**метал-діелектрик-напівпровідник**", а "**МОН**" — як "**метал-оксид-напівпровідник**" (наприклад, коли як діелектрик використовують оксид кремнію SiO_2). Наявність діелектрика забезпечує високий вхідний опір r_{BX} даних транзисторів ($10^{12} - 10^{14}$ Ом). Витік і стік в них формують із сильнолегованих напівпровідників, за рахунок чого області витоку і стоку мають високу концентрацію носіїв і помічаються на рисунку знаком "+". Транзистори з ізованим



а)



б)

Рис. 5.20. Зовнішній вигляд дискретного МДН-транзистора з n-каналом (а) та p-каналом (б)

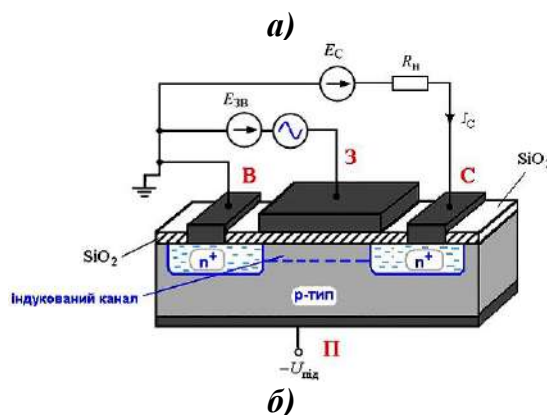
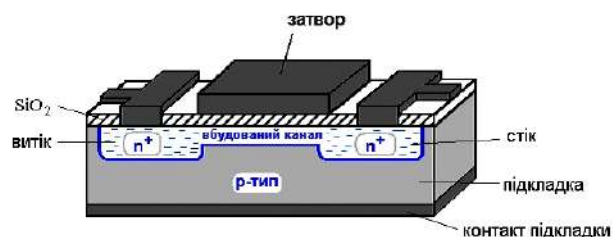


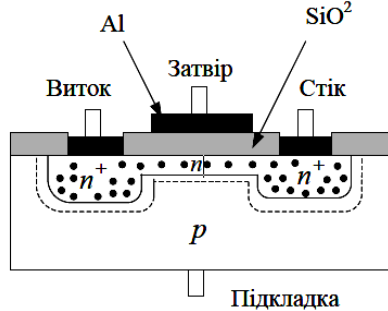
Рис. 5.21. Структура МДН-транзистора з вбудованим (а) та з індукованим (б) n-каналом

каналом можуть виконуватись як *n*- так і *p*-канальними (рис. 5.20). Провідний канал у *МДН*- і *МОН-транзисторах* може бути утворений при виготовленні транзисторів або утворюватись під впливом напруги, прикладеної до затвору. В залежності від цього розрізняють *ПТ з вбудованим* і *ПТ з індукованим каналами* (рис. 5.20). Принцип дії *МДН-транзисторів* заснований на ефекті зміни провідності приповерхневого шару напівпровідника на межі з діелектриком (струмопровідного каналу) під впливом поперечного електричного поля.

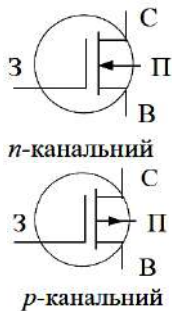
Польовий транзистор із вбудованим каналом

На рис. 5. 22, а, зображений *МОН-транзистор* із вбудованим каналом *n*-типу. Провідний канал являє собою слабо леговану смугу *n*-типу, яка з'єднує між собою більш леговані області (*n*+) витоку і стоку, що утворені в підкладці – напівпровіднику *p*-типу. *МДН*- і *МОН-транзистори* мають чотири електрода: витік, стік, затвір і підкладку. Підкладку часто електрично з'єднують з витоком (або зі стоком), утворюючи три виводи. Наявність шару діелектрика дозволяє в *МДН-транзисторі* з вбудованим каналом подавати на затвор керуючу напругу обох полярностей. У залежності від полярності напруги між затвором і витоком $U_{ЗВ}$, у каналі змінюється концентрація основних носіїв. При прикладенні до затвору позитивної напруги, електричним полем, яке при цьому створюється, канал збагачується основними носіями заряду – електронами, його провідність збільшується і струм стоку I_C зростає. Цей режим називають режимом збагачення. При прикладенні до затвору від'ємної напруги відносно витоку, в каналі створюється електричне поле, яке виштовхує електрони з області каналу в області *n*+ та підкладку, через що канал збіднюється основними носіями заряду, його провідність зменшується і струм стоку I_C зменшується. Такий режим роботи транзистора називають режимом збіднення. У таких транзисторах при $U_{ЗВ}=0$, якщо прикласти напругу між стоком і витоком ($U_{СВ}>0$), протікає початковий струм стоку I_C поч, що являє собою потік електронів. При збільшенні від'ємної напруги на затворі до величини $U_{З0}$ провідний канал зникає і струм стоку практично стає рівним нулю.

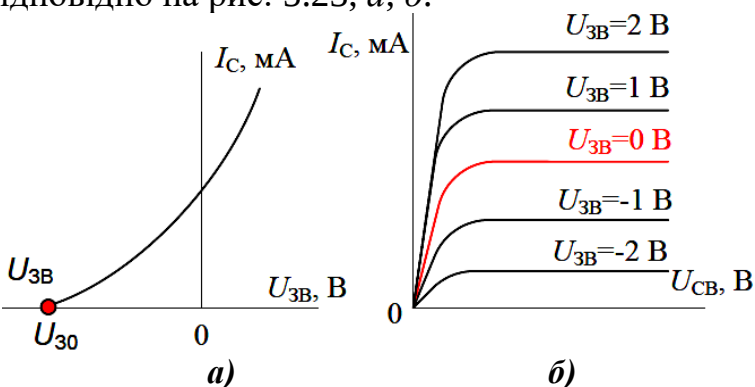
Таким чином, *МОН-транзистор* з вбудованим каналом може працювати як у режимі збагачення, так і в режимі збіднення. Стік-затворна і стокова характеристики такого транзистора приведені відповідно на рис. 5.23, а, б.



а)



б)



а)

б)

Рис. 5.22. *МОН-транзистор*: а – робоча структура ПТ з вбудованим *n*-каналом; б – умовне позначення ПТ з вбудованим каналом *n*-типу, *p*-типу

Рис. 5.23. Стік-затворна (а) і стокова (б) характеристики *МОН-транзистора* з вбудованим *n*-каналом

Польовий транзистор з індукованим каналом

МДН-транзистори з індукованим каналом відрізняється від попереднього тим, що, за відсутності напруги на затворі, канал відсутній (рис. 5.24, б), тому що *n*+ області витоку і стоку утворюють з *p*-підкладкою два *p*-*n*-переходи, включені назустріч один одному. Прилюбій полярності напруги між стоком і витоком $U_{СВ}$ один із *p*-*n*-переходів буде зміщений у зворотному напрямі (замкнений) і струм

між виток і стоком буде відсутній. **ПТ** з індукованим **п-каналом** (**п-МОП-транзистори**), на відміну від розглянутих раніше польових транзисторів, управляються тільки позитивним сигналом $U_{ЗВ}$. Відмінність стокових характеристик (рис. 5.25) полягає в тому, що управління струмом транзистора здійснюється напругою однієї полярності, співпадаючої з полярністю напруги $U_{СВ}$. Струм $I_C=0$ при $U_{ЗВ}=0$. Якщо до затвору підвести напругу більшу за порогову $U_{ЗВ} > U_{ЗВпор}$, то створене нею електричне поле притягує електрони з **п+ областей** і з підкладки, утворюючи тонкий шар **п-типу** в приповерхневій області **р-підкладки** (рис. 5.24, а). Цей шар з'єднає витік і стік і буде **індукованим каналом п-типу**. Від підкладки канал ізолюваний створеним збідненим шаром. Таким чином, **ПТ** з **індукованим п-каналом** керуються тільки додатною напругою $U_{ЗВ}$ (рис. 5.25, б). Значення порогової напруги **п-канального** транзистора складає 0,2-0,1 В.

Основні параметри **МДН-транзисторів** аналогічні параметрам **ПТ** з керованим **р-п-переходом**, але значно більший вхідний опір. Тому, **ПТ** застосовуються в підсилювальних каскадах з великим вхідним опором, ключових і логічних пристроях, при виготовленні інтегральних схем та ін.

Схеми вмикання польових транзисторів. **ПТ** можна вмикати за однією з трьох основних схем: зі спільним витком (**СВ**), зі спільним стоком (**СС**) та зі спільним затвором (**СЗ**) (рис. 5.26).

На практиці найчастіше застосовується схема з **СВ**, аналогічна схемі на біполярному транзисторі з **СЕ**. Підсилювальний каскад на польовому транзисторі, увімкненого за схемою з **СВ**, дає дуже велике посилення струму і потужності (дозволяє одержати одночасно посилення за струмом, за напругою та за потужністю). Схема з **СЗ** аналогічна схемі з **СБ**. Вона не дає посилення струму, і тому посилення потужності в ній в багато разів менше, ніж в схемі з **СВ**. Каскад з **СЗ** має низький вхідний опір, у зв'язку з чим він має обмежене практичне застосування.

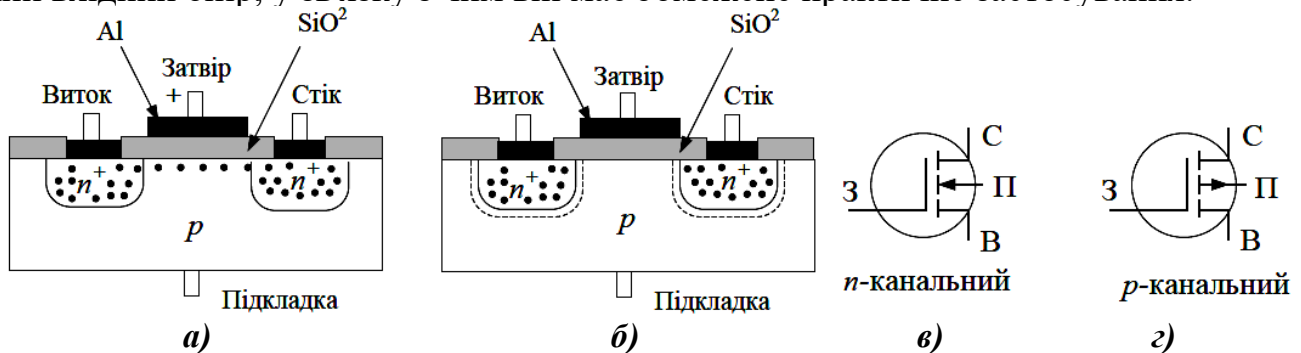


Рис. 5.24. **МОН-транзистор**: а – робоча структура **ПТ** з індукованим **п-каналом** при позитивній напрузі на затворі; б – робоча структура **ПТ** з відсутнім індукованим каналом **п-типу**; в – умовне позначення **ПТ** з індукованим каналом **п-типу**; г – умовне позначення **ПТ** з індукованим каналом **р-типу**

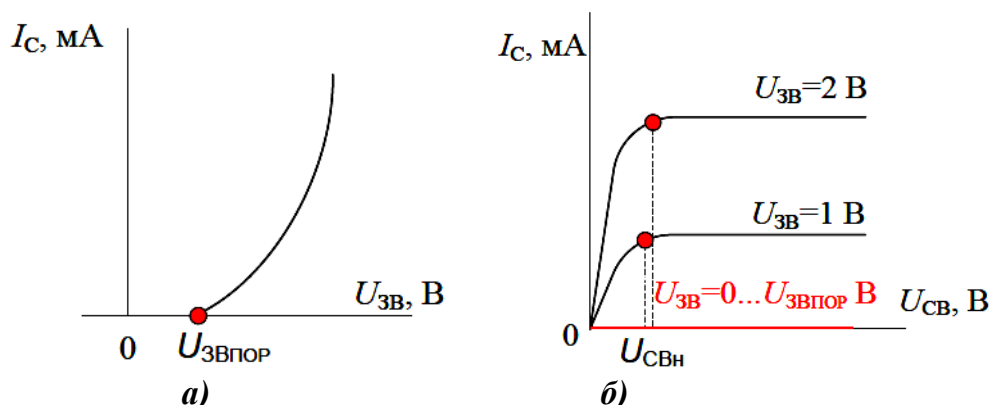


Рис. 5.25. **Стік-затворна** (а) і **стокова** (б) характеристики **МОН-транзистора** з індукованим **п-каналом**

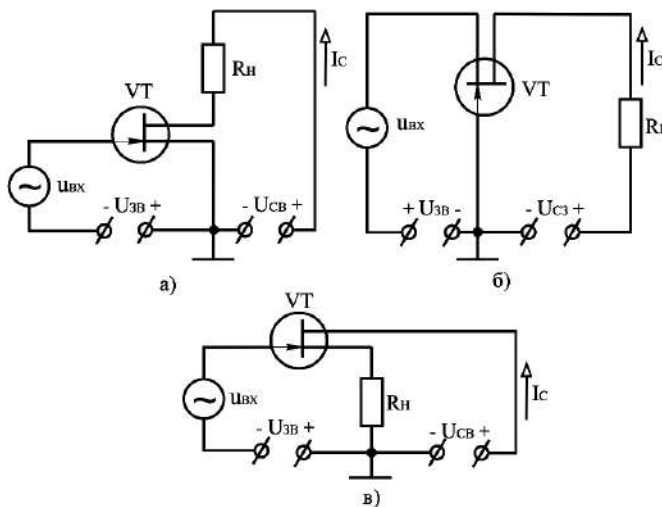


Рис. 5.26. Схеми вмикання ПТ: а – зі спільним витоком; б – зі спільним затвором; в – зі спільним стоком

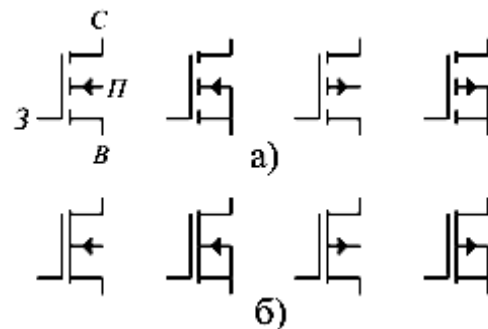


Рис. 5.27. Схемні зображення МДН-транзисторів відповідно з n - і p -індукованими (а) та вбудованими (б) каналами в двох варіантах: з окремим виводом підкладки і загальним виводом підкладки і витоку

5.3. Напівпровідникові тиристори

Перемикаючими називають напівпровідникові прилади, вольт-амперна характеристика яких має ділянку з від'ємним диференційним опором і які використовуються для перемикання. До них відносяться тиристори (диністори, триністори, симістори) та одноперехідні транзистори (див. табл. 5.2).

Тиристор – це електроперетворювальний напівпровідниковий прилад вентильного типу з трьома або більше p - n -переходами, який відкривається для пропускання електричного струму при досягненні порогового значення напруги між анодом і катодом, або за умови подачі невеликої напруги на керуючий електрод. Також цей електронний компонент (елемент) називають напівпровідниковим керованим вентилем (Silicon/Semiconductor Controlled Rectifier, SCR).

За кількістю зовнішніх виводів розрізняють: діодні тиристори (диністори, що мають два зовнішні виводи), триодні тиристори (триністори, що мають три зовнішні виводи) та тетродні тиристори (мають чотири зовнішні виводи).

За напрямком протікання струму у відкритому стані тиристори поділяються на несиметричні (пропускають струм в одному напрямку – від анода до катода) і симетричні (пропускають струм в обох напрямках). Симетричні тиристори виготовляються з п'яти шарів напівпровідників.

Диністор (двоелектродний тиристор) – це тиристор, що має два зовнішніх виводи (рис. 5.28) – анод і катод, та не містить керуючих електродів. Такі прилади керуються напругою, прикладеною між основними електродами.

Диністор являє собою напівпровідниковий прилад, що складається з чотирьох областей з провідностями p - і n -типу, які послідовно чергуються (рис. 5.29). Виходячи з принципу роботи диністорів, їх використовують в якості електронного ключа (для замикання та/або розмикання електричного ланцюга/ланцюгів).

Диністор може перебувати у двох станах: 1) закритому, яке характеризується значним падінням напруги на диністорі та протіканням малих струмів через нього, тобто великим опором; 2) відкритому, яке характеризується малим падінням напруги на диністорі та протіканням значних струмів через нього, тобто малим опором. Для відкривання диністора, до нього необхідно прикласти імпульс прямої напруги десятки В, а для закривання – необхідно зменшити прямий струм до значення $I_A \text{ пр} < I_A \text{ утр}$, (де $I_A \text{ утр}$ – струм утримання – мінімальний прямий струм, при якому диністор ще залишається в увімкненому стані) або подати на прилад напругу зворотної полярності. Основні параметри диністора характеризу-

Таблиця 5.2.

Умовні позначення перемикаючих напівпровідникових приладів

Тип	Умовне позначення
Диністор	
Триністор з керуванням за катодом	
Триністор з керуванням за анодом	
Триністор двоопераційний з керуванням за катодом	
Триністор двоопераційний з керуванням за анодом	
Симістор некерований	
Симістор керований	
Одноперехідний транзистор з базою n-типу	
Одноперехідний транзистор з базою p-типу	

ються ВАХ: 1) **напруга вмикання**, яка становить 20-1000 В; 2) **напруга у відкритому стані** – напруга між анодом і катодом відкритого диністора для заданого струму, приймає значення 1-3 В; 3) **максимальне допустиме амплітудне значення зворотної напруги**, яке може сягати 1000 В; 4) **струм вмикання** – мінімальний струм через прилад, який забезпечує перемикання диністора із закритого стану у



Рис. 5.28. Диністор – зовнішній вигляд та умовне позначення

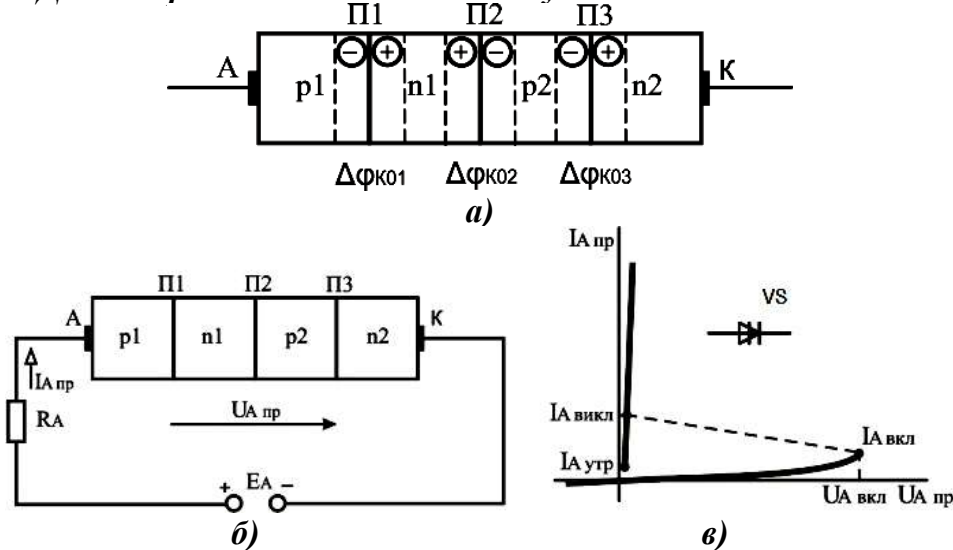


Рис. 5.29. Диністор: а – структура; б – схема увімкнення; в – вольт-амперна характеристика та умовне графічне позначення.

відкритий і підтримку цього відкритого стану після припинення дії імпульсу прямої напруги; 5) максимальне середнє значення прямого струму за заданих умов охолодження, що становить 0,1-2000 А; 6) **струм утримання** – мінімальний прямий струм (0,01-1 А) через увімкнений диністор, подальше зменшення якого переводить прилад у стан з високим опором; 7) загальна ємність приладу та ін.

Триністор (триелектродний тиристор) (рис. 5.30) – це керований напівпровідниковий прилад, що має три зовнішні виводи (анод, катод та керуючий електрод). На відміну від диністора триністор, має додатковий електрод КЕ, який називають керуючим. В залежності від того, до якого прошарку напівпровідника підключений керуючий електрод, триністори бувають з **керуванням по аноду** і з **керуванням по катоду**. Останні є більш поширеними. **Тріодні тиристори** діляться на **запірні** та **незапірні**. Незапірні тиристори не можуть бути переведені в закритий стан (що відображено в їх назві) за допомогою сигналу, що подається на керуючий електрод. Такі тиристори закриваються лише тоді, коли струм через них стає меншим від струму утримання. У випадку комутації змінного струму на активному (резистивному) навантаженні це відбувається в кінці напівхвилі.

Розглянемо роботу триністора з управлінням по катоду. Відкривання триністора при прикладанні на анод та катод прямої напруги здійснюється підведенням напруги близько одиниць вольт на керуючий електрод від додаткового зовнішнього джерела **ЕК** при певному значенні **струму керування** $I_{кер}$. Для триністора з управлінням по катоду (рис. 5.30) на керуючий електрод необхідно подати імпульс "+" позитивної напруги. Згідно з **ВАХ** (рис. 5.31, б), якщо на керуючому електроді $I_{кер0} = 0$ пряма напруга $U_{А пр}$ при якій тиристор знаходиться у закритому стані, сягає значної величини (**ділянка 0А**). При збільшенні струму керування від $I_{кер1}$ до $I_{кер3}$, $U_{А пр}$ при якій тиристор знаходиться у закритому стані зменшується. При струмі $I_{кер1}-I_{кер3}$ та збільшенні прямої напруги більше точки **А** відбувається відкривання триністора. На **ділянці АБ**, що характеризується як **ділянка від'ємного опору**, триністор знаходиться в нестійкому стані. Якщо прямий струм через триністор перевищує точку **Б**, то він знаходиться у відкритому стані. Для вимикання триністора необхідно зменшити прямий струм до значення $I_{А пр} < I_{А утр}$ (де $I_{А утр}$ – **струм утримання** – мінімальний прямий струм увімкненого тиристора при розімкненому колі керування) або подати на прилад напругу зворотної полярності.



Рис. 5.30. Зовнішній вигляд дискретних триністорів – малопотужні (а), силові з таблетним і штирьовим конструктивним виконанням (б); умовне позначення триністора з керуванням по катоду (в)

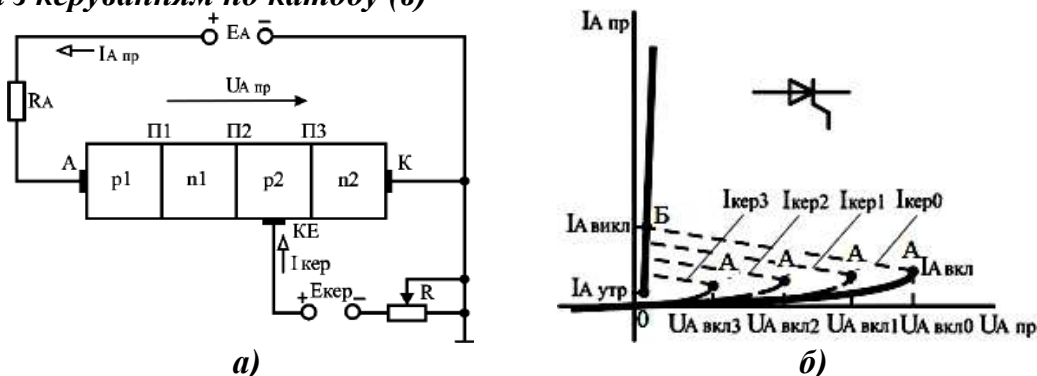


Рис. 5.31. Триністор: а – структура та схема увімкнення; б – ВАХ

Основні параметри триністорів подібні до основних параметрів диністорів. Додаються лише параметри, які характеризують коло керування приладом: **напруга керування** – постійна напруга на керуючому електроді, яка забезпечує постійний струм вмикання; **струм спрямлення** – мінімальний струм через керуючий електрод, який забезпечує виродження характеристики тиристора на характеристику звичайного діода (десятки міліамперів).

Отже, принципових відмінностей між диністорами і триністорами немає, проте якщо включення диністора відбувається при досягненні напруги між виводами анода і катода певного значення напруги вмикання, що залежить від типу даного диністора, то для триністора напруга включення може бути знижена за умови подачі імпульсу струму певної тривалості та величини на його керуючий електрод при позитивній різниці потенціалів між анодом і катодом.

Триністори використовуються, здебільшого, як **електронні ключі в керованих випрямлячах та регуляторах напруги і потужності**. Прилади здатні практично без втрат комутувати ланцюги, за якими проходять струми в десятки і навіть сотні амперів. Однак, триністори мають одну суттєву незручність – проводять струм тільки в один бік, що обмежує їхнє використання в колах змінного струму.

Управління **триністорними випрямлячами** зводиться до керування моментом відмикання тиристора. Найбільш поширений спосіб управління тиристорами – імпульсно-фазовий (рис. 5.32); при цьому на керуючий електрод тиристора періодично подаються імпульси керуючого сигналу, які можуть зсуватися у часі. В результаті змінюється момент відмикання триністора, починаючи з якого і до кінця додатної півхвилі напруги, тиристор знаходиться у відкритому стані. Цей зсув у часі імпульсів сигналу керування відносно переходу напруги мережі через нуль називається **кутом керування α** , який може змінюватися від 0 до 180°. Змінюючи α можна регулювати напругу на навантаженні від нуля до максимуму.

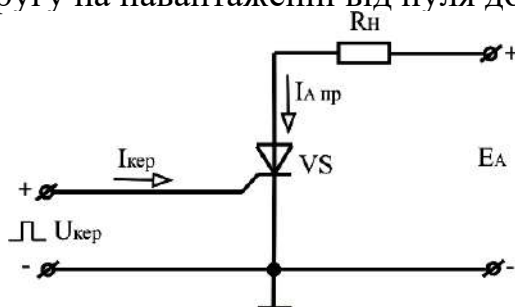


Рис. 5.32. Схема увімкнення триністора

Симістор (симетричний тріодний тиристор) (Triode for Alternating Current (TRIAC)) – це керований напівпровідниковий прилад, який має однакові **ВАХ** при різних полярностях прикладеної напруги. Він проводить струм в обох напрямках та використовується для комутації в ланцюгах змінного струму. У електроніці часто розглядається як керований вимикач (ключ) та регулятор напруги. На відміну від тиристора, що має катод і анод, основні (силові) виводи симістора не називають катодом чи анодом, оскільки в силу структури симістора вони є тим і іншим одночасно. Однак за способом включення відносно керуючого електрода основні виводи симістора розрізняються, причому має місце їх аналогія з катодом і анодом тиристора. Умовне зображення симістора наведене на рис. 5.33, а. Основою симістора є кремнієва монокристалічна структура, що складається з п'яти областей з електропровідностями **p-** і **n-типу**, які послідовно чергуються, й утворюють **чотири p-n-переходи** (рис. 5.33, б).

Симістор відкривається: при подачі низьковольтного сигналу на керуючий електрод незалежно від полярності напруги між основними виводами (і забезпечує

проходження струму в будь-якому напрямку); або в результаті перевищення напруги між основними виводами **MT1** і **MT2** деякої максимальної величини. Симістор переходить у закритий стан після зміни полярності напруги між виводами **MT1** і **MT2** або у випадку зменшення робочого струму за значення струму утримання. Існують різні структурні модифікації приладу, які визначають характер керування симістором (імпульсами однієї чи будь-якої полярності). Одна із розповсюджених структур симістора, яка може керуватися як додатними, так і від'ємними імпульсами напруги між затвором і основним виводом **MT1**, представлена на рис. 5.33, б. Прилад має три електроди: два силові **MT1** і **MT2** та один керуючий **KE**, причому електрод **MT1** є спільним для силового і керуючого кіл. Особливістю структури є зашунтовані металевими контактами *емітерні переходи П1 і П4*, а також *керуючий перехід п4-р1*. Залежно від полярностей основної і керуючої напруг працює одна із чотирьох структурних частин приладу. Під час роботи симістора на навантаження у колах змінного струму полярності керуючого електрода та основного електрода **MT2**, здебільшого, співпадають, тому вольт-амперні характеристики симістора рисують у першому і третьому квадрантах (рис. 5.34). **ВАХ** симістора аналогічна **ВАХ** двох триністорів, увімкнених зустрічно-паралельно. Окремі характеристики мають ділянки з від'ємним опором на обох гілках **ВАХ**. Струм керування будь-якого напрямку змінює значення напруги вмикання.

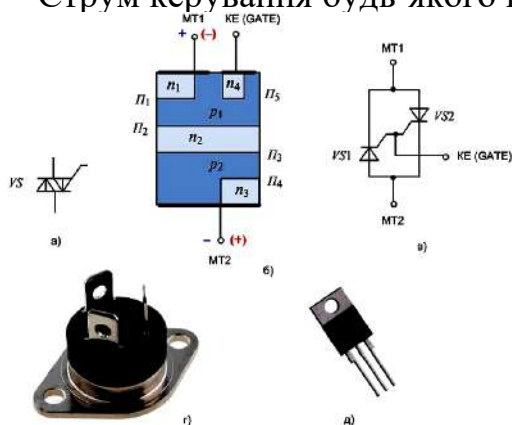


Рис. 5.33. Симістор: умовне позначення (а), структура (б); еквівалентна схема (в); BTA25-600B-E (600V, 25A; ST Microelectronics) (з); L6004L5-ND (600V, 4A; Teccor Electronics Inc.) (д)

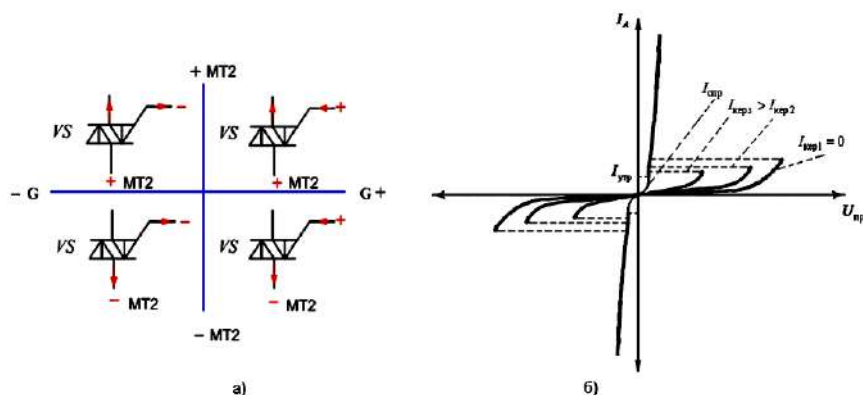


Рис. 5.34. До пояснення роботи симістора: режими роботи (а), ВАХ (б)

Двоопераційний (запірний) тиристор (Gate Turn-Off thyristor (GTO)) є повністю керованим напівпровідниковим приладом, який можна не тільки вмикати, але й вимикати за колом керування шляхом подачі коротких імпульсів, полярність яких протилежна полярності імпульсів вмикання. У звичайних тиристорів можна керувати моментом увімкнення, але для їхнього вимикання у колах постійного струму потрібні додаткові елементи вузлів комутації, які збільшують масу тиристорних пристроїв. Для вимикання **GTO** необхідно подати на той самий керуючий електрод потужний короткотривалий (10-100 мкс) імпульс протилежної полярності зі значенням приблизно 1:5 по відношенню до значення прямого анодного струму I_A через тиристор, що вимикається. Умовне зображення **GTO** наведене на рис. 5.35, а. Двоопераційний тиристор має таку ж чотиришарову структуру, як і звичайний тиристор. Основна конструктивна відмінність **GTO** тиристорів від звичайних полягає в іншому розміщенні горизонтальних і вертикальних шарів з **n**- і **p**-типамі провідностей: в областях анода і катода прилад складається з великої кількості (сотень) технологічних осередків (рис. 5.35, б). Таке конструктивне ви-

конання має на меті рівномірне зменшення струму через структуру під час вимикання приладу. Таким чином, уся структура являє собою окремі тиристори, які увімкнені паралельно, з розподіленим керуючим електродом поблизу катода або анода. Розподілений керуючий електрод забезпечує додаткові умови для швидкого розсмоктування носіїв зарядів у базі. В якості еквівалентної схеми для такої структури можна застосувати транзисторний аналог.

На рис. 5.35, б показано двоопераційний тиристор, *шар катода* n_2 якого розділений на елементарні осередки, які рівномірно розподілені за площею катода і з'єднані паралельно. Керуючий електрод приєднаний до *шару бази* p_2 , який виконаний єдиним цілим з великою кількістю контактів керуючого електрода, рівномірно розподілених за площею катода і з'єднаних паралельно. *Шар бази* n_1 виконаний подібно до відповідного шару одноопераційного триністора. У *шарі анода* p_1 наявні *шунти n-типу*, які з'єднують *базу* n_1 з анодним контактом. Шунти призначені для прискорення виведення зарядів із *базу* n_1 під час вимикання приладу. Розподілений керуючий електрод ефективно регулює інжекцію з катодного переходу. Додатний керуючий імпульс вмикає тиристор і залишає структуру у провідному стані після припинення дії імпульсу. Для вимикання тиристора **GTO** при незмінній напрузі U_{vs} між керуючим електродом і катодом прикладається напруга від'ємної полярності. Від'ємний керуючий сигнал достатньої величини і тривалості знижує концентрацію основних носіїв заряду в *базі* p_2 : через керуючий електрод в *базу* p_2 надходять електрони і відбувається рекомбінація цих електронів з дірками, що надходять із *базу* n_1 . Розсмоктування основних носіїв поблизу колекторного переходу тиристора спричинює зміщення переходу у зворотному напрямі і зменшення прямого струму через прилад за короткий час. Обидва транзистори **VT1** і **VT2** починають працювати в активному режимі, причому внаслідок додатного зворотного зв'язку у структурі анодний струм продовжує зменшуватися і транзистор **VT2** входить у режим відсічки. Тиристор переходить у стан блокування, коли два переходи Π_2 і Π_3 зміщені зворотно, а на керуючому електроді діє імпульс від'ємної полярності.

Статичні вольт-амперні характеристики *двоопераційних тиристорів* подібні до **VAX** одноопераційних з тією різницею, що спади напруги у ввімкненому стані на приладі мають більші значення, а максимальні допустимі значення середнього прямого струму I_{max} і зворотної напруги $U_{zv\ max}$, навпаки, менші на 20-30 %. Щоб блокувати великі зворотні напруги, зустрічно-паралельно до **GTO** вмикають діод. Двоопераційні тиристори виготовляють, здебільшого, у таблеткових корпусах (рис. 5.35, в): чотиришарова кремнієва пластина затискується через термокомпенсуючі молібденові диски двома мідними основами, що мають збільшені тепло- та

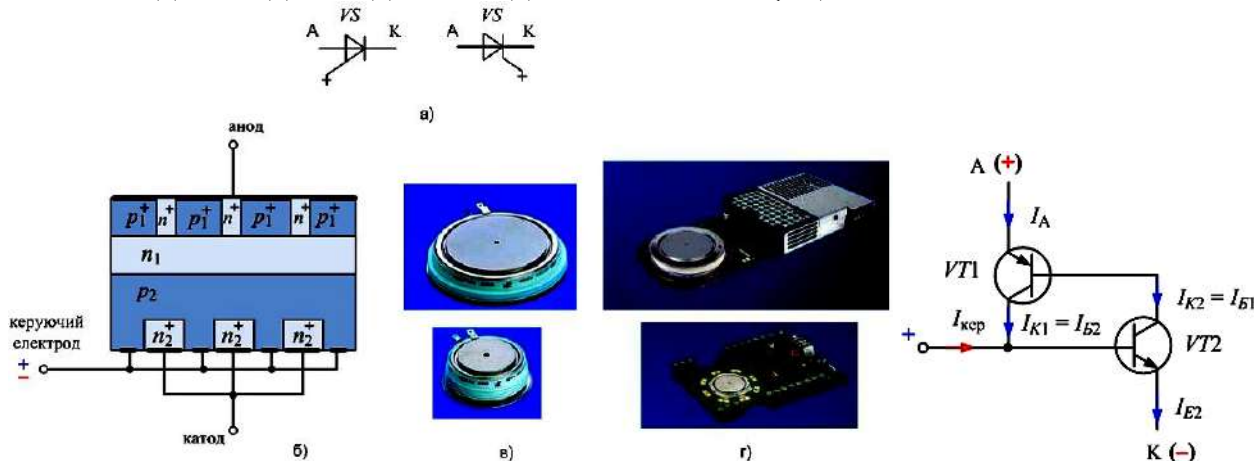


Рис. 5.35. Двоопераційний тиристор: умовне позначення (а), структура (б); прилади фірми ABB Semiconductors **GTO** та **IGCT** (з)

електропровідності. З кремнієвою пластиною контактує керуючий електрод через вивід у керамічному корпусі. Прилад затискується контактними поверхнями між двома половинами охолоджувача, які ізольовані одна від одної і мають конструкцію, що визначається типом системи охолодження. Деякі двоопераційні тиристори виготовляють у штирьових корпусах. **GTO-тиристор** оптимізовано для низьких втрат у провідному стані. Середній час переходу від увімкненого стану до вимкненого стану і навпаки складає від 10 до 30 мкс, тому типова частота перемикання приладу – від 200 до 500 Гц. Тобто двоопераційні тиристори за своєю природою є порівняно повільними ключами. Для роботи **GTO-тиристорам** потрібні кола захисту: при увімкненні – індуктивний реактор, який вмикається послідовно і обмежує швидкість наростання прямого струму; при вимиканні – **RC-коло**, що увімкнено паралельно, для захисту від швидкості наростання напруги.

Основними областями застосування двоопераційних тиристорів є комутаційні та перетворювальні пристрої в електроенергетиці, промисловості та на транспорті (див. табл. 5.3).

Одноперехідний транзистор (ОПТ) – напівпровідниковий прилад з трьома електродами і одним **p-n-переходом**. Одноперехідний транзистор належить до сімейства тиристорів. Підсилювальні і перемикаючі властивості **ОПТ** обумовлені зміною опору бази у результаті інжекції у неї неосновних носіїв заряду.

Основою **ОПТ** є кристал напівпровідника (наприклад **n-типу** рис. 5.36, б, в), який називається **базою**. На кінцях кристала є омичні контакти **B1(B1)** і **B2(B2)**, між якими розташовується область, що має випрямляючий контакт **E** з напівпровідником **p-типу**, що виконує роль емітера. Принцип дії **ОПТ** зручно розглядати, скориставшись еквівалентною схемою заміщення (рис. 5.36, в), де **верхній опір R_{B2}** і **нижній опір R_{B1}** – опори між відповідними виводами бази і емітера, а діодом зображено емітерний **p-n-перехід**. Струм, що протікає через опори **R_{B2}** і **R_{B1}** , створює на першому з них падіння напруги, яке зміщує діод у зворотному напрямку. Якщо напруга на емітері **U_e** менше напруги на опорі **R_{B1}** – діод закритий, і через нього тече тільки струм витоку. Коли ж напруга **U_e** стає вище за напругу на опорі **R_{B1}** , діод починає пропускати струм у прямому напрямі. При цьому опір **R_{B1}** зменшується, що призводить до збільшення струму у ланцюзі діод – **R_{B1}** , що у свою чергу, викликає подальше зменшення опору **R_{B1}** . Відповідно й струм **I_b** , що протікає через навантаження та **R_{B2}** і **R_{B1}** , зростає (рис. 5.37, а). Цей процес протікає лавиноподібно. Опір **R_{B1}** зменшується швидше, ніж збільшується струм через **p-n-перехід**, у результаті на вольт-амперній характеристиці одноперехідного транзистора з'являється область від'ємного опору (рис. 5.37, б). При подальшому збільшенні струму залежність опору **R_{B1}** від струму через **p-n-перехід** зменшується, і при значеннях більших за деяку величину **$I_{вкл}$** опір не залежить від струму (область насичення). При зменшенні напруги зсуву **U_{zc}** вольт-амперна характеристика зміщується вліво і за відсутності його перетворюється у характеристику відкритого **p-n-переходу**.

Таблиця 5.3.

Граничні експлуатаційні параметри приладів силової електроніки

Тип приладу	Фірма-виробник	Тип	Струм, А	Напруга, В
Одноопераційний тиристор	ABB Semiconductors	5STP 34N5200	3500	4400
GTO	ABB Semiconductors	5SGT 30J6004	3000	6000
IGCT	ABB Semiconductors	5SHY 35L4502	4000	6000
IGBT	Toshiba Semiconductor Group	ST1200FXF21	1200	3300

При певному значенні напруги $U_{EB1} \geq U_{EB1 \text{ вмик}}$ відбувається різке зростання струму I_E і зниження напруги U_{EB1} , що приводить до появи ділянки з від'ємним диференціальним опором (*ділянка ВС*, рис. 5.37, б). У відкритому стані одноперехідний транзистор знаходитиметься до тих пір, поки інжекція носіїв заряду через емітерний перехід підтримуватиме в базі надмірну концентрацію неосновних і основних носіїв заряду, тобто до тих пір, поки *струм емітера I_E* перевищуватиме значення *струму вимикання $I_{вим}$* .

Основними параметрами одноперехідних транзисторів є:

- 1) *міжбазовий опір*;
- 2) *коефіцієнт передачі H* , що характеризує напругу перемикавання;
- 3) *напруга спрацьовування $U_{вкл}$* – мінімальна напруга на емітерному переході, необхідна для переходу приладу зі стану з великим опором у стан з від'ємним опором;
- 4) *струм включення $I_{вкл}$* – мінімальний струм, необхідний для включення одноперехідного транзистора, тобто переведення його в область негативного опору;
- 5) *струм вимикання $I_{вимкл}$* – найменший емітерний струм, що утримує транзистор у включеному стані;
- 6) *напруга вимикання $U_{вимкл}$* – напруга на емітерному переході при струмі через нього, рівному $I_{вимкл}$;
- 7) *зворотний струм емітера $I_{ез}$* – струм витоку закритого емітерного переходу.

Одноперехідні транзистори отримали широке застосування у різних пристроях автоматики, імпульсної і вимірювальної техніки – генераторах, порогових пристроях, дільниках частоти, реле часу і т. д. Основною їх функцією є перемикавання.

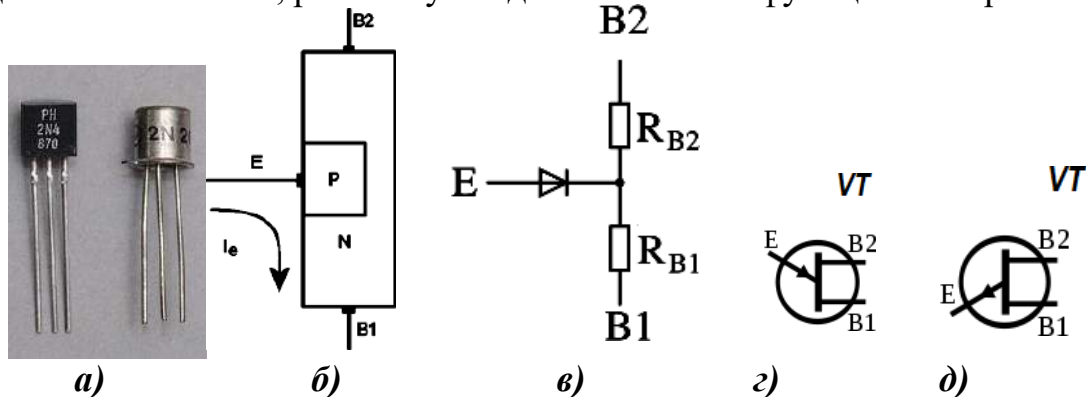


Рис. 5.36. Одноперехідний транзистор: а – зовнішній вигляд; б – структура; в – еквівалентна схема заміщення; з – умовне позначення з n-каналом; д – умовне позначення р-каналом.

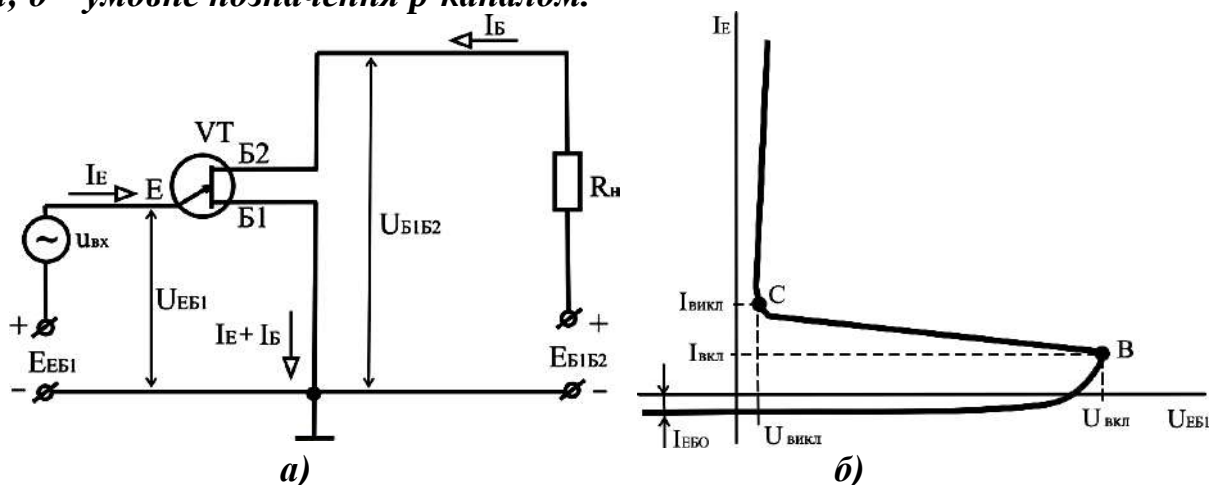


Рис. 5.37. Одноперехідний транзистор: а – схема увімкнення та умовне графічне позначення; б – вольт-амперна характеристика.

Система позначень напівпровідникових приладів

Згідно з державними стандартами, всі напівпровідникові прилади, що випускаються промисловістю, позначаються літерно-цифровим кодом.

Перший елемент коду – літера або цифра, що позначає матеріал, з якого виготовлений прилад: *Г* або *1* – германій або його сполуки, *К* або *2* – кремній або його сполуки, *А* або *3* – сполуки галію. Літера для приладів широкого застосування, цифра – для приладів спеціального застосування.

Другий елемент коду – літера, яка позначає підклас приладу: *А* – діод надвисокочастотний, *В* – варикап, *Д* – діод випрямний, універсальний чи імпульсний, *І* – діод тунельний чи обернений, *Н* – тиристор діодний (диністор), *П* – польовий транзистор, *Т* – біполярний транзистор, *У* – тиристор тріодний, *Ц* – випрямний стовп чи блок.

Третій елемент коду – цифри, перша з яких позначає діапазон основних параметрів (потужність, частоту, яскравість для світлодіодів) або тип приладу. Наприклад: 1) для транзисторів (див. табл. 5.4):

Таблиця 5.4.

Цифрове позначення підкласів транзисторів за потужністю та частотою

Підклас транзисторів	Третій елемент коду
малої потужності (максимальна потужність, що розсіюється транзистором не більша за 0,3 Вт)	
низької частоти (до 3 МГц)	1
середньої частоти (від 3 до 30 МГц)	2
високої частоти (частота більша за 30 МГц)	3
середньої потужності (потужність розсіювання від 0,3 Вт до 1,5 Вт)	
низької частоти (до 3 МГц)	4
середньої частоти (від 3 до 30 МГц)	5
високої частоти (частота більша за 30 МГц)	6
великої потужності (потужність розсіювання більша за 1,5 Вт)	
низької частоти (до 3 МГц)	7
середньої частоти (від 3 до 30 МГц)	8
високої частоти (частота більша за 30 МГц)	9

2) для надвисокочастотних діодів (підкласу А) перша цифра третього елемента коду вказує на тип приладу: *1* – змішувальний, *2* – детекторний, *3* – параметричний, *7* – генераторний.

Наступні дві цифри третього елемента коду (від 1 до 99) – порядковий номер розробки, крім стабілітронів і стабісторів, для яких це значення напруги стабілізації.

Четвертий елемент коду – літера, що показує різновид даного типу приладів, технологічні особливості виготовлення.

Приклади позначень напівпровідникових приладів:

КВ102А – кремнієвий (широкого застосування) варикап підстроювальний, номер розробки *02*, група *А*.

ГТ605А – германієвий біполярний транзистор (широкого застосування), середньої потужності, високочастотний, номер розробки *05*, різновид *А*.

За кордоном існують три основні системи позначень напівпровідникових елементів: *американська (JEDEK)*, *європейська (PRO ELECTRON)* і *японська (JIS)*. В *JEDEK* перша цифра показує кількість *p-n-переходів*: *1* – діод, *2* – транзистор, *3* – тиристор. Після цифри стоїть літера, потім серійний номер і різні параметри для пристроїв даного типу.

Лекція № 6

Тема: "Напівпровідникові джерела і приймачі оптичного випромінювання"

ПЛАН

- 6.1. Випромінювальні та лазерні діоди.
- 6.2. Фотодіоди.
- 6.3. Фототранзистори.
- 6.4. Фототиристори.
- 6.5. Оптрони та оптотиристори.

6.1. Випромінювальні та лазерні діоди

Випромінювальний діод (LED – *Light-emitting diode*) – це напівпровідниковий прилад з одним ***p-n-переходом***, призначений для перетворення електричної енергії на енергію оптичного випромінювання. Електромагнітні хвилі (рис. 6.1), що випромінюються, належать вузькому спектру, діапазон частот якого визначається хімічним складом напівпровідника. За характеристиками випромінювання діоди поділяють на групи (рис. 6.2): 1) ***світлодіоди*** (СД) – діоди з випромінюванням у видимій частині спектра; 2) ***ІЧ-діоди*** – діоди з випромінюванням в інфрачервоній частині спектра ($\lambda=820\text{--}1350\text{ нм}$, наприклад, діоди з арсеніду галію мають $\lambda=0,9\text{--}1,4\text{ мкм}$); 3) ***діоди, які випромінюють в ультрафіолетовій області спектру***. Усі типи випромінювальних діодів працюють при прямому зміщенні ***p-n-переходів*** зовнішніми джерелами (вмикаються на пряму напругу). Діоди можна збуджувати постійним, імпульсним або змінним (через драйвери) струмами.

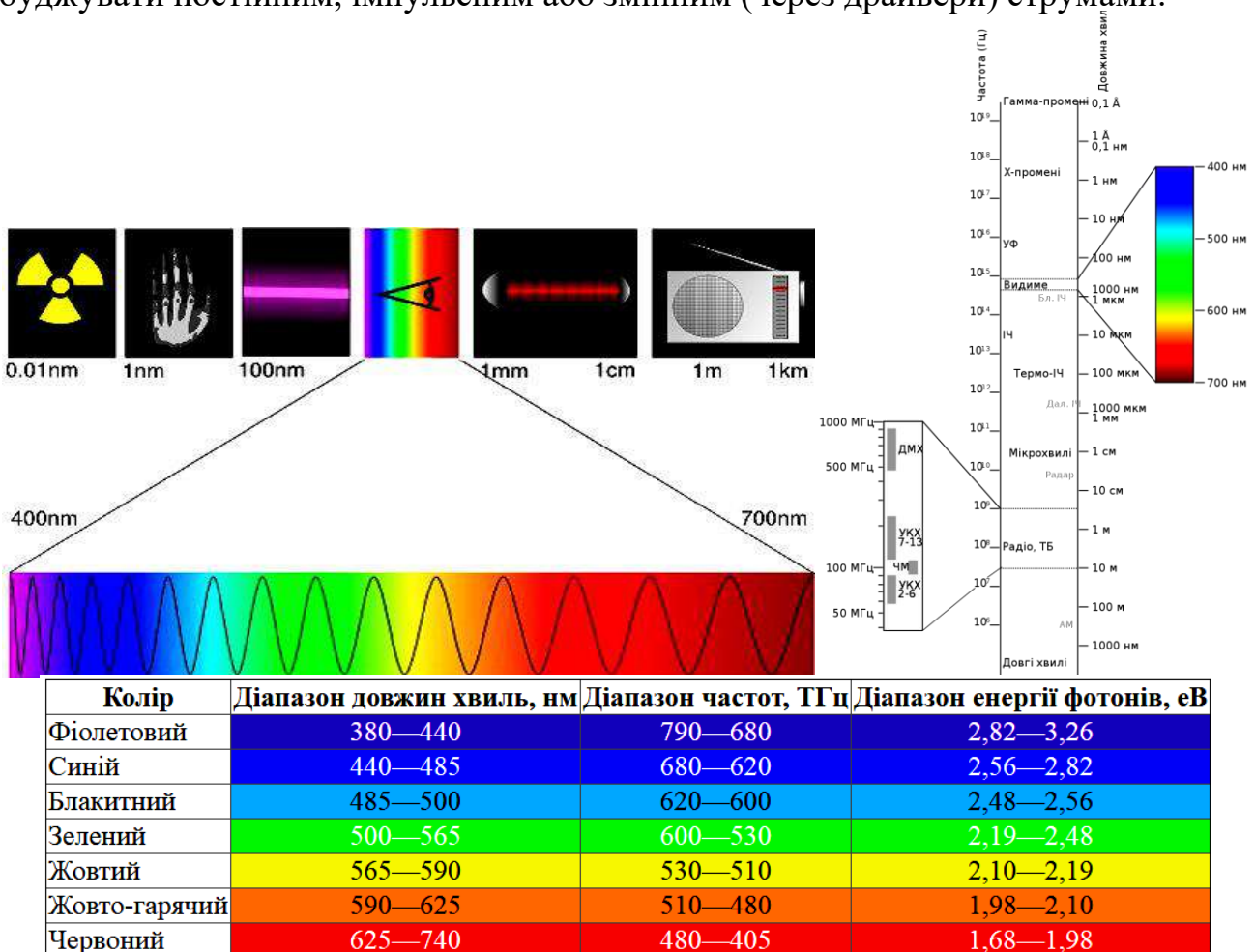


Рис. 6.1. Спектр електромагнітних хвиль

Світлодіоди – це напівпровідникові прилади (рис. 6.2, в, г), які, за рахунок процесів що відбуваються в ***p-n-переході*** при протіканні через нього прямого струму, ***генерують оптичне випромінювання видимого діапазону*** (ефект, відомий як ***електролюмінесценція***). Розрізняють світлодіоди лампового типу, форма яких нагадує мініатюрну лампу з двома виводами, і площинні світлодіоди для монтажу на поверхні плати (***surface mounted devices – SMD***). З метою ізоляції напівпровідникових кристалів від механічних ушкоджень і впливу зовнішнього середовища ***світлодіоди захищають прозорою герметичною полімерною лінзою***. Випромінювання може бути ***направленим*** або ***розсіяним***. Світло, яке випромінюється напівпровідниковим кристалом, потрапляє у мініатюрну оптичну систему, що створюється сферичним рефлектором і прозорим корпусом світлодіоду, який має форму лінзи (рис. 6.2, в). Змінюючи конфігурацію рефлектора і лінзи, забезпечують необхідну спрямованість випромінювання. Зазвичай випромінювання розповсюджується вздовж осі діода, зі спадаючою інтенсивністю по мірі відхилення від осі. Для різних застосувань використовують діоди з різними ***діаграмами спрямованості***. Так, наприклад, для світлофорів кути випромінювання обирають 10-15 °, а для вуличних екранів використовують діоди з кутами випромінювання до 120 ° у горизонтальній площині і до 40 ° – у вертикальній площині.

За своєю структурою, світлодіод подібний до звичайного напівпровідникового діода – він має властивість односторонньої електропровідності, але, при протіканні електричного струму у "прямому" напрямі, на кристалі, в зоні контакту напівпровідників різного типу провідності, виникає світіння. Зазвичай ***p-n-перехід*** виконують несиметричним і емітер (***n-область***) легують сильніше, ніж ***p-область***. У такому разі інжекція через перехід є односторонньою і випромінює базова область (рис. 6.2, б). ***Випромінювання відбувається за рахунок рекомбінації носіїв заряду*** у високоомній області бази (рис. 6.3). Неосновні носії заряду, які інjektуються з емітера, рекомбінують у базі з основними носіями заряду (переходять із зони провідності у валентну зону). При цьому випромінюється вивільнена енергія у вигляді квантів світла. Довжина хвилі λ випромінювального світла однозначно визначається енергією кванта, яка приблизно дорівнює ширині забороненої зони напівпровідника. Колір випромінювального світла залежить від довжини хвилі λ , яка залежить від матеріалу напівпровідника. Так, світлодіоди з фосфіду галію випромінюють червоне світло ($\lambda=0,7$ мкм), з карбіду кремнію – жовто-зелене ($\lambda=0,53$ мкм).

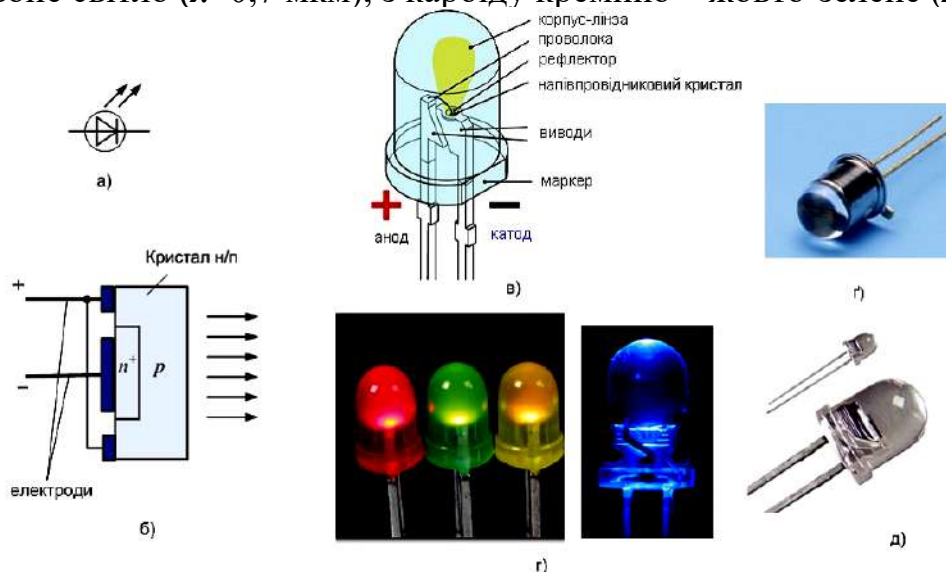


Рис. 6.2. Випромінювальні діоди: умовне зображення (а); структура *p-n*-переходу (б); світлодіоди лампового типу – структура (в), зразки (г); ІЧ-діоди – L2791-02 (r), SFH13 (д)

Енергія фотону E_ϕ , що випромінюється, майже дорівнює енергії (ширині) забороненої зони E_g :

$$E_\phi = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda} \cong E_g \quad (6.1)$$

де h – стала Планка; ν – частота електромагнітної хвилі, що випромінюється; λ – довжина електромагнітної хвилі; c – швидкість світла.

Із формули (6.1) зрозуміло, що довжина хвилі випромінювання визначається шириною забороненої зони напівпровідника і завжди можна визначити ширину забороненої зони, яку повинен мати напівпровідник для отримання випромінювання з певною довжиною хвилі. Так для випромінювання у видимій частині спектру ширина забороненої зони має бути $E_g \gg 1,7 \text{ eV}$. У діодах з германію та кремнію ширина забороненої зони, відповідно, для германію становить $E_{g \text{ Ge}} = 0,72 \text{ eV}$, для кремнію – $E_{g \text{ Si}} = 1,12 \text{ eV}$. Тому рекомбінація електронів і дірок у цих речовинах відбувається з виділенням теплоти, але без світлового випромінювання. При комбінаціях різних матеріалів і домішок можна отримати випромінювання у різних частинах спектру. Випромінювання сучасних світлодіодів охоплює весь оптичний діапазон від блакитного до червоного ($\lambda = 380\text{--}750 \text{ нм}$) (рис. 6.3, б). Широко застосовують світлодіоди на основі нітриду індію-галію (InGaN), які випромінюють синім, зеленим і ультрафіолетовим з високою яскравістю; діоди на основі фосфідів алюмінію-галію-індію (AlGaInP) випромінюють від червоно-жовто-гарячого до жовто-зеленого; світлодіоди з арсенід-галію-алюмінію (AlGaAs) випромінюють червоним і в інфрачервоному діапазоні; діоди з фосфіду галію (GaP) дають жовте і зелене світло. ІЧ-діоди виготовляють в більшості із арсеніду галію, для середнього ІЧ діапазону із сульфиду свинцю (PbS). Для ультрафіолетового діапазону діоди виготовляють із нітриду галію (GaN).

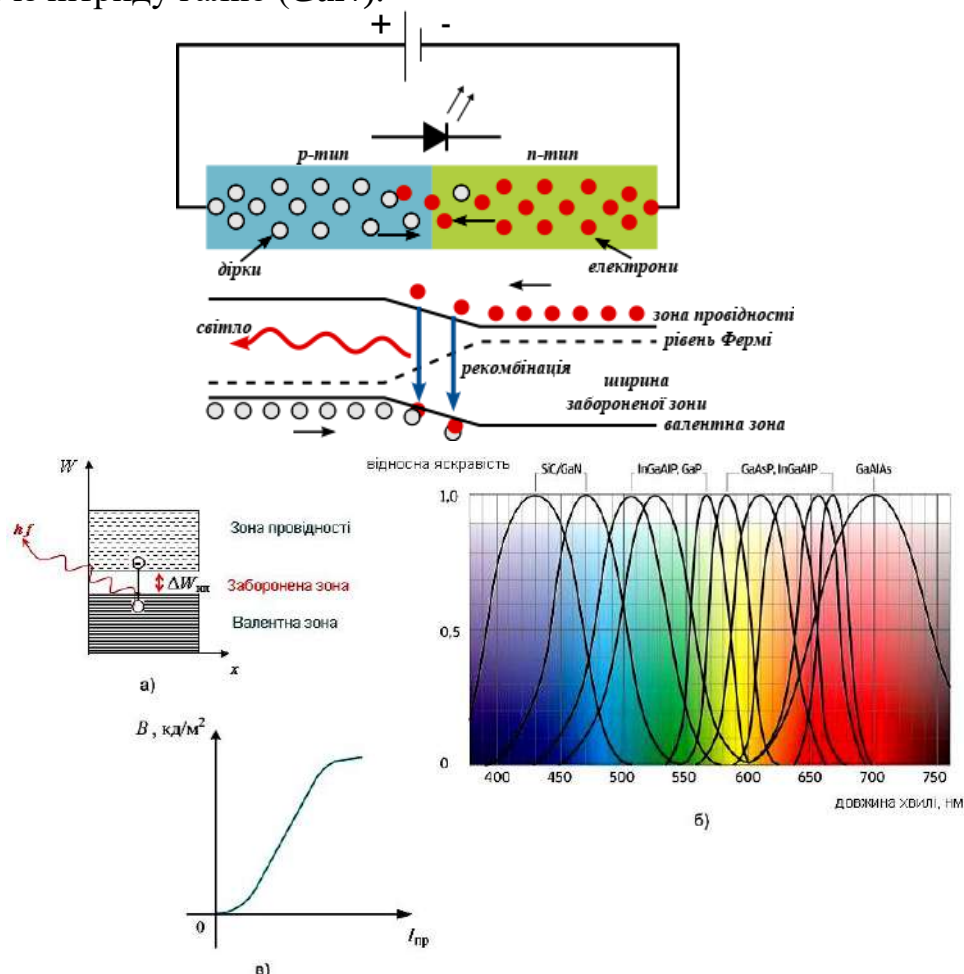


Рис. 6.3. Пояснення процесу випромінювання світлодіодів: утворення фотона (а), спектральні характеристики LED (б), характеристика яскравості світіння (в)

Отже, довжина світлової хвилі, яку ми сприймаємо як колір, залежить лише від структурних та хімічних особливостей напівпровідників. Ніякі зміни характеристик струму живлення світлодіоду (сила струму, частота, напруга) не можуть вплинути на довжину хвилі випромінюваного світла. Сучасні світлодіоди мають ефективність 90 %, тобто 90 % електроенергії може бути перероблене на світло і можуть випромінювати світло від інфрачервоної ділянки спектру до ультрафіолету в тому числі білі. Використовуючи світлодіоди можна одержати світло з високою насиченістю кольору. Світлодіоди широко використовуються в якості індикаторних приладів та швидкодіючих джерел світла (їх перемикання відбувається за 10^{-7} - 10^{-9} с). Найбільшого розповсюдження серед світлодіодів білого світіння набули **світлодіоди з люмінофорним покриттям** (рис. 6.4). Головна перевага світлодіодів з люмінофорами – їх дешевизна. За принципом дії такі світлодіоди подібні до люмінесцентних ламп. На кристал фіолетового, або ультрафіолетового світлодіоду наноситься покриття люмінофору, що під дією ультрафіолетового випромінювання починає світитися саме, але вже білим світлом. Зрозуміло, так само як вигоряє люмінофор люмінесцентних ламп, зменшуючи світловіддачу, вигоряє і люмінофор світлодіоду. Отже, якщо через світлодіод пропускати більший струм, ніж той на який він розрахований, світлодіод світитиме яскравіше, але внаслідок виділення тепла кристал швидко деградує. Замість сотень тисяч годин світлодіод пропрацює десятки, поступово втрачаючи яскравість.

В будь-якому світлодіоді є сильна залежність струму від напруги, яка описується **VAX** (рис. 6.4, б). Так, збільшення напруги живлення від 4,7 до 5,07 В (лише на 0,37 В) викликає зростання струму через світлодіод з 45 мА до 100 мА. Оскільки, **VAX** носить експоненціальний характер, то для живлення світлодіоду необхідно задавати струм живлення. Для малопотужних індикаторних світлодіодів, як правило струм задають послідовно ввімкненим стосовно світлодіоду резистором. У випадку, коли напруга живлення може змінюватися по величині, наприклад при живленні світлодіоду від хімічного джерела струму (акумулятор) по мірі його розрядки зменшуватиметься напруга живлення та струм через світлодіод – світловий потік світлодіоду зменшуватиметься. Тому для живлення освітлювальних (білих) світлодіодів використовують спеціальні драйвери – стабілізатори струму. Вони забезпечують оптимальний прямий струм через світлодіод – максимальну світловіддачу, та оптимальний температурний режим.

Основні параметри і характеристики випромінювальних діодів

Електричні експлуатаційні параметри:

1. I , кд (для світлодіодів) – сила світла при заданому значенні I_{np} . За силою світла світлодіоди поділяють на три основні групи: 1) **ультрависокої яскравості**

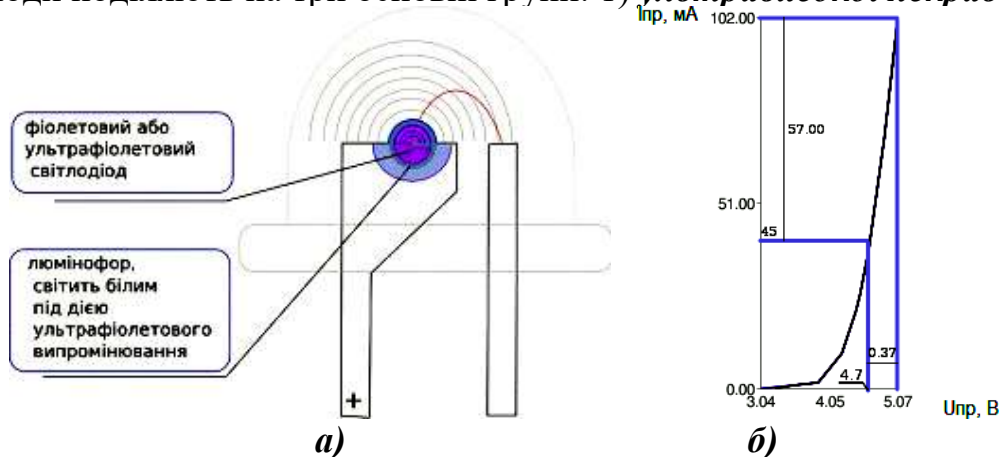


Рис. 6.4. Схематична діаграма принципу роботи світлодіоду з люмінофорним покриттям (а) та їх VAX (б)

(Ultra-high brightness LEDs) – десятки кандел; 2) високої яскравості (High brightness LEDs) – сотні мілікандел; 3) стандартної яскравості (Standart brightness LEDs) – десятки мілікандел.

2. B_{min} , кд/м² (для світлодіодів) – яскравість світіння діода при заданому значенні I_{np} . За яскравістю світіння B світлодіоди поділяють на дві групи: $B_{min} < 500$ кд/м² і $B_{min} > 500$ кд/м².
3. $\tau_{ф}$, $\tau_{зр}$ – тривалості переднього фронту і заднього зрізу імпульсу випромінювання.
4. λ_{min} , λ_{max} мкм – мінімальна і максимальна довжини хвиль, що випромінюються (визначають колір випромінювання).
5. U_{np} – постійна пряма напруга при заданому значенні прямого струму I_{np} (1,2-4,5 В при робочих струмах 3-20 мА).
6. Δt °С – діапазон температур для нормальної роботи діода.
7. U_{np} , В – пряма експлуатаційна напруга.
8. I_{np} , мА – прямий допустимий струм.
9. $U_{зв}$, В – зворотна напруга.

Граничні експлуатаційні параметри:

1. $U_{np.max}$, В – пряма максимальна напруга.
2. $I_{np.imn}$, мА – прямий допустимий імпульсний струм,;
3. $U_{зв.max}$, В – максимально допустиме значення зворотної напруги, яке діод може витримати, зберігаючи працездатність.
4. $I_{np.max}$, мА – допустиме значення прямого струму;
5. P_{max} , Вт – максимальна (іноді середня) потужність, яка розсіюється на діоді і забезпечує тривалу і надійну роботу приладу.

Основні характеристики випромінювальних діодів:

1. Вольт-амперна характеристика $I=f(U)$ – показує залежність струму через прилад I_{np} від прикладеної до нього напруги U_{np} (подібна до прямої вітки **ВАХ** звичайного діода).
2. Спектральна характеристика $B=f(\lambda)$ – це залежність інтенсивності випромінювання від довжини хвилі λ (рис. 6.3, б).
3. Характеристика яскравості світіння $B=f(I_{np})$ (для світлодіодів) – залежність яскравості світіння від значень прямого струму через **p-n-перехід** являє собою майже пряму лінійну залежність у робочому діапазоні струмів (рис. 6.3, в). Аналогом характеристики яскравості світіння для ПЧ-діодів є залежність потужності випромінювання від струму $P=f(I_{np})$.

На основі світлодіодів і їх збірок будують різні індикаторні прилади для візуального відображення інформації від найпростіших (ввімкнуто-вимкнуто) до алфавітно-цифрових дисплеїв у цифрових системах обробки інформації, вимірювальній і побутовій апаратурі, пристроях автоматики та інших. На основі світлодіодів створені різні світлодіодні лінії, знакові та сегментні індикатори. Так звані, матричні світлодіоди можуть мати кілька **p-n-переходів**, розміщених на одному кристалі. Вибірково вмикаючи окремі **p-n-переходи** матричного світлодіоду, можна отримати висвітлену цифру, літеру або знак. Наприклад, **КЛ104А** являє собою світлодіодний індикатор зі стандартною вісімкою (рис. 6.5, а). Виготовляють універсальні матричні індикатори із 36 світлодіодних елементів для синтезу будь-яких літер і чисел. Світлодіоди, кожен з яких має власний корпус, що зібрані у групу на спільній основі і утворюють єдиний прилад, називають світлодіодними модулями. Світлодіодні модулі виготовляють різних форм і розмірів, як гнучкі стрічки та жорсткі лінійки, в яких закріплено до сотні елементів (рис. 6.5, г).

Перші LED випромінювали лише монохроматичне світло червоного, зеленого

і жовтого кольорів. У 1971 був випущений перший синій світлодіод, але через коштовність тривалий час виробництво синіх світлодіодів було обмеженим. Лише з 1993 року сині світлодіоди почали серійно виготовлятися корпорацією **Nichia Chemical Industries**. З цього часу стало можливим виготовлення напівпровідникових джерел білого світла, тому що тільки комбінація червоного, зеленого і синього кольорів дає білий колір (рис. 6.5, б). Отже, з'явилася альтернатива до існуючих джерел світла. Враховуючи, що світлодіод майже не гріється і не створює ніяких випромінювань інших характерів, а за яскравістю витрачає на 80 % енергії менше порівняно до звичайної лампочки розжарювання, не дивно, що на сьогодні світлодіоди – це найбільш вдосконалені сучасні джерела світла, які характеризуються тривалим терміном працездатності, високою економічністю, механічною міцністю, швидкодією і маленькими розмірами (рис. 6.5, в – е). Після проникнення світлодіодів на ринок систем освітлення і застосування світлодіодів не тільки в якості індикаторних елементів, але й в якості декоративних елементів інтер'єрів, високі темпи зростання виробництва світлодіодів ультрависокої яскравості невпинно збільшуються.

Органічний світлодіод (**Organic Light Emitting Diode (OLED)**) – це світлодіод, у якому електролюмінесценція відбувається в тонкому шарі органічного напівпровідника, розташованому між двома електродами (рис. 6.6). Органічні речовини можуть бути малими молекулами або полімерами. У пристроях відображення візуальної інформації (дисплеях) на органічних світлодіодах створюється матриця пікселів, які можуть світитися різними кольорами. Такі системи можуть використовуватись у телевізійних екранах, комп'ютерних моніторах, малих портативних системах (смартфонах, планшетах, електронних книгах), в джерелах світла. Випромінювання світла в **OLED** відбувається в тонкому люмінесцентному (емісійному) шарі органічного напівпровідника, в який із двох електродів інжектуються електрони та дірки. В межах люмінесцентного шару електрони й дірки рекомбінують, випромінюючи фотони. Для інжекції електронів в катод використовуються метали з малою роботою виходу (**Ca, Mg, Al**). Для інжекції дірок – напівпрозорий анод із **InSnO**. **OLED** забезпечують високу яскравість, покривають увесь видимий спектр і є досить дешевими у виробництві. Вони відкривають перспективу створення телевізорів і моніторів товщиною у декілька мм та надгнучких дисплеїв.

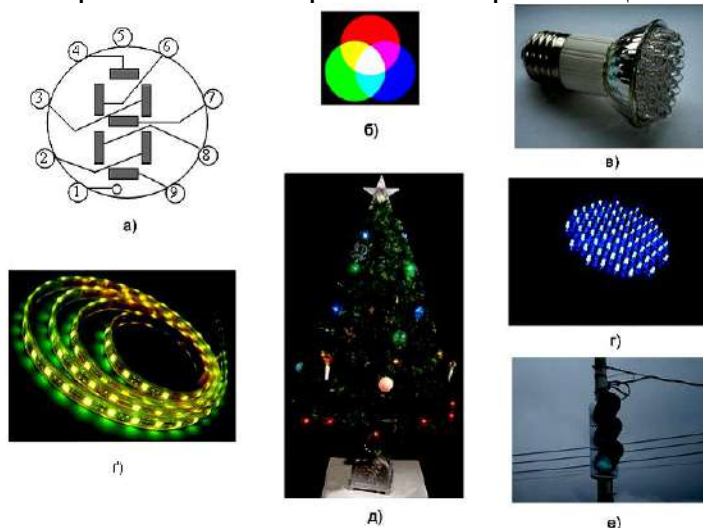


Рис. 6.5. Застосування світлодіодів: семисегментний цифросинтезуючий індикатор (а); отримання білого світла (б); лампа (в); прожектор (г); світлодіодна стрічка (д); світлофор (е)

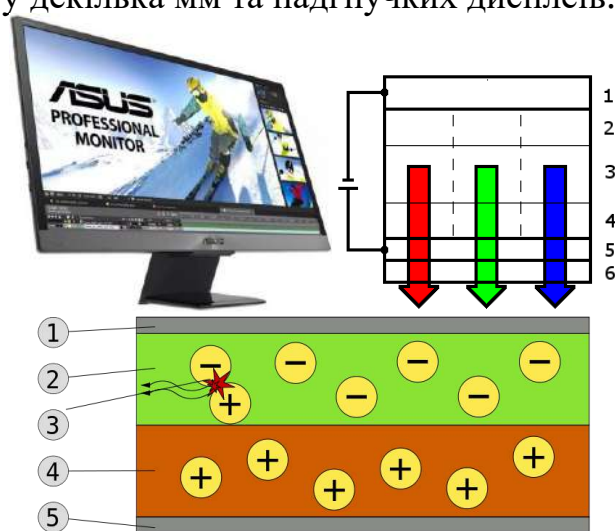


Рис. 6.6. OLED-дисплей та схема 2-шарової OLED-панелі: 1 – катод (-); 2 – емісійний шар; 3 – рекомбінація й випромінювання фотонів; 4 – провідний шар; 5 – анод (+)

ІЧ-діоди використовують у пожежних датчиках, приладах нічного бачення, системах автоматичного керування, як джерела випромінювання в оптоелектронних пристроях. Повна потужність ІЧ-діодів знаходиться в межах від одиниць до сотень міліватів при напругах на діодах 1,2-3 В і прямих струмах від десятків до сотень міліамперів.

Подальше вдосконалення випромінювальних діодів ґрунтується на використанні нової бази напівпровідникових матеріалів, в першу чергу, гетероструктур, які забезпечують найкращі параметри приладів.

Випромінювальна рекомбінація носіїв заряду може відбуватися **спонтанно** або **вимушено (індуковано)**. **Спонтанне випромінювання** є некогерентним і забезпечує розподіл енергії в широкому частотному діапазоні. **Індуковане випромінювання** є монохроматичним, когерентним (коливання когерентні, якщо мають незмінну в часі різницю фаз; додавання когерентних коливань спричинює коливання такої самої частоти). Джерелами некогерентного випромінювання слугують випромінювальні діоди, когерентного – **лазерні діоди** (Рис. 6.7). Лазерне випромінювання це високоякісна форма енергії, яку застосовують у системах обробки та передачі інформації, медицині та інших.

У більшості лазерних діодів напівпровідникові шари зроблені дуже тонкими, і така структура може генерувати випромінювання тільки в напрямку, паралельному цим областям кристалу. Тонка прямокутна напівпровідникова пластинка по суті є оптичним хвилеводом, де випромінювання обмежене у відносно невеликому просторі. Верхній шар кристала легується для створення **p-області**, а в нижньому шарі створюють **p-область**. У результаті виходить плоский **p-n-перехід** великої площі. Дві бічні паралельні сторони (торці) кристала полірують і утворюють **оптичний резонатор**. Випадковий фотон спонтанного випромінювання, випущений перпендикулярно цим площинам, пройде через весь оптичний хвилевід і кілька разів відіб'ється від торців, перш ніж вийде назовні. Проходячи вздовж резонатора, фотон буде викликати вимушену рекомбінацію, створюючи нові й нові фотони з тими ж параметрами, і випромінювання буде посилюватися. Як тільки посилення перевищить втрати, почнеться лазерна генерація.

Для роботи лазера спочатку створюють умови для переходу електронів на вищі енергетичні рівні, тобто накачують енергією від зовнішнього джерела різними способами: оптичним випромінюванням, електричною енергією під час прямого увімкнення **p-n-переходу** або тунелювання електронів; електронним пучком швидких електронів. Шар напівпровідника зі збудженими електронами називають активним середовищем. Лазерне випромінювання відбувається, коли водночас збуджені електрони переходять на нижчі енергетичні рівні. **Оптичний резонатор** – система оптичних елементів, які відбивають, заломлюють та фокусують потік фотонів, що утворюється – підсилює вимушені коливання. Широкого розповсюдження набули інжекційні лазери на основі арсеніду галію, накачування енергією яких відбувається при прямому увімкненні **p-n-переходу**.

Якщо хвилевід зробити достатньо широким у порівнянні з довжиною хвилі, він зможе працювати вже в декількох поперечних режимах. Такий **діод** називається **багатомодовим (multi-mode)**. Застосовують багатомодові лазери, коли від пристрою потрібна висока потужність випромінювання і допускається значне розсію-

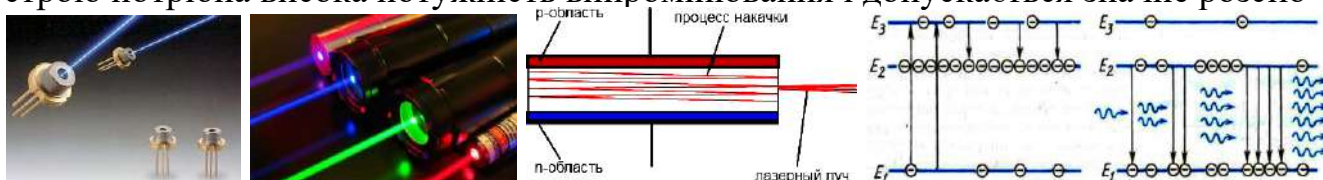


Рис. 6.7. Лазерні діоди і модулі, оптичний резонатор та індуковане випромінювання

вання променя (друкуючі пристрої, хімічна промисловість, накачування інших лазерів). З іншого боку, якщо потрібне хороше фокусування променя, то ширина хвилеводу має бути сумірною з довжиною хвилі випромінювання. Тут вже ширина променя визначатиметься тільки межами, що накладаються дифракцією. Такі пристрої застосовуються в оптичних запам'ятовуючих пристроях, у волоконній техніці та пристроях, що наводять на ціль. Довжина хвилі випромінювання лазерного діода залежить від ширини забороненої зони між енергетичними рівнями *p*- і *n*-областей напівпровідника. У зв'язку з тим, що випромінюючий елемент достатньо тонкий, промінь на виході діода, завдяки дифракції, практично відразу розходиться. Для компенсації цього ефекту і отримання тонкого променя необхідно застосовувати збираючі лінзи. Просторово-когерентну хвилю з довжиною λ легко фокусувати на площинку близько λ^2 . Тоді, наприклад, якщо лазер випромінює імпульс енергії 1 Дж протягом 1 мс (потужністю 1 кВт) з довжиною хвилі $\lambda=690$ нм, то інтенсивність випромінювання у фокусі може досягти значення $2,1 \cdot 10^{11}$ Вт/см².

В останні роки описана вище конструкція найпростішого лазерного діода, який споживає багато потужності і може працювати тільки в імпульсному режимі, піддавалася численним удосконаленням, щоб пристрої могли відповідати сучасним вимогам. На сьогодні лазери створюють на основі гетероструктур. У цих приладах, шар матеріалу з більш вузькою забороненою зоною розміщується між двома шарами матеріалу з ширшою забороненою зоною. Найчастіше для реалізації лазера на основі подвійної гетероструктури використовують *p-Ga_{1-x}Al_xAs/p-GaAs/n-Ga_{1-x}Al_xAs* (рис. 6.8). Отриманий діод має назву діод з подвійною гетероструктурою (*Double Heterostructure Laser* або *DH Laser*). Ефективно працюють діоди з квантовими ямами, з розподіленням зворотним зв'язком та інші.

Лазерні діоди – це важливі електронні компоненти. Вони знаходять широке застосування як керовані джерела світла у волоконно-оптичних лініях зв'язку, їх використовують у різному вимірювальному устаткуванні, при зчитуванні штрих кодів. Лазери з видимим випромінюванням використовують у лазерних указках: червоного кольору – для масового застосування; синього, зеленого і жовтого кольорів з високим електроспоживанням – для наукових і промислових застосувань. Інфрачервоні і червоні лазери – в програвачах CD-і DVD-дисків, сині лазери – в пристроях HD DVD та Blu-Ray та інше.

6.2. Фотодіоди

Фотодіод – це приймач оптичного випромінювання, який перетворює подану на його фоточутливу область світло в електричний заряд за рахунок процесів в *p-n-переході*. Це напівпровідниковий фотоелектричний прилад з одним *p-n-переходом*, параметри яких змінюються під дією квантів світла. Його можна класифікувати як напівпровідниковий діод, в якому використовується залежність його *ВАХ* від освітленості. **Конструктивно фотодіоди виконують з відкритим для опромінювання вікном:** корпус має лінзу, яка спрямовує світловий потік на кристал напівпровідника. Промисловість випускає фотодіоди з германію і кремнію, зі структурою метал-напівпровідник (фотодіоди Шотткі) та ін. (рис. 6.9). Більшість виготовляють за планарною технологією.

Робота фотодіодів базується на явищі внутрішнього фотоефекту, сутність якого полягає в іонізації атомів кристалічних ґраток напівпровідника чи домішок у ньому квантами світла. У разі іонізації атомів вихідного напівпровідника генеруються електронно-діркові пари, які підвищують провідність напівпровідника – внутрішній фотоефект призводить до зміни концентрації носіїв у зоні провідності

та виникненню **фото-електрорушійної сили (фото-ЕРС)**. Фотоефект виникає у разі перевищення енергії квантів світла ширини забороненої зони. Фотодіод може працювати в двох режимах: **фотодіодний (режим фотоперетворювача)** – із зовнішньою зворотною напругою (із зовнішнім джерелом живлення) (рис. 6.10, а) та **фотогальванічний (фотогенераторний)** – без зовнішньої напруги (рис. 6.10, б). Фотодіоди використовуються у різних пристроях як датчики світла.

На рис. 6.11 наведено структурну схему фотодіода і схема його включення при роботі у фотодіодному режимі: **1** – кристал напівпровідника; **2** – контакти; **3** – виводи; **Φ** – потік електромагнітного випромінювання; **n - і p -області** напівпровідника відповідно з донорною та акцепторною домішками; **E** – джерело постійного струму; **R_H** – навантаження. **Фотодіодний режим:** у разі відсутності освітлення і наявності на фотодіоді зовнішньої зворотної напруги буде мати місце темновий струм **I_0** (рис. 6.12), що є зворотним струмом **p - n -переходу**. За наявності освітлення електрони і дірки, викликані світловим збудженням, збільшать струм через **p - n -перехід**. Чим більший світловий потік, тим більший фотострум через діод. При відсутності освітленості фотодіод працює в режимі звичайного діода. Темновий струм у германієвих фотодіодів рівний 10-30 мкА, у кремнієвих 1-3 мкА.

За відсутності освітлення концентрації носіїв, розподіл потенціалів та енергетична зонна діаграма фотодіода повністю відповідають звичайній **p - n -структурі**. Зворотний струм через **p - n -перехід** при аналізі процесів у фотодіодах називають темновим **$I_T=I_{36}\approx I_0$** . При опроміненні структури діода електромагнітними хвилями з частотою **$\nu \geq \nu_0$** в напрямку, перпендикулярному площині **p - n -переходу**, в результаті поглинання фотонів з енергією, більшою, ніж ширина забороненої зони, в **n -області** виникають електронно-діркові пари (рис. 6.13, а). Ці електрони і дірки називають **фотоносіями**. При дифузії фотоносіїв вглиб **n -області** основна частка

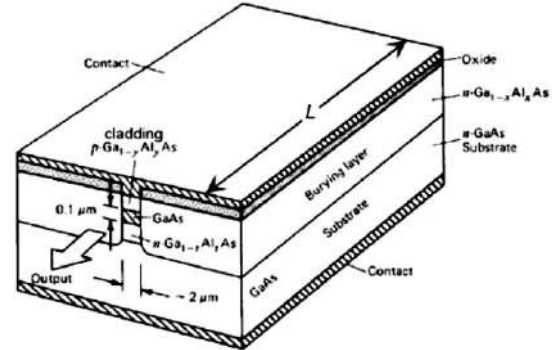


Рис. 6.8. Схематичне зображення лазерного діода з подвійною гетероструктурою p -Ga_{1-x}Al_xAs/ p -GaAs/ n -Ga_{1-x}Al_xAs

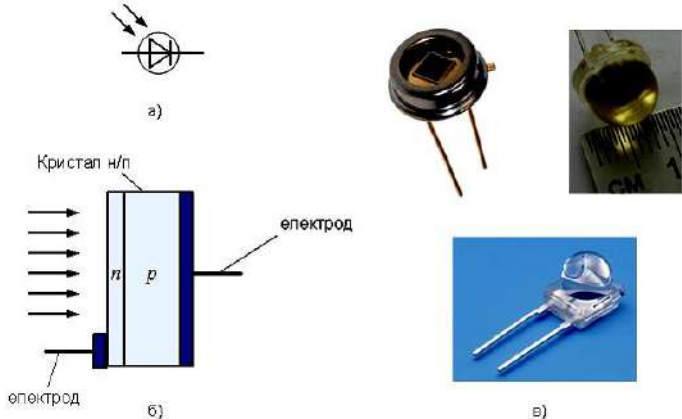


Рис. 6.9. Фотодіоди: умовне позначення (а), структура (б), промислові зразки (в)

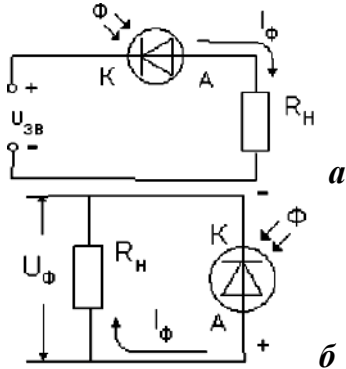


Рис. 6.10. Схеми режимів роботи фотодіоду: а – фотодіодний; б – фотогальванічний

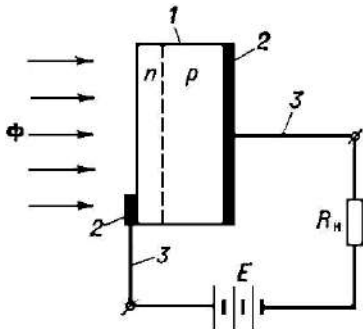


Рис. 6.11 Структурна схема фотодіода та схема його включення при роботі у фотодіодному режимі

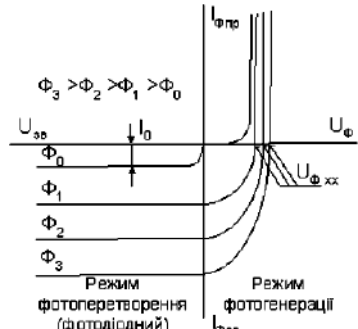


Рис. 6.12. ВАХ фотодіодів при різних рівнях освітленості (Φ_i) в режимі фотоперетворювача та режимі фотогенератора

електронів і дірок не встигає рекомбінувати і доходить до кордону ***p-n-переходу***. Тут фотоносії розділяються електричним полем ***p-n-переходу***, причому дірки переходять в ***p-область***, а електрони не можуть подолати поле переходу і скупчуються біля кордону ***p-n-переходу***. Таким чином, **струм через p-n-перехід обумовлений дрейфом неосновних носіїв**. Дрейфовий струм фотоносіїв називається фотострумом I_Φ . Фотопровідність діода не залежить від прикладеної напруги, а визначається інтенсивністю та спектральним вмістом електромагнітної хвилі. Більшість фотодіодів працюють у широкому оптичному діапазоні видимої (0,38-0,74 мкм) та інфрачервоної (1,5-3,2 мкм) частин електромагнітного спектру.

Чим більшим є світловий потік, тим більшим стає фотострум. На рис. 6.13, б, зображені ***ВАХ*** затемненого діода ($\Phi=0$) і ***ВАХ*** освітленого діода для двох різних значень світлового потоку ($\Phi_1 < \Phi_2$). Ділянки, що відповідають прямим струмам поступово зливаються в одну, що свідчить про незначну відсоткову частину фотоструму, а зворотні вітки змінюють своє розміщення, що означає суттєвий вплив фотоструму на зворотний струм. Вважають, що у разі освітлення фотодіода збільшується зворотний струм:

$$I_{ze} = I_T + I_\Phi \quad (6.2)$$

а зміни прямого струму не беруть до уваги через відсоткову малість фотоструму в повному струмі. Залежність $I_\Phi(\Phi)|_{U_{3B}=\text{const}}$ виявляється лінійною (рис. 6.13, в).

Основними параметрами фотодіодів є:

1. **Чутливість** – характеризує зміну сигналу на виході фотодіода у разі подавання на вхід одиничного оптичного сигналу і кількісно дорівнює відношенню зміни сигналу до світлового потоку, що спричинив ці зміни. Розрізняють **струмову чутливість** I_Φ/Φ (мкА/лм) і **вольтаїчну чутливість** E_Φ/Φ (В/лм).
2. **Шуми** – хаотичний сигнал з випадковою амплітудою і спектром, який з'являється на виході фотодіода і не дає змогу реагувати на малі корисні сигнали. Шум фотодіода має дві складові: **шум напівпровідникового матеріалу** і **фотонний шум**.
3. **Темновий опір** – опір фотодіода за відсутності падаючого на нього випромінювання у діапазоні його спектральної чутливості.
4. **Стала часу** τ_Φ – час, протягом якого фотострум у фотодіоді після освітлення або затемнення змінюється на 63 %, тобто в e разів по відношенню до початкового значення.

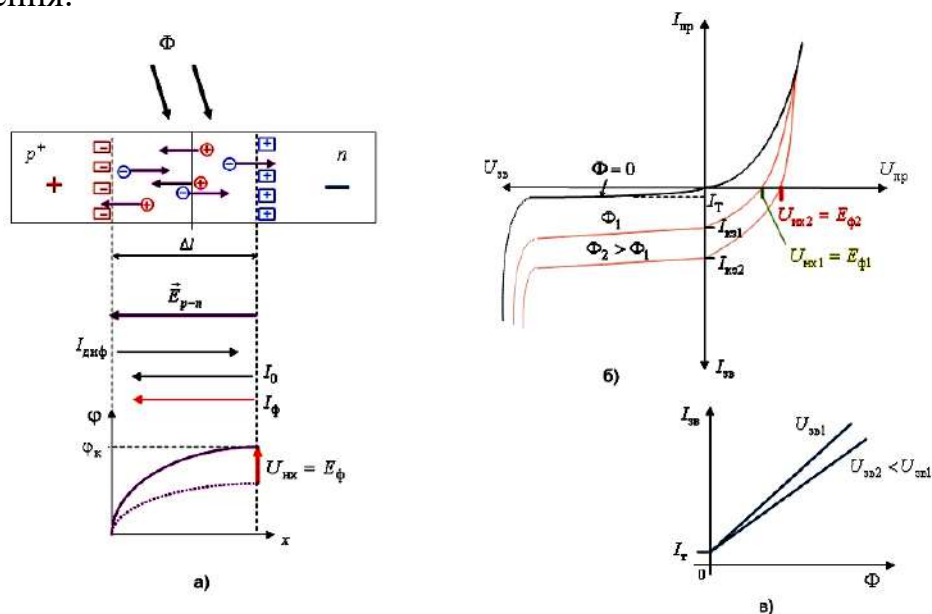


Рис. 6.13. Пояснення принципу дії фотодіоду: фотогальванічний ефект (а), вольт-амперні характеристики фотодіода при різних світлових потоках (б), залежність фотоструму від світлового потоку з частотою $I_\Phi(\Phi)|_{U_{3B}=\text{const}}$ (в)

Основними характеристиками фотодіодів є:

1. Вольт-амперна характеристика фотодіода показує залежність струму через прилад від прикладеної до нього напруги (рис. 6.13, б).
2. Світлова характеристика фотодіода – це залежність фотоструму I_{Φ} від освітленості (рис. 6.13, в). **Пряма пропорційність фотоструму від освітленості** пояснюється тим, що товщина бази у фотодіода набагато менша дифузійної довжини носіїв заряду, тому практично усі носії заряду, які виникають в базі при освітленні приймають участь в утворенні фотоструму.
3. Спектральна характеристика фотодіода – це залежність фотоструму від довжини хвилі опромінення λ , яке падає на фотодіод.

В режимі фотоперетворювача фотодіоди знаходять широке застосування як приймачі оптичного випромінювання. В схемі фотоперетворювача фотодіод вмикають в коло послідовно з зовнішнім джерелом живлення, яке забезпечує зворотне зміщення ***p-n-переходу***. Як первинні вимірювальні перетворювачі світлового потоку фотодіоди мають більшу швидкодію, ніж фоторезистори, але меншу чутливість. Швидкодія фотодіода визначається швидкістю розділення носіїв зарядів полем ***p-n-переходу*** і ємністю переходу. Зважаючи на порівняно малий рівень вихідного сигналу, фотодіоди, як правило, працюють з підсилювачами. Підсилювач може бути зовнішнім чи інтегрованим разом з фотодіодом. Фотодіоди в режимі фотоперетворювача використовують як швидкодіючі елементи модулів волоконно-оптичних ліній зв'язку, як елементи оптопар, координатно-чутливі елементи автоматики та інші. Для підвищення швидкодії фотоприймачів використовують фотодіоди зі структурою метал-напівпровідник (ФД Шотткі), фотодіоди з гетеропереходами, які забезпечують роботу у будь-якому частотному діапазоні, ***p-i-n-діоди*** з верхньою граничною частотою 1 (ГГц). Для збільшення чутливості застосовують лавинні фотодіоди з внутрішнім підсиленням, принцип дії якого ґрунтується на явищі ударної іонізації атомів.

Режим фотогенератора реалізується без зовнішнього джерела електричної енергії (рис. 6.10, б). У разі освітлення ***p-n-переходу*** за рахунок іонізації з'являються дірки і електрони, які полем ***p-n-переходу*** виштовхуються за його межі (дірки в ***p-область***, а електрони в ***n-область***) і утворюють на його виводах **фото-ЕРС E_{Φ}** , величина якої залежить від властивостей напівпровідника (ширини забороненої зони, часу життя і рухомості носіїв заряду), інтенсивності падаючого світла та інших параметрів. У разі приєднання навантаження в ньому виникає струм, величина якого залежить від величини **світлового потоку Φ** . Зі збільшенням освітлення збільшується **фотострум I_{Φ}** і, відповідно, збільшується **напруга неробочого ходу $U_{нх}$** (рис. 6.13, б). **Фото-ЕРС** дорівнює напрузі неробочого ходу $U_{нх}$ і не може перевищувати контактної різниці потенціалів: для кремнієвих структур $\phi_k=0,7-0,8$ В, для германієвих – $\phi_k=0,3-0,4$ В.

Фотодіод, який працює в генераторному режимі, називають фотоелементом. На сьогодні превалюють кремнієві фотоелементи, кожний з яких може забезпечити **фото-ЕРС $E_{\Phi}=0,4-0,6$ В**. Такі фотоелементи з'єднують послідовно і паралельно у сонячні батареї, які працюють з **ККД** до 25 % (в лабораторіях – до 29 %).

Сонячні батареї – це сукупність електрично з'єднаних фотодіодів для перетворення частини електромагнітної енергії сонячних променів на постійний електричний струм. Виробництво сонячних батарей розвивається швидкими темпами у різних напрямках. Сонячні батареї бувають різних розмірів і технології виготовлення: від гігантських полів на електростанціях (рис. 6.14, а) до маленьких, що вбудовані у калькулятори. Сонячні кремнієві батареї – це основні джерела живлення космічних супутників і станцій, автоматичних метеостанцій та інших при-

строїв і систем, що працюють в автономному режимі. В останні роки застосування сонячних батарей стало загальним: на електростанціях, для електропостачання окремих житлових будівель; для зарядки акумуляторів різної побутової техніки, мобільних телефонів, ноутбуків, електромобілів; навіть для підігріву кабінок каналних доріг на гірськолижних курортах світу та багато іншого (рис. 6.14, б – д).

Кремнієві фотоелементи працюють з **ККД** 9-25 % при теоретичних значеннях ~30 %, і віддають потужність в середньому до 100 Вт з 1 м² поверхні при напрузі 0,3 В на елемент. В лабораторіях світу учені намагаються отримати сонячні елементи з кращими **ККД** (на сьогодні це >60 %). Майбутнє за фотоелементами з гетероструктурою, які забезпечують **фото-ЕРС** $E_{\phi}=0,8-1,2$ В. На жаль високоефективні батареї через свою дуже високу собівартість досі не виготовляють масово.

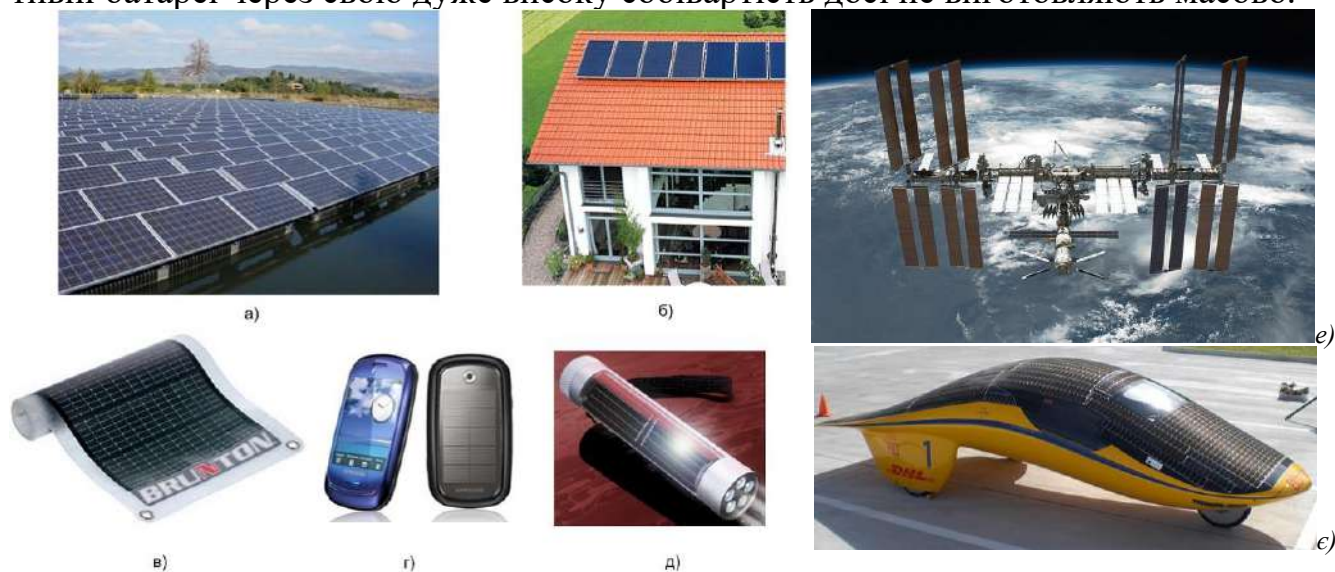


Рис. 6.14. Сонячні батареї: на електростанціях (а), для електропостачання будинків (б), новітні розробки гнучких батарей solarroll (в), телефон Samsung (г), ліхтар на сонячній батареї (д), на МКС (е) та електромобілях (є)

6.3. Фототранзистори

Фототранзистор – це транзистор (зазвичай біполярний), в якому інжекція нерівноважних носіїв заряду здійснюється на основі внутрішнього фотоефекту; це напівпровідниковий прилад з двома електронно-дірковими переходами, що перетворює світлові сигнали в електричні з одночасним посиленням останніх (рис. 6.15). Фототранзистор являє собою монокристалічну напівпровідникову пластину з германію або кремнію, в якій за допомогою особливих технологічних прийомів створено три області, які мають назву, як і у звичайному транзисторі – емітер, колектор і база, причому остання, на відміну від транзистора, як правило, виводу не має. Кристал вмонтовується в захисний (металевий) корпус з прозорим вхідним вікном (лінзою).

Включення фототранзистора у зовнішнє електричне коло виконується подібно включенню біполярного транзистора за схемою зі спільним емітером та нульовим струмом бази (рис. 6.16). При попаданні світла на базу (або колектор), на ній утворюються парні носії зарядів (електрони і дірки), які розділяються електричним полем колекторного переходу. В результаті чого у базовій області накопичуються основні носії, що призводить до зниження потенціального бар'єру емітерного переходу і збільшення (посилення) струму через фототранзистор, в порівнянні зі струмом, обумовленим перенесенням лише тих носіїв, які утворилися безпосередньо під дією світла.

Основними параметрами і характеристиками фототранзистора є:

1. **Інтегральна чутливість** – відношення фотоструму до падаючого світлового потоку; в найкращих зразків (наприклад, виготовлених за дифузійною планарною технологією) вона досягає 10 А/лм.
2. **Спектральна характеристика** – залежність чутливості до монохроматичного випромінювання від довжини хвилі цього випромінювання; що дозволяє, зокрема, встановити довгохвильову межу застосовності фототранзистора; ця межа (залежна перш за все від ширини забороненої зони напівпровідникового матеріалу) для германієвого фототранзистора становить 1,7 мкм, для кремнієвого – 1,1 мкм.
3. **Стала часу** (що характеризує інерційність фототранзистора) не перевищує декількох сотень мікросекунд. Крім того, фототранзистор характеризується коефіцієнтом підсилення первинного фотоструму, що досягає $10^2 - 10^3$ та ін.

Високі надійність, чутливість і часова стабільність параметрів фототранзистора, а також його малі габарити і відносна простота конструкції дозволяють широко використовувати фототранзистори у системах контролю і автоматики – як датчики освітленості, елементи гальванічної розв'язки і т.д. З 70-х рр. ХХ ст., розробляються польові фототранзистори (рис. 6.17).



Рис. 6.15. Зовнішній вигляд (а) та умовне позначення (б) фототранзистора

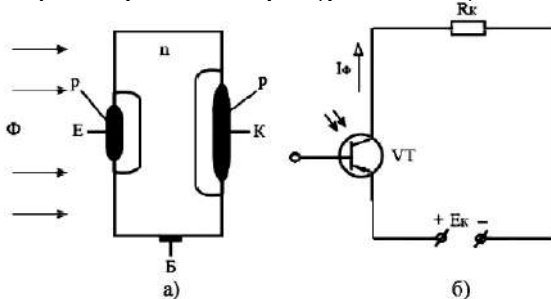


Рис. 6.16. Біполярний фототранзистор: а – структура; б – схема увімкнення

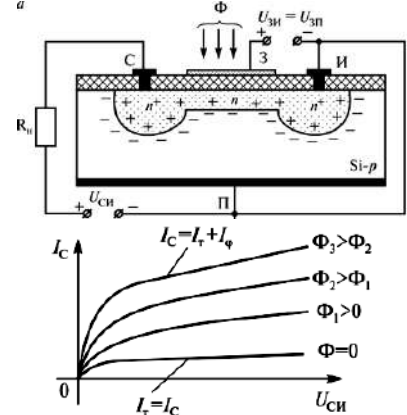


Рис. 6.17. Структура і ВАХ польового фототранзистора

6.4. Фототиристори

Фототиристор (*Light Activated SCR (LASCR), Light Triggered Thyristor (LTT)*) – це оптоелектронний напівпровідниковий прилад, що має структуру, схожу зі структурою звичайного тиристора, але відрізняється від останнього тим, що вмикається не напругою, а світлом, яке падає на тиристорну структуру. У корпусі фототиристора для опромінення однієї із баз світловим потоком є спеціальне прозоре вікно або замість електричного керуючого електрода наявний оптичний вхід для приєднання світловоду (рис. 6.18).

Найбільше розповсюдження отримали конструкції з опроміненням бази p_2 . При вмиканні тиристора з підвищенням прямої напруги між анодом і катодом відбувається накопичення дірок у базі p_2 і електронів у базі n_1 . Процесом накопичення носіїв заряду можна керувати у триністора за допомогою імпульсів, що подаються на керуючий електрод, а у фототиристорів – за допомогою внутрішнього фотоефекту під час опромінення p_2 -базі або n_1 -базі. Залежно від модифікації фототиристора потік енергії випромінювання може бути використаний замість керуючого електричного імпульсу або разом з ним для вмикання тиристора.

Структура фототиристора з опроміненням бази p_2 показана на рис. 6.18, б.

Світловий потік потрапляє на область бази і спричинює генерацію носіїв заряду, які дифундують до ***p-n-переходів***. Електрони, які потрапляють в область зворотно зміщеного переходу P_3 зменшують його опір. Через перехід P_3 починає протікати фотострум, що спричинює зменшення напруги на переході P_2 , а це, в свою чергу, веде до збільшення напруги на емітерних переходах, збільшення інжекції носіїв і розвитку лавиноподібного процесу вмикання тиристора. Таким чином опромінення впливає на рівень напруги U_{BM5} , яку потрібно прикласти між анодом і катодом для вмикання приладу. Чим більший світловий потік, тим меншим є значення напруги для вмикання тиристора. На рис. 6.19 зображена сімейство вольт-амперних характеристик фототиристора, яка аналогічна ***ВАХ*** триністора, тільки в якості параметра керування використаний світловий потік.

Фототиристори зазвичай виготовляють з кремнію, і спектральна характеристика у них така сама, як і в інших кремнієвих фоточутливих елементів. Опір фототиристора змінюється від 10^8 Ом у вимкненому стані до 10^{-1} Ом в увімкненому стані. Час перемикання фототиристорів знаходиться у межах 1-10 мкс.

Деякі моделі фототиристорів керуються тільки світловим потоком і одним з основних параметрів таких приладів є ***мінімальна світлова потужність керування (PLT)***, яка необхідна для вмикання приладу. Інші типи фототиристорів мають керуючі виводи до однієї з баз. Для таких приладів значення порогового світлового потоку, який забезпечує гарантоване увімкнення фототиристора, можна змінювати в деяких межах, якщо подавати керуючі електричні імпульси. Інтенсивність світлового потоку для вмикання фототиристора визначається анодною напругою та температурним режимом роботи. Перевагою фототиристорів з керуючим електродом є можливість здійснювати керування двома сигналами водночас – світлом і струмом керування. Для надійного вмикання фототиристорів застосовують випромінювання лазерів і світлодіодів. З фотоелектронним керуванням виготовляють також симетричні диністори і симістори – ***фотосимістори***.

Широко застосовують фототиристори у різних пристроях автоматичного керування і захисту, а також в потужних високовольтних перетворювальних пристроях, оскільки вони дають змогу надійно розв'язати за напругою вихідні кола пристроїв із системами керування. Сучасні тиристори з оптичним керуванням виготовляють на струми від декількох міліамперів до 1000 (А) і напруги від кількох десятків вольт до 6,5 кВ. Потужність керуючого світлового випромінювання (при довжині хвилі 0,9 мкм порядку 1-102 мВт).

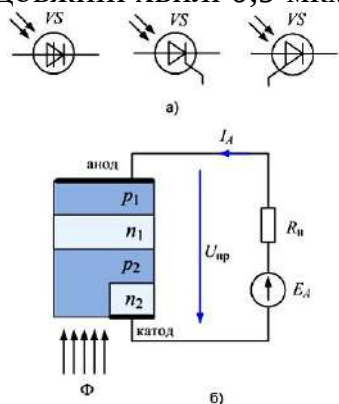


Рис. 6.18. Фототиристор: умовні позначення для різних конструктивних модифікацій (а), структура без керуючого електрода (б); прилади ТФ193-2500 (в) і ТФ173-1000 з оптичною розеткою на катоді та підключеним світловодом (г)

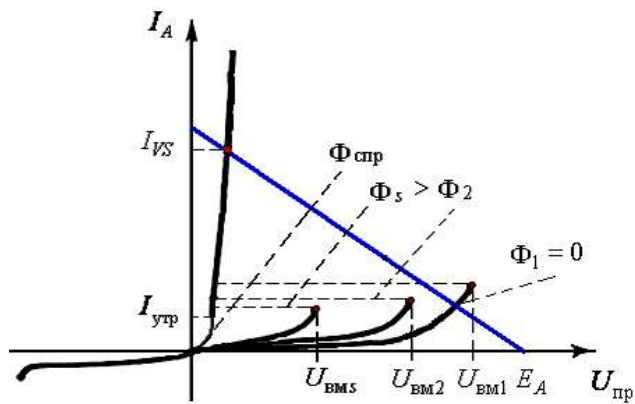


Рис. 6.19. Вольт-амперна характеристика фототиристора

6.5. Оптрони та оптодиристоры

Оптрон (optical electronic device) – це напівпровідниковий прилад, в якому конструктивно об'єднані джерело та приймач випромінювання, що мають між собою оптичний зв'язок (рис. 6.20). **Джерело випромінювання (ДВ)** являє собою перетворювач електричних сигналів на випромінювання, яке діє на **фотоприймач (ФП)** і створює вихідні електричні сигнали. Електричне коло з джерелом випромінювання виконує керуючі функції, а коло з фотоприймачем – кероване коло.

Класифікують оптрони за такими ознаками: 1) за ступенем інтеграції на **оптонари, багатоканальні діодні оптонари і оптоелектронні інтегральні мікросхеми**; 2) за типом оптичного каналу: **із закритим оптичним каналом** (рис. 6.20, а, б), **з відкритим оптичним каналом** (рис. 6.20, в); 3) за типом фотоприймача: **з фоторезистором, з фотодіодом, з біполярним фототранзистором, з польовим фототранзистором, з фототиристором**.

Якщо до складу оптрона входять одне джерело випромінювання та один фотоприймач, які з'єднані оптичним каналом, то оптрон називають **оптопарою** (рис. 6.21, а). Функцію перетворювача електричних сигналів на випромінювання в оптронах виконують ІЧ-діоди, світлодіоди, лазерні діоди. Ширше розповсюджені ІЧ-діоди, що пояснюється простотою їх структури і вищими ККД. У ролі перетворювачів випромінювання на електричні сигнали знаходять застосування фоторезистори, фотодіоди, фототранзистори і фототиристори, опори яких змінюються зі зміною освітленості. Залежно від типу фотоприймача розрізняють резисторні, діодні (з максимальною швидкодією), транзисторні (з біполярним фототранзистором, з польовим фототранзистором) та тиристорні оптрони (рис. 6.21, б - д). У конструкціях оптронів з закритим каналом випромінювач і фотоприймач вміщуються у корпус таким чином, щоб світлочутливий майданчик фотодіода розташовувалася навпроти випромінюючого майданчика світлодіода, і заливають оптично прозорим компаундом (клеєм) на основі полімерів або халькогенідного скла. Конструкції оптронів з відкритим каналом мають зазор, в якому може переміщуватися об'єкт, що контролюється, або в іншому варіанті світловий потік відбивається від об'єкта, а потім потрапляє на фотоприймач.

Наявність **номінальної прямої напруги $U_{ВХ}$** на вході висвітлювального діода спричинює проходження **струму $I_{ВХ}$** й випромінювання з області **p-n-переходу** потоку світлової енергії **Φ** з яскравістю **B** . Керована яскравість висвітлювання **B** слугує вхідним сигналом для фотоприймача, який працює в режимі фотоперетворювача. **Вихідні напруга $U_{ВІХ}$** і струм **$I_{ВІХ}$** **ФП** визначають вихідні сигнали оптрона.

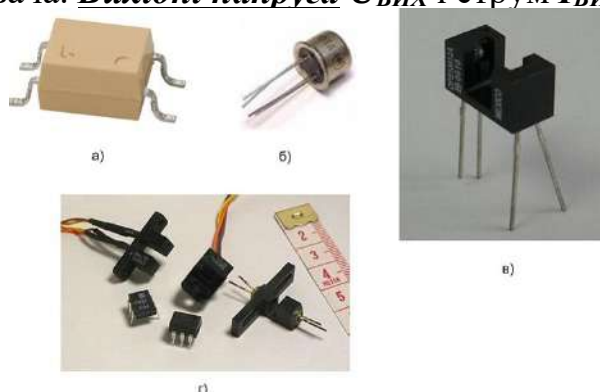


Рис. 6.20. Оптрони: з закритим каналом TLP181 SOP-4 (а), (б); з відкритим каналом OPB10612A (в), різні (г)

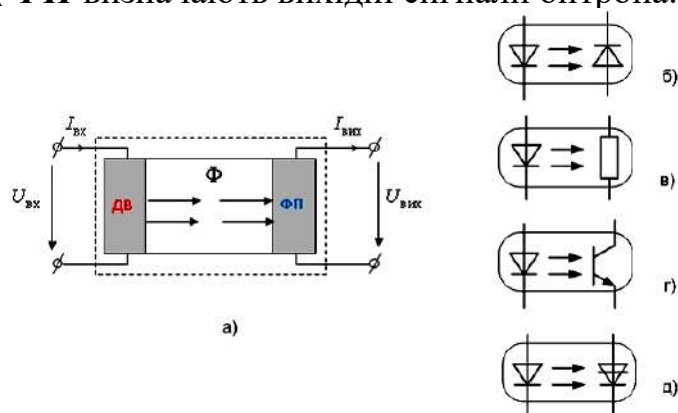


Рис. 6.21. Оптопара: структура (а) і умовні позначення оптронів – резисторного (б), діодного (в), транзисторного (г), тиристорного (д)

Таким чином, через оптрон передається інформативний сигнал за відсутності гальванічного зв'язку між вхідним і вихідним електричними колами. Носіями інформації в оптичному каналі є електрично нейтральні фотони, тому на цей канал практично не впливають різного роду завади, спричинені електричними і магнітними полями. Оптрони дають змогу легко узгоджувати між собою електричні кола з різними вхідними і вихідними опорами. У діодних оптопарах фотодіод часто працює у фотогенераторному режимі. Це означає, що з надходженням керуючого сигналу на вхід оптопари на виході формується **фото-ЕРС**.

Основні параметри і характеристики оптронів:

- 1) $U_{ВХ\ MAX}$, **В** – максимальна напруга на вході оптрона;
- 2) $I_{ВІХ\ MAX}$, **мА** – максимальний вихідний струм оптрона;
- 3) K_I , % – коефіцієнт передачі струму, який визначається як відношення вихідного струму оптрона до вхідного;
- 4) $R_{із}$, **ГОм** – опір ізоляції між вхідними і вихідними виводами оптрона;
- 5) $I_{ВІТ}$, **мкА** – прямий струм витоку через закритий оптрон;
- 6) C , **нФ** – прохідна ємність між вхідними і вихідними виводами оптрона;
- 7) N – кількість каналів зв'язку та інші.

Параметри дискретних діодних оптронів змінюються у межах: $U_{ВХ}=1,5-2\ В$, $K_{I\ min}=1-1000\ \%$, $R_{із}=1-100\ ГОм$, $I_{ВІТ}=0,25-10\ мкА$, кількість оптичних каналів $N=1-3$. Конструктивне виконання – металеві герметичні корпуси зі скляними ізоляторами і гнучкими виводами.

До недоліків оптронів слід віднести: значну споживану потужність, обумовлену подвійним перетворенням енергії (електричний сигнал – світло – електричний сигнал) і невисоким ККД цих перетворень; підвищену чутливість параметрів і характеристик до змін температурного режиму і проникаючої ядерної радіації; помітне старіння; відносно великий рівень власних шумів.

Багатоканальні діодні оптопари вміщують в одному корпусі кілька оптопар.

Оптрони мають численні області застосування: 1) для гальванічного розмежування електронних кіл – в якості елементів гальванічної розв'язки для зв'язку блоків апаратури, між якими є різниця потенціалів, та кіл з різними частотами; 2) для оптичного, безконтактного керування слабострумними (резисторні оптопари) і сильнострумними, високовольтними колами, електромеханічними пристроями; 3) оптрони з відкритим оптичним каналом, доступним для механічної дії (перекриття), використовують в якості датчиків у всіляких детекторах наявності (наприклад, детектор паперу в принтері), датчиках кінця (чи початку), лічильниках і дискретних спідометрах на їх базі (наприклад, координатні лічильники в механічній миші, ареометри); 4) у неруйнівному контролі в якості датчиків різних зовнішніх впливів внаслідок можливості зміни параметрів відкритого оптичного каналу. Розроблена ціла серія оптронів-датчиків: вологості, загазованості, наявності рідини, якості обробки поверхні об'єкта; 5) як датчики аварійних ситуацій. Наприклад, **GaP**-діоди починають випромінювати світло при дії на них радіації, а фотоприймач фіксує виникнення висвітлювання і замикає коло подачі сигналу тривоги та інші. Використання оптронів дозволяє підвищити завадостійкість апаратури.

Сфери застосування оптронів стали обчислювальна техніка, автоматика, техніка зв'язку, радіотехнічна апаратура, автоматизовані системи управління, вимірювальна техніка, системи контролю та регулювання, медична електроніка, пристрої візуального відображення інформації.

Прогрес у галузі оптоелектроніки визначається виробництвом і впровадженням інтегральних схем, до складу яких входять оптрони. **Оптоелектронна інтегральна мікросхема** являє собою мікросхему, що складається з однієї оптопари або

кількох оптопар з додатковими узгоджувальними та підсилювальними пристроями. Для зв'язку джерел та приймачів випромінювання застосовують плівкові світловоди. Промисловістю виготовляються різні типи оптоелектронних інтегральних схем, які здебільшого використовують як перемикачі цифрових та аналогових сигналів, реле та схеми цифро-літерної індикації.

Великі можливості відкриває застосування оптоелектронних пристроїв у лініях зв'язку. Оптичним каналом може бути навколишнє середовище, оптичні волокна чи плівкові світловоди. Спрямоване передавання світлової енергії у волокні відбувається внаслідок явища повного внутрішнього відбивання світла на межі між осердям та оболонкою. Для кодування оптичної інформації використовують керування параметрами оптичного випромінювання (амплітудою, фазою, поляризацією). На виході передавача формується вузький промінь світла. Промінь спрямовується на фотодетектор, який перетворює оптичне випромінювання на електричний сигнал. Електричні сигнали підсилюються й оброблюються звичайними радіотехнічними методами. Лінії зв'язку поділяються на атмосферно-оптичні, що використовують проходження випромінювання в приземних шарах атмосфери, і волоконно-оптичні, які використовують закриті світловодні канали для передачі аналогових і цифрових сигналів. Космічні лінії зв'язку використовують штучні супутники Землі на геостаціонарних орбітах, через які можна обмінюватися інформацією між будь-якими точками Землі.

Різновидом фототиристорів є оптотиристори (тиристорні оптрони) – прилади які являють комбінації в одному корпусі кремнієвого фототиристора або фотосимістора і випромінювального діода малої потужності, зазвичай ІЧ-діода на основі арсеніду галію (**GaAs**), який випромінює в інфрачервоному діапазоні 0,9-1,2 мкм (рис. 6.22). Два напівпровідникові елементи з'єднані у єдину конструкцію і зв'язані оптичним каналом. Принцип роботи оптотиристора полягає в перетворенні електричного сигналу на світло випромінювальним діодом, передачі світла по оптичному каналу з подальшим перетворенням знову на електричний сигнал фототиристором. Виводи випромінювального діода у приладі електрично ізольовані від силових виводів. Такі оптопари випускають у корпусах штирьового виконання або у вигляді модульних конструкцій, що мають ізольовану основу.

Тиристорні оптрони надають найбільші можливості з забезпечення ефективної гальванічної розв'язки інформаційного кола і силового кола, тому дуже зручні для використання в якості комутаторів змінного струму у потужних пристроях з високим рівнем електричних завад. Тиристорні оптрони споживають за входом керування світлодіодом струм близько 1,5 мА і комутують у вихідному колі змінні струми, що вимірюються амперами при напругах у сотні вольт. Мале споживання кола керування дає змогу підключати оптрони до виходів мікропроцесорів і мікроЕОМ для регулювання струмами у навантаженні. Також оптотиристори використовують для керування більш потужними тиристорами.



Рис. 6.22. Тиристорні оптрони: умовне позначення оптрона з фототиристором (а) і фотосимістором (б), оптосимістор компанії Fairchild MOC3021 (в)

Лекція № 7

Тема: "Інтегральні мікросхеми"

ПЛАН

- 7.1. Класифікація інтегральних мікросхем і система їх позначень.
- 7.2. Напівпровідникові інтегральні мікросхеми.
- 7.3. Плівкові інтегральні мікросхеми.
- 7.4. Гібридні та суміщені інтегральні мікросхеми.

7.1. Класифікація інтегральних мікросхем і система їх позначень

Інтегральна мікросхема (ІМС) – це електронний прилад, що виконує визначену функцію перетворення чи обробки сигналу (перетворення інформації), і є сукупністю великої кількості щільно розташованих й електрично з'єднаних елементів (взаємозв'язаних електронних компонентів), виготовлених в єдиному технологічному циклі на спільній пластині (підкладці). Термін "інтегральна мікросхема" відображає, по-перше, факт об'єднання (інтеграції) окремих компонентів у конструктивно єдиний прилад (чіп), а, по-друге, факт ускладнення функцій, що виконуються приладом, у порівнянні із функціонуванням окремих елементів.

Конструктивно інтегральні мікросхеми виконують у герметичних корпусах (металевих, пластмасових або керамічних), які захищають вироби від зовнішніх впливів, або **у безкорпусних модифікаціях**. Безкорпусну герметизацію виконують заливанням ІМС спеціальними компаундами. Більш надійний захист забезпечують корпуси. Типи і розміри корпусів, кількість виводів та їхнє розміщення стандартизовані для спрощення технологічного процесу виготовлення виробів з різних мікросхем. На корпусі знаходиться "ключ" (відповідна позначка) або корпус має несиметричну форму, що еквівалентно ключу, який необхідний для правильного знаходження виводів мікросхеми (рис. 7.1). Кількість стандартних корпусів обчислюється сотнями. Розрізняють **корпуси для поверхневого монтажу**. Основною відмінністю технології поверхневого монтажу від "традиційної" технології наскрізного монтажу в отвори на друкованій платі є те, що компоненти фіксуються на контактні площадки поверхні з використанням паяльної пасти методом групової пайки в печі (переважно методом конвекції, а також інфрачервоним нагріванням або в паровій фазі). У вітчизняних корпусах відстань між виводами вимірюється у міліметрах: стандартними є 2,5 мм і 1,25 мм. В імпорتنих мікросхемах відстань вимірюють у дюймах: стандарт – це 1/10 чи 1/20 дюйма, що відповідає 2,54 і 1,28 мм. У сучасних імпорتنих корпусах для поверхневого монтажу застосовують і метричні розміри: 0,8 мм; 0,65 мм та інші. Безкорпусні мікросхеми призначені для монтажу в гібридні мікросхеми або мікрозбірки.



Рис. 7.1. Інтегральні мікросхеми: гібридна мікросхема E100-03H (а), перетворювач – аналогова схема AD536AJQ (б), аудіопідсилювач Lm3886tf (в), операційний підсилювач AD549LHZ (г); схеми для поверхневого монтажу: драйвер для двигунів/контролер IC A3930KJP-T (з), пристрій пам'яті 25LF020A-33SAE (д)

Компоненти, що входять до складу *ІМС* і не можуть бути відокремлені від *ІМС* як самостійні прилади, називаються *елементами ІМС* або *інтегральними елементами*. Інтегральні елементи слід відрізняти від компонентів, які встановлюють шляхом монтажних операцій на *ІМС* і які є самостійними виробами, що можна замінити на інші (конденсатори, котушки індуктивності та ін.).

Особливостями ІМС є те, що вони самостійно виконують закінчені, як правило, складні функції, тоді як елементарні прилади виконують аналогічні функції тільки в поєднанні з іншими приладами. Збільшення функціональної складності *ІМС* веде до суттєвої переваги відносної частки активних елементів над пасивними на відміну від дискретних пристроїв. Виготовлення *ІМС* визначеної вартості передбачає розміщення на кристалі якомога більшої кількості елементів з мінімальними розмірами, а саме, транзисторів і діодів. Єдиний технологічний цикл виготовлення *ІМС* забезпечує практичну однаковість параметрів інтегральних елементів. *ІМС* характеризуються високою швидкістю. Малі розміри *ІМС* значно зменшують паразитні параметри, такі як міжелектродні ємності та індуктивності з'єднувальних провідників. Це дає змогу створювати високочастотні підсилювачі на частотах 1-3 ГГц та швидкодіючі логічні елементи з затримкою не більшою за 0,1 нс. *ІМС* мають переваги за надійністю, габаритами і вартістю порівняно з пристроями на елементарних приладах. Надійність обумовлена відсутністю процесів луження і зварювання. Габарити зменшуються через відсутність корпусів і зовнішніх виводів у кожного елемента. Оскільки всі елементи *ІМС* виготовляються в єдиному технологічному циклі, то вартість *ІМС* наближується до вартості одного транзистора. Зі збільшенням інтеграції відносна вартість кожного інтегрального елемента зменшується. Перевагою *ІМС* є також висока економічність – потужність, яку споживають навіть великі *ІМС*, не перебільшує 100-200 мВт, а для більшості *ІМС* становить 10-100 мкВт.

Для виготовлення ІМС використовують груповий метод і планарну технологію. Груповий метод виробництва полягає в тому, що, по-перше, на одній пластині водночас виготовляють велику кількість *ІМС*; а, по-друге, якщо дозволяє технологічний процес, то водночас оброблюються десятки таких пластин. Після завершення циклу виготовлення *ІМС* підкладка розрізається на окремі *ІМС*. Планарна технологія – це така організація технологічного процесу, коли всі елементи і їх складові створюються в *ІМС* шляхом їх формування через площину. Виводи від усіх сформованих областей структури виходять на одну поверхню пластини.

Проектування інтегральних схем – це складний і тривалий процес. Можна виділити кілька рівнів проектування *ІМС*:

1. Фізичний рівень, на якому розроблюють методи реалізації на кристалі елементів *ІМС* (в першу чергу, транзистора).
2. Електричний рівень, на якому розроблюють схемні варіанти найпростіших компонентів *ІМС*, які називають *транзисторними логіками (ТЛ)*. Найпростіші компоненти цифрових *ІМС* – це, наприклад, ключі та логічні елементи.
3. Логічний рівень (для цифрових схем), на якому створюється структурна модель цифрового пристрою, який реалізує певну логічну функцію. В якості компонентів логічної схеми можуть бути використані як логічні елементи (вентилі), що реалізують елементарні логічні функції, так і об'єднання логічних елементів (підсхеми). Відповідно розрізняють логічне моделювання на різних рівнях.
4. Схемо- і системотехнічний рівень для отримання повної схеми пристрою, що розроблюється.
5. Топологічний рівень, виходом якого є фотошаблони для виробництва. Важливою проблемою є розміщення (топологія) елементів на мінімальній площі таким чином, щоб з'єднання були виконані без перехрещень або, у крайньому випадку, з мінімальною кількістю перехрещень. Крім того, важливо, зменшити пара-

зитні зв'язки між елементами. При великій кількості елементів тільки ЕОМ орієнтовані методи можуть допомогти у виборі оптимального варіанту.

6. **Програмний рівень** (для мікроконтролерів і мікропроцесорів), виходом якого є набори команд на мові асемблера для керування роботою пристрою.

У даний час **більшість інтегральних схем розробляється за допомогою систем автоматичного проектування (САПР)**, що дає змогу автоматизувати і значно прискорити процес одержання топологічних фотошаблонів.

В той же час, розробка і виробництво **ІМС** за новими архітектурами і техпроцесами, та відповідного обладнання й устаткування для цього, потребують величезних капіталовкладень в мільярди і навіть десятки мільярдів доларів. Так, сумарні інвестиції тільки в одну нідерландську компанію **ASML**, що випускає спеціальні установки (комплекси) для виробництвом процесорів за методом **EUV-літографії** за 7-нм і 5-нм техпроцесами для **TSMC (Samsung, HUAWEI, Apple, Intel, AMD** та ін.), за останні 5 років склали понад 11 млрд. дол. За цими установками вартістю >120 млн. дол. "стоять в черзі" роками, оскільки їх виробляється на рік кілька десятків "одиниць" (маса кожної ~180 т, споживає ~1 МВт електроенергії та потребує ~1,5 т води за 1 хв. для охолодження)! Вони містять понад 100 тис. деталей, одним з самих складних елементів яких є джерела ультрафіолетового світла, що працюють на основі спеціального 30 кВт-го вуглекислотного лазера (1), який у вакуумній камері вистрілює по 2 імпульси з частотою 50 тисяч разів на секунду на краплі олова (2). Перший постріл лазера фактично плющить і перетворює краплю олова на млинець, яка стає легкою мішенню для другого залпу, який її підпалює до температур у 100 разів більших, ніж температура поверхні сонця! Плазма, що утворилася, випромінює світло в екстремальному УФ-спектрі (див. рис. 7.2).

Інтегральні схеми класифікують за різними ознаками:

- I. **За конструктивно-технологічними ознаками інтегральні схеми поділяють на напівпровідникові, плівкові, гібридні та суміщені.** У **напівпровідникових інтегральних схемах** всі елементи (резистори, діоди, транзистори та інші) виконані у приповерхневому шарі одного кристалу напівпровідникового матеріалу, так званої **активної підкладки** (зазвичай це монокристал кремнію, германію або арсеніду галію). Недоліком напівпровідникових **ІМС** можна вважати порівняно невисоку якість пасивних елементів (резисторів і конденсаторів) і неможливість створення всередині напівпровідника котушок індуктивності. В **плівкових інтегральних схемах** всі елементи являють собою плівки, які нанесені на **діелектричну підкладку** (пасивну підкладку). Їх поділяють на **тонкоплівкові** та **товстоплівкові**. У **гібридних інтегральних схемах** пасивні елементи виконані у вигляді плівок, які нанесені на діелектричну підкладку, а активні елементи є навісними. У тих випадках, коли необхідна висока якість пасивних елементів напівпровідникових ІС, використовують **суміщені інтегральні схеми**. Активні елементи суміщених ІС виконують у приповерхневих шарах кристалів напівпровідникового матеріалу (як у напівпровідникових ІС), на кристалі створюють ізолюючий шар **SiO_2** і наносять на нього плівкові пасивні елементи і між'єднан-

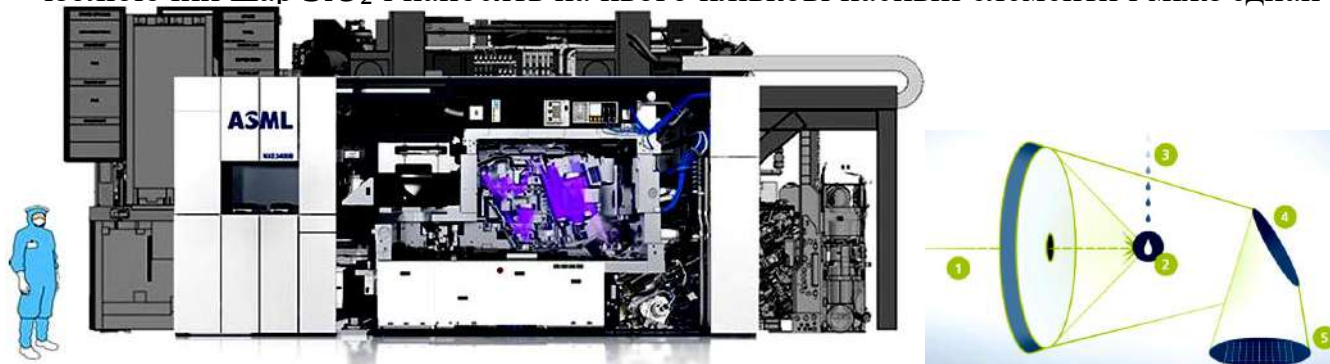


Рис. 7.2. Схема установки для виробництва ІМС компанії ASML

ня. Суміщені схеми коштовніші за напівпровідникові і мають помітно більші розміри, але характеризуються кращими параметрами.

Кожна з груп ІС у свою чергу об'єднує інтегральні схеми з різними технологіями виготовлення елементів (в першу чергу, транзисторів), що суттєво впливає на параметри мікросхем. До того ж, існують різні схемні варіанти реалізації інтегральних логічних елементів, що також безпосередньо впливає на параметри усіх вузлів і систем пристроїв. Тому нерідко в описі мікросхеми вказують транзисторну логіку, щоб підкреслити тим самим загальну характеристику властивостей і можливостей мікросхеми. На сьогодні найбільш поширеними є **мікросхеми з транзисторно-транзисторною логікою (ТТЛШ на біполярних транзисторах)** та з логікою на комплементарних польових транзисторах (КМОН).

II. За видом сигналу, що оброблюється, інтегральні схеми поділяють на дві великі групи: аналогові та цифрові. **Аналогові ІС** виконують функції перетворення та обробки електричних сигналів чи параметрів електричної енергії за законами функцій, які неперервні у часі (**операційні підсилювачі, компаратори, генератори сигналів, фільтри, стабілізатори напруги і струму, мікросхеми управління імпульсних блоків живлення, перетворювачі сигналів, різні датчики**). Основу схемотехніки аналогових інтегральних мікросхем створюють найпростіші підсилювальні каскади. Використовуючи такі схемотехнічні заходи як багаторазовість та зворотні зв'язки, розробляють різного призначення підсилювачі, стабілізатори напруги і струму, перетворювачі частоти, фази і тривалості імпульсів, генератори синусоїдних та релаксаційних сигналів, а також інші схеми. **Цифрові ІС** призначені для формування, перетворення, обробки і передавання двійкових або інших цифрових кодів, поставлених у відповідність реальним значенням сигналів. При цьому інформаційні значення вхідних і вихідних сигналів змінюються дискретно в часі, тобто приймають два значення, які дорівнюють логічній одиниці та логічному нулю (**логічні елементи, комутатори, ключі, тригери, регістри, суматори, лічильники, шифратори, цифрові компаратори, мікроконтролери, мікропроцесори** (ІС, що виконують функції центрального процесора та призначений для виконання команд мови машинної програми; основною функцією їх є обробка даних по заданій програмі шляхом виконання арифметичних і логічних операцій – програмне керування роботою пристроїв або спеціалізованого процесора) та ін.) (рис. 7.3). Основою цифрових ІМС є транзисторні ключі, які здатні перебувати в двох стійких станах: відкритому і закритому. Використання транзисторних ключів дає можливість будувати різні логічні пристрої та ін. функціональні вузли, які входять до складу цифрових пристроїв і систем, що виконують складні функції (ЕОМ).

Цифрові ІМС мають ряд переваг у порівнянні з аналоговими:

1. **Зменшене енергоспоживання**, що пояснюється використанням у цифровій електроніці імпульсних електричних сигналів. При отриманні і перетворенні таких сигналів активні елементи електронних пристроїв (транзистори) працюють у "ключовому" режимі, тобто транзистор або "відкритий", що відповідає сигналу високого рівня (лог. 1), або "закритий" – лог. 0. На відкритому транзисторі мізерний спад напруги, через закритий транзистор протікає незначний струм, отже, в обох випадках енергоспоживання близьке до 0, на відміну від аналогових пристроїв, в яких більшу частину часу транзистори знаходяться у активній області.



Рис. 7.3. Плата ARDUINO з мікроконтролером ATmega2560, сучасні мікропроцесори

2. Висока завадостійкість цифрових пристроїв, що пояснюється значною відмінністю рівнів сигналів лог. 1 і лог. 0 (наприклад, 2,5-5 В і 0-0,5 В, відповідно). До того ж, у цифрових пристроях можливе застосування спеціальних кодів, які дають змогу виправляти помилки.

3. Нечутливість цифрової техніки до неминучого в інтегральній технології розкиду параметрів елементів. Така нечутливість пояснюється значним логічним перепадом сигналів високого та низького рівня та досить широким інтервалом допустимих змін сигналів лог. 1 і лог. 0. Для сумісної роботи аналогових і цифрових інтегральних схем, наприклад, під час цифрової обробки аналогової інформації, необхідна наявність аналого-цифрових та цифро-аналогових перетворювачів.

До основних параметрів аналогових мікросхем відносяться: 1) напруга живлення $U_{\text{ж}}$; 2) коефіцієнт підсилення за напругою K_U ; 3) вхідний опір $R_{\text{вх}}$; 4) вихідний опір $R_{\text{вих}}$; 5) максимальна вихідна напруга $U_{\text{вих max}}$; 6) робочий частотний діапазон $f_{\text{н}}$ та $f_{\text{в}}$, де $f_{\text{н}}$ та $f_{\text{в}}$ – відповідно нижня і верхня робочі частоти; 7) потужність, що споживається елементом від джерела живлення $P_{\text{спож}}$.

До основних параметрів цифрових інтегральних мікросхем відносяться: 1) напруга живлення $U_{\text{ж}}$; 2) час переходу $ИМС$ зі стану логічного нуля в стан логічної одиниці t^{01} ; 3) напруга логічного нуля U^0 ; 4) напруга логічної одиниці U^1 ; 5) потужність, що споживається від джерела живлення $P_{\text{спож}}$; 6) коефіцієнт об'єднання по входу $K_{\text{об}}$ – число входів $ИМС$, по яких реалізується логічна функція; 7) завадостійкість $U_{\text{зав}}$ – найбільша напруга перешкоди на вході $ИМС$, що не викликає порушення правильності її роботи.

Аналогові та цифрові інтегральні схеми виготовляють серіями для спрощення побудови різноманітної електронної апаратури. Серія – це сукупність $ИМС$ (від одиниць до десятків), які виконують різні функції, але мають єдину схемотехнічну і конструктивно-технологічну основу та призначені для сумісної роботи в електронній апаратурі. До складу серії цифрових схем включають логічні елементи, які не тільки створюють функціонально повну систему, але і вирізняються різноманітністю, що дає змогу мінімізувати об'єм обладнання. Мікросхеми однієї серії, як правило, мають однакову напругу джерел живлення, значення вхідних і вихідних опорів, рівні сигналів, тобто узгоджені за електричними характеристиками.

III. За функціональним призначенням, тобто згідно з характером функцій, що виконуються, аналогові та цифрові схеми поділяють на підгрупи і види (таблиця 7.1). До аналогових схем належать такі підгрупи, як підсилювачі, генератори сигналів, джерела вторинного електроживлення, багатофункціональні аналогові пристрої, фільтри, схеми порівняння та інші. Цифрові схеми – це комутатори і ключі, логічні елементи, тригери, пристрої пам'яті, обчислювальні та цифрові пристрої, багатофункціональні цифрові пристрої та інші. Цифрова мікросхема, яка виконує складні функції процесора, отримала назву мікропроцесора. Мікропроцесор виконує в основному функції АЛУ (арифметико-логічного пристрою), а додаткові функції зв'язку з периферією виконують спеціально для цього виготовлені набори мікросхем. Для перших мікропроцесорів число мікросхем у наборах обчислювалося десятками, а тепер це набір із двох-трьох мікросхем, що одержав термін чипсет. Мікропроцесори з вбудованими контролерами оперативної та постійної пам'яті, а також іншими додатковими функціями називають мікроконтролерами.

Аналого-цифрові перетворювачі (АЦП) – це пристрої для перетворення вхідного аналогового сигналу на дискретний код (цифровий сигнал).

Цифро-аналогові перетворювачі (ЦАП) – це пристрої для перетворення цифрового коду на аналоговий сигнал (струм, напругу, заряд).

Базові матричні кристали (БМК) містять як аналогові, так і цифрові первинні елементи.

У цілому, існує безліч систем позначень інтегральних схем. З них є кілька стандартних, які використовуються багатьма виробниками. Розглянемо систему позначень, яка була прийнята в СРСР і залишилася основною у РФ. Це система умовних позначень сучасних типів інтегральних мікросхем, що була встановлена ОСТ 11073915-80. В основу системи позначень покладений буквено-цифровий код. Повне умовне позначення ІС складається з кількох груп символів (табл. 7.2, рис. 7.4), які записують без розділових знаків та пропусків.

Таблиця 7.1.

Підгрупи, види та літерне позначення функціонального призначення ІМС

Функції, які виконує інтегральна схема		Літерне позначення (ОСТ 11073915-80)
Підгрупа	Вид	
Детектори	амплітудні	ДА
	імпульсні	ДИ
	частотні	ДС
	фазові	ДФ
	інші	ДП
Комутатори та ключі	напруги	КН
	струму	КТ
	інші	КП
Логічні елементи	I-НІ	ЛА
	I-НІ \ АБО-НІ	ЛБ
	розширювачі	ЛД
	АБО-НІ	ЛЕ
	I	ЛИ
	I-АБО-НІ \ I-АБО	ЛК
	АБО	ЛЛ
	АБО-НІ \ АБО	ЛМ
	НІ	ЛН
	I-АБО-НІ	ЛР
	I-АБО	ЛС
	інші	ЛП
Модулятори	амплітудні	МА
	імпульсні	МИ
	частотні	МС
	фазові	МФ
	інші	МП
Набори елементів	діодів	НД
	конденсаторів	НЕ
	комбіновані	НК
	резисторів	НР
	транзисторів	НТ
	функціональні (наприклад, матриці резисторів типу R-2R)	НФ
	інші	НП
Обчислювальні пристрої	схеми зв'язку з магістраллю	ВА
	схеми синхронізації	ВБ
	схеми керування вводом/виводом (схеми інтерфейсу)	ВВ

	контролери	ВГ
	мікро-ЕОМ	ВЕ
	спеціалізовані пристрої	ВЖ
	часозадавальні	ВИ
	комбіновані пристрої	ВК
	мікропроцесори	ВМ
	мікропроцесорні секції	ВС
	схеми керування перериванням	ВН
	функціональні розширювачі	ВР
	схеми керування пам'яттю	ВТ
	схеми мікропрограмного керування	ВУ
	функціональні перетворювачі інформації (арифметичні, тригонометричні, логарифмічні, швидкого перетворення Фур'є та інші)	ВФ
	мікрокалькулятори	ВХ
	інші	ВП
Пристрої пам'яті	асоціативні	РА
	матриці постійних запам'ятовуючих пристроїв (ПЗП)	РВ
	матричні ПЗП	РЕ
	матриці оперативних запам'ятовуючих пристроїв (ОЗП)	РМ
	ПЗП з можливістю багаторазового перепрограмування	РР
	ПЗП з можливістю одноразового програмування	РТ
	ОЗП	РУ
	ПЗП з ультрафіолетовим стиранням і електричним записом інформації	РФ
	ПЗ на циліндричних магнітних доменах (ЦМД)	РЦ
	інші	РП
Тригери	типу JK (універсальні)	ТВ
	динамічні	ТД
	комбіновані	ТК
	Шмітта	ТЛ
	Типу D (з затримкою)	ТМ
	типу RS (з роздільним запуском)	ТР
	типу T (лічильний)	ТТ
	інші	ТП
Фільтри	верхніх частот	ФВ
	смугові	ФЕ
	нижніх частот	ФН
	режекторні	ФР
	інші	ФП
Формувачі	адресних струмів	АА
	імпульсів прямокутної форми	АГ
	розрядних струмів	АР
	імпульсів спеціальної форми	АФ
	інші	АП

Фоточутливі пристрої з зарядовим зв'язком	лінійні	ЦЛ
	матричні	ЦМ
	інші	ЦП
Цифрові пристрої	арифметико-логічні	ИА
	шифратори	ИВ
	дешифратори	ИД
	лічильники	ИЕ
	комбіновані	ИК
	півсуматори	ИЛ
	суматори	ИМ
	реєстри	ИР
	інші	ИП

Таблиця 7.2.

Літерно-цифровий код для позначення ІС

Номер групи	
	Перед першим елементом позначення можуть стояти наступні літери: К – для апаратури загального застосування; ЭК – для апаратури на експорт (з кроком виводів 2,54 і 1,27 мм); відсутність літери – ІС спеціального застосування.
1	Перший елемент коду у вигляді однієї цифри відображає класифікацію ІС за конструктивно-технологічними ознаками: 1, 5, 7 – напівпровідникові ІС (7 для безкорпусних); 2, 4, 6, 8 – гібридні ІС; 3 – інші.
2	Другий елемент коду у вигляді двох-трьох цифр (від 01 до 99 або від 001 до 999) – це порядковий номер розробки схмотехнічної реалізації ІС. Разом перший і другий елементи (три-чотири цифри) утворюють серії ІС. Для спрощення побудови різноманітної електронної апаратури були розроблені функціонально повні серії схем, які налічують від одиниць до десятків різних схем. Схеми серії відрізняються функціональним призначенням, але мають єдину схмотехнічну та конструктивно-технологічну основу, узгоджені за електричними характеристиками і дозволяють сумісне використання в електронній апаратурі. Останнім часом при чотиризначному номері серії першу цифру порядкового номера серії (або другу цифру номера серії) встановлюють залежно від функціонального призначення мікросхем, що входять в серію. Так, цифра 0 визначає, що дана серія мікросхем призначена для комплектації побутової РЕА; цифра 1 призначена для аналогових мікросхем; цифра 4 – для мікросхем ОП; цифра 5 – для серій цифрових мікросхем; цифра 6 – для серій мікросхем пам'яті, як оперативної, так і постійної; цифра 8 – для серій МП.
3	Третій елемент коду – це дві літери, які позначають функціональну підгрупу та вид мікросхеми.
4	Четвертий елемент коду – це одна-дві цифри для позначення номеру розробки ІС у серії, у складі якої може бути кілька однакових за функціональним призначенням мікросхем. У позначення також можуть бути введені додаткові символи (від А до Я), що визначають допуски на розкид параметрів мікросхем та інше.
	Іноді наприкінці умовного позначення додається буква, яка визна-

час технологічний розкид електричних параметрів даної ІС (конкретні значення та відмінності наводяться в технічній документації).

Для характеристики матеріалу і типу корпусу перед цифровим позначенням можуть бути додані наступні літери:

- А – пластмасовий планарний корпус,
- Е – металополімерний корпус типу DIP,
- И – склокерамічний планарний корпус,
- М – металокерамічний корпус типу DIP,
- Н – керамічний "безвивідний" корпус,
- Р – пластмасовий корпус типу DIP,
- С – склокерамічний корпус типу DIP.

Для безкорпусних мікросхем до складу умовного позначення через дефіс вводиться цифра, що характеризує відповідну модифікацію конструктивного виконання:

- 1 – з гнучкими виводами,
- 2 – зі стрічковими виводами,
- 3 – з жорсткими виводами,
- 4 – на загальній пластині (нерозділені),
- 5 – розділені без втрати орієнтування (наприклад, наклеєні на плівку),
- 6 – з контактними площадками без виводів.

ПРИКЛАД.

Мікросхема К1533ЛА3 – напівпровідникова ІС загального застосування, серія – 1533 (ТТЛ), функціональне призначення – логічний елемент І-НІ, номер розробки ІС у серії (підвид) – 3 (елемент 2-2І-НІ).

Мікросхема К140УД1 – інтегральний напівпровідниковий операційний підсилювач загального застосування серії 140 з порядковим номером розробки даної схеми в серії за функціональною ознакою 1.

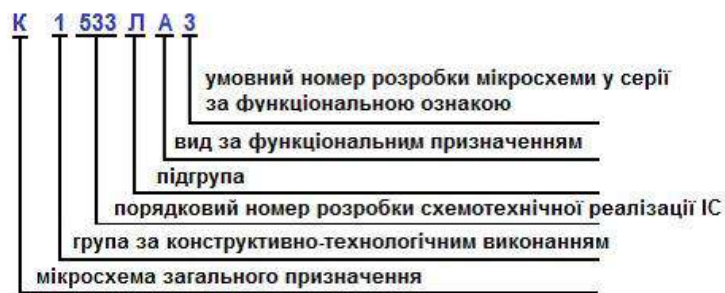


Рис. 7.4. Літерно-цифровий код позначення мікросхеми

Мікросхеми позначають на схемах заміщення умовно-графічними зображеннями відповідно до ГОСТ 2.743-91 для цифрових мікросхем та ГОСТ 2.759-82 для аналогових мікросхем. Умовно-графічне позначення мікросхеми має форму прямокутника, до якого підводять лінії виводів. Зображення може складатися тільки з основного поля або з основного поля і одного додаткового, яке розташовують праворуч або ліворуч від основного, а також з основного поля і двох додаткових (рис. 7.5). Допускається додаткові поля розділяти на зони, які відділяють горизонтальними лініями. У першому рядку основного поля умовно-графічного позначення мікросхеми розміщують позначення функції, яку виконує ІС. Наприклад, **RG** – регістр, **G** – генератор, ***STU** – стабілізатор напруги, **SW** – комутатор, **SM** – суматор та багато інших. У наступних рядках основного поля розташовують інформацію відповідно до ГОСТ 2.708 (табл. 7.3).

У додаткових полях розміщують інформацію про призначення виводів (мітки, покажчики). Входи елемента зображують з лівої сторони прямокутника, виходи – з правого боку. Двонаправлені виводи і виводи, що не несуть логічної інформації,

зображують з правого або з лівого боку прямокутника. В областях поряд з виводами на додаткових полях позначають мнемонічні позначення виводів (**Vcc**, **GND**, **D1** ...), зовні номери виводів. На схемах заміщення кожен мікросхему позначають дволітерним кодом: **DA** (якщо схема аналогова) або **DD** (якщо схема цифрова) і присвоюють їй порядковий номер.

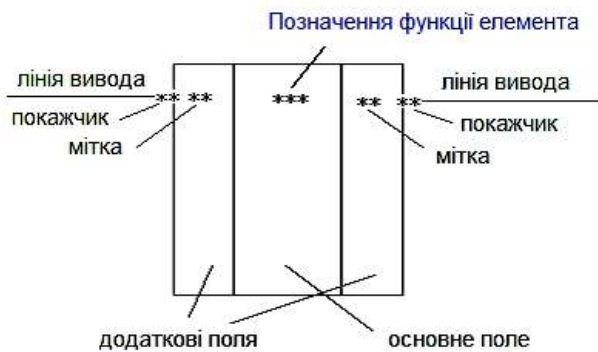


Рис. 7.5. Умовне графічне зображення мікросхеми

Таблиця 7.3.

Умовно-графічне зображення мікросхем серії 555

DD1.1 K555AF3 DD1.2 K555AF3 DD1.1 K555AP5 DD1.2 K555AP5	DD1.1 K555AF5 DD1.2 K555AF5 DD K555AP6	DD1.1 K555AP3 DD1.2 K555AP3 DD1.1 K555FG2 DD1.2 K555FG2	DD1.1 K555AP4 DD1.2 K555AP4 DD K555BX1
---	--	---	--

7.2. Напівпровідникові інтегральні мікросхеми

Напівпровідникова інтегральна схема – це мікросхема, елементи якої розміщені у приповерхневому шарі напівпровідникової пластини (підкладки) (рис. 7.5). У технології напівпровідникових інтегральних мікросхем окремі елементи виготовляють шляхом спрямованої зміни властивостей певних областей підкладки, а саме, внесення домішок у кристал напівпровідника за допомогою дифузії за високої температури або іонної імплантації. Таке легування здійснюється локально за допомогою спеціальних масок з отворами, через які атоми домішки проникають у кристал на потрібних ділянках. Роль маски зазвичай виконує плівка двоокису кремнію SiO_2 , що покриває поверхню кремнієвої пластини. В цій плівці різними методами формуються вікна необхідної форми. Потім елементи з'єднують один з одним тонкими металевими доріжками. Напівпровідникові ІС відіграють основну роль у сучасній мікроелектроніці. Залежно від типу транзисторної логіки основними елементами напівпровідникової ІМС можуть бути біполярні чи польові транзисторні структури, на виготовлення яких орієнтується увесь технологічний цикл ІМС. Усі інші інтегральні елементи виготовляють водночас з основними без додаткових технологічних операцій. Наприклад, основним елементом ІМС транзисторно-транзисторної логіки є багатомітерний ***n-p-n-транзистор***. Інші елементи (***p-n-p-транзистори***, ***діоди***, ***резистори*** і ***конденсатори***) виготовляють водночас з ***n-p-n-транзисторами*** у тих шарах напівпровідникової структури, які створюються для ***n-p-n-транзистора*** (рис. 7.6).

Елементи біполярної ІМС необхідно ізолювати один від одного, щоб вони не взаємодіяли через кристал. Розроблені різні способи ізоляції. Найчастіше окремі елементи мікросхем формуються на напівпровідниковій підкладці ***p-типу*** в ізолюваних від неї областях ***n-типу***, так званих, ***кишенях***. Ізоляція кишень від підкладки може бути виконана кількома способами. Найкращим є спосіб ізоляції за допомогою двоокису кремнію SiO_2 (рис. 7.7, а), проте, такий процес є технологічно складним. Найпростішим є спосіб ізоляції за допомогою зворотно зміщеного ***p-n-переходу*** (рис. 7.7, б), але він недосконалий через наявність зворотного струму. Для забезпечення зворотного зміщення ***p-n-переходу*** в структурі наявний омичний контакт до шару підкладки, на який подається найнижчий потенціал від джерела живлення. Розповсюдженим методом ізоляції при виробництві інтегральних мікросхем є створення комбінованої ізоляції (рис. 7.7, в). Паразитна ємність між кишенею та підкладкою набагато менша при ізоляції діелектриком, через те що шар SiO_2 у кілька разів товще, ніж зворотно увімкнений ***p-n-перехід***. Принципово іншою є ізоляція елементів при застосуванні ***технології "кремній на сапфірі"***. Сапфір має таку саму структуру кристалічних ґраток як і кремній, тому на сапфіровій підкладці можна наростити епітаксiальний шар кремнію. Шар кремнію протравлюють до сапфіру і утворюють окремі "острівці" кремнію, в яких і формують

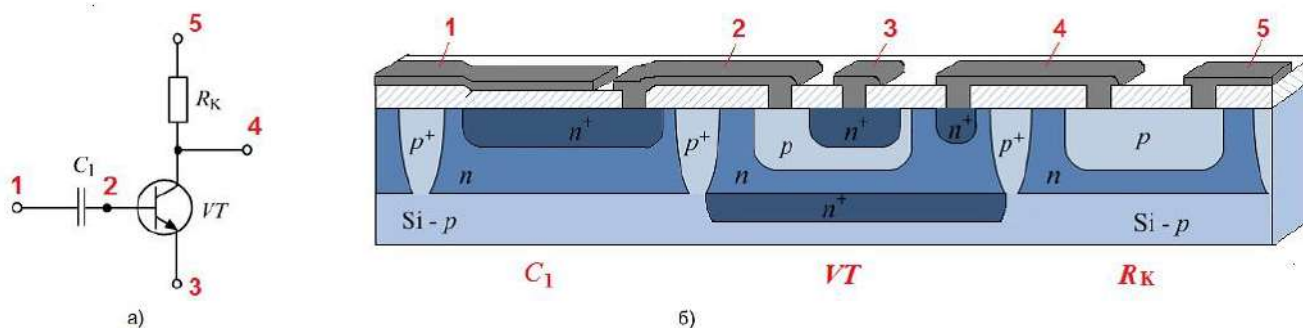


Рис. 7.6. Фрагмент напівпровідникової ІМС: електрична схема (а) і відповідна структура (б)

елементи *ІМС* (рис. 7.7, з). Острівки ізольовані один від одного повітрям, а знизу – сапфіром-діелектриком. Суттєвим недоліком такого методу є рельєфність поверхні, яка ускладнює металізацію.

На практиці для створення шарів напівпровідника з різними типами провідності використовують дифузійно-планарну та епітаксіально-планарну технології. Найчастіше застосовують епітаксіально-планарну технологію, яка передбачає на першому етапі осадження із газової сфери на монокристалічну високоомну підкладку *p-типу* епітаксіального шару *n-типу*, в якому на наступних етапах формуються елементи *ІМС*. При дифузійно-планарній технології острівки *n-типу* утворюються як результат дифузії донорної домішки через вікна оксидної маски безпосередньо у монокристалічній підкладці. Таким чином, зменшується кількість операцій (на одну – епітаксію), але погіршуються якості ізолюючих *p-n-переходів*, що утворюють для ізоляції елементів, через нечіткий і нерівномірний розподіл домішок. Обидві технології забезпечують створення транзисторів з виводами від областей колектора, бази і емітера (або витоку, затвору і стоку), розміщеними в одній площині на поверхні підкладки. Така структура називається планарною. Обидві технології – це послідовні комбінації основних технологічних процесів, структурна схема етапів яких наведена на рис. 7.8.

Розглянемо детальніше послідовність кроків епітаксіально-планарної технології, основними етапами якої є вирощування на поверхні кремнію *p-типу* епітаксіального шару *n-типу*, створення в цьому шарі кишень і формування в них вертикальних *p-n-p-транзисторних* структур (рис. 7.9).

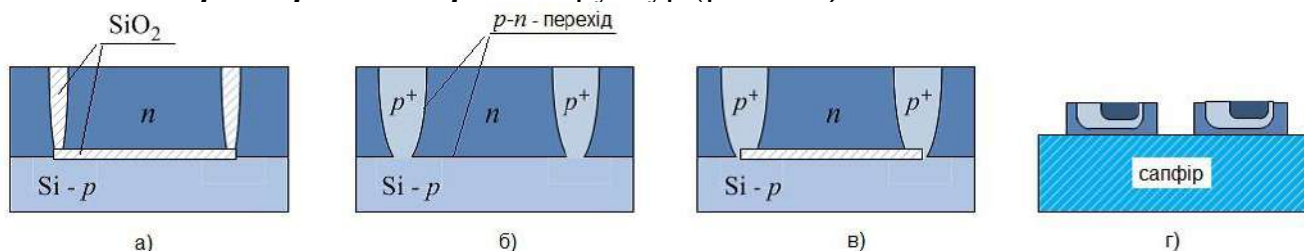


Рис. 7.7. Способи ізоляції елементів напівпровідникової ІМС: діелектрична кишень (а), ізоляція зворотно зміщеним *p-n*-переходом (б), комбінована ізоляція (в), "кремній на сапфірі" (г)

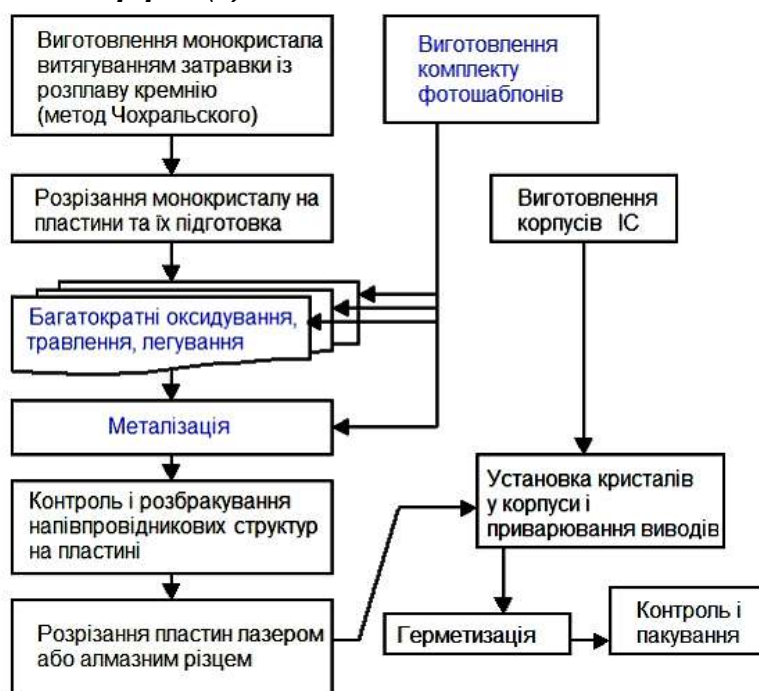


Рис. 7.8. Схема технологічного процесу виготовлення напівпровідникових ІМС

Технологічний процес при виготовленні класичного планарного кремнієво-го транзистора n-p-n-типу складається з наступних основних операцій:

1. На підкладці **Si p-типу** (відшліфований, а потім відполірований, ретельно очищеній поверхні пластини з монокристалічного кремнію з електропровідністю **p-типу**) термічним окисненням в сухому або вологому кисні створюють шар дво-окису кремнію (**SiO₂**) товщиною від кількох десятих до 1,0-1,5 (мкм), в якому ви-травлюють вікна (фотолітографічна обробка) для здійснення дифузії донорів і фо-рмують приховані **n⁺-шари**.

2. Віддаляють шар **SiO₂** і нарощують епітаксіальний шар **n-типу** з високим опором, товщиною кілька мікрометрів. При епітаксії шар кремнію продовжує мо-нокристалічну структуру підкладки.

3. Окиснюють поверхню; роблять вікна в **SiO₂** (друга маска), через які вводять акцепторну домішку (наскрізна дифузія), в результаті чого епітаксіальний шар "розрізається" на окремі острівці-кишені з провідністю **n-типу**. На ізольованих островках формуються інтегральні елементи. Власне області острівків – це колек-тори майбутніх транзисторів **n-p-n-типу**.

4. Повторним окисленням вікна закривають і за допомогою чергової фотолі-тографії (третя маска) створюють нові вікна для введення акцепторів, формують базові області.

5. Знову створюють новий шар **SiO₂** з вікнами для дифузії донорів (четверту маска), формують емітерні області **n⁺-типу** (для збільшення інжекції) і **n⁺-області** під виводи від колекторних областей.

6. Повторюючи операції окиснення та селективного травлення на основі фо-толітографії, формують вікна в п'ятій оксидній масці для приєднання виводів до емітерних, базових та колекторних шарів і формування малюнка металевих провід-ників на поверхні **SiO₂**.

7. Пластину кремнію розрізають на окремі кристали, кожен з яких має тран-зисторну структуру (рис. 7.10).

8. Насамкінець виконують монтаж кожного кристала ІМС в корпусі, з'єднан-ня контактних майданчиків з виводами корпусу (рис. 7.11), герметизацію корпусу.

Біполярний транзистор, зображений на рис. 7.9, складається з емітерної 1, базової 2 і колекторної 3 областей. Від областей колектора і бази часто створюють по два виводи, для того щоб зручно було з'єднувати транзистор з сусідніми елеме-нтами без перехреснення металеві розводки. Під колекторною областю розташо-

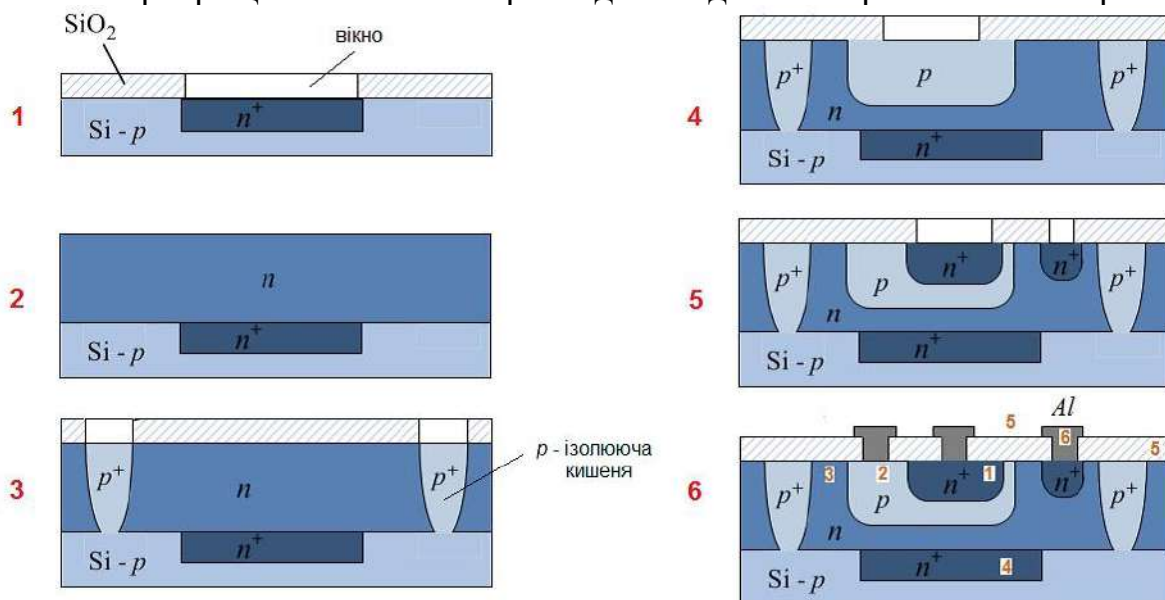


Рис. 7.9. Етапи технологічного процесу епітаксіально-планарної технології



Рис. 7.10. Розрізання підкладки

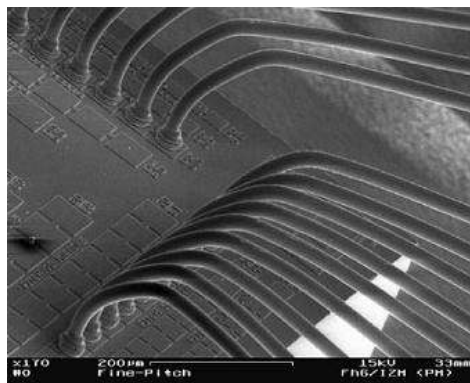


Рис. 7.11. З'єднання контактів на кристалі з ніжками корпусу

ваний прихований n^+ -шар 4. Від зовнішніх впливів структура захищена діелектричною плівкою 5, в якій є вікна для приєднання металевих виводів 6 до відповідних областей структури. Прихований n^+ -шар створюють для зменшення об'ємного опору області колектора, вивід від якої розміщений на верхній поверхні кристала. Отже, струм протікає через чималу горизонтальну ділянку колекторної області (під базою) і вертикальну ділянку. У дифузійному шарі колектора концентрація домішки розподілена нерівномірно: максимальна концентрація біля поверхні і нульова на дні. Через це опір колектора великий і навіть за наявності прихованого шару опір колекторної області **інтегрального транзистора** виявляється більшим за аналогічний опір **дискретного транзистора**. Це призводить до деякого погіршення частотних властивостей інтегрального транзистора в зв'язку зі збільшенням сталої часу ланцюга колектора (часу перезарядження бар'єрної ємності колектора). Тому граничні частоти біполярних транзисторів в інтегральних мікросхемах зазвичай не перевищують 500 МГц.

Багатоемітерні транзистори складають основу цифрових ІМС транзисторно-транзисторної логіки (ТТЛ). Маючи один колектор і одну базу, транзистор містить до 16 емітерів.

Біполярний транзистор в цифрових інтегральних мікросхемах зазвичай виконує функцію ключа і працює або в режимі насичення, або в режимі відсічки. У режимі насичення відбувається накопичення неосновних носіїв заряду в базі транзистора, а також в колекторної області. Процеси накопичення неосновних носіїв і їх подальшого розсмоктування при переході транзистора в режим відсічки пов'язані з відносно повільним процесом дифузії неосновних носіїв заряду. Інерційність цих процесів визначає швидкість перемикавання транзистора з включеного стану у вимкнений і навпаки, тобто швидкість спрацьовування схеми. Для прискорення процесу накопичення та розсмоктування неосновних носіїв заряду доцільно обмежити їх накопичення. Досягти цього можна шляхом **шунтування колекторного переходу транзистора діодом Шотткі** (діодом з випрямним електричним переходом між металом і напівпровідником). Діод Шотткі має порогове значення напруги 0,2-0,3 В, відкривається раніше, ніж колекторний перехід транзистора (з пороговою напругою 0,5-0,7 В) і не дає змогу транзистору переходити у режим насичення. В результаті в транзисторі не накопичується надлишковий заряд і час розсмоктування істотно зменшуються.

Отже, **для збільшення швидкодії схем на БТ** впроваджують **комбінацію звичайного транзистора та діода Шотткі у вигляді монолітної структури**, яка виготовляється у єдиному технологічному циклі, та має назву **транзистор Шотткі** (або **транзистора з бар'єром Шотткі**) і широко використовується в інтегральній схемотехніці завдяки більш високій швидкодії порівняно зі звичай-

ними транзисторами. Структура такого інтегрального транзистора показана на рис. 7.12. Алюмінієвий електрод бази утворює з ***p-областю*** бази омичний контакт і добре пропускає струм в обох напрямках. В той же час перехід між алюмінієвим електродом бази і високоомною ***n-областю*** колектора виходить випрямним і добре пропускає струм у напрямку від металу до напівпровідника, і погано пропускає струм в протилежному напрямку, тобто цей контакт є діодом Шотткі, увімкненим між колектором і базою, як це показано на рис. 7.12, б. Виготовлення інтегрального транзистора з діодом Шотткі не вимагає введення додаткових технологічних операцій. Необхідно лише змінити відповідним чином фотошаблон і розширити шар алюмінію за колекторний перехід. На електричних схемах ***транзистори з ДШ*** зображують так, як це показано на рис. 7.12, в. Застосування ***транзисторів з ДШ*** підвищує швидкодію цифрових ІМС у 2-5 разів.

Транзистори p-n-p-структури в ІМС відіграють допоміжну роль. Їх виготовляють одночасно з ***p-n-p-транзисторами*** і вони, як правило, мають горизонтальну структуру (рис. 7.13). Для формування транзисторів ***p-n-p-типу*** не треба вводити додаткові технологічні операції: ***p-області*** емітера і колектора створюють одночасно зі створенням ***p-області*** бази транзистора ***p-n-p-типу***, причому колекторний шар охоплює емітер з обох сторін. Базова область формується на основі епітаксialного шару з легуванням контактної області під час емітерної дифузії. Перенесення носіїв заряду в такому транзисторі відбувається у горизонтальному напрямку. Дірки інjektуються в базу з бічних частин емітера і дифундують до колекторної області в приповерхневому шарі. Товщина бази горизонтального транзистора дорівнює відстані між ***p-шарами*** (3-4 мкм). Це більше, ніж у ***p-n-p-транзисторів***, що спричинює зменшення підсилення і погіршення частотних властивостей (гранична частота не перевищує кількох десятків мегагерц). Такі транзистори застосовують в аналогових схемах, де необхідно використовувати транзистори двох типів провідності.

Інтегральні структури на біполярних транзисторах здебільшого спроектовані на ***транзисторах n-p-n-типу***, що викликано зручностями формування саме ***p-n-p-структур*** і дещо кращими параметрами ***інтегральних n-p-n-транзисторів*** порівняно з параметрами ***інтегральних транзисторів p-n-p-типу***. Справа в тому, що для формування сильнолегованих емітерних областей транзисторів ***n-p-n-типу*** зазвичай використовують дифузію фосфору, який має велику розчинність у кремнії і відносно малий коефіцієнт дифузії. Таким чином, для формування ***p-n-p-транзистора*** в інтегральній мікросхемі, яка містить ***p-n-p-транзистори***, необхідно ще провести додаткову дифузію якогось акцептора з граничною розчинністю, що перевищує граничну розчинність фосфору. А такі акцептори практично відсутні.

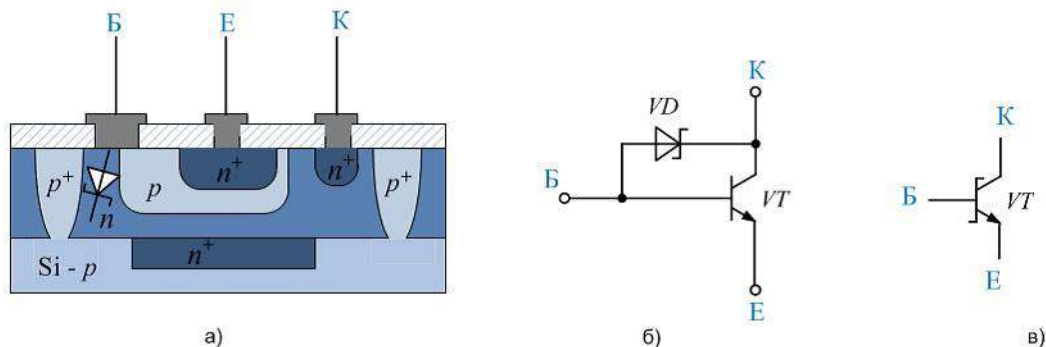


Рис. 7.12. Транзистор Шотткі: структура при виготовленні за епітаксialно-планарною технологією (а), позначення структури на електричних схемах (б), умовне позначення (в)

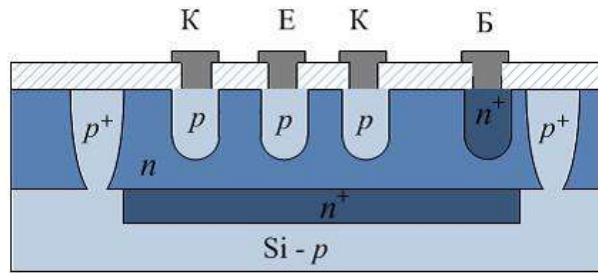


Рис. 7.13. Структура горизонтального транзистора *p-n-p*-типу

Діоди у напівпровідникових ІМС формують водночас з виготовленням базових **транзисторів *p-n-p*-типу**. В якості діода можна використовувати один з ***p-n*-переходів** вертикального ***p-n-p*-транзистора** або їх комбінацію. Отримання діодів таким шляхом значно простіше, ніж формування спеціальних діодних структур. Можливі п'ять варіантів діодного увімкнення ***p-n-p*-транзистора** (рис. 7.14).

У **першому варіанті** (1) використовується емітерний перехід, а колекторний короткозамкнений. Таке увімкнення має місце в цифрових мікросхемах, тому що в цьому випадку досягається найбільша швидкодія (час перемикання 1-10 нс) внаслідок незначного накопичення електронів у тонкій базовій області в процесі інжекції. Можливість накопичення носіїв заряду в колекторній області виключена шунтуванням колекторного переходу. У всіх інших варіантах діодних структур накопичення надлишкового заряду має місце не тільки в базі, але й в колекторному шарі, тому швидкодія таких значно нижча, час перемикання 10-100 нс.

У **другому варіанті** (2) використовується емітерний перехід, а колекторний ланцюг розімкнений.

У **третьому варіанті** (3) використовується колекторний перехід, а емітерної області при цьому може і не бути, тобто етап дифузії домішок для формування емітерної області може бути виключений з технологічного процесу. Якщо ж емітерний шар сформований, то коло емітера залишається розімкнутим. Колекторна область зазвичай є відносно високоомною, тому такий діод має досить високу зворотну пробивну напругу (до 50 В). Площа колекторного переходу значно більша від площі емітерного переходу, тому використання колекторного переходу в якості діода дає можливість пропускати великі прямі струми. Подібні властивості має **діодна структура** (4) на основі колекторного переходу з короткозамкненим емітерним переходом. У **п'ятому варіанті** (5) емітерну і колекторну області з'єднують між собою, тобто емітерний і колекторний переходи увімкнені паралельно. Допустимий прямий струм при цьому виявляється найбільшим, а отже, найбільшою є і потужність, але збільшується також і сумарна бар'єрна ємність, що спричинює найменшу швидкодію.

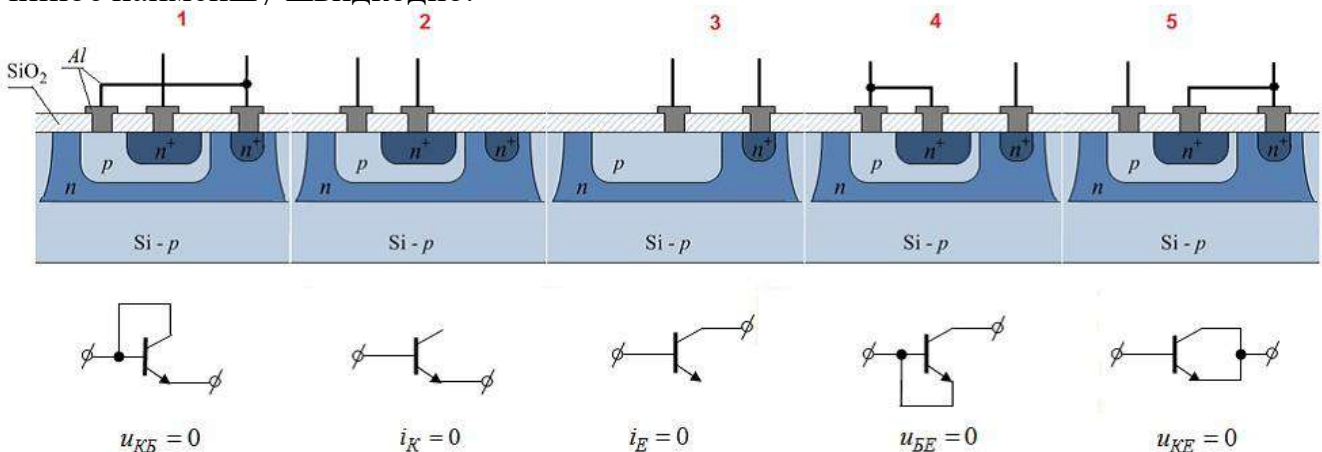


Рис. 7.14. Діодні структури в напівпровідникових ІМС

Технологія напівпровідникових ІМС заснована на легуванні напівпровідникової (кремнієвої) пластини по черзі донорними і акцепторними домішками, в результаті чого під поверхнею утворюються тонкі шари з різним типом провідності і ***p-n-переходи*** на границях шарів. Тому для ***створення резисторів*** використовують об'ємні опори однієї з областей транзисторної структури: емітера, бази або колектора. ***Резистор в інтегральному виконанні*** являє собою тонкий шар напівпровідника, до кінців якого приєднані два виводи (рис. 7.15).

Здебільшого в ***напівпровідникових ІМС*** застосовують ***резистори на основі базової області*** (рис. 7.15, а) з номіналами до 50 кОм. Високоомні резистори займають більшу площу, ніж база класичного біполярного транзистора. Щоб ізолювати резистор від підкладки, паразитний ***p-n-p-транзистор*** повинен знаходитися у режимі відсічки. З цією метою на електрод ***K*** від n-шару подають високий потенціал. Відхилення від номінального значення опору резистора становить 10-20 %. Колекторна область транзисторної структури характеризується найменшою концентрацією домішок. Тому колекторна область придатна для формування ***дифузійних резисторів з великим опором***, але через малу концентрацію домішок температурні коефіцієнти опору таких резисторів надто великі. Емітерна область містить найбільшу концентрацію домішок і має найменший питомий опір. Як наслідок, ***емітерні дифузійні резистори*** – це резистори з малим опором (одиниці і десятки омів) і малим температурним коефіцієнтом опору (0,01-0,02 % / °С).

Конденсатори в інтегральному виконанні характеризуються малими номіналами і низькою добротністю. В якості конденсаторів використовують зворотно увімкнені емітерні (рис. 7.16, а) чи колекторні ***p-n-переходи*** (рис. 7.16, б) стандартної транзисторної структури, тому формують конденсатори одночасно з виготовленням транзисторних структур. Дифузійні конденсатори працюють тільки за умови зворотної напруги на ***p-n-переході***. Якщо прикладається постійна напруга, то структура працює як конденсатор постійної ємності. Зважаючи на те, що бар'єрна ємність ***p-n-переходу*** нелінійна, конденсатор може працювати в якості конденсатора змінної ємності, якою можна керувати шляхом зміни постійного зміщення на переході. Діапазон номінальних значень ємності дифузійних конденсаторів, які можуть бути сформовані на відведених для них площах монокристала напівпровідника, визначається концентрацією домішок у прилеглих до ***p-n-переходу*** областях. Тому, бар'єрна ємність емітерного переходу (до 400 пФ) приблизно у шість разів перевищує ємність колекторного переходу, однак має меншу пробивну напругу. Іноді обкладки конденсатора створюють із колекторного шару і підкладки (рис. 7.16, в). Кращі параметри мають ***МДН-конденсатори*** (рис. 7.16, г). Нижньою обкладкою ***МДН-конденсатора*** є емітерний ***n⁺-шар***, діелектриком – шар ***SiO₂***, а верхньою обкладкою – металева плівка. Ємність такого конденсатора майже не залежить від величини і знака прикладеної напруги і змінюється до 650 пФ/см² з допуском ± 20 %.

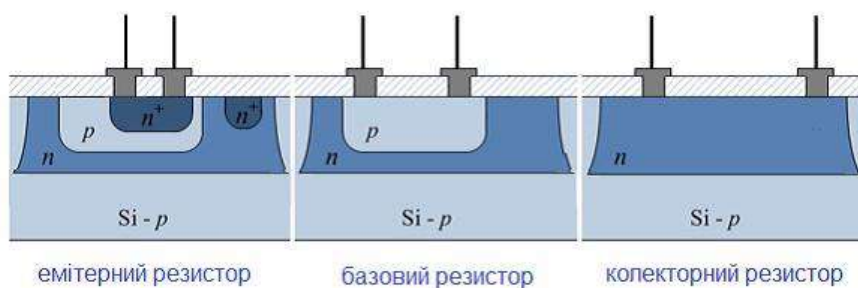


Рис. 7.15. Транзисторні структури, що використовують в якості резисторів ІМС

Характерною особливістю напівпровідникових ІМС є відсутність котушок індуктивності і, тим більше, трансформаторів. Це пояснюється тим, що досі не вдалося використати жодне явище у напівпровіднику, подібне до електромагнітної індукції. Тому при розробці ІМС намагаються реалізувати необхідну функцію без використання індуктивностей. Якщо ж котушка чи трансформатор принципово необхідні, їх доводиться використовувати як навісні елементи. Також можна створити еквівалент індуктивності, який складається із транзистора, резистора і конденсатора.

Варіантом епітаксіально-планарної технології є ізопланарна технологія, яка передбачає діелектричну ізоляцію окремих елементів ІМС і забезпечує більшу щільність пакування елементів. Технологічний процес має особливість: після наросування епітаксіального шару на поверхні створюють шар нітриду кремнію з вікнами (1 на рис. 7.17). Через вікна в плівці нітриду кремнію здійснюють травлення епітаксіального шару із кремнію *n*-типу майже до прихованого *n*⁺-шару та іонну імплантацію *p*⁺-областей, а потім проводять тривале низькотемпературне окиснення канавок (глибина травлення вибирається такою, щоб після окиснення поверхня підкладки була б рівною (2 на рис. 7.17). Після цього шар нітриду кремнію віддаляється і замість нього на поверхні створюється шар оксиду кремнію, через вікна в якому формується *n-p-n*-структура транзистора (3 на рис. 7.17) аналогічно до операцій у класичному варіанті епітаксіально-планарної технології (у результаті повторення операцій окиснення, селективного травлення на основі фотолітографії та дифузії домішок у кристал напівпровідника).

Технологія виготовлення структур "метал-діелектрик-напівпровідник" значно простіша від технології виготовлення біполярних інтегральних схем. Так, число основних технологічних операцій для виготовлення поширеного *МДН-транзистора* з індукованим каналом приблизно на 30 % менше, ніж при виготовленні *біполярних ІМС*. До того ж, елементи *МДН ІМС* не потребують спеціальної ізоляції через відсутність взаємодії. Це одна із важливих переваг *МОН ІМС*, яка веде до більшої щільності упакування: площа, яку займає транзистор, менша у 20 разів. *МДН-транзистори* виготовляють із застосуванням тих самих технологічних операцій, що і біполярні. Застосування ізопланарної технології, особливістю якої є

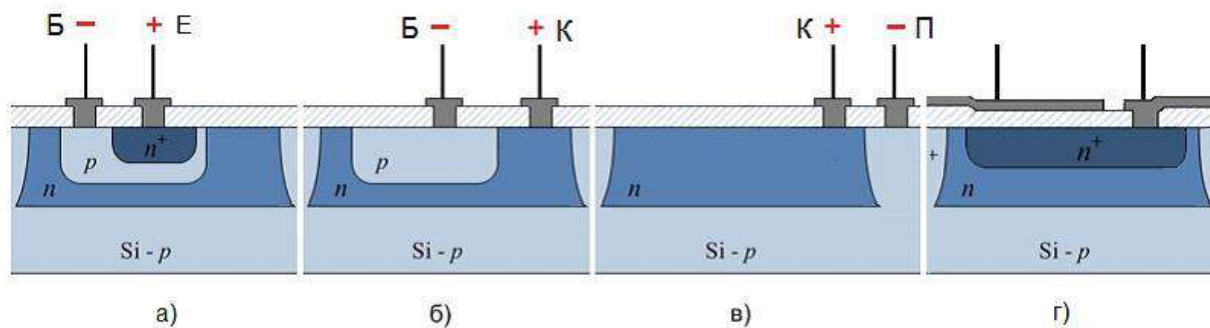


Рис. 7.16. Структури конденсаторів ІС на основі емітерного переходу (а), колекторного переходу (б), переходу між колектором і підкладкою (в), МДН-конденсатор (г)

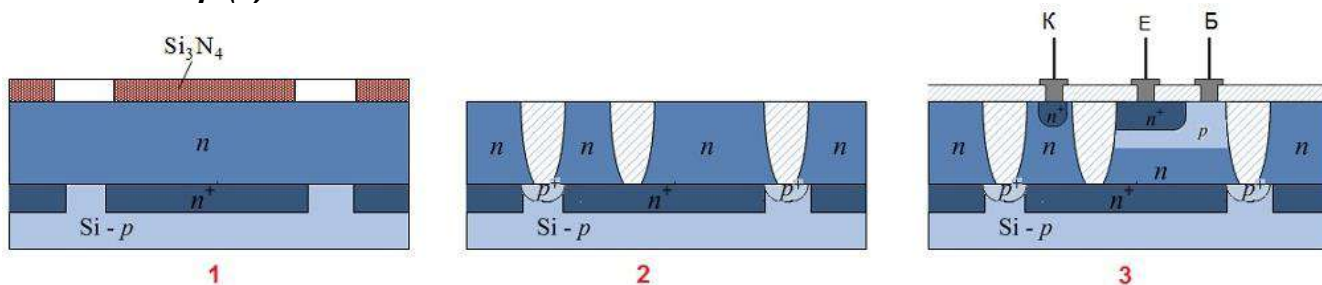


Рис. 7.17. Етапи технологічного процесу ізопланарної технології

ізоляція елементів товстим шаром оксиду кремнію, дає змогу спільно формувати на одній підкладці як біполярні, так і *МДП-структури*. Технологічний процес поетапного формування МДП-структури у кишнях складається з наступних основних операцій: 1) на поверхні кремнієвої підкладки *p-типу* формують маску з нітриду кремнію, через отвори в якій здійснюють дифузію іонів бору, в результаті чого формуються протиканальні *p⁺-області*; 2) окисненням через маску створюють розділові шари двоокису кремнію, після чого видаляють шар нітриду кремнію на поверхні, а потім іонним легуванням бору створюють шар з підвищеною концентрацією акцепторів, який необхідний для зниження порогового значення напруги; 3) формують тонкий підзатворний шар *SiO₂* і наносять на нього шар полікремнію (затвор); 4) іонним легуванням миш'яку формують *n⁺-області* витоку і стоку; 5) хімічним паровим осадженням наносять шар двоокису кремнію, формують в ньому вікна, напилують плівку алюмінію і методом фотолітографії створюють малюнок металевих провідників.

Розміри кристалів у сучасних *напівпровідникових ІМС* досягають 20×20 мм², а розміри фрагментів елементів *ІМС* складають соті і тисячні частки мікрметра (сучасні технології досягли 5 нанометрового рівня). Чим більша площа кристала, тим більш складну й багатоелементну *ІМС* можна на ньому розташувати. При одній і тій самій площі кристала намагаються збільшити кількість інтегральних елементів, зменшуючи їх розміри. Кількісно складність ІМС прийнято характеризувати рівнем інтеграції, тобто числом *N* елементів (найчастіше транзисторів) на кристалі. Десятковий логарифм від рівня інтеграції, округлений до найближчого більшого цілого числа, називають ступенем інтеграції $k = \lg N$. *ІМС* з кількістю елементів до 10 – це *ІМС 1-го ступеня інтеграції*; *ІМС* з кількістю елементів від 11 до 100 – це *ІМС 2-го ступеня інтеграції* і т.п.

Залежно від значення ступеня інтеграції ІМС називаються по-різному:

$k \leq 2$ ($N \leq 100$) – інтегральна схема малого ступеня інтеграції (ІС) – Small Scale Integrated Circuit (SSI);

$2 \leq k \leq 3$ ($N \leq 1000$) – інтегральна схема середнього ступеня інтеграції (СІС) – Medium Scale Integrated Circuit (MSI);

$3 \leq k \leq 5$ ($N \leq 10^5$) – інтегральна схема великого ступеня інтеграції (ВІС) – Large Scale Integration (LSI);

$5 \leq k \leq 7$ ($N \leq 10^7$) – інтегральна схема надвеликого ступеня інтеграції (НВІС) – Very Large Scale Integration (VLSI);

$7 \leq k \leq 9$ ($N \leq 10^9$) – інтегральна схема ультравеликого ступеня інтеграції (УВІС) – Ultra Large Scale Integration (ULSI);

$k > 9$ ($N > 10^9$) – *гігавелика ІС (ГВІС)*.

Класичні приклади інтегральних схем малого ступеня інтеграції ІС – це логічні вентиля, тобто електронні схеми, що виконують найпростіші логічні функції *I*, *АБО*, *НІ*, *АБО-НІ*, *І-НІ*. Тригери, тобто цифрові пристрої, вихідні сигнали яких визначаються вхідними і можуть зберігатися після закінчення вхідного збудження, містять 8-10 логічних вентилів і їх відносять до *СІС*. До інтегральних схем середнього ступеня інтеграції належать суматори, лічильники, *ОЗП* (оперативні запам'ятовувальні пристрої) і *ПЗП* (постійні ЗП) ємністю 256-1024 біт та інші. Приклади *ВІС* – це арифметико-логічні і керуючі пристрої *ЕОМ*, цифрові фільтри. Наприклад, мікрокалькулятори будуються на єдиній *ВІС*, яка містить близько 45000 елементів. Найбільший ступінь інтеграції властивий однорідним структурам *ЗП*.

Функціональну складність інтегральних схем і рівень технології їх виготовлення прийнято характеризувати щільністю пакування інтегральних елементів.

нтів у заданому об'ємі пристрою чи на заданій поверхні. Цей показник доходить до сотень мільйонів активних елементів на квадратний міліметр.

Основні переваги напівпровідникових ІМС – це мала потужність, що споживається – до 200 мВт (для логічних ІМС – до 100 мкВт), а також висока тривалість роботи – до 10^8 годин.

Конструктивно напівпровідникові ІМС можуть бути безкорпусними чи можуть бути розміщені в закритих корпусах: пластмасових, якщо вони призначені для роботи в полегшених умовах, або в герметичних металоскляних корпусах, якщо передбачаються важкі умови експлуатації. Корпуси мають багато виводів: у простих ІС – від 8 до 14, а у **ВІС (НВІС)** кількість зовнішніх виводів сягає сотень і більше. Корпуси мають прямокутну або округлу форму, виводи виконують в площині корпусу чи перпендикулярно до неї (рис. 7.18).

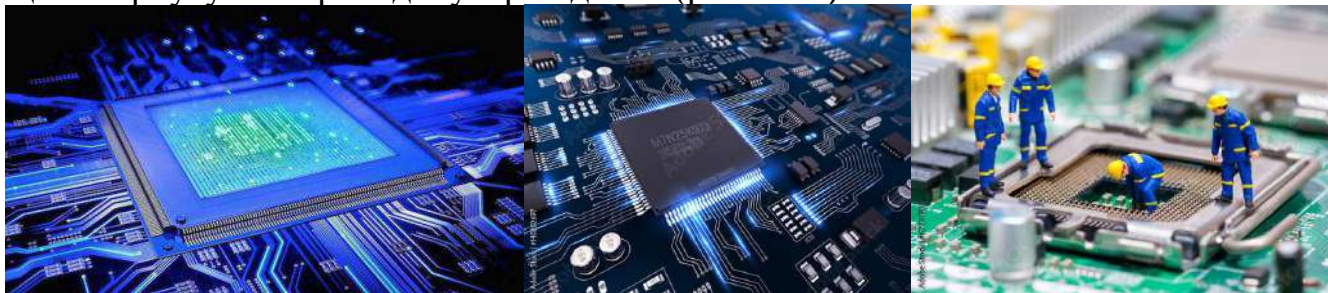


Рис. 7.18. Надвеликі та ультравеликі інтегральні мікросхеми

7.3. Плівкові інтегральні мікросхеми

Плівкова ІС – це мікросхема, елементи якої і їх між'єднання виготовлені у вигляді різного роду плівок, що нанесені на поверхню ретельно відшліфованої і відполірованої діелектричної підкладки з ситалу чи кераміки, товщиною 0,5-1,0 мм. Ситал являє собою кристалічний різновид скла з дрібнозернистою структурою (звичайне скло – аморфний матеріал, а в процесі виготовлення ситалу в скло вводять центри кристалізації – порошки оксидів лужних металів). Кераміка – це суміш оксидів в кристалічній і склоподібній фазах. Підкладки з цих матеріалів мають не тільки достатню механічну міцність, здатність до механічної обробки (різання) та високий опір ізоляції, але й великий коефіцієнт теплопровідності для ефективної передачі теплоти від тепловиділяючих елементів, тому виконують водночас функції тепловідводів. Стан поверхні підкладки впливає на параметри плівкових елементів: шорсткість поверхні зменшує товщину плівок у місцях мікронерівностей, тому при товщині плівок близько 100 нм допускається висота мікронерівностей приблизно 25 нм; при товщині плівок 10-50 мкм – до 1-2 мкм. Коли потрібно забезпечити хороший тепловідвід і високу міцність застосовують металеві підкладки на основі алюмінію, покриті шаром анодного оксиду. Активні елементи (діоди, транзистори) не виготовляють плівковими, тому що властивості таких елементів значно погіршуються. Таким чином, плівкові ІС містять тільки пасивні елементи і являють собою, зазвичай, РС-ланцюги або будь-які інші схеми. Ізолювати плівкові елементи один від одного немає потреби, тому що їх виконують на діелектричній підкладці.

Залежно від способу утворення плівок розрізняють тонкоплівкові ІС (товщина плівок до 1-2 мкм) і товстоплівкові ІС (товщина плівок від 10-20 мкм і більша). Різниця між цими ІС полягає не стільки в товщині плівок, скільки в різних технологіях нанесення плівок.

Тонкоплівкові елементи ІС створюють локальним (через маску) термічним або іонно-плазмовим напиленням і електрохімічним осадженням різних матеріалів

на діелектричну підкладку. Для формування конфігурацій провідного, резистивного і діелектричного шарів використовують різні методи:

1. Трафаретний (масковий): найпростіший метод отримання заданої конфігурації плівкових елементів, при якому нанесення кожного шару тонкоплівкової структури здійснюється через накладний трафарет термічним випаровуванням у вакуумі або іонно-плазмовим розпиленням. Після нарощування чергової плівки змінюють хімічний склад речовини, що осаджується, і тим самим електрофізичні властивості наступної плівки. Конфігурація кожної наступної плівки визначається маскою. Таким чином, по чергово отримують провідні, резистивні та діелектричні шари. Трафаретний варіант – найдешевший, але помітно поступається фотолітографічному за роздільною здатністю: під час напилення плівок відбувається напилення на самі трафарети, що змінює їхню товщину і поступово приводить до непридатності.

2. Фотолітографічний: плівку наносять на всю поверхню підкладки, після чого витравлюють з певних ділянок. Різновиди цього методу – це електронно-променевий метод (плівку видаляють шляхом випаровування під дією електронного променя) і лазерний (плівку видаляють шляхом випаровування під дією лазерного променя).

3. Комбінований: поєднання трафаретного і фотолітографічного методів.

Наприклад, з урахуванням контактних площадок з електропровідної тонкої плівки структуру резистора можна розглядати як двошарову. При цьому можливі три технологічні варіанти для створення резистора з контактними площадками:

За трафаретним методом: напилення резистивних елементів через трафарет, напилення провідних елементів через трафарет (рис. 7.19).

За фотолітографічним методом: напилення суцільної резистивної плівки, напилення суцільний провідної плівки, фотолітографія по провідній плівці, фотолітографія по резистивній плівці. Це означає, що спочатку на підкладку напилюють суцільну резистивну плівку, а зверху – суцільну провідну. Потім через вікна першої маски травлять провідний шар і створюють контактні площадки, а через вікна другої маски отримують готові конфігурації резисторів. Певна річ, важливо, щоб травильник, який діє на провідний шар, не діяв на резистивний і навпаки.

За комбінованим методом: напилення суцільний резистивної плівки, напилення провідних елементів через трафарет, фотолітографія по резистивній плівці.

Плівкові резистори являють собою тонкі плівки високоомного матеріалу певної конфігурації, на кінцях яких напилені металеві плівки, що з'єднують резистор з іншими елементами. Для збільшення опору роблять плівкові резистори зигзагоподібної форми. На рис. 7.20 наведені конфігурації плівкових резисторів з малим (рис. 7.20, а) та великим (рис. 7.20, б) опорами. Матеріал, що використовується для резистивних плівок, повинен забезпечувати можливість отримання широкого діапазону номінальних значень опору, мати низький температурний коефіцієнт опору, високу корозійну стійкість і стабільність параметрів у часі. **Метод напилення** цих матеріалів – **термічний (вакуумний)**. Такі резистори у вигляді тонких плівок металу (чистого хрому, танталу, паладію), металевого сплаву (ніхрому: Ni – 80 %, Cr – 20 %) або металокераміки, яка складається з частинок металу і діелектрика (наприклад, кермету: Cr – 50 %, монооксиду кремнію SiO – 50 %), наносять безпосередньо на ізоляційну основу. Найбільшого поширення набули ніхромові резистивні плівки через їхню стабільність та можливість їх створення з малим температурним коефіцієнтом опору. Після осадження плівки ніхрому на діелектричну основу здійснюють термообробку шляхом відпалу плівки на повітрі. При цьому ніхромові плівки покриваються шаром оксиду, який значно покращує стабільність

плівкового резистора. При створенні плівкових резисторів на діелектричній підкладці не утворюється паразитних елементів, які наявні в напівпровідникових інтегральних мікросхемах з дифузійними резисторами.

При **проектуванні інтегральних резисторів** виникає завдання з визначення робочих розмірів для кожного резистора з таким розрахунком, щоб **сумарна площа, яку займає резистор, була мінімальною**. Вихідними даними для проектування є: номінальні значення опорів резисторів, потужність розсіювання; граничні допустимі відхилення опору і температурний діапазон експлуатації. Конкретні метали, марки резистивних сплавів та металокераміки характеризуються значеннями питомого поверхневого опору, допустимої питомої потужності розсіювання, температурним коефіцієнтом опору і коефіцієнтом старіння. Залежно від товщини, ширини і довжини резистивної смуги, а також питомого опору матеріалу у **тонкоплівкових резисторів** питомий поверхневий опір може становити від 10 до 300 Ом на квадрат. Реалізуються опори від 10 Ом до 1 МОм з розкидом 3-10 % і номінальною потужністю до 0,2-3 Вт/см².

Плівкові провідники та контактні площадки призначені для об'єднання елементів гібридних мікросхем в єдину електричну схему. У **місцях з'єднання плівкового провідника 1** (рис. 7.21) з іншим плівковим елементом, наприклад **резистором 2**, утворюють контактний перехід. Для приєднання зовнішніх виводів мікросхеми та електродів навісних елементів плівкові провідники закінчуються **контактними площадками 3**. Плівкові провідники виготовляють із матеріалів з високою електропровідністю, доброю адгезією з поверхнею підкладки, високою корозійною стійкістю (алюміній, мідь, золото з підшаром хрому).

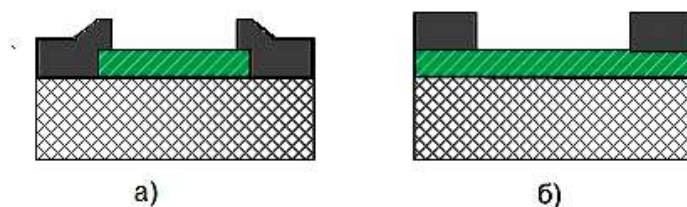


Рис. 7.19. Структури плівкових резисторів: виготовлених за трафаретною технологією (а) і комбінованою технологією (б)

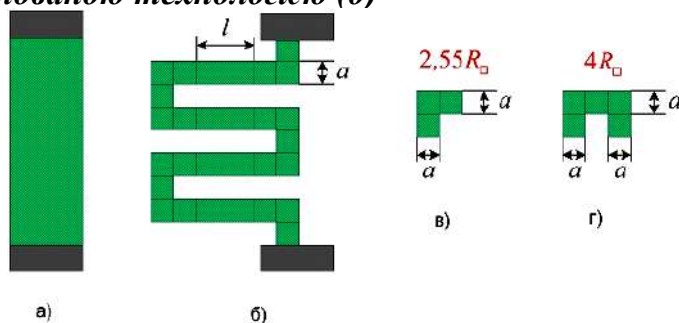


Рис. 7.20. Конструкції плівкових резисторів: прямолінійної конфігурації (а), у формі меандру (б), Г-подібна ділянка (в), П-подібна ділянка (г)

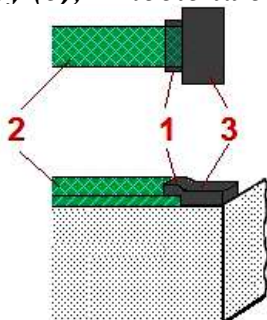


Рис. 7.21. З'єднання плівкового резистора з контактною площиною

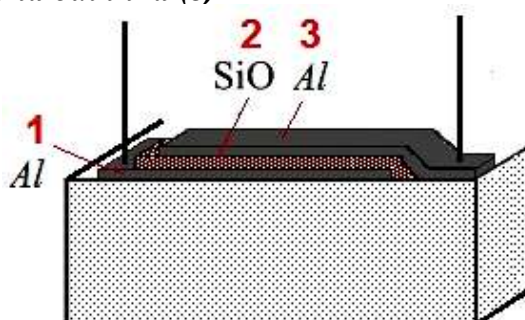


Рис. 7.22. Структура плівкового конденсатора

Плівкові конденсатори конструктивно представляють собою тришарову структуру метал-діелектрик-метал і складаються з нижньої і верхньої обкладок, розділених шаром діелектричного матеріалу. Складові конденсатора формують за три операції вакуумного напилення. **Нижня провідна обкладка 1** наноситься на підкладку і продовжується у вигляді з'єднувальної провідної смужки. На обкладку наноситься **діелектрична плівка 2**, а зверху напилюється **верхня провідна обкладка 3**, яка також переходить у з'єднувальну провідну смужку (рис. 7.22). Такий **плівковий конденсатор** називають **одношаровим**. Для обкладок конденсаторів використовують алюміній, причому перед напиленням нижньої обкладки доводиться напилювати тонкий шар сплаву **CrTi**, який забезпечує достатню адгезію алюмінію з підкладкою. Для діелектричного шару плівкових конденсаторів використовують монооксиди кремнію **SiO** та германію **GeO**, а також оксиди алюмінію **Al₂O₃**, танталу **Ta₂O₅** і титану **TiO₂**, які отримують методом анодування нижніх металевих обкладинок. Питома ємність таких конденсаторів залежно від площі обкладок, товщини і діелектричної проникності діелектрика може становити від десятків до тисяч пікофарад на квадратний міліметр, і відповідно до цього при площі конденсатора в 25 мм² досягаються номінальні ємності від сотень до десятків тисяч пікофарад. Точність виготовлення $\pm 15\%$. Високі питомі ємності мають титанати барію і кальцію. Для отримання більшої ємності або для зменшення площі, яку займає конденсатор на підкладці, можна виготовляти **багатошарові плівкові конденсатори**, секції яких мають "поверхи" – одна секція над ін. Проте, створення багатоповерхових конденсаторів ускладнює процес їх виготовлення, підвищує вартість, зменшує надійність, збільшує % браку через збільшення крайового ефекту, зменшення щільності та електричної міцності верхніх діелектричних шарів.

Плівкові котушки індуктивності виконують шляхом напилення на підкладку металевої плівки у вигляді одновиткових або багатовиткових плоских спіралей круглої або прямокутної форми (рис. 7.23). Матеріалом для плівкових котушок слугують алюміній, рідше срібло, мідь, латунь, нікель. Ширина провідних смужок і просвітів між ними зазвичай становить кілька десятків мікрометрів. При цьому виходить питома індуктивність 10-20 нГн/мм². На площі 25 мм² можна отримати індуктивність до 0,5 мкГн. Зазвичай такі котушки робляться з індуктивністю не більше декількох мікрогенрі і невеликою добротністю (у межах 50-120) для роботи на частотах, більших за 50-100 МГц. Збільшити індуктивність можна нанесенням на котушку феромагнітної плівки, яка буде виконувати функцію осердя. Певні труднощі виникають при формуванні вивода від внутрішнього кінця плівкової котушки: доводиться наносити на відповідне місце котушки діелектричну плівку, а потім поверх цієї плівки наносити металеву плівку – вивід.

Плівкові індуктивні елементи широко поширені в **аналогових ІМС**, де входять до складу коливальних контурів автогенераторів, смугових фільтрів, кіл корекції частотних характеристик та інших. Товщина плівкової спіралі залежить від робочої частоти і визначається глибиною проникнення електромагнітної хвилі в матеріал плівкового провідника. Для виготовлення плівкових спіралей застосовують матеріали з високою електропровідністю.

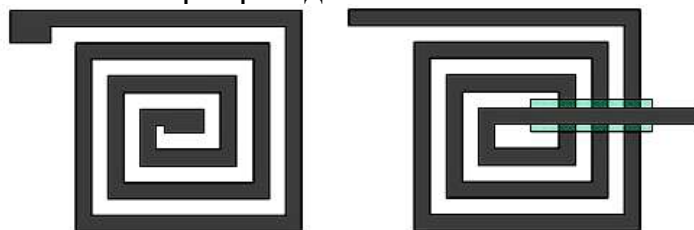


Рис. 7.23. Плівкова котушка індуктивності: з плівковим виводом від внутрішнього кінця (а) і без (б)

Технологія товстоплівкових ІС полягає у локальному нанесенні на діелектричну підкладку напівпровідникових паст-склоемалей різних складів через трафаретну маску з наступним їх підсушуванням і впалюванням у підкладку. Етап термообробки пасти спричинює завищені вимоги за механічними та тепловими характеристиками до матеріалу підкладки: міцність при статичному вигині не меншу за 140 МПа, коефіцієнт термічного лінійного розширення в інтервалі температур 20-1000 °С не більший від $80 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$, нагрівостійкість до 1200 °С. Для виготовлення товстоплівкових елементів застосовують пасти, що складаються з порошку скла, наповнювача і органічної зв'язки. Тип наповнювача визначається призначенням пасти. Розрізняють **провідні, діелектричні та резистивні пасти**. Наприклад, в якості наповнювача резистивних паст застосовують срібло, паладій та їхні сплави. Плівки набувають розрахункової товщини відразу, а не поступово – шар за шаром – як при тонкоплівковій технології. У порівнянні з тонкоплівковою технологією щільність пакування елементів менша через більшу ширину ліній, а розкид параметрів – більший через неконтрольовану товщину плівок. Стабільність елементів у часі гірша, ніж у тонкоплівкових.

Технологічний маршрут виробництва товстоплівкових ІС. Після очищення і відпалу підкладки на неї наносять і впалюють з обох сторін провідникову пасту для формування провідників, контактних площадок і нижніх обкладок конденсаторів, після чого формують діелектрик для конденсаторів і перетинів провідників. Верхні обкладки і плівкові перемички виготовляють з однієї пасти. При підгонці номіналів конденсаторів застосовують повітряно-абразивну підгонку шляхом видалення невеликого шару з верхньої обкладки конденсатора. Операція дуже складна і трудомістка. Останніми формують резистори, що мають найнижчу температуру впалювання, і здійснюють їхню підгонку або шляхом зміни конфігурації елементів, або відпалом. Випалювання лазером плівки під кутом (лазерна підгонка) збільшує номінал резистора за рахунок зменшення його ширини. Відпал дозволяє як збільшувати, так і зменшувати опір за рахунок зміни властивостей резистивної плівки. При виготовленні пасивних елементів за товстоплівковою технологією похибка номіналів становить $\pm 10\%$, після підгонки – $\pm 2\%$. Наприкінці приєднують зовнішні виводи і здійснюють герметизацію обпресуванням з використанням пластмаси, після чого виконують обрізання плати. Зважаючи на механічну міцність підкладки, можливим є просте і надійне **кріплення зовнішніх виводів** шляхом **розклепання** (рис. 7.24, а), **підгону** (рис. 7.24, б) з наступним можливим обслуговування місця з'єднання або **безпосереднє зварювання зовнішніх виводів з контактними площинками** (рис. 7.24, в) з огляду на добру адгезію плівок.

Підвищена експлуатаційна надійність **товстоплівкових елементів** дає змогу спростити і **герметизацію мікросхем**: після контролю на функціонування інтегральна схема може бути встановлена у дюралевий корпус і залита з боку виводів епоксидним компаундом або безпосередньо опресована полімером у прес-формі.

Функції, які виконують чисто **плівкові ІС**, дуже обмежені внаслідок відсутності активних елементів, оскільки активні тонкоплівкові елементи досі серійно не виготовляються. З метою розширення функцій пасивні елементи доповнюють навісними активними елементами, які розташовують на цій самій підкладці і з'єднують з плівковими елементами. Виходить **ІС**, яку називають **гібридною**.

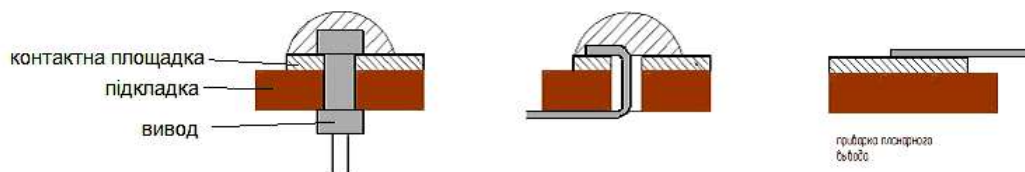


Рис. 7.24. Електричні з'єднання виводів з контактними площинками у товстоплівкових ІС: розклепання штиркового виводу (а), підгін (б) і безпосереднє зварювання планарного виводу (в)

7.4. Гібридні та суміщені інтегральні мікросхеми

Гібридна ІС (ГІС) – це мікросхема, яка являє собою комбінацію плівкових пасивних елементів і навісних активних елементів (напівпровідникових приладів без корпусів), розміщених на поверхні спільної діелектричної підкладки із силікату або кераміки (рис. 7.25, 7.26). Плівкові елементи (резистори, конденсатори, спіралі котушок індуктивності, провідники і контактні площадки) виконують за тонкоплівковою та товстоплівковою технологіями. Дискретні компоненти, які входять до складу ГІС, називають навісними, підкреслюючи цим відокремлення їх від основного технологічного циклу. Це, в першу чергу, мініатюрні напівпровідникові діоди і транзистори, безкорпусні напівпровідникові ІС та БІС. Навісними можуть бути і деякі пасивні елементи, наприклад, мініатюрні конденсатори з великою ємністю, дискретні індуктивні елементи, мініатюрні трансформатори, потужні резистори. Електричні зв'язки між елементами здійснюються за допомогою плівкового і дріт'яного монтажу. Для захисту від зовнішніх впливів **гібридні ІС** герметизують пластмасою (за умови, що зовнішні виводи виведені на одну сторону мікросхеми) або вміщують у герметичні металеві, скляні і керамічні корпуси.

Щільність пакування ГІС до 150 ел./см², а ступінь інтеграції звичайно середній і малий. Для збільшення щільності пакування розроблені спеціальні конструктивні варіанти навісних елементів, які сумісні з плоскою підкладкою плівкової мікросхеми. **Компоненти ГІС** можуть мати жорсткі кулькові та балкові виводи і звичайні гнучкі виводи. Кулькові виводи (рис. 7.27, а) являють собою кульки

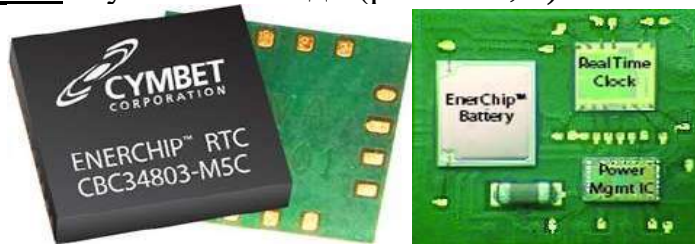


Рис. 7.25. Гібрида інтегральна мікросхема – зовнішній вигляд та будова

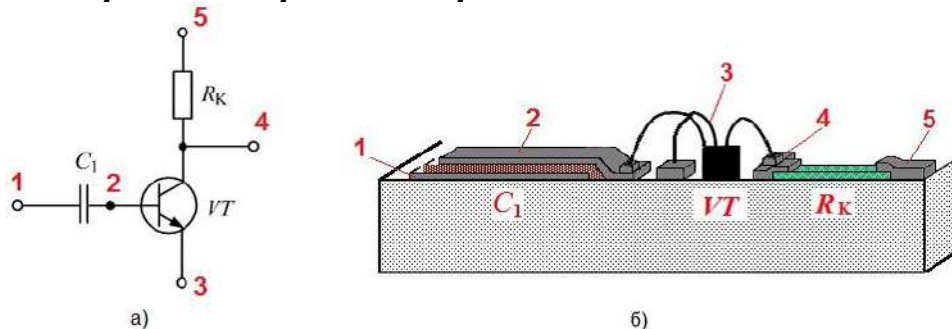


Рис. 7.26. Фрагмент гібридної ІС: електрична схема (а) і відповідна структура (б)

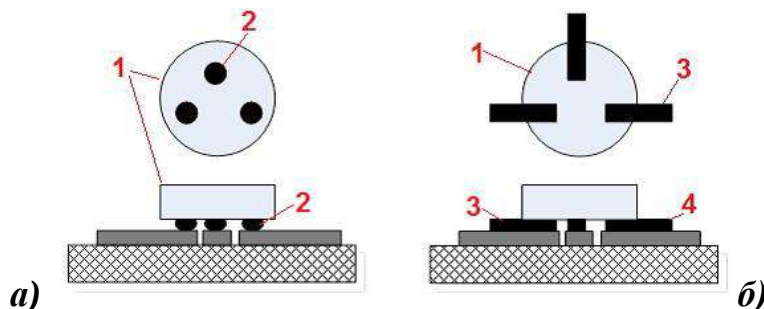


Рис. 7.27. Монтаж транзистора (1) термокомпресійним зварюванням кулькових (2) і балкових (3) виводів з контактними площадками (4)

діаметром 50-100 мкм із міді, золота, сплаву **Sn-Sb**. Із того самого матеріалу на підкладці виготовлені стовпчики висотою 10-15 мкм і діаметром 150-200 мкм. Кульки суміщаються зі стовпчиками і з'єднуються методами термокомпресії (притискання виводів навісного елемента при високій температурі), ультразвукового зварювання чи променем лазера. Такий метод монтажу дає змогу автоматизувати процес і виконувати його груповим методом. Щоб полегшити контроль за операціями суміщення кульок і стовпчиків, використовують транзистори з більш коштовними балочними виводами, які продовжені за межі елемента і нависають з боків на 100-150 мкм, звідси і назва – **балки** (рис. 7.27, б). Виготовлення кулькових і балкових виводів складніше і дорожче, ніж провідникових, але забезпечує суттєве спрощення та здешевлення складальних операцій, а також помітне підвищення виходу придатних **ГІС** та їхню надійність.

До переваг ГІС потрібно віднести низьку вартість підкладок і можливість застосування різноманітних дискретних приладів. Активні елементи в гібридних мікросхемах мають кращі параметри, ніж у напівпровідникових, і можуть працювати при більших напругах і потужностях. Можна суміщати активні елементи, що виконані за різними технологіями. З іншого боку, **ГІС** забезпечує різновеликі номінали резисторів і конденсаторів, недосяжні в **напівпровідникових ІС**, і їх прецизійність. При гібридному виконанні можна забезпечити виготовлення виробів досить великої потужності, що важливо при створенні аналогових пристроїв, керуючих потужними вихідними колами. Таким чином, **ГІС** – це інтегральні схеми, які порівняно швидко можна спроектувати до розв'язування спеціальних задач і виготовити дешевшими, ніж напівпровідникові ІС аналогічного призначення. Тому такий конструктивно-технологічний варіант виготовлення виробів мікроелектроніки постійно удосконалюється і є широко поширеним. Недоліком є необхідність додаткових контактних площадок для монтажу навісних елементів і напівпровідникових ІС. Висока надійність гібридних ІС досягається лише за допомогою точного проведення технологічного процесу та ефективного контролю. Суккупність технологічних операцій, які визначають технологічний маршрут виробництва ГІС, включає в себе підготовку поверхні підкладки, нанесення плівок на підкладку і формування конфігурацій тонкопліткових елементів, монтаж і збірку навісних компонентів, захист і герметизацію **ГІС** від зовнішніх впливів. Важливе значення при створенні **ГІС** мають контрольні операції, а також підготовка виробництва: виготовлення комплексу масок і фотошаблонів, контроль компонентів **ГІС** і вихідних матеріалів. Схема технологічних процесів виготовлення гібридних ІС наведена на рис. 7.28.

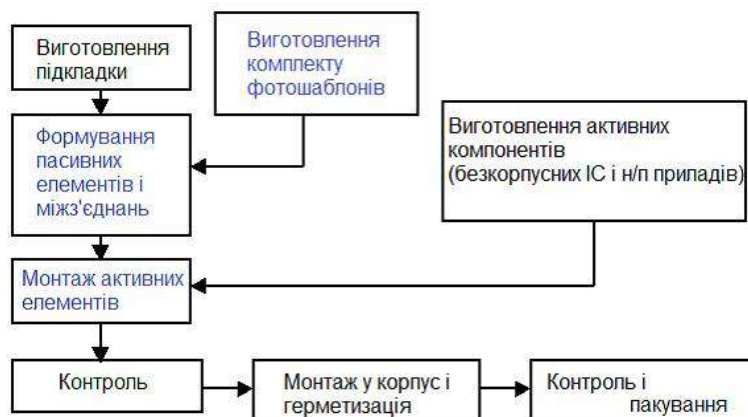


Рис. 7.28. Схема технологічного процесу виготовлення гібридних ІС

Розрізняють тонкоплівкові та товстоплівкові ГІС (рис. 7.29) залежно від технології виготовлення плівкових елементів. **Технологічні маршрути виробництва ГІС** різняться для **тонкоплівкових ІС** та **товстоплівкових ІС** на етапі формування пасивних елементів і з'єднань. Наприклад, на етапі формування пасивних елементів і міжз'єднань **тонкоплівкової ІС** за трафаретним методом на діелектричну підкладку тонкоплівкової гібридної ІС наносять через трафарет резистивнісмужки з високоомного матеріалу (R_K на рис. 7.26). Потім через інший трафарет розпиленням металу, що має високу електропровідність, формують нижні обкладки конденсаторів (C_1 на рис. 7.26), міжз'єднання та контактні площадки. Через третій трафарет наносять діелектричні плівки конденсаторів і, насамкінець, через четвертий трафарет наносять останній шар – верхні обкладки конденсаторів. Наступним етапом є монтаж активних елементів. Для схеми на рис. 7.26 це означає, що транзистор **VT** приклеюють до підкладки і дротяними виводами приєднують до відповідних контактних площадок.

Спільним для всіх технологічних процесів виробництва **ГІС** є застосування групового методу, при якому на одну підкладку наносять до 16-18 ідентичних груп елементів і міжз'єднань, потім підкладку розрізають на частини – плати, кожна з яких містить елементи однієї **ГІС**. Відсоток виходу придатних **ГІС** – 60-80 %, що набагато більше порівняно з виготовленням **напівпровідникових ІС** (5-30 %).

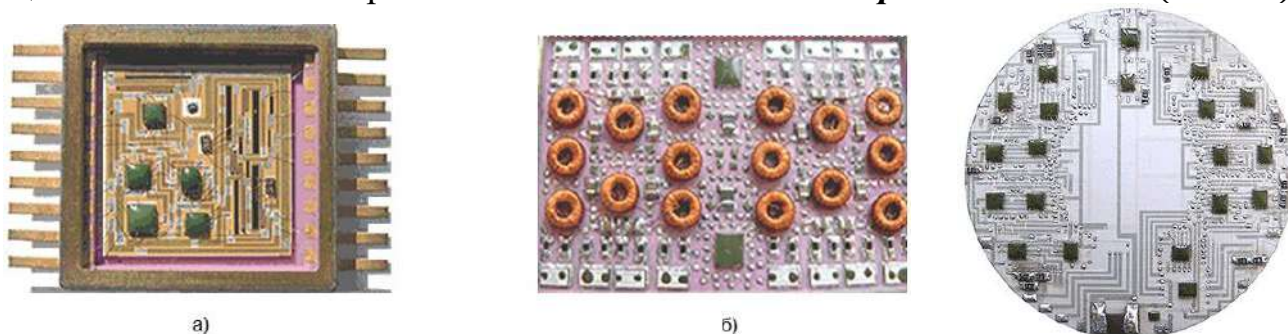


Рис. 7.29. Гібридні мікросхеми, які були виготовлені за тонкоплівковою технологією (а) та товстоплівковою технологією (б)

Степінь інтеграції ГІС визначається не таким способом, як для **напівпровідникових ІС**. Термін **велика ГІС (ВГІС)** означає, що до складу навісних елементів **ГІС** входять не окремі безкорпусні транзистори і діоди, а цілі **напівпровідникові ІС** і **ВІС**. **ВГІС** мають, як правило, багатошарову металізацію, як і **напівпровідникові ВІС**. Вживають терміни: комутаційна плата – для сукупності пасивних плівкових елементів; мікрозбірка – за наявності **ВГІС** на комутаційній платі. Функціональна складність мікрозбірки набагато вища за **ВІС** і **НВІС**. Із мікрозбірок можна монтувати надскладні вузли електронної апаратури або навіть повністю весь пристрій. Особливість мікрозбірок полягає в тому, що вони є виробами приватного застосування, тобто виготовляються для конкретного типу апаратури, в той час як звичайні **ГІС** є виробами загального застосування, що придатні для різних видів апаратури. Іноді мікрозбірками називають набори декількох активних або пасивних елементів, що знаходяться в одному корпусі і мають самостійні виводи. Такі набори ще називають матрицями. У аналоговій апаратурі гібридні інтегральні схеми порівняно з напівпровідниковими мікросхемами мають більш широкі схемотехнічні можливості завдяки використанню різноманітних навісних компонентів (напівпровідникових ІС, транзисторів, конденсаторів з великою ємністю, інду-

ктивних котушок, високоомний і стабільних резисторів та інших). **ГІС** дають змогу реалізувати широкий клас функціональних електронних схем – підсилювачів, перетворювачів, комутаторів, вторинних джерел живлення, залишаючись при цьому економічними в умовах серійного і навіть дрібносерійного виробництва. Особливо економічно доцільна реалізація функціональних елементів у вигляді **ГІС** при випуску пристроїв та апаратури малими серіями.

Суміщена ІС – це мікросхема, активні елементи якої виконані в приповерхневому шарі напівпровідникового кристала (як у **напівпровідникової ІС**), а пасивні нанесені у вигляді плівок на попередньо ізольовану поверхню того ж самого кристала (як у **плівкової ІС**) (рис. 7.30).

Технологія виготовлення напівпровідникових ІС передбачає багатократні операції оксидування поверхні підкладки і металізацію, тобто етапи створення тонких діелектричних плівок SiO_2 і напilenня металів для з'єднань елементів. Очевидним є доповнення технології етапом формування плівкових пасивних елементів (резисторів і конденсаторів), що значно розширює множину номіналів елементів, покращує їхні характеристики та усуває небажані гальванічні та ємнісні зв'язки значної частини елементів (ізоляція оксидом кремнію замість ізоляції зворотно зміщеними зміщеного **p-n-переходами**). На ряду з оптимізацією параметрів елементів **ІС** спостерігається зменшення відсотку виходу придатних мікросхем (тих, що пройшли контроль) внаслідок збільшення кількості технологічних операцій. **Суміщені ІС** мають переваги тоді, коли необхідні великі номінали і висока стабільність опорів і ємностей. Ці вимоги легше забезпечити за допомогою плівкових елементів, ніж напівпровідникових.

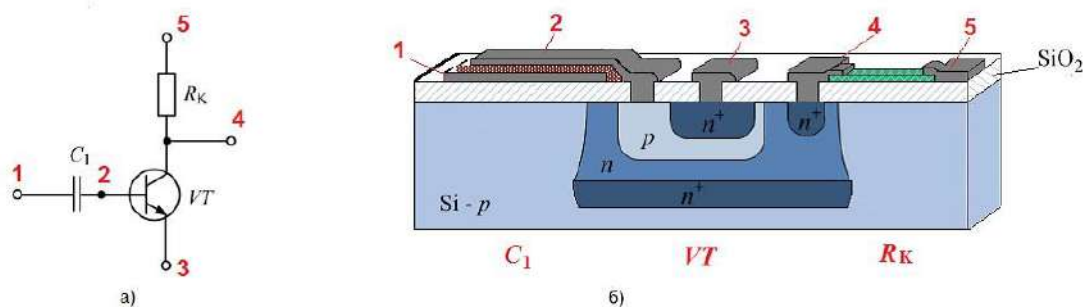


Рис. 7.30. Фрагмент суміщеної ІС: електрична схема (а) і відповідна структура (б)

Лекція № 8

Тема: "Основи функціональної елементної бази ЕОМ"

ПЛАН

- 8.1. Представлення і обробка інформації в ЕОМ.
- 8.2. Логічні елементи, їх типи та характеристики.
- 8.3. Зовнішня пам'ять комп'ютера.
- 8.4. Блок живлення комп'ютера.

8.1. Представлення і обробка інформації в ЕОМ

8.1.1. Дві форми подання інформації

Як відомо, сучасні ЕОМ можуть вирішувати самі різноманітні завдання. Для цього лише треба за допомогою програми "навчити" ЕОМ алгоритму вирішення тієї чи іншої задачі, ввести в неї початкові дані. Програма ж записується на алгоритмічній мові, яка досить близька до природної мови (особливо англійської). Однак ЕОМ не розуміє не тільки природної мови, а й алгоритмічної. Для розшифровки тексту програми, написаної на алгоритмічній мові, в машині повинна знаходитися спеціальна програма *транслятор* (від англ. translate – переводити), яка переводить текст вихідної програми з алгоритмічної мови на мову ЕОМ. А як же виглядає мова ЕОМ?

Обчислювальна машина – це технічний пристрій, в якому інформація про вихідні дані розв'язуваної задачі, правила її розв'язку (алгоритм), і результати обчислень повинна задаватися у вигляді зміни певних фізичних величин:

1) кутів повороту або переміщень (як, наприклад, для "передачі інформації" телевізору про зменшення гучності або яскравості);

2) намагніченості матеріалу (як, наприклад, для відтворення мелодії за допомогою магнітофона або збереження даних про атестацію студентів з дисциплін навчального плану на магнітному диску);

3) освітленості екрану (дисплею) або фотодатчика (введення інформації з перфострічки або перфокарт).

У минулі століття, коли людство не знало про електричні та магнітні явища або ще не вміло їх використовувати, найбільш доступною, а отже, і зручною була механічна форма подання інформації в обчислювальних пристроях. В арифмометрах операції над числами виконувалися за допомогою коліс, які при додаванні одиниці поверталися на 36° і за допомогою штифта приводили в рух наступне по старшинству колесо всякий раз, коли цифра 9 переходила до цифри 0 (накопичувався десяток). Однак механічні пристрої громіздкі, дорогі і занадто інерційні (з їх допомогою неможна побудувати універсальні і швидкодіючі обчислювальні машини). Тому зараз у всіх обчислювальних машинах в якості основної форми подання інформації служать електричні сигнали (найчастіше – певні значення напруги постійного струму). Для передачі електричних сигналів потрібні лише дроти, ці сигнали легко перетворювати за допомогою різних напівпровідникових схем.

При використанні в якості носія інформації напруги постійного струму можливі дві форми подання чисельного значення якої-небудь змінної, наприклад, X :

1) у вигляді одного сигналу – значення напруги постійного струму, яке можна порівняти з величиною X (аналогічно їй). Наприклад, при X =тисячі вісімсот сорок п'ять одиниць на вхід обчислювального пристрою можна подати напругу 1,845 В

(масштаб уявлення 0,001 В / од.) або 9,225 В (масштаб уявлення 0,005 В / од.);

2) у вигляді декількох сигналів – кількох значень напруги постійного струму, які, наприклад, можна порівняти з числом одиниць в Х, числом десятків в Х, числом сотень в Х і т. д.

Перша форма подання інформації називається **аналоговою** або **безперервною** (за допомогою схожої величини – аналога). Величини, представлені в такій формі, можуть приймати принципово будь-які значення в якомусь діапазоні. Вони можуть бути як завгодно близькі один до одного, малорозрізнявані, але все-таки, хоча б в принципі, помітні. Кількість значень, які може приймати така величина, нескінченно велике. Їх нескінченно багато навіть в разі, коли величина змінюється в обмеженому діапазоні, наприклад 0-2000 або 0-0,0001. Звідси назви – **безперервна величина** і **безперервна інформація**. Слово "безперервність" чітко виділяє основну властивість таких величин – відсутність розривів, проміжків між значеннями, які може приймати дана аналогова величина.

Друга форма подання інформації називається **цифровою** або **дискретною** (за допомогою набору напруг, кожна з яких відповідає одній з цифр величини, що задається). Такі величини, які набувають не всіх можливих, а лише цілком певних значень, називаються **дискретними (переривчастими)**. На відміну від безперервної величини кількість значень дискретної величини завжди буде кінцевим.

Порівнюючи безперервну і дискретну форми подання інформації, неважко помітити, що при використанні безперервної форми обчислювальній машині потрібно менше число пристроїв (кожна величина репрезентується одним, а не декількома сигналами), але ці пристрої будуть складнішими (вони повинні розрізняти значно більше число станів сигналу). Крім того, пристрої для обробки безперервних сигналів мають більш високу "кваліфікацію" (вони можуть інтегрувати сигнал, виконувати будь-яке його функціональне перетворення і т. п.) і за рахунок цього, а також ряду інших особливостей мають високу швидкодію. Деякі види задач вирішуються у багато разів швидше, ніж за допомогою пристроїв з дискретним представленням інформації. Однак через складність технічної реалізації пристроїв для логічних операцій з безперервними сигналами, тривалого зберігання таких сигналів, їх точного вимірювання подібна форма подання в основному використовується в аналогових обчислювальних машинах (АОМ). Ці машини призначені для вирішення завдань:

1) що описуються системами диференціальних рівнянь: дослідження поведінки рухомих об'єктів (машин, роботів, суден, літальних апаратів і т. п.);

2) моделювання ядерних реакторів, гідротехнічних споруд, газових мереж, електромагнітних полів і біологічних систем;

3) вирішення завдань параметричної оптимізації та оптимального управління;

4) управління процесами переробки нафти і виплавки різних металів.

Але АОМ не можуть вирішувати завдання, пов'язані зі зберіганням і обробкою великих обсягів інформації, які легко вирішуються при використанні цифрової (дискретної) форми подання інформації, реалізованої цифровими електронними обчислювальними машинами (ЕОМ).

Створюють також і гібридні обчислювальні системи (ГОС), які поєднують в собі переваги як аналогових, так і цифрових обчислювальних машин.

8.1.2. Способи подання цифрової інформації

Як було показано, кожне значення з набору вихідних даних певного завдання і/або результатів її вирішення може бути представлено в ЕОМ у вигляді декількох електричних сигналів. Один з цих сигналів відповідає числу одиниць в значенні, інший – числу десятків, третій – числу сотень і т.д. Однак таке природне для нас подання не є найкращим з технічної позиції. Пристрій, призначений для обробки подібних сигналів, треба розрізняти в кожному з них десять станів. Значно простіше побудувати пристрій, який розрізняв би всього два стани сигналу (його наявність або відсутність). Це тим більш доцільно, так як існуючі зараз дешеві пристрої для введення даних в ЕОМ також кодують (представляють) окремі складові вводиться за допомогою двох станів: отвір є або відсутній (перфолента і перфокарта); матеріал намагнічений або розмагнічений (магнітні стрічки, диски); тумблер включений або виключений (окремі блоки пульта управління ЕОМ); кнопка натиснута чи ні (клавіатура).

Ця обставина наштовхнула творців перших ЕОМ на застосування іншої системи числення при внутрішньому поданні чисел в машинах: замість звичної десяткової системи, яка використовувалася в механічних обчислювальних пристроях, була взята **двійкова система числення**. Як і десяткова система числення, двійкова система (в якій використовуються лише цифри 0 і 1) є позиційною системою числення, тобто в ній значення кожної цифри числа залежить від положення (позиції) цієї цифри в запису числа. Кожній з позицій присвоюється певна "вага". Так, число 371 можна записати у вигляді:

$3 \times 10^2 + 7 \times 10^1 + 1 \times 10^0 = (371)_{10}$, де цифри мають вагу 10^1 ,
або в двійковій системі числення:
 $256 + 0 + 64 + 32 + 16 + 0 + 0 + 2 + 1 =$
 $= 1 \times 2^8 + 0 \times 2^7 + 1 \times 2^6 + 1 \times 2^5 + 1 \times 2^4 + 0 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 1 \times 2^0 =$
 $= (101110011)_2 = (371)_{10}$, де цифри мають вагу 2^1 .

Тут і далі основу системи числення зазначено в вигляді індексу для числа, взятого в круглі дужки.

Існують спеціальні терміни, широко використовувані в обчислювальній техніці: біт, байт і слово.

Двійковий розряд зазвичай називають **бітом**. Таким чином, число +1001 є 4-бітовим двійковим числом, а раніше розглянутий двійковий еквівалент числа 371, тобто 101110011, – 9-бітовим числом.

Крайній зліва біт числа називається старшим розрядом (він має найбільшу вагу), крайній праворуч – молодшим розрядом (він має найменшу вагу). Двійкове число, що складається з 16 біт, представлено на рис. 8.1.

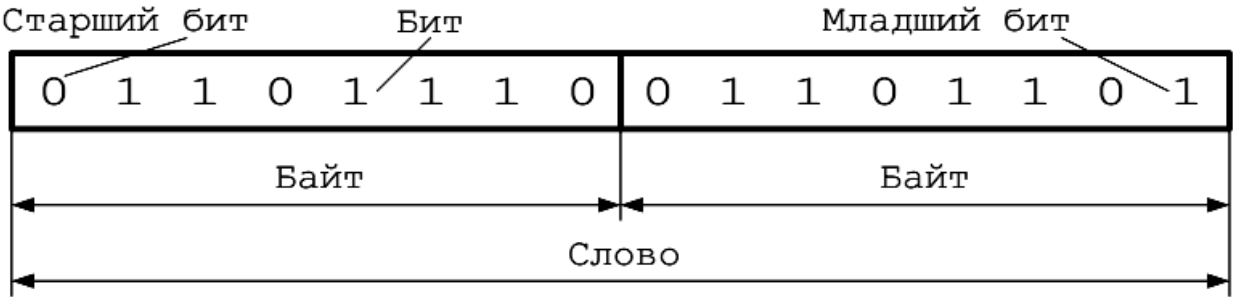


Рис. 8.1. Біт, байт, слово

Осередки пам'яті і регістри складаються з елементів пам'яті. Кожен з таких електричних елементів може бути в одному з двох стійких станів:

- 1) конденсатор заряджений або розряджений;
- 2) транзистор знаходиться в провідному або непровідному стані;
- 3) спеціальний напівпровідниковий матеріал має високий або низький питомий опір і т. п.

Один з таких фізичних станів створює високий рівень вихідної напруги елемента пам'яті, а інший – низький. В елементах пам'яті ряду мікроЕОМ це електричні напруги порядку 4 В і 0 відповідно, причому перше зазвичай приймається за двійкову одиницю, а друге – за двійковий нуль.

На рис. 8.2 показаний вихідний сигнал такого елемента пам'яті (наприклад, одного розряду регістра) при зміні його станів (при перемиканнях) під впливом деякого вхідного сигналу. Хоча перехід від 0 до 1 і від 1 до 0 відбувається не миттєво, проте в певні моменти часу цей сигнал досягає значень, які сприймаються елементами ЕОМ як 0 або 1.

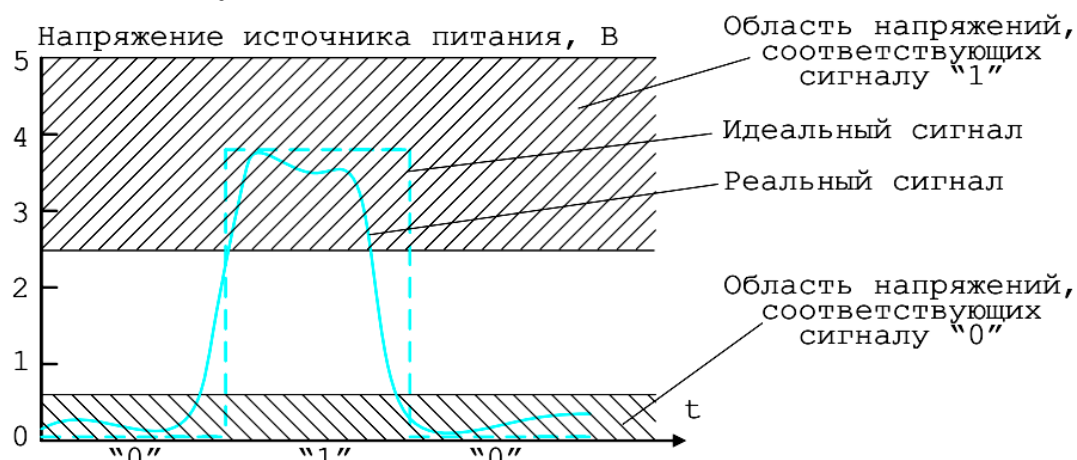


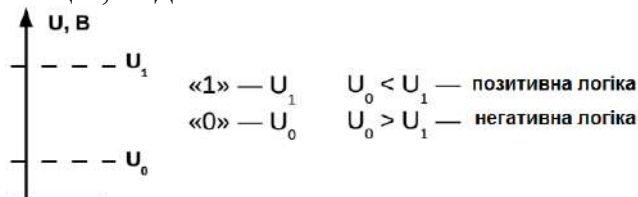
Рис. 8.2. Графічне зображення двійкового сигналу

8.2. Логічні елементи, їх типи та характеристики

Цифровий електричний сигнал – це послідовність двохрівневих елементарних сигналів 0 та 1, які називаються **логічними сигналами**. Для їх обробки, наприклад, дешифрації або зчитування, додавання чи віднімання, зберігання чи затримки в часі, застосовують так звані **логічні схеми**, а у випадку мікроелектронних пристроїв – цифрові ІМС з логічними елементами.

Логічний елемент (ЛЕ) – пристрій, призначений для обробки інформації в цифровій формі (у двійковій логіці, послідовність "0" та "1"). Фізично логічні елементи можуть бути виконані механічними, електромеханічними (на електромагнітних реле), електронними (на діодах і транзисторах), пневматичними, гідравлічними, оптичними та ін. способами.

Логіка ЛЕ називається **позитивною**, якщо високий потенціал на ньому відображає одиницю, а низький, – нуль. Якщо навпаки, високий потенціал відображає нуль, а низький, – одиницю, тоді **логіка** називається **негативною**:



Всі характеристики логічних елементів поділяються на: статичні; динамічні; функціональні; загальні.

Статичні характеристики логічних елементів розглянемо на прикладі *інвертора* рис. 8.3:

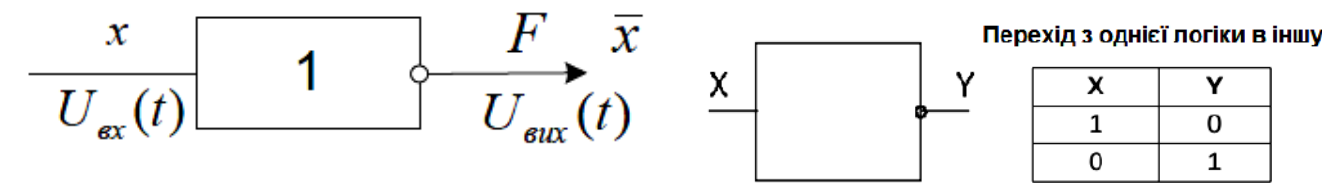


Рис. 8.3. Логічний елемент типу "інвертор"

При застосуванні позитивної логіки рівень логічної "1" характеризується високою напругою, наприклад U^1 (4,5-5,5 В), а рівень логічного "0" характеризується низькою напругою, наприклад U^0 (0,1-0,5 В) (рис. 8.4). Якщо живлення ЛЕ негативне, то рівень логічної "1" повинен бути більшим від рівня напруги логічного "0" (рис. 8.4). При застосуванні негативної логіки все навпаки (рис. 8.5).

Так само для цих логік вводиться поняття струму логічної "1" і логічного "0", тобто $I^0_{вх}$, $I^1_{вх}$, $I^0_{вих}$, $I^1_{вих}$. Потужність споживання логічних елементів і багатьох мікросхем характеризується середньою потужністю споживання при станах коли ЛЕ знаходиться в "одиначному" стані і "нульовому" стані: $P_{cp}=(P_{(0)}+P_{(1)})/2$.

Динамічні характеристики ЛЕ характеризують часом затримки вихідного сигналу відносно вхідного (рис. 8.6):

- t_{3m}^{10} – час затримки при переході елемента із одничного стану в нульовий;
- t_{3m}^{01} – час затримки при переході елемента із нульового стану в одичний;
- t_{3mcp} – середнім часом, як $(t_{3m}^{10} + t_{3m}^{01})/2$;
- f_{max} – максимальною частотою перемикування логічного елемента без збоїв.

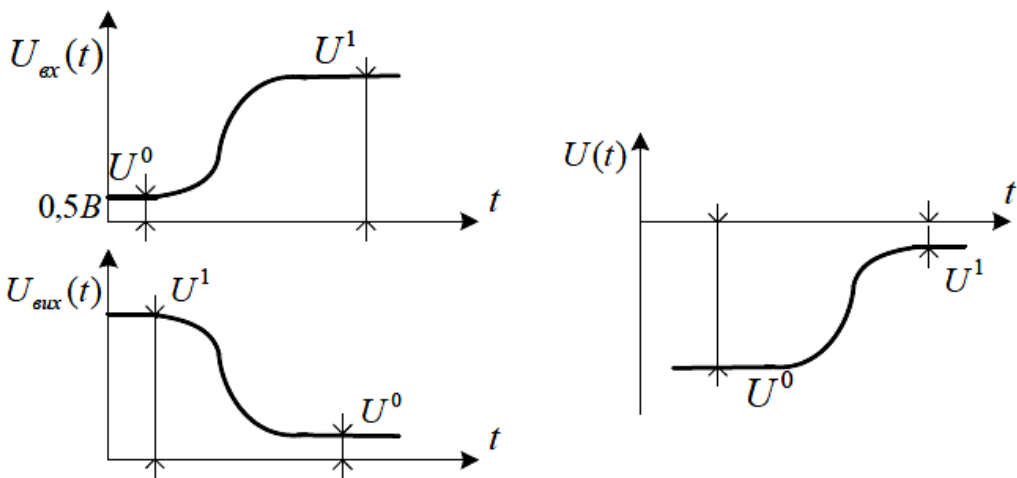


Рис. 8.4. Логічний елемент в статичному режимі (позитивна логіка)

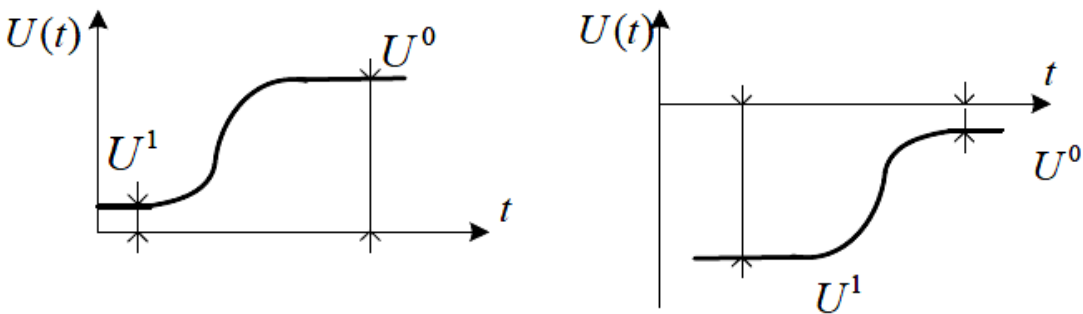


Рис. 8.5. Логічний елемент в статичному режимі (негативна логіка)

На практиці використовують, як правило, не всі названі параметри.

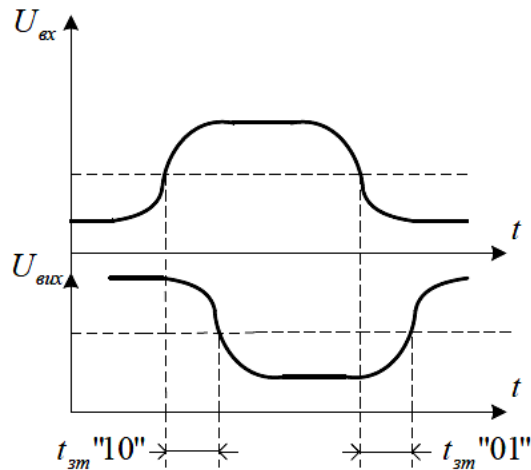


Рис. 8.6. Логічний елемент в динамічному режимі

Функціональні характеристики логічних елементів (рис. 8.7) характеризуються такими параметрами: n – коефіцієнт об'єднання по входу, це кількість однотипних ходів логічного елемента; m – коефіцієнт розгалудження, який показує кількість логічних елементів тієї ж самої серії, яку можна під'єднати до виходу даного логічного елемента. Завадостійкість характеризується максимальною амплітудою завади, яка не викликає помилкового спрацювання схеми (U_{3max}).

Загальні характеристики логічних елементів характеризують умови їх експлуатації: температурний діапазон, тиск, прискорення, а також габарити, вагу, коштовність і т.п.

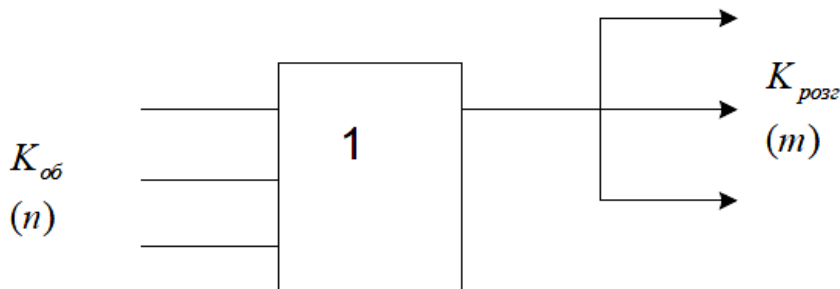


Рис. 8.7. Функціональна характеристика логічного елемента

Класифікації логічних елементів:

- 1) **за видом вхідного сигналу:** потенціальні елементи, імпульсні логічні елементи, імпульсно потенціальні;
- 2) **за елементною базою:** діодна логіка, діодно-транзисторна логіка, резисторно-транзисторна логіка, транзисторно-транзисторна логіка на діодах Шотки, транзисторна логіка, транзисторно-транзисторна логіка, логічні елементи на польових транзисторах, оптоелектронні логічні елементи;
- 3) **за видом зв'язку між елементами:** безпосередній зв'язок, резистивний зв'язок, діодний зв'язок, ємнісний зв'язок;
- 4) **за способом з'єднання транзисторів:** колекторним зв'язком, емітерним зв'язком;
- 5) **за видом функції перетворення:** одноступеневі логічні елементи, дво- або більше ступеневі логічні елементи;
- 6) **за видом фізичних ефектів що застосовуються в фізичних елементах:** електронні, оптоелектронні, магнітокеровані, пневмоавтоматичні та ін.

Діодні логічні елементи

Діодні логічні елементи є історично першими і найпростішими схемами, які реалізують булеві функції АБО, І, І-АБО, АБО-І. Діодні елементи не посилюють вхідних сигналів і не можуть виконувати операцію НІ.

При розгляді роботи логічних елементів припускають (якщо не оговорено окремо) позитивне кодування: високий рівень напруги U^1 відображає лог.1, а низький рівень U^0 – лог.0.

Елемент АБО

Логіка роботи логічного елемента АБО на два входи X_1 і X_2 подана в табл. 8.1, на основі якої одержують вираз для вихідної булевої функції елемента $F=X_1+X_2$.

Використовуючи принцип суперпозиції, функцію F можна записати для довільного числа вхідних змінних: $F=X_1+X_2+...+X_n$.

Схема двовходового елемента АБО, його умовне графічне зображення і часові діаграми роботи показані на рис. 8.8.

Таблиця. 8.1

X_1	X_2	F
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

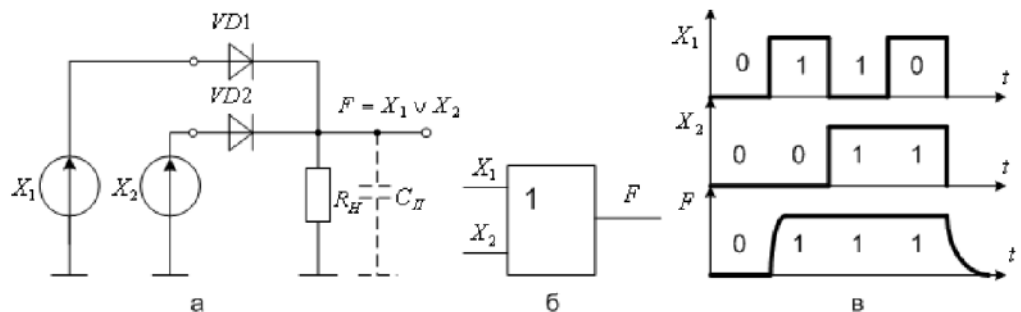


Рис. 8.8. Діодний елемент АБО: а – схема; б – умовне графічне зображення; в – часові діаграми роботи

Високий рівень напруги U_H^1 на виході діодного елемента АБО встановлюється при подачі на один або обидва входи високих рівнів напруги U^1 при яких відкриваються відповідні кремнієві діоди $VD1$ чи $VD2$, або обидва разом. В резистор навантаження R_H втікає вихідний струм I_H^1 , визначений за формулою $I_H^1=U_H^1/R_H$.

Під час подачі одночасно на обидва входи низьких рівнів напруги $U^0=0,4\text{ В}$, діоди закриті, струм у колі навантаження не протікає і вихідна напруга U_H^0 майже дорівнює нулю. На виході елемента звичайно є паразитна ємність $C_n=25\text{-}100\text{ пФ}$, внаслідок чого тривалість фронту вихідного сигналу t_f дуже мала (ємність швидко заряджається від джерела вхідних сигналів через малий прямий опір відкритого діода), а тривалість спаду t_c велика (діоди закриті і ємність розряджається через резистор R_H). Тому для діодних схем АБО виконується нерівність $t_f \ll t_c$.

Елемент І

Логіка роботи логічного елемента І на два входи X_1 і X_2 подана в табл. 8.2, на основі якої одержують вираз для вихідної булевої функції елемента $F=X_1 \cdot X_2$.

Використовуючи принцип суперпозиції, функцію F можна записати для довільного числа вхідних змінних: $F=X_1 \cdot X_2 \cdot ... \cdot X_n$.

Схема двовходового елемента І, його умовне графічне зображення і часові діаграми роботи, показані на рис. 8.9.

Високий рівень напруги U_H^1 на виході діодного елемента І встановлюється тільки при одночасній подачі на обидва входи високих рівнів напруги U^1 , при яких закриваються кремнієві діоди $VD1$ і $VD2$. При цьому від джерела живлення $U_{\text{ж}}$ через резистори R і R_H протікає струм навантаження $I_H^1=U_{\text{ж}}/(R+R_H)$, що визначає

значення високого рівня вихідної напруги $U_H^1 = I_H^1 \cdot R_H = U_{ж} \cdot R_H / (R + R_H)$.

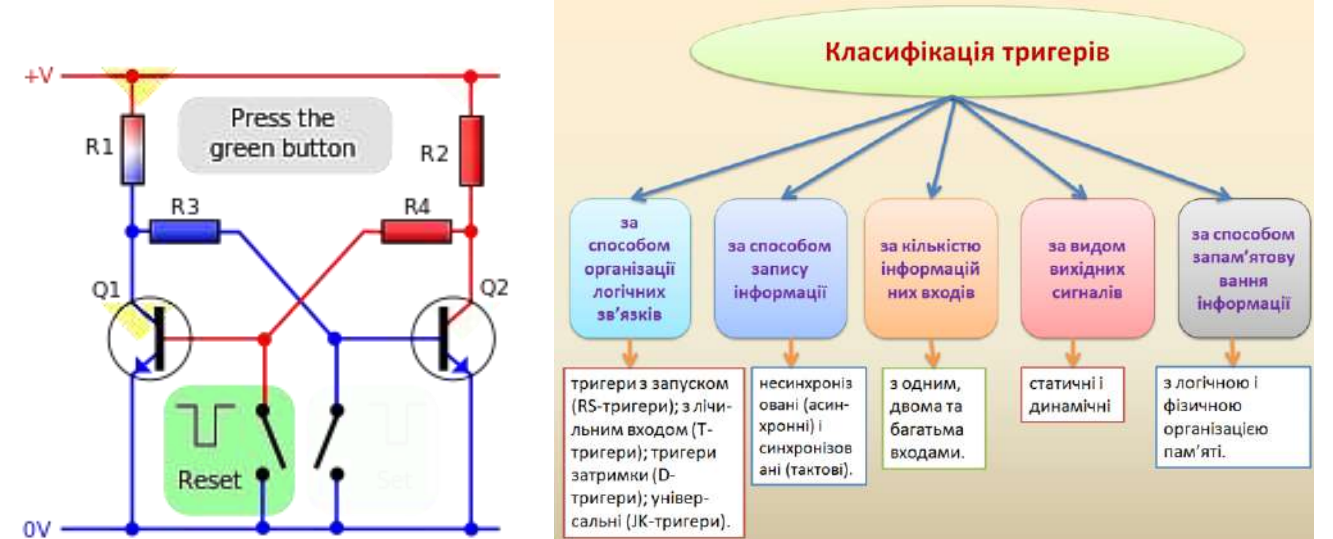
Як правило, використовують значення $R = 1-2 \text{ кОм}$ і $R_H > R$. Тривалість фронту вихідного сигналу t_{ϕ} визначається часом заряду паразитної ємності C_n через великий опір резистора R . Якщо на один із входів, наприклад X_1 поданий низький рівень напруги U^0 , то діод $VD1$ відкривається. При цьому від джерела живлення $U_{ж}$ у колі резистора R , відкритий діод $VD1$ і джерело вхідного сигналу X_1 через резистор протікає струм I_H^0 , і на виході встановлюється низький рівень напруги U_H^0 . Джерела вхідних сигналів будують так, щоб вони пропускали струм I^0 який в них втікає. Тривалість спаду вихідного сигналу визначається часом розряду паразитної ємності C_n через малий прямий опір відкритого діода. Тому в діодних схемах I тривалість фронту вихідного сигналу значно більша за тривалість спаду: $t_{\phi} \gg t_c$.



В арифметичних і логічних пристроях для збереження інформації найчастіше використовують **тригери** – пристрої з двома стійкими станами по виходу, які містять елементарну запам'ятовувальну комірку і схему керування (рис. 8.10).

Тригер, як електронна логічна схема, має два стійкі стани, в яких може перебувати, доки не зміняться відповідним чином сигнали керування. Напруги і струми на виході тригера можуть змінюватися стрибкоподібно. Тригер це фактично мультівібратор із двома стабільними станами.

Статичні тригери – тригери, в яких вихідні сигнали в стійких станах залишаються незмінними в часі. **Динамічні тригери** – тригери, в яких вихідні сигнали в стійких станах змінюються в часі.



Тригери з логічною пам'яттю виконують на логічних елементах І, АБО, НІ, І-НІ, АБО-НІ, І-АБО-НІ і т.д.

Тригери з фізичною пам'яттю є елементами запам'ятовувальних пристроїв, у яких використовують нелінійні властивості матеріалів або нелінійні вольт-амперні характеристики компонентів.

RS-тригер, або **SR-тригер** – тригер, який зберігає свій попередній стан при нульових входах та змінює свій вихідний стан при подачі на один з його входів одиниці. При подачі одиниці на вхід S вихідний стан стає рівним логічній одиниці (1). А при подачі одиниці на вхід R вихідний стан стає рівним логічному нулю (0).

Транзисторно-транзисторні та діодно-транзисторні логічні елементи

У ТТЛ схемах для реалізації логічного елемента "2І" замість паралельного з'єднання діодів використовується багатоємітерний транзистор. Фізика роботи цього логічного елемента не відрізняється від роботи діодного логічного елемента "І". Високий потенціал на виході цього транзистора виходить тільки в тому випадку, коли на обох входах логічного елемента (емітерах транзистора) присутній високий потенціал (рис. 8.11).

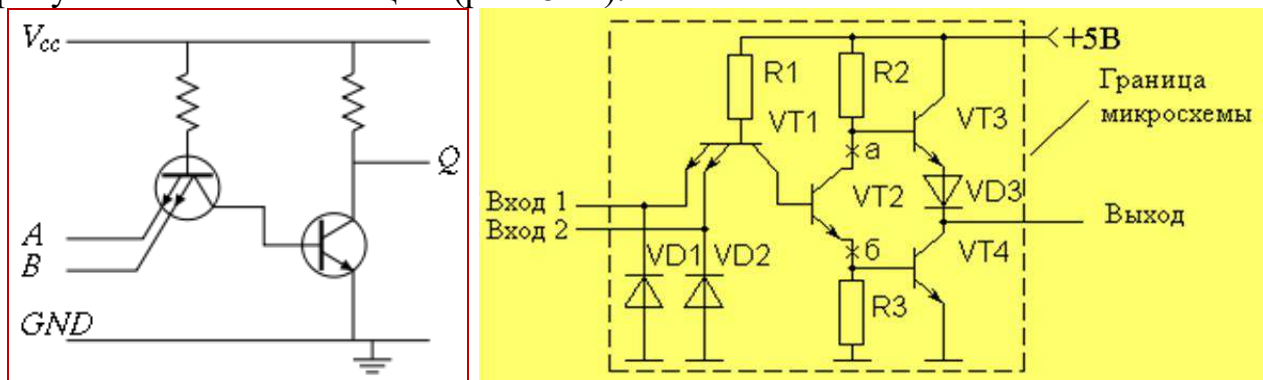


Рис. 8.11. Схеми виконання базових логічних елементів ТТЛ мікросхем серій 131, 155 і 531. Схеми "І-НІ" в цих серіях мікросхем зазвичай має позначення ЛА. Наприклад, схема К531ЛА3 містить в одному корпусі чотири логічних елемента "2 І-НІ"

Основні параметри логічних елементів:

1. Завадостійкість – спроможність елемента правильно функціонувати при наявності завад. Характеризується найбільшим значенням сигналу завади, при котрому ще не відбувається помилкове спрацювання ЛЕ.

2. Швидкодія – характеризується середньою затримкою поширення сигналу, що являє собою інтервал часу між зміною станів вхідного і вихідного сигналів.

3. Потужність, що розсіюється елементом, визначається добутком значення напруги, що живить елемент, на середнє значення струму, споживаного ЛЕ.

4. Коефіцієнт об'єднання по входу – це число входів ЛЕ, по яких реалізується логічна функція (або число аналогічних ЛЕ, що можуть бути підключені на вхід даного елемента).

5. Коефіцієнт розгалуження по виходу – максимальне число аналогічних ЛЕ, що можна підключити своїми входами до виходу даного елемента без порушення його працездатності.

8.3. Зовнішня пам'ять комп'ютера

Зовнішня пам'ять – це пам'ять, призначена для тривалого зберігання програм і даних. Цілісність вмісту ВЗП не залежить від того, включений або вимкнений комп'ютер.

Носій інформації (носій запису) – матеріальний об'єкт, здатний зберігати інформацію. Інформація записується на носій за допомогою зміни фізичних, хімічних і механічних властивостей пам'ятного середовища.

Накопичувачі інформації можуть бути класифіковані за такими ознаками:

- за способом зберігання інформації: магнітоелектричні, оптичні, магнітооптичні;
- за властивістю носія інформації: накопичувачі на гнучких і жорстких магнітних дисках, оптичних і магнітооптичних дисках, магнітній стрічці, твердотільні елементи пам'яті;
- за способом організації доступу до інформації – накопичувачі прямого, послідовного та блочного доступу;
- за типом пристрою зберігання інформації – вбудовані (внутрішні), зовнішні, автономні, мобільні (носяться) і ін.

За типом доступу до інформації зовнішню пам'ять ділять на два класи:

1. Пристрої прямого (довільного) доступу – час звернення до інформації не залежить від місця її розташування на носії;
2. Пристрої послідовного доступу.

До складу зовнішньої пам'яті входять:

- 1) накопичувачі на жорстких магнітних дисках (НЖМД);
- 2) накопичувачі на гнучких магнітних дисках (НГМД);
- 3) накопичувачі на магнітооптичних компакт дисках;
- 4) накопичувачі на оптичних дисках (CD-ROM);
- 5) накопичувачі на магнітній стрічці та ін.

Фізичні основи процесів запису і відтворення інформації на магнітних носіях закладені ще в роботах фізиків М. Фарадея (1791-1867 рр.) та Д. Максвелла (1831-1879 рр.).

У магнітних носіях інформації цифровий запис проводиться на магніточутливий матеріал. До таких матеріалів відносяться деякі різновиди оксидів заліза, нікелю, кобальту та їх сполук, сплави, а також магнітопласти і магнітоеластичні на основі пластмас і гуми, мікропорошкові магнітні матеріали.

Магнітне покриття має товщину в кілька мікрометрів. Покриття наноситься на немагнітну основу, в якості якої для магнітних стрічок і гнучких дисків використовуються різні пластмаси, а для жорстких дисків – алюмінієві сплави та композиційні матеріали підкладки. Магнітне покриття диска має доменну структуру, тобто складається з безлічі намагнічених найдрібніших частинок.

Магнітний домен – це мікроскопічна, однорідно намагнічена область в феромагнітних зразках, відокремлена від сусідніх областей тонкими перехідними

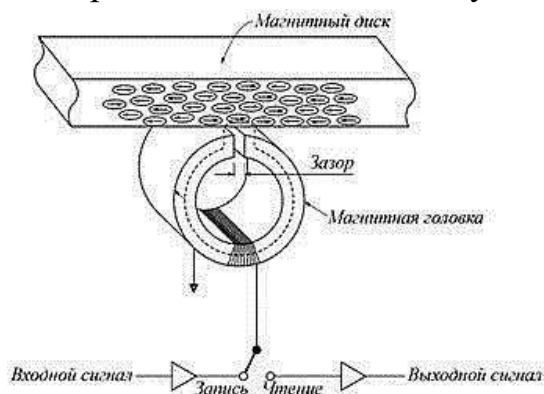


Рис. 8.12. Схематична ілюстрація принципу магнітного запису та зчитування інформації.

шарами (доменними межами).

Під впливом зовнішнього магнітного поля власні магнітні поля доменів орієнтуються відповідно до напрямку магнітних силових ліній. Після припинення дії зовнішнього поля на поверхні домену утворюються зони залишкової намагніченості. Завдяки цій властивості на магнітному носії зберігається інформація.

При запису інформації зовнішнє магнітне поле створюється за допомогою магнітної головки. У процесі зчитування інформації зони залишкової намагніченості, опинившись навпроти магнітної головки, наводять у ній при зчитуванні електрорушійну силу (ЕРС). Зміна напрямку ЕРС протягом певного проміжку часу ототожнюється з двійковою одиницею, а відсутність цієї зміни – з нулем. Зазначений проміжок часу називається двійковим елементом.

Поверхня магнітного носія розглядається як послідовність точкових позицій, кожна з яких асоціюється з бітом інформації. Оскільки розташування цих позицій визначається неточно, для запису потрібні заздалегідь нанесені мітки, які допомагають знаходити необхідні позиції запису. Для нанесення таких синхронізуючих міток має бути здійснене розбиття диска на доріжки і сектори – **форматування**.

Організація швидкого доступу до інформації на диску є важливим етапом зберігання даних. Оперативний доступ до будь-якої частини поверхні диска забезпечується, по-перше, за рахунок надання йому швидкого обертання і, по-друге, шляхом переміщення магнітної головки читання / запису по радіусу диска.

Гнучкий диск обертається зі швидкістю 300-360 об / хв, а жорсткий диск – 3600-7200 об / хв.

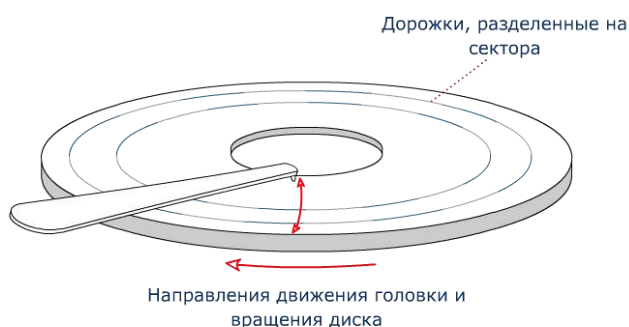
НГМД – накопичувачі на гнучких магнітних дисках

Загальні властивості:

- призначені для зберігання невеликих обсягів інформації;
- слід оберігати від сильних магнітних полів і нагрівання;
- це носії довільного (прямого) доступу до інформації;
- використовуються для перенесення даних з одного комп'ютера на інший;
- для роботи з інформацією носій повинен бути відформатований, тобто повинна бути проведена магнітна розмітка диска на доріжки і сектори;
- швидкість обміну інформацією залежить від швидкості обертання дисководу. Для звернення до диска, вставленого в дисковод, присвоюється ім'я А;
- об'єм ГМД порівняно невеликий (3,5 дюйма - 1,44 Мбайт);
- Рекомендується робити копії вмісту ГМД.

Диски називаються гнучкими тому, що їхня робоча поверхня виготовлена з еластичного матеріалу і поміщена в твердий захисний конверт. Для доступу до магнітної поверхні диска в захисному конверті є закрите шторкою вікно. Поверхня диска покрита спеціальним магнітним шаром (двійкова одиниця визначає намагнічену ділянку, двійковий нуль – не намагнічена ділянка). Інформація записується з двох сторін диска на доріжки у вигляді концентричних кіл. Доріжки роз-

Устройство и принцип работы магнитного диска



<http://inf1.info>

биваються на сектори. Сучасні дискетки мають програмну розмітку. На кожному секторі виділяється ділянка для його ідентифікації, а на решту місця записуються дані. Дисківод забезпечений двома двигунами. Один забезпечує обертання диску всередині захисного конверта. Другий переміщує головку запису / читання уздовж радіуса поверхні диска. У захисному конверті є спеціальне вікно захисту запису. За допомогою бігунка це вікно відкривають і дискета стає доступна тільки на читання, а на запис доступу не буде. Це охороняє інформацію на диску від зміни і видалення.

Оптичні (лазерні) CD і DVD диски:

- призначені для зберігання будь-якого виду інформації;
- інформацію на CD записується за допомогою лазерного променя;
- слід оберегти від подряпин і забруднення поверхні;
- це носії прямого (довільного) доступу до інформації;
- об'єм (місткість) CD становить сотні Мбайт; DVD – більш 1 Гбайта;
- більш довговічні і надійні, ніж магнітні диски.

CD-ROM-диск (або просто CD-диск) складається з 3 основних шарів. Шар А – полікарбонатний диск, який відповідає відразу за кілька функцій. Перше – основа диска, яка витримує величезні швидкості обертання всередині дисківоду.

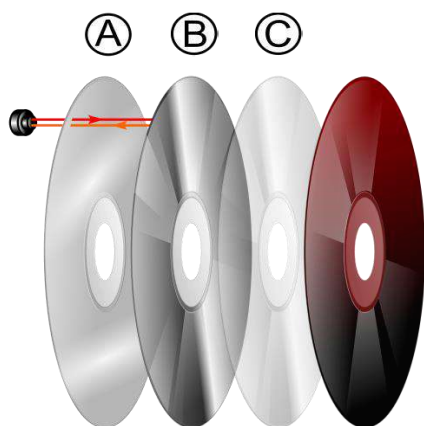


Рис. 8.13. Структура CD-диска.

Полікарбонатний диск покривають спеціальним лаком, який захищає від легких механічних пошкоджень зовнішню поверхню диска.

Друге – саме на полікарбонат, в прямому сенсі цього слова, друкується інформація з матриці – будь то фільм, музика або програми. Полікарбонатна основа має товщину 1,2 мм і має масу близько 15-20 г.

Природно, що полікарбонат і лак прозорі для лазерного випромінювання, тому «надруковану» інформацію для лазера необхідно зробити «видимою», для чого поверхню покривають тонким шаром алюмінію (шар В). Варто відзначити, що CD-ROM з «надрукованою» інформацією, порівняно з відомими CD-R і CD-RW мають незначні відмінності. У двох останніх випадках, додається проміжний шар між полікарбонатом і алюмінієм, який може змінювати свої властивості під дією лазерного випромінювання певної довжини хвилі, а на полікарбонат друкуються порожні доріжки. Це можуть бути або барвники в разі CD-R (щось схоже на фоторезист), або металеві сплави в разі CD-RW. Саме тому перезаписувані диски не рекомендується піддавати дії прямих сонячних променів і перегріву, який також може спровокувати зміну оптичних властивостей.

На рис. 8.14 показано порівняння диску і алюмінієвого шару, відірваного від нього. Видно, що на полікарбонаті є «канавки» (піти), а на шарі алюмінію навпаки піднесення, які повністю відповідають канавкам. На захисному алюмінієвому шарі видно піти- «навпаки» – не канавки, а виступи.

Далі отриманий «пиріг» покривають спеціальним захисним шаром С, який захищає «ніжний» алюмінієвий шар, що відбиває.

Далі на цей шар можна щось наклеювати, писати маркером, наносити спеціальні додаткові шари для друку і т.д.

Запис на CD диску подібний запису на вініловій платівці, тобто доріжка з інформацією йде по спіралі. Він бере свій початок в центрі диска і закінчується біля зовнішнього краю.

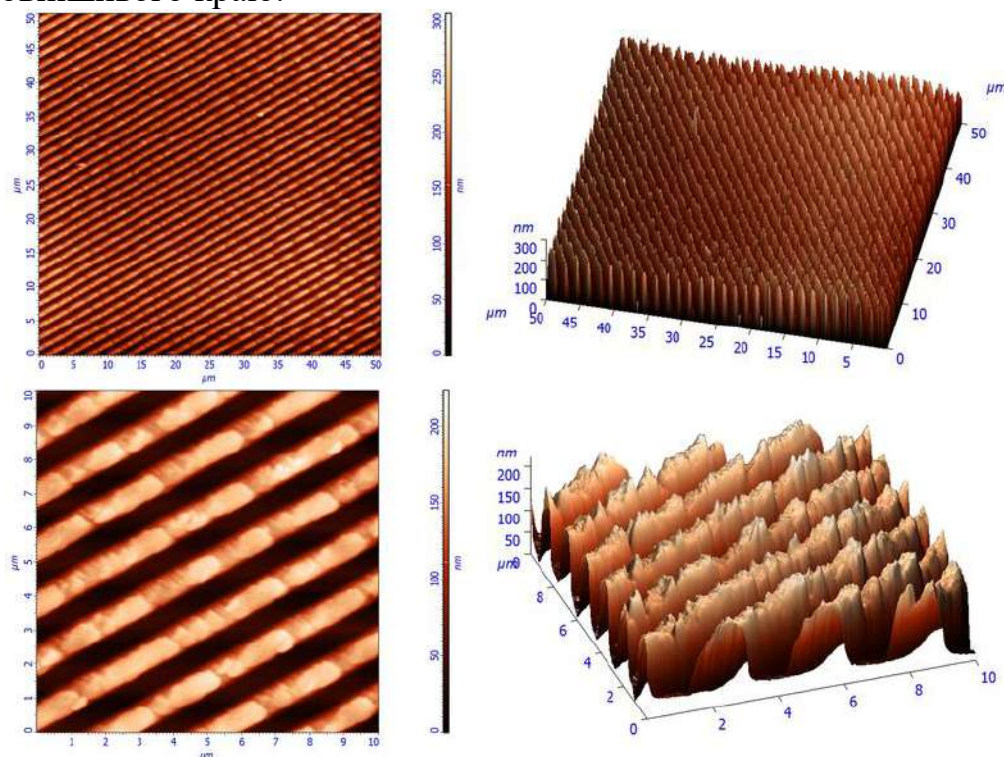


Рис. 8.14

Принципових відмінностей на мікрорівні CD від DVD і, напевно, Blu-Ray(BD-R(W)) немає. Хіба що піти будуть менших розмірів. У нашому випадку розміри 1 мінімального поглиблення складають 330 нм в ширину і 680 нм в довжину, при цьому відстань між доріжками ~ 930 нм.

Диск DVD + R (W) містить більшу кількість інформації, що в кінцевому підсумку, призводить до поліпшення якості запису. В DVD дисках використовується алгоритм оптимального управління потужністю (OPC), який дозволяє зчитува-

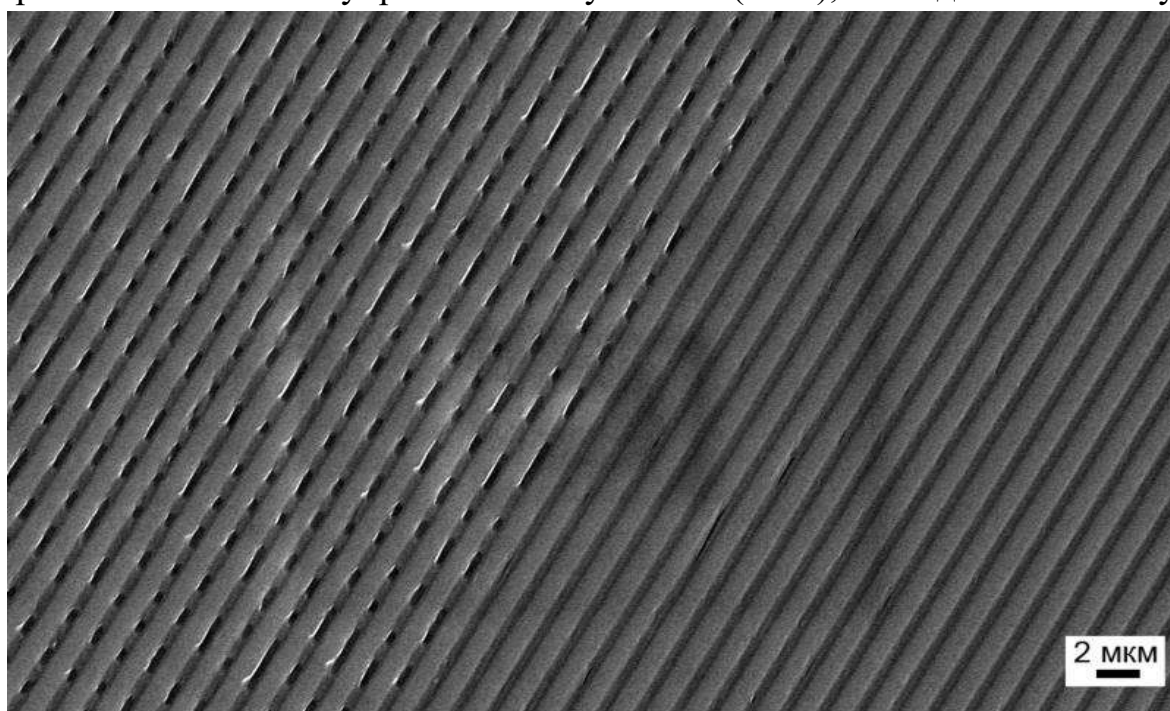


Рис. 8.15. Порівняння порожніх доріжок і доріжок із записаною інформацією

ти найкращі параметри для запису конкретного носія і проводити їх тестування. Ці параметри, наприклад потужність лазера в залежності від довжини хвилі, містяться в блоках LPP на DVD-R (W) або в словах ADIP на DVD + R (W). Кількість регульованих параметрів для обох форматів дисків однакове, проте в носіях DVD + R (W) параметри задаються з більшою точністю. Крім того, в форматі «плюс», можна задавати параметри для 4-х різних швидкостей запису, тоді як в конкуруючому форматі тільки для однієї (відомо, що параметри запису залежать від швидкості). До того ж область тестування OPC на DVD + R (W) дисках більше, ніж на DVD-R (W) (32768 проти 7088 секторів).

Накопичувачі на жорстких магнітних дисках (HDD)

Призначені для зберігання тієї інформації, яка найбільш часто використовується в роботі – програм операційної системи, компіляторів, сервісних програм, прикладних програм користувача, текстових документів, файлів бази даних.

- Слід оберігати від ударів, небажанірізкі переміщення в просторі;
- Це носії з довільним доступом до інформації.
- Для зберігання інформації розбивається на доріжки і сектори.
- Швидкість обміну інформації значно вище ГМД та CD, DVD.
- Об'єм ЖМД вимірюється від Мбайт до сотень Гбайт і десятків Тбайт.

НЖМД вбудовані в дисковод і є незнімними. Вони являють собою кілька алюмінієвих дисків з магнітним покриттям, укладених в єдиний корпус з електро-двигуном, магнітними головками і пристроєм позиціонування. До магнітної поверхні диска підводиться записувальна/зчитувальна головка, яка переміщається по радіусу диска із зовнішнього боку до центру. Під час роботи дисковода диск обертається. У кожному фіксованому положенні головка взаємодіє з круговою доріжкою. На ці концентричні доріжки і проводиться запис інформації (у двійковій системі). Завдяки хорошій захищеності від пилу, вологи та інших зовнішніх впливів досягають високої щільності запису, на відміну від дискет.

Для запису використовуються обидві поверхні дисків. Вал обертається з високою постійною швидкістю (3600-7200 об. / хв.). Обертання дисків і радіальне переміщення головок здійснюється за допомогою 2-х електродвигунів. Запис інформації на диск ведеться по строго певних місцях – концентричних доріжках (треках). Доріжки діляться на сектори. В одному секторі 512 байт інформації.

Запис даних у жорсткому диску здійснюється наступним чином. При зміні сили струму, що проходить через головку, відбувається зміна напруженості динамічного магнітного поля в щілині між поверхнею та головкою, що приводить до зміни стаціонарного магнітного поля феромагнітних частин покриття диску. Операція зчитування відбувається у зворотному порядку. Намагнічені частинки феромагнітного покриття спричиняють електрорушійну силу самоіндукції магнітної головки. Електромагнітні сигнали, що виникають при цьому, підсилюються й передаються на обробку. Роботою вінчестера керує спеціальний апаратно-логічний пристрій-контролер жорсткого диска. В минулому це була окрема дочірня плата, яку під'єднували через слоти до материнської плати. У сучасних комп'ютерах функції контролера жорсткого диска виконують спеціальні мікросхеми, розташовані в чіпсеті. На рис. 18.16 наведена будова жорсткого диска.

Обмін даними між ОЗУ і НЖМД здійснюється послідовно цілим числом (кластером). Кластер – ланцюжки послідовних секторів (1,2,3,4, ...). Для звернен-

ня до НЖМД використовується ім'я, що прописується латинською буквою, починаючи з C:, але за допомогою спеціальної системної програми можна розбити свій фізичний НЖМД на кілька логічних дисків, кожному з яких дається відповідне ім'я. Магнітний диск спочатку до роботи не готовий. Для приведення його в робочий стан він повинен бути відформатований, тобто повинна бути створена структура диска. Структура (розмітка) диска створюється в процесі форматування. Форматування магнітних дисків включає 2 етапи: фізичне форматування (низького рівня); логічне (високого рівня).

При фізичному форматуванні робоча поверхня диска розбивається на окремі області, так звані сектори, які розташовані вздовж концентричних кіл – доріжок. Крім того, визначаються сектори, непридатні для запису даних, вони позначаються як погані для того, щоб уникнути їх використання. Кожен сектор є мінімальною одиницею даних на диску, має власну адресу для забезпечення прямого доступу до нього. Адреса сектора включає номер сторони диска, номер доріжки і номер сектора на доріжці. Задаються фізичні параметри диска.

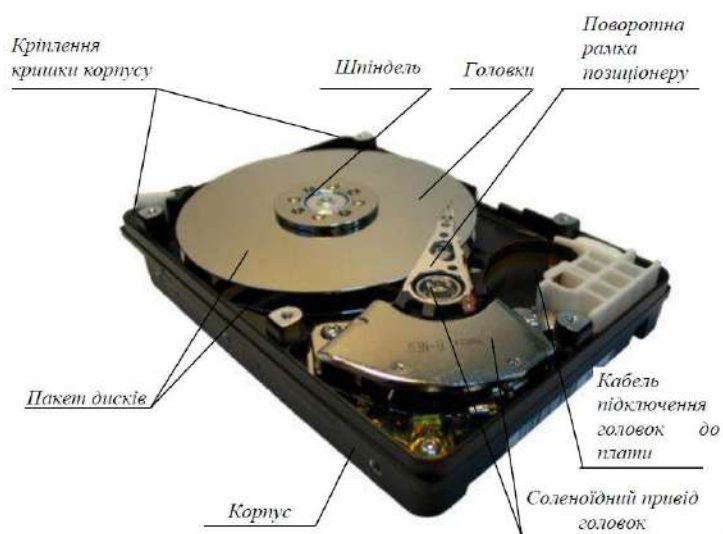


Рис. 18.16. Будова жорсткого диску

SSD - накопичувачі

Твердотільний накопичувач (SSD, solid-state drive) – комп'ютерний запам'ятовувальний пристрій на основі мікросхем пам'яті та контролера керування ними, що не містить рухомих механічних частин. Розрізняють два види твердотільних накопичувачів: SSD на основі динамічної пам'яті (подібної до оперативної пам'яті комп'ютерів), і SSD на основі флеш-пам'яті.

Флеш-пам'ять зберігає інформацію в масиві польових транзисторів, що звуться комітками (англ. cell). Розрізняють два типи коміток: однорівневі (англ. single-level cell, SLC) – кожна з них може зберігати лише один біт, і багаторівневі (англ. multi-level cell, MLC) – можуть зберігати більше одного біта, використовуючи різний рівень електричного заряду на плаваючому затворі транзистора. Відмінності між SLC і MLC є не лише в об'ємі інформації, що зберігається, але й в циклах перезапису. Сьогодні типова кількість циклів запису в SLC складає близько 100 тисяч. Але якщо ви вважаєте, що $SLC = 2MLC$, і життєвий цикл MLC в районі 50 тисяч, то помиляєтесь. Це було б вірно для пам'яті з довільним доступом, але флеш-пам'ять не є такою. У результаті MLC витримують всього 10 тисяч циклів запису, після чого будуть доступні лише для читання. Окрім відмінностей в

типах комірок існує і два види архітектури пам'яті, побудованих по різних принципах. **NOR архітектура** – в основі цього типа флеш-пам'яті лежить елемент АБО-НІ (англ. NOR), В NOR-архітектурі до кожного транзистора необхідно підвести індивідуальний контакт, що збільшує розміри схеми. Ця проблема вирішується за допомогою новішої NAND-архітектури. **NAND архітектура** – в основі NAND-типа лежить елемент І-НІ (англ. NAND). Принцип роботи такий же, від NOR типа відрізняється лише розміщенням комірок і їх контактами. В результаті вже не потрібно підводити індивідуальний контакт до кожної комірки, так що розмір і вартість NAND-чіпа може бути істотно менша. Також запис і стирання відбуваються скоріше. Проте ця архітектура не дозволяє звертатися до довільної комірки.

Отже, оперативна пам'ять працює, як USB-флешка, але у багато разів її швидше. Дійсно, HDD – ефективні для зберігання даних, а SSD – найефективніші для роботи.

Спробуємо детальніше зважити всі переваги і недоліки – SSD проти HDD.

1) *Швидкість:*

Накопичувач швидше диска: за 10-15 с зчитує і передає інформацію. Час завантаження системи, яка звертається до жорсткого диску – до 40 с.

2) *Шум:*

У твердотільних немає рухомих частин, вони працюють безшумно. Вінчестер потріскує.

3) *Маса:*

SSD легше HDD, тому що складається з мікросхем.

4) *Споживання електроенергії:*

При піковому навантаженні накопичувач споживає до 2 Вт, жорсткий диск – до 7 Вт. Таким чином, SSD на 80 % знижує споживання електроенергії.

5) *Надійність:*

У SSD обмежена кількість циклів запису, а диски вінчестера іноді відмовляються працювати.

6) *Дефрагментація:*

Накопичувач її не потребує, HDD – без поновлення втрачає продуктивність.



Рис. 18.17

8.4. Блок живлення комп'ютера

Блок живлення – вторинне джерело живлення, призначене для забезпечення живлення електроприладів електричною енергією, шляхом перетворення енергії інших джерел живлення.

Комп'ютерний блок живлення – блок живлення (вторинне джерело живлення), призначений для забезпечення вузлів комп'ютера електричною енергією постійного струму. У його завдання входить перетворення мережевої напруги до заданих значень напруги живлення, її стабілізація і захист від незначних перешкод з боку електричних мереж живлення.

Згладжувальні фільтри і стабілізатори напруги

Згладжувальні фільтри призначені для зменшення пульсацій випрямленої напруги. Згладжування пульсацій оцінюють коефіцієнтом згладжування q . Основ-

ними елементами згладжуючих фільтрів є конденсатори, котушки індуктивності та транзистори, опір яких є різним для постійного і змінного струмів.

Залежно від типу фільтруючого елемента розрізняють ємнісні, індуктивні і електронні фільтри.

Ємнісний фільтр являє собою конденсатор великої ємності, який включається паралельно навантажувальному резистору R_H . Конденсатор має великий опір постійному струму і малий опір змінному струмі. Розглянемо роботу фільтра на прикладі схеми однопівперіодного випрямляча (рис. 8.18, а).

При протіканні позитивної напівхвилі в часовому проміжку $t_0 - t_1$ (рис. 8.18, б) протікає струм навантаження (струм діода) і струм заряду конденсатора. Конденсатор заряджається і в момент часу t_1 напруга на конденсаторі перевищує спад напруги вторинної обмотки – діод закривається і в часовий проміжок $t_1 - t_2$ струм в навантаженні забезпечується розрядом конденсатора. Таким чином, струм у навантаженні протікає постійно, що значно зменшує пульсації випрямленої напруги.

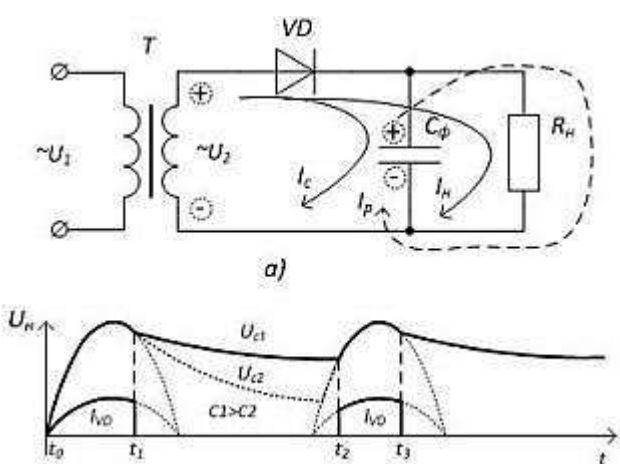


Рис. 8.18. Однофазний однопівперіодний випрямляч з ємнісним фільтром: а) схема б) тимчасові діаграми роботи

Індуктивний фільтр (дросель) включається послідовно з R_H (рис. 8.19, а). Індуктивність володіє малим опором постійному струму і великим змінному. Згладжування пульсацій ґрунтується на явищі самоіндукції, яка спочатку перешкоджає наростанню струму, а потім підтримує його при зменшенні (рис. 8.19, б).

Індуктивні фільтри застосовують у випрямлячах середньої та великої потужностей, т.б. у випрямлячах, що працюють з великими струмами навантаження.

Коефіцієнт згладжування визначається за формулою: $q = 2\pi f_c m L_\phi / R_H$.

Робота ємнісного та індуктивного фільтра заснована на тому, що під час протікання струму, споживаного з мережі, конденсатор і котушка індуктивності запасають енергію, а коли струму від мережі немає, або він зменшується, елементи віддають накопичену енергію, підтримуючи струм (напругу) в навантаженні.

Чим більше ємність конденсатора C_ϕ , тим менше пульсацій. Це визначається часом розряду конденсатора – постійної часу розряду $\tau = C_\phi R_H$. При $\tau > 10$ коефіцієнт згладжування визначається за формулою $q = 2\pi f_c m C_\phi R_H$, де f_c – частота мережі, m – число напівперіодів випрямленої напруги.

Ємнісний фільтр доцільно застосовувати з високоомним навантажувальним резистором R_H при невеликих потужностях навантаження.

Ємнісний фільтр доцільно застосовувати з високоомним навантажувальним резистором R_H при невеликих потужностях навантаження.

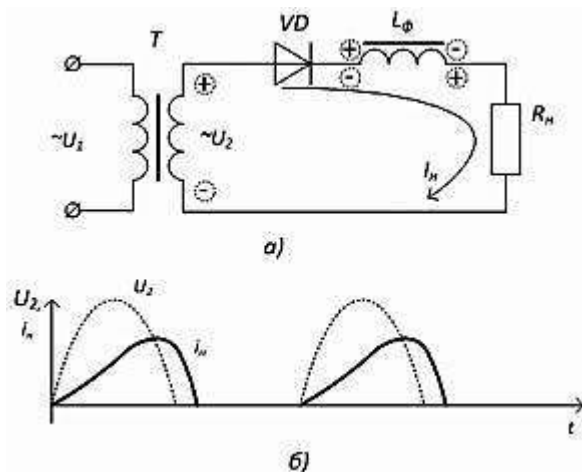


Рис. 8.19. Однофазний однопівперіодний випрямляч з індуктивним фільтром: а) схема, б) тимчасові діаграми роботи

Багатоланкові фільтри використовують згладжувальні властивості і конденсаторів, і котушок індуктивності. У малопотужних випрямлячах, у яких опір навантажувального резистора становить кілька кОм, замість дроселя L_Φ включають резистор R_Φ , що істотно зменшує масу і габарити фільтру.

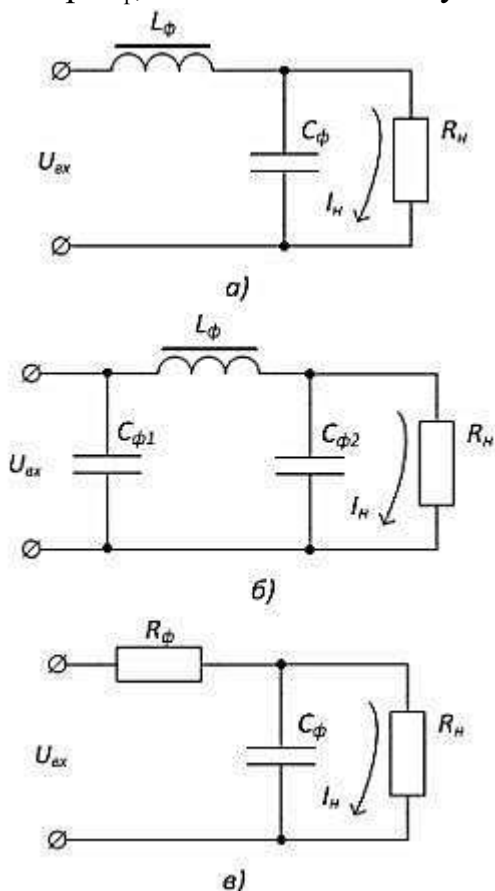


Рис. 8.20. Багатоланкові фільтри: а) Г – подібний LC, б) П – подібний LC, в) RC – фільтр

діляється між обмежуючим резистором $R_{огр}$ і паралельно включеними стабілітроном VD і резистором навантаження R_n .

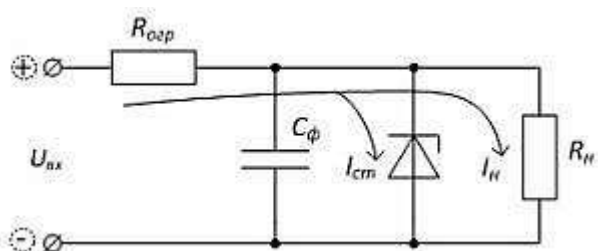


Рис. 8.21. Параметричний стабілізатор

Параметричні стабілізатори застосовують в якості допоміжних опорних джерел напруги, а також коли струм навантаження невеликий – не більше сотень міліампер.

Компенсаційний стабілізатор використовує в якості обмежувального резистора змінний опір транзистора. Зі збільшенням вхідної напруги зростає і опір транзистора, відповідно зі зменшенням напруги зменшується опір. При цьому напруга

На рис. 8.20 представлені типи багатоланкових LC- і RC- фільтрів.

Як згладжувальні конденсатори використовуються електролітичні конденсатори. Чим більше ємність, тим краще. Крім того, для надійності, конденсатори повинні бути розраховані на напругу, що в півтора-два рази перевищує вихідну напругу діодного моста.

Стабілітрони призначені для стабілізації постійної напруги (струму) на навантаженні при коливаннях напруги і зміні споживаного навантаженням струму.

Стабілізатори поділяються на стабілізатори напруги і струму, а також на параметричні та компенсаційні. Стабільність вихідної напруги оцінюють коефіцієнтом стабілізації $K_{ст}$.

Параметричний стабілізатор заснований на використанні елемента з нелінійною характеристикою – напівпровідникового стабілітрона. Напруга на стабілітроні майже постійна при значній зміні зворотного струму через прилад.

Схема параметричного стабілізатора приведена на рис. 8.21. Вхідна напруга $U_{вх}$ розпо-

При збільшенні вхідної напруги струм через стабілітрон збільшиться, значить, збільшиться струм через обмежувальний резистор, і на ньому буде відбуватися більше падіння напруги, а напруга навантаження залишиться незмінною.

Параметричний стабілізатор має $K_{ст}$ близько 20-50. Недоліками такого типу стабілізаторів є малі струми стабілізації і низький ККД.

на навантаженні залишається незмінною.

Схема стабілізатора на транзисторах представлена на рис. 8.22. Принцип регулювання вихідної напруги на R_H заснований на зміні провідності регулюючого транзистора VT1.

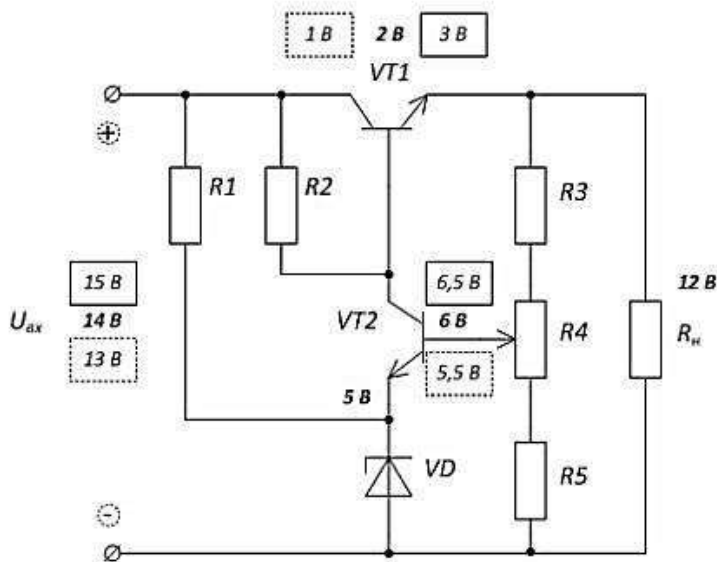


Рис. 8.22. Схема компенсаційного стабілізатора напруги

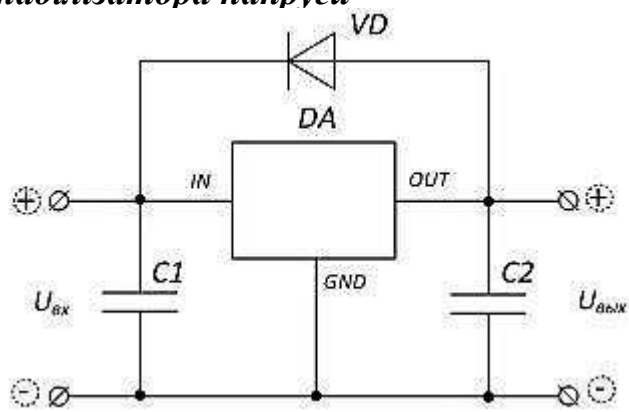


Рис. 8.23. Типова схема включення інтегрального стабілізатора напруги

Якщо стабілізатор регульований, то є вивід "ADJ" – регулювання.

Вибір стабілізатора проводиться виходячи із значення вихідної напруги, максимального струму навантаження і діапазону зміни вхідного напруги.

Блок живлення в комп'ютері виконує три функції. По-перше, змінний струм з побутової мережі електроживлення потрібно перетворити в постійний. Другим завданням БЖ є зниження напруги 220-230 В, надлишкового для комп'ютерної електроніки, до стандартних значень, необхідних для живлення окремих компонентів ПК – 12 В, 5 В і 3,3 В. Нарешті, БЖ відіграє роль стабілізатора напруг. Є два основних типи джерел живлення, які виконують перелічені функції – лінійні та імпульсні. В основі найпростішого лінійного БЖ (рис. 8.24) лежить трансформатор (T_1), на якому напруга змінного струму знижується до необхідного значення, а потім струм випрямляється діодним мостом (D_1).

Однак БЖ повинен забезпечити ще й стабілізацію вихідної напруги, що обумовлено як нестабільністю напруги в побутовій мережі, так і падінням напруги у відповідь на збільшення струму в навантаженні.

На транзисторі VT2 зібрана схема порівняння напруг і підсилювач постійного струму. У коло його бази включено вимірювальна ділянка R_4 , R_5 , коло емітера – джерело опорної напруги R_1 VD.

Наприклад, при збільшенні вхідної напруги, вихідна також зросте, що призведе до зростання напруги на базі транзистора VT2, в той же час потенціал емітера VT2 залишиться незмінним. Це призведе до збільшення струму бази, а значить і струму колектора транзистора VT2 – потенціал бази транзистора VT1 зменшиться, транзистор підкриється і на ньому буде відбуватися більше падіння напруги, а вихідна напруга залишиться незмінною.

На сьогоднішній день стабілізатори випускають у вигляді інтегральних схем. Типова схема включення інтегрального стабілізатора зображена на рис. 8.23.

Позначення виводів мікросхеми стабілізатора: "IN" – вхід, "OUT" – вихід, "GND" – загальний (корпус).

Щоб компенсувати падіння напруги, в лінійному БЖ параметри трансформатора розраховуються так, щоб забезпечити надлишкову потужність. Тоді при високому струмі в навантаженні буде спостерігатися необхідна напруга. Однак і підвищена напруга, яка виникне без будь-яких засобів компенсації при низькому струмові, теж неприйнятна.

У практичних схемах надмірна напруга усувається за рахунок включення в коло некорисного навантаження. У найпростішому випадку таким є резистор або транзистор учасних БЖ використовується мікросхема. Як би там не було, надлишкова потужність просто розсіюється у вигляді тепла, що негативно позначається на ККД пристрою.

У схемі імпульсного БЖ (рис. 8.25) виникає ще одна змінна, від якої залежить напруга на виході, оскільки послідовно з навантаженням вмикається ключ (яким зазвичай є транзистор), керований мікроконтролером в режимі широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Чим вища тривалість відкритих станів транзистора по відношенню до їх періоду (цей параметр називається duty cycle, в російськомовній термінології використовується зворотна величина – скважність імпульсів), тим вище напруга на виході. Через наявність ключа імпульсний БЖ також називається Switched-Mode Power Supply (SMPS).

Через закритий транзистор струм не йде, а опір відкритого транзистора в ідеалі дуже малий. Насправді відкритий транзистор має опір і розсіює якусь частину потужності у вигляді тепла. Крім того, перехід між станами транзистора не ідеально дискретний. І все ж ККД імпульсного джерела струму може перевищувати 90 %, в той час як ККД лінійного БЖ зі стабілізатором в кращому випадку досягає 50 %.

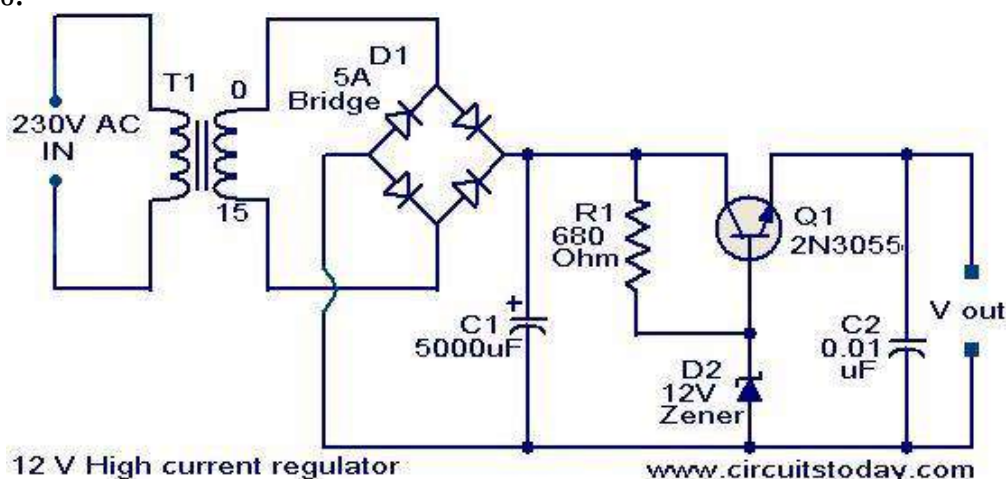


Рис. 8.24. Схема найпростішого лінійного блоку живлення

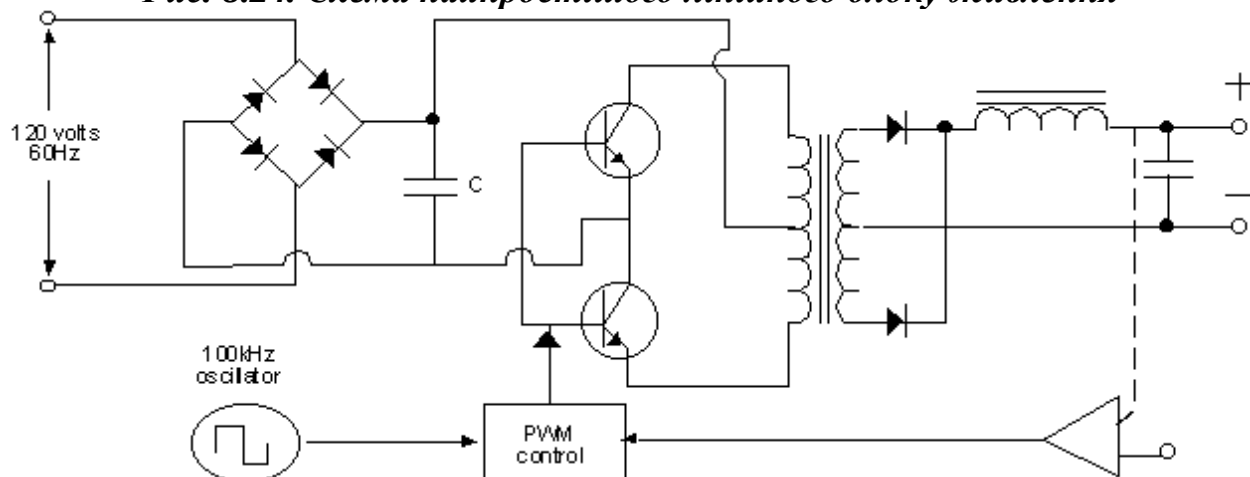


Рис. 8.25. Схема найпростішого імпульсного перетворювача напруги

Ще одна перевага імпульсних джерел живлення полягає в радикальному зменшенні габаритів і маси трансформатора в порівнянні з лінійними БЖ такої ж потужності. Відомо, що чим вища частота змінного струму в первинній обмотці трансформатора, тим менший необхідний розмір сердечника і число витків обмотки. Тому ключовий транзистор в колі розміщують не після, а до трансформатора і, крім стабілізації напруги використовують для отримання змінного струму високої частоти (для комп'ютерних БЖ це від 30 до 100 кГц і вище, а як правило – близько 60 кГц). Трансформатор, що працює на частоті електромережі 50-60 Гц, для потужності, необхідної стандартним комп'ютерам, був би в десятки разів масивнішим.

Лінійні БЖ сьогодні застосовуються головним чином в разі малопотужних пристроїв та коли імпульсні блоки досить дорогі, порівняно з пристроями, які треба живити. Це, наприклад, блоки живлення на 9-12 В для телевізійних антенних підсилювачів та ігрових приставок. А ось «зарядники» для мобільних телефонів і смартфонів вже виключно імпульсні – тут витрати виправдані. Завдяки істотно меншій амплітудній пульсації напруги на виході лінійні БЖ також застосовуються в тих областях, де ця якість затребувана.

Загальна схема блоку живлення стандарту АТХ

БЖ сучасного ПК являє собою імпульсне джерело живлення, на вхід якого подається напруга побутової електромережі з параметрами 220-238 В, 50-60 Гц, а на виході є ряд ліній постійного струму, основні з яких мають номінал 12, 5 і 3,3 В. Крім цього, БЖ забезпечує напругу –12 В, (колись ще й напругу –5 В), необхідну для шини ISA – шина введення/виведення IBMPC-сумісних комп'ютерів. Напруга –5 В в якийсь момент була виключена зі стандарту АТХ в зв'язку з припиненням підтримки самої ISA.

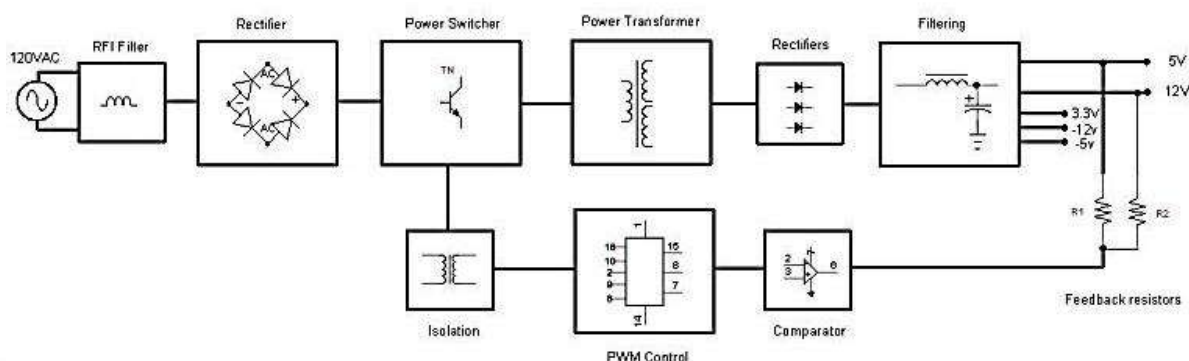


Рис. 8.26. Блок-схема сучасного імпульсного БЖ

На спрощеній схемі стандартного імпульсного БЖ (рис. 8.26), є чотири основні блоки:

- фільтр ЕМЗ – електромагнітних завад (RFI filter);
- первинний ланцюг – вхідний випрямляч (rectifier), ключові транзистори (switcher), що створюють змінний струм високої частоти на первинній обмотці трансформатора;



Рис. 8.27. Загальний вигляд БЖ

- основний трансформатор;
- вторинне коло – випрямлячі струму з вторинної обмотки трансформатора (rectifiers), згладжувальні фільтри на виході (filtering).
- широтно-імпульсний (ШІМ) блок регулювання.

У колі змінного струму з лінійним навантаженням і струм, і напруга змінюються за синусоїдальним законом. Але це не так у випадку з пристроями, що мають вхідний випрямляч, – такими як імпульсні БЖ. Блок живлення пропускає струм короткими імпульсами, які приблизно збігаються за часом з піками синусоїди напруги (тобто максимальною миттєвою напругою), коли заряджається згладжувальний конденсатор випрямляча (рис. 5).

Фільтр ЕМЗ

Фільтр на вході БЖ служить для придушення двох типів електромагнітних завад: диференціальних (differential-mode) – коли струм перешкоди тече в різні боки в лініях живлення, і синфазних (common-mode) – коли струм тече в одному напрямку.

Диференціальні перешкоди придушуються конденсатором СХ (великий жовтий плівковий конденсатор на рис. 6), включеним паралельно навантаженню. Іноді на кожен провід додатково під'єднується дросель, що виконує ту ж функцію.

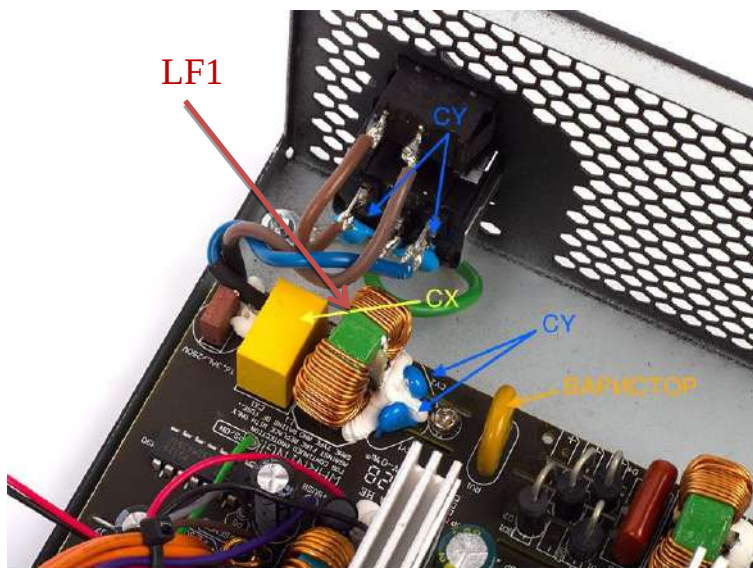


Рис. 8.29. Фото фільтрів електромагнітних завад

У минулому нерідко зустрічалися БЖ взагалі без фільтра ЕМЗ. У фільтрі якісного БЖ обов'язково є кілька деталей, що захищають від пошкодження сам пристрій або його власника. Майже завжди є найпростіший запобіжник для захисту від короткого замикання. Окремо виконується захист від короточасних коливань напруги за допомогою варистора (рис. 8.28). А ось засобів захисту від тривалого підвищення напруги в комп'ютерних БЖ ніяких немає. Цю функцію виконують зовнішні стабілізатори зі своїм трансформатором всередині.

Конденсатор в колі фільтра може зберігати значний заряд після відключення

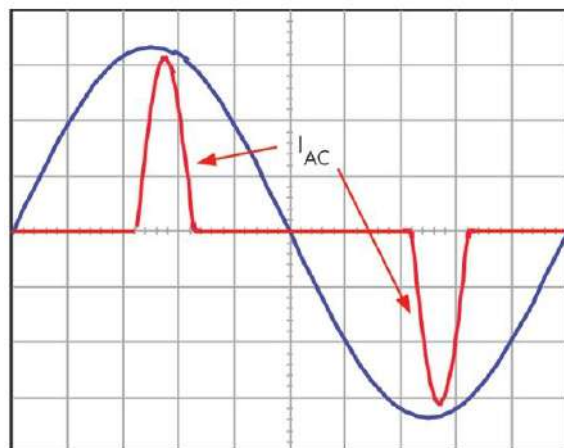


Рис. 8.28. Осцилограми синусоїдального та імпульсного струмів

Фільтр синфазних перешкод утворений конденсаторами СУ (сині каплевидні керамічні конденсатори на фото), в загальній точці з'єднують лінії живлення із заземленням, і синфазним дроселем (LF1 на фото), струм в двох обмотках якого тече в одному напрямку, що створює опір для синфазних перешкод.

Особливості фільтра електромагнітних завад. У дешевих моделях встановлюють мінімальний набір деталей фільтра, в більш дорогих описані схеми утворюють повторювані (повністю

від живлення. Щоб не відбулось випадкове враження людини, яка доторкнулась до роз'єму живлення, між дротами встановлюють резистор великого номіналу, який розряджає конденсатор.

До речі, наявність фільтра в блоці живлення ПК (а також в БЖ монітора і практично будь-якої комп'ютерної техніки він теж є) означає, що купувати окремий «мережевий фільтр» замість звичайного подовжувача, – недоцільно, оскільки всередині «мережевого фільтра» – ті ж елементи. Єдина умова в будь-якому випадку – нормальна трьохконтактна проводка з заземленням, щоб конденсатори СУ, з'єднані з заземленням, просто не зможуть виконувати свою функцію.

Вхідний випрямляч

Після фільтра змінний струм перетворюється в постійний за допомогою діодного моста – як правило, у вигляді збірки в загальному корпусі, який інколи має окремий радіатор для охолодження моста. Міст, зібраний з чотирьох дискретних діодів, – атрибут дешевих блоків живлення. Можна також поцікавитися, на який струм розрахований міст, щоб визначити, чи відповідає він потужності самого БЖ. Хоча за цим параметром, як правило, є хороший запас.

Блок активного PFC

PFC – це аббревіатура від слів Power Factor Correction (корекція коефіцієнта потужності) (рис. 8.30).

Ще зі шкільного курсу фізики відомо, що потужність буває активна і реактивна. Активна потужність виконує корисну роботу, зокрема, виділяючись у вигляді тепла. Класичні приклади – праска і лампа розжарювання, які володіють майже чисто активним навантаженням, напруга і струм на такому навантаженні збігаються за фазою.

Але існують і навантаження реактивно-індуктивне (електродвигуни, дроселі, обмотки трансформаторів) і ємнісне (конденсатори). У реактивних колах існує зсув фаз між струмом і напругою, так званий $\cos \phi$, тобто струм може відставати від напруги (в індуктивному навантаженні) або випереджати його (в ємнісному навантаженні).

Реактивна потужність невиконує корисної роботи, а тільки переноситься від генератора до навантаження і назад, марно нагріваючи дроти. Це означає, що проводка повинна мати запас по перерізу. Чим більший зсув фаз між струмом і напругою, тим більша частина потужності марно розсіюється на дротах.

У комп'ютерному блоці живлення після випрямного моста стоять конденсатори досить великої ємності. Таким чином, присутня реактивна складова потужності. Якщо комп'ютер використовується в будинку, то зазвичай проблем ніяких не виникає. Реактивна потужність звичайним побутовим лічильником електроенергії не фіксу-



Рис. 8.30. Маркування на блоці живлення



Рис. 8.31. Фото частини БЖ з дроселем PFC

ється, але якщо на підприємстві працює сотня чи тисяча комп'ютерів, враховувати реактивну потужність необхідно! Типове значення $\cos\varphi$ для комп'ютерних блоків живлення без корекції – близько 0,7, т.б. проводка повинна бути розрахована з 30 % запасом за потужністю.

У самому блоці живлення струм через вхідні високовольтні діоди протікає у вигляді коротких імпульсів. Ширина і амплітуда цих імпульсів може змінюватися в залежності від навантаження. Велика амплітуда струму несприятливо впливає на високовольтні конденсатори і діоди, скорочуючи термін їх служби. Якщо випрямні діоди обрані «впритул» (що часто буває в дешевих моделях), то надійність всього блоку живлення ще більше знижується. Для усунення цих явищ і використовують пристрої, що підвищують коефіцієнт потужності. Згадаємо, що векторна сума реактивної і активної потужності називається повною потужністю, а відношення активної потужності до повної називається коефіцієнтом потужності (не плутати з ККД). Такі пристрої діляться на активні і пасивні. Пасивна схема PFC представляє собою дросель, включений між випрямлячем і високовольтними конденсаторами. Дросель – це індуктивність, що володіє реактивним опором. Індуктивність дроселя перешкоджає наростанню струму, імпульси струму злегка розтягуються, їх амплітуда зменшується. Однак $\cos\varphi$ підвищується незначно і великого виграшу за реактивною потужністю не відбувається.

Для більш істотної компенсації застосовують активні схеми PFC. Активна схема підвищує $\cos\varphi$ до 0,95 і вище. Активна схема містить в собі перетворювач на основі індуктивності (дроселя) і силових комутуючих елементів, які управляються окремим контролером. Дросель періодично то запасав енергію, то віддає її. На виході PFC є фільтруючий електролітичний конденсатор. Блок живлення з активною PFC менш чутливий до короткочасних «провалів» напруги живлення, що є перевагою. Однак застосування активної схеми здорожчує конструкцію.

На закінчення відзначимо, що наявність PFC в конкретному БЖ можна ідентифікувати за літерами «PFC» або «ActivePFC».

Вторинне коло

Вторинне коло – це все, що знаходиться після вторинної обмотки трансформатора. У більшості сучасних блоків живлення трансформатор має дві обмотки: з одного – з них знімається напруга 12 В, з іншого – 5 В. Струм спочатку випрямляється за допомогою збірки з діодів. Більш ефективними з точки зору ККД є синхронні випрямлячі, в яких замість діодів використовуються польові транзистори. Але це прерогатива по-справжньому просунутих і дорогих БЖ, що претендують на сертифікат 80 PLUS Platinum.

Шина 3,3 В, як правило, виводиться від тієї ж обмотки, що і шина 5 В, тільки напруга знижується за допомогою насичувального дроселя. Спеціальна обмотка на трансформаторі під напругу 3,3 В – екзотичний варіант. З негативних напруг в поточному стандарті ATX залишилося тільки -12 В, яка знімається з вторинної обмотки під шину 12 В через окремі слабкострумкові діоди.

Широтно-імпульсне (ШИМ) регулювання ключем перетворювача змінює напругу на первинній обмотці трансформатора, а отже – на всіх вторинних обмотках відразу. При цьому споживання струму комп'ютером зовсім не рівномірно розподілене між шинами БЖ. У сучасному «залізі» найбільш навантаженою шиною є 12 В.

Для роздільної стабілізації напруг на різних шинах потрібні додаткові захо-

ди. Класичний спосіб реалізується використанням дроселя групової стабілізації. Три основні шини пропущені через його обмотки, і в результаті якщо на одній шині збільшується струм, то на інших – падає напруга. Припустимо, на шині 12 В зріс струм, і, щоб запобігти падінню напруги, ШІМ-контролер зменшив скважність імпульсів ключових транзисторів. В результаті на шині «5 В» напруга могла б вийти за допустимі рамки, але вона коректується дроселем групової стабілізації. Напруга на шині «3,3 В» додатково регулюється ще одним насичувальним дроселем. У більш досконалому варіанті забезпечується роздільна стабілізація шин «5 В» і «12 В» за рахунок насичувальних дроселів, але зараз ця конструкція в дорогих якісних БЖ поступилася місцем перетворювачам DC-DC. В останньому випадку трансформатор має єдину вторинну обмотку з напругою 12 В, а напруги 5 В і 3,3 В одержують завдяки перетворювачам постійного струму. Такий спосіб найбільш сприятливий для стабільності напруг.



Рис. 8.32. Стабілізуючі дроселі і вихідний фільтр (Antec VP700P)

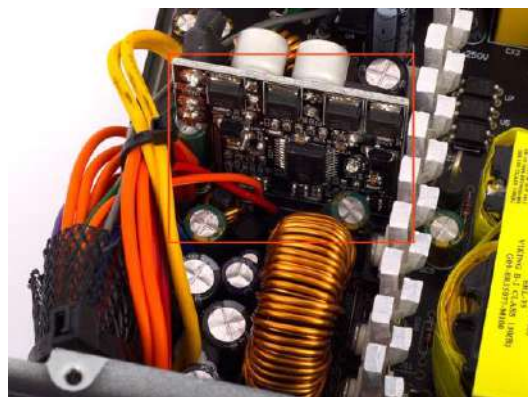


Рис. 8.33. Перетворювач DC-DC для шини 5 В (Cooler Master G650M)

Фінальною стадією на кожній шині є фільтр, який згладжує пульсації напруги, що викликаються ключовими транзисторами. Крім того, у вторинне коло БЖ в тій чи іншій мірі пробиваються пульсації вхідного випрямляча, чия частота дорівнює подвоєній частоті електромережі. До складу фільтру пульсацій входить дросель і конденсатори великої ємності. Для якісних блоків живлення характерна ємність не менше 2000 мкФ, хоча деякі виробники дешевих моделей встановлюють конденсатори, наприклад, дещо меншого номіналу, що неминуче відбивається на амплітуді пульсацій.

Чергове живлення + 5VSB. Опис компонентів блоку живлення був би неповним без згадки про джерело чергової напруги 5 В, який робить можливим сплячий режим ПК і забезпечує роботу всіх пристроїв, які повинні бути включені постійно. Ця система живиться від окремого імпульсного перетворювача з малопотужним трансформатором. У деяких БЖ зустрічається і третій трансформатор, який використовується в колі зворотного зв'язку для ізоляції ШІМ-контролера від первинного кола основного перетворювача. В інших випадках цю функцію виконують оптопари – світлодіод і фототранзистор в одному корпусі.

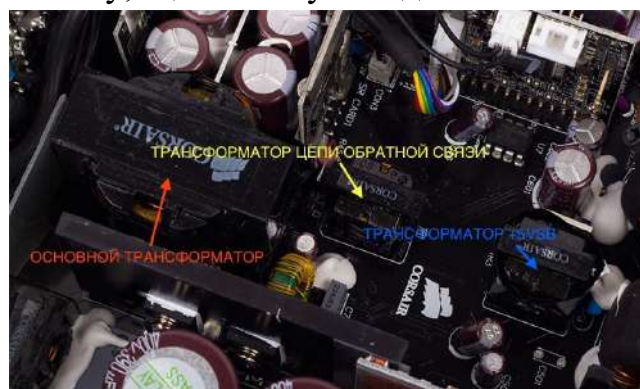


Рис. 8.34. Трансформатори (Corsair HX750i)

Лекція № 9

Тема: "Перспективи розвитку елементної бази ЕОМ, квантові комп'ютери"

ПЛАН

- 9.1. Основні напрямки сучасної твердотільної електроніки.
- 9.2. Перспективні напрямки розвитку елементної бази ЕОМ.
- 9.3. Квантові комп'ютери.

9.1. Основні напрямки сучасної твердотільної електроніки

Електроніка – це галузь фізики й техніки, в якій досліджуються електронні процеси, що пов'язані з утворенням та керуванням руху вільних електронів та/або інших заряджених частинок в різноманітних середовищах (вакуум, рідина, тверде тіло, газ, плазма) та на їх границях, а також проблеми й методи розробки електронних приладів різного призначення.

Електроніка включає три області досліджень і розробок: 1) вакуумну електроніку (охоплює питання створення електровакуумних приладів); 2) квантову електроніку (охоплює питання створення, в першу чергу, лазерів і мазарів); 3) твердотільну електроніку, основні напрямки якої пов'язані з розробкою і виготовленням різних видів приладів, пристроїв і систем напівпровідникової та діелектричної електроніки, включаючи інтегральну напівпровідникову мікроелектроніку (наноелектроніку), акустоелектроніку, оптоелектроніку, кріоелектроніку, молекулярну електроніку тощо.

Основні напрямки сучасної твердотільної електроніки пов'язані з розробкою і виготовленням різних видів приладів, пристроїв і систем напівпровідникової та діелектричної електроніки, включаючи інтегральну напівпровідникову мікроелектроніку, наноелектроніку, акустоелектроніку, оптоелектроніку, кріоелектроніку та молекулярну електроніку.

Мікроелектроніка – це підрозділ твердотільної електроніки, пов'язаний з вивченням і виробництвом електронних компонентів з геометричними розмірами характерних елементів порядку декількох мікрметрів і менше. Наноелектроніка – це підрозділ твердотільної електроніки, що займається створенням, дослідженням і застосуванням електронних приладів з нанометровими розмірами елементів (1-100 нм), в основі функціонування яких лежать вже квантові ефекти.

Фактично, людство, й Україна в тому числі, стоять на порозі "четвертої промислової революції (Індустрії 4.0)" та повноцінного переходу до шостого технологічного укладу, які передбачають не тільки широкомасштабне впровадження у виробництво супернанотехнологій, а й принципово новий підхід до виробництва, що заснований на масовому впровадженні інформаційних технологій в промисловість та повної автоматизації процесів і поширенні штучного інтелекту, домінуванням "Цифрової країни" та "Цифрової економіки" з прямим чи опосередкованим "інформаційним контролем" та "соціальним рейтингом" всіх членів суспільства, поширенням саморегульованого "Інтернету речей" на основі систем зв'язку стандарту 5G та 6G для "загальної машинізації".

В той же час, самі останні досягнення технологій серійного виробництва напівпровідникових електронних компонентів твердотільної інтегральної наноелектроніки вже дозволили виготовляти в 2021 році по нормам 7-нм техпроцесу найбі-

льші та найбільш продуктивніші в світі суперпроцесори Cerebras Wafer Scale Engine 2 (WSE-2) на одному кристалі площею 46225 мм² ("квадрату" 215×215 мм з цілої 300-мм пластина), що вміщує 2,6 трильйона транзисторів у 850 тис. програмованих ядрах, які працюють на частоті 2,5-3 ГГц та оптимізовані для обчислень у векторному просторі. Суперчип має 40 Гбайт вбудованої пам'яті SRAM з пропускною здатністю до 20 Петабайт/с (у неї завантажується одразу вся необхідна для проведення обчислень з використанням всіх робочих ядер інформація, при цьому навантаження розподіляється рівномірно таким чином, щоб обробка даних була завершена усіма ядрами одночасно), при загальній пропускній здатності до 220 Пбіт/с, але споживає понад 15 кВт електроенергії. В продовж 2022-2030 рр. провідними компаніями світу планується вже перехід на серійне виробництво мікропроцесорів за 5-нм, 3-нм, 2-нм і 1-нм техпроцесами з щільністю транзисторів до 400-500 млн./мм².

А найбільшу, станом на листопад 2021 року, обчислювальну потужність (робоча обчислювальна швидкодія становить 442 петафлопс (10¹⁵ операцій з рухомою комою за секунду), має японський суперкомп'ютер "Fugaku", що використовує 158976 об'єднаних разом 48-ядерних 64-розрядних мікропроцесорів Fujitsu A64FX (7-нм техпроцес EUVL з майже 9 млрд. транзисторів, плюс допоміжні ядра для керування) на архітектурі ARM (сумарна кількість ядер 7630848) з масштабованими векторними розширеннями. При вартості в понад 1,3 млрд. дол. та споживанні електричної потужності в майже 30 МВт, його основний машинний зал площею 3000 м² містить 432 шафи з 384 розрахунковими вузлами кожен, тепло від яких відводиться холодною проточною водою.

Кріоелектроніка (кріогенна електроніка) – це один з напрямків сучасної твердотільної електроніки, що займається **застосуванням явищ, які мають місце в твердих тілах при кріогенних температурах в присутності електричних, магнітних і електромагнітних полів (взаємодії електромагнітного поля з електронами в твердих тілах при кріогенних температурах)**, для створення електронних приладів і пристроїв. Технології кріоелектроніки включають прилади та пристрої, в яких використовуються явища і процеси, що протікають при низьких температурах ($T < 90$ К). Більшість сучасних кріоелектронних приладів засновані на явищі надпровідності (перетворенні в нуль електричного опору постійному струму та виштовхуванні магнітного поля з об'єму при охолодженні надпровідників нижче певної критичної температури) металів і сплавів, зокрема, на ефекті Джозефсона (протікання надпровідного струму через тонкий шар ізолятора, що розділяє два надпровідника (контакт Джозефсона); якщо струм не перевищує критичного значення, то падіння напруги на контакті відсутнє, якщо перевищує – то виникає падіння напруги і контакт випромінює ЕМ хвилі), а також на явищі одноелектронного тунелювання (проходження через потенційний бар'єр мікročастинки, енергія якої менше висоти бар'єру) між надпровідниками. До кріоелектронних приладів слід віднести: запам'ятовуючі та логічні кріоелектронні пристрої обчислювальної техніки; генератори, підсилювачі, перемикачі, резонатори, детектори, перетворювачі частоти, фільтри, лінії затримки, модулятори та ін. прилади НВЧ; надпровідні магнітometri, гальванometri, болометри та ін. Одним із завдань кріоелектроніки є створення електронних охолоджувачів, а також мініатюрних приладів, що поєднують в одній конструкції електронну схему, кріостат, що слугує герметичною оболонкою, та охолоджуючий пристрій.

Молекулярна електроніка (МЕ) вивчає принципи дії, синтез і застосування

одиночних молекул та їх ансамблів як функціональних елементів електроніки з метою створення нової елементної бази – молекулярних електронних пристроїв. Вона поділяється на дві самостійні, але пов'язані між собою області: 1) наномолекулярну електроніку, мета якої – досягнення мінімально допустимих розмірів електронних пристроїв (транзисторів, елементів пам'яті та ін.), співставних з розміром одиночних молекул; 2) макромолекулярну електроніку, орієнтовану на створення електронних схем, сонячних батарей, фоточутливих елементів, хімічні сенсори і т.п. на основі молекулярних структур. Важлива особливість технології МЕ – здатність атомів і молекул при певних умовах самовільно з'єднуватися в задані молекулярні утворення (принцип самозборки), що є засобом організації штучних квантових структур. Саме синтез молекулярної системи в процесі самозборки забезпечує ідентичність зібраних ансамблів і розмірів елементів, надійність та ефективність протікання квантових процесів і функціонування електронних пристроїв. Ведеться розробка й підготовка виробництва молекулярної резистивної пам'яті – прототипу штучного синапсу і нейрона. Створення засобами МЕ штучних нейронів, різних типів сенсорів, включених в єдину мережу, дозволить реалізувати потенційні можливості, закладені в нейрокомп'ютерну ідеологію, отримати принципово новий тип інформаційно-обчислювальних систем і підійти впритул до вирішення проблеми штучного інтелекту.

9.2. Перспективні напрямки розвитку елементної бази ЕОМ

До перспективних технологій ЕОМ майбутнього, слід віднести:

- молекулярні або атомні технології;
- ДНК й інші біологічні матеріали;
- тривимірні технології;
- технології, засновані на фотонах замість електронів;
- квантові технології, в яких використовуються елементарні частинки.

Так, ще у червні 2001 року IBM оголосила про нову технологію, засновану на ефекті притягання атомів різних кристалів. При нанесенні шару кремнію поверх іншого матеріалу, атоми якого рознесені ширше, атоми кремнію «шикуються» в лінію, витягаючи кремній ("розріджуючи" його структуру). Електрони зустрічають менше опору на своєму шляху і рухаються на 70 % швидше, що дозволяє збільшити продуктивність мікросхем на 35 %, навіть без зменшення розміру транзисторів. Технологія напруженого кремнію застосовується в промисловому виробництві з 2003 року.

Одним з важливих шляхів розв'язання проблем планарної технології наноелектроніки є перехід до розробки **тривимірних (3D) компонентів інтегральних мікросхем** на основі **3D польових транзисторів** та **польових транзисторів на основі графену** та **графенової нанострічки** шириною до 10 нм

Новий підхід в електроніці також полягає в поєднанні в компоненті неживої і живої форм. ДНК-транзистор – це новий нанорозмірний пристрій, здатний контролювати положення молекули ДНК в нанопорі з точністю до одного нуклеотиду. Така структура зробить революцію в сучасній технології секвенування. Секвенування біополімерів (білків і нуклеїнових кислот ДНК і РНК) – це визначення їх первинної амінокислотної або нуклеотидної послідовності. В результаті отримується лінійний символічний опис, який представляє атомну структуру молекули. ДНК-транзистор для більш ефективного секвенування геному являє собою довгу

нанорозмірну пору з рядом напівпровідникових і металевих добавок, всередині якої знаходиться довга молекула ДНК. Діаметр пори повинен бути не надто великий – всього кілька нанометрів. Завдяки добавкам всередині ДНК-каналу концентруються заряди, які можна порівняти з зарядами одиночних електронів. Через різницю потенціалів між центральним і бічними електродами формується електростатична пастка, яка захоплює молекулу ДНК. Зміна частоти напруги призводить до руху молекули всередині пори із заданою точністю до одного нуклеотиду.

Окремо стоїть можливість створення транзисторів з ДНК людини, молекули яких володіють здатністю до самозборки в різноманітні правильні геометричні форми – трикутники, квадрати, зірочки тощо.

Зараз проводяться дослідження взаємодії комп'ютера з набором живих клітин (індивідуально), що дозволяє не тільки отримувати від них інформацію, а й впливати на роботу генів в цих клітинах. Розглядається «двосторонній підхід» для вирішення проблеми тісної і ефективної взаємодії «живих» нейронів і електроніки. Іонний потік в клітині перетворює її в складову частину польового транзистора, дозволяючи впливати на роботу електронного пристрою. Наприклад, створений спеціальний чіп з поперечним розміром в 1 мм містить 16384 транзистора і сотні конденсаторів. Коли на нього «висаджуються» нервові клітини, транзистори отримують від них сигнали, а конденсатори під керуванням транзисторів посиляють сигнали від електроніки нейронам. З точки зору фізики, взаємодія нейронів і схеми відбувається завдяки проходженню іонів натрію через клітинну мембрану, що змінює її локальний заряд, на який реагує транзистор. У свою чергу, керований електронікою заряд на конденсаторі впливає на іонний струм, що проходить через мембрану, таким чином, «змушуючи» нейрон реагувати на «запит» ззовні. Методами генної інженерії вчені модифікували нейрони тварин, збільшивши в їх оболонках число іонних каналів і підвищивши їх активність. Сам чіп також був удосконалений, щоб максимально адаптувати його до нейрона – покрили білками, які в мозку пов'язують нейрони разом (свого роду клей) та активують в них іонні канали. У чіпі були використані транзистори з меншим шумом, ділянки для збудження нейронів і сусідні з ними транзистори були зменшені до відстані в кілька мікронів, щоб можна було посилати імпульс і отримувати відгук тільки від одного нейрона. Тісна взаємодія нервових клітин і електронної схеми дозволяє дослідникам змусити сигнали чіпа впливати на нейрон так, щоб в ньому «включався» новий ген.

Neuralink – американська компанія, яка займається розробкою мозкових імплантантів, які стануть інтерфейсом для взаємодії між мозком людини та електронним пристроєм. Майбутніми продуктами Neuralink мають бути нейронні чипи, інтегровані в мозок людини з метою усунення наслідків певних хвороб мозку, розширення пам'яті, лікування паралічу, сліпоты, депресії, хвороби Паркінсона та оптимальнішого керування складними системами тощо. Припускається можливість подумки грати у відеоігри, викликати авто Tesla, або завантажувати і відтворювати спогади. У квітні 2021 р. оприлюднено відео з мавпою, де, після того як восьмирічному самцю макаки вживили чип, його спонукали керувати джойстиком, щоб рухати м'ячик по екрану. При цьому вчені досліджували, які ділянки мозку мають активність. Через шість тижнів джойстик прибрали, а мавпа вже могла керувати рухом м'ячика силою думки. Імплантація електричних дрітів і будь-яких інших об'єктів у мозок вимагає великої точності, бо він сприймає

сторонні предмети, як загарбників, утворюючи навколо них рубцеву тканину, яка заважає передачі сигналу. **Mema Neuralink** – зробити пристрій передачі імпульсів безпечним і здатним перебувати у мозку необмежений час. Ця високошвидкісна обчислювальна система має завдавати найменшої шкоди мозковим тканинам серед усіх існуючих методів та засобів нейропротезування. *Щоб імплантувати мікросхеми в мозок, у компанії сконструювали спеціального робота для проведення нейрохірургічних операцій*, що допомагає уникнути пошкоджень кровоносних судин. Прототип чипу *Neuralink «Link» v0.9* (2020 рік) має *пласку циліндричну форму діаметром 23 мм і висотою 8 мм та 1024 електроди*. В одному пристрої безпосередньо *об'єднанні чип та акумуляторна батарея*. Її заряду вистачатиме на 12 годин, процес індукційної зарядки має тривати 12 годин. Передбачається, що капсула-приймач буде кріпитися за вухом, як слуховий апарат. Від неї до мозку йдуть ниткоподібні електроди. Всього в мозок імплантують до 1500 електродів, кожен з яких у 4 рази тонший за людську волосину. Один процесор завбільшки 4x4 мм зможе обробляти інформацію з 10 тис. електродів. Кабель USB-C забезпечить максимальну пропускну здатність передачі даних. *Link зчитує дані в мозку та з'єднується з різними пристроями Bluetooth на відстані до 10 метрів*. У майбутньому чіп зможе не лише зчитувати, а й записувати інформацію: це знадобиться для лікування захворювань.

9.3. Квантові комп'ютери

Можливості пристроїв, які мають в своїй основі класичні принципи обчислювальних машин, в останні роки досягли рівня, при якому більшість завдань може бути вирішено відносно швидко і досить точно. Стандартні операції індивідуального користувача навіть портативними пристроями виконуються блискавично. Однак в різних областях знань залишаються проблеми, вирішити які, в тому числі з використанням кращих суперкомп'ютерів світу, не є можливим досі. При цьому процес вдосконалення існуючих комп'ютерів кінцевий та описаний законом Мура: кількість транзисторів, що розміщуються на кристалі інтегральної схеми, подвоюється кожні 24 місяці. Але сучасні транзистори вже досягли розміру в кілька нанометрів, і в майбутньому електронні напівпровідникові компоненти неможливо буде зменшувати нескінченно, тому що їх елементи будуть складатися з одного атома. Розвиток класичних комп'ютерів у вигляді хмарних обчислювальних потужностей також обмежений по площі та споживаній енергії. Крім того, не кожен алгоритм піддається розпаралелюванню. Ефективна обробка великих обсягів даних вимагає високопродуктивних обчислень в області штучного інтелекту, наукомістких виробничих напрямків, моделювання хімічних і фізичних явищ і процесів, тобто там, де перестає вистачати можливостей сучасних суперкомп'ютерів. Вирішення цієї проблеми можливе в застосуванні новітніх технологій квантових комп'ютерів.

Власне, **квантовий комп'ютер** – це обчислювальний пристрій, що використовує явища **квантової суперпозиції (паралелізму)** та **квантової заплутаності** для передачі й обробки даних, тобто в основу роботи його центрального процесора закладена логіка квантової механіки з використанням особливих квантових алгоритмів. Такий комп'ютер принципово відрізняється від традиційного комп'ютера, що має архітектуру фон Неймана та сприймає будь-яку інформацію у вигляді бінарного коду – біту, що може бути в одному з двох можливих станів: 0 або 1.

Будь-який класичний процесор представляє ці два стани рівнями низької або високої напруги всередині напівпровідникового транзистора. Його завдання вибрати нуль або одиницю. Квантові процесори виготовлені за таким же принципом, але радикальна відміна в тому, що замість транзистора в них використовуються **кубіти (Qubit) – квантові біти**. Це квантові системи з двома станами, проте на відміну від звичайного біта вони можуть зберігати набагато більше інформації ніж просто один або нуль, бо можуть існувати в будь-якій суперпозиції цих станів – одно-часно представляти обидва стани. Двом значенням кубіта можуть відповідати, наприклад, основний та збуджений стан атома, напрямки вгору і вниз спина електрона, атомного ядра (наприклад, спин квантової частинки розташований у напрямку зовнішнього поля – 0 або проти – 1), напрямок струму в надпровідному кільці. Кубіти можуть бути засновані на реальних об'єктах мікросвіту (нейтральних атомах в оптичних пастках, іонах в електромагнітних пастках, електронних спінах в квантових точках, фотонах), так і на штучних атомах – надпровідникові кубіти.

У кубіта можливе існування не тільки двох станів, а й їх суперпозиції, що обумовлено квантовою природою явищ мікросвіту.

На сучасному етапі створення квантових комп'ютерів іде у двох напрямках: 1) спеціалізовані квантові комп'ютери, які спрямовані на вирішення одного конкретного специфічного завдання, наприклад, завдання оптимізації (квантові комп'ютери D-Wave); 2) універсальні квантові комп'ютери, які здатні реалізувати довільні квантові алгоритми (Шора, Саймона, Гровера і т.д.) – в реалізації від IBM, Google та ін. Також йдуть роботи над квантовими сенсорами та квантовими мережами, як основами для квантової криптографії. В поточному різноманітті фізичних реалізацій кубіта найбільш відомі і поширені: надпровідникові кубіти, зарядові кубіти, іонні пастки, квантові точки і безліч інших екзотичних ідей (аніонів, майоранівських ферміонів, бозонного семплінгу фотонів та ін.) З усього цього різноманіття найбільш опрацьованим є перший метод отримання кубітів, заснований на надпровідниках. Google, IBM, Intel та інші провідні гравці використовують саме його для побудови своїх систем.

Так, ще у 2007 році компанія D-Wave Orion збрала свій перший 16-кубітовий квантовий комп'ютер, в якому квантовий процесор являв собою сукупність ніобієвих надпровідних спіральних доріжок, розділених ізолятором, на кремнієвій підкладці, що охолоджувався до робочої температури 10 мК. Створені на чипі переходи Джозефсона, що склалися з двох сегментів надпровідного ніобію, пов'язаних слабким ізолюючим бар'єром, для Куперівських пар електронів в їх області ставали еквівалентом електроноподібних квазічастинок, що могли тунелювати через ізолятор в переході, ефективно проводячи через нього струм. В ніобієвих спіралях струм міг протікати за годинниковою стрілкою, проти неї або змішано (в обох напрямках), що відповідало "0" і "1" або суперпозиції двох значень в кубіті. Таким чином, перший квантовий чіп став повністю металевим магнітним пристроєм, в якому вся інформація зберігалась у вигляді напрямків течії струму по металевих петлях і переходах. А в 2019 році квантовий комп'ютер Google з 53-кубітовим надпровідним квантовим процесором "Sycamore", робоча температура якого -273,11 °С, досяг квантової переваги – зміг за 200 с виконати розрахунок, на який найпотужнішому тоді в світі суперкомп'ютеру Summit IBM (робоча обчислювальна швидкодія становить 122 петафлопе, складається з 4608 обчислювальних сер-

верів IBM Power Systems AC922, на кожному з яких встановлено два 22-ядерні процесори IBM Power9, що споживають 15 МВт електроенергії, а вбудована пам'ять сягає 10 петабайт) знадобилося б приблизно 10 тис. років. Фактично, це квантова інтегральна система, що включає в себе крім кріостату з кубітами ще й класичну електроніку, яка відповідає за віддалений доступ фахівців до системи для програмних досліджень і аналізу отриманих даних. При цьому всі елементи системи надійно захищені від взаємних і зовнішніх перешкод.

Для виконання таких квантових обчислень на квантовому комп'ютері потрібна реалізація наступних макрооперацій: задання вихідних даних → створення квантової суперпозиції → виконання обчислень у суперпозиції та перетворень кубітів → зменшення шуму вимірювання і зчитування даних → аналіз вихідних даних. У всіх квантових алгоритмах присутні наступні етапи: 1) підготовка суперпозиції вхідних даних для обчислення функції; 2) застосування самої функції (алгоритму або квантового оракула); 3) перетворення отриманих станів таким чином, щоб ймовірність потрібного для нас результату була близька до одиниці (калібрування обладнання, зменшення шуму, багатократні запуски процесу розв'язування задачі). В той же час, ефективність роботи квантових комп'ютерів з різною структурою та фізичними принципами роботи залежить не тільки від кількості в них кубітів, а й кількості зв'язків між ними, оскільки кубіти не підключають до спільної шини передачі даних, як в ЕОМ. В той же час, якщо напівпровідниковий процесор може працювати практично в будь-яких умовах, то квантовому заважає майже все, що нас оточує в реальному житті: найменший шум, мінімальна зміна температури, магнітного поля, мізерний сторонній електричний сигнал або вібрація – це все призводить до колапсу кубіта і повної втрати даних. Навіть охолодження до екстремально низьких температур в десятки мК, не усувають ситуації, коли "шуми" перевищують корисний сигнал. Однією з головних труднощів при побудові квантових комп'ютерів є збереження квантових станів якомога довше, що найчастіше досягається низькими температурами та контролюванням часу виконання обчислень. Найменше порушення фізичного стану системи може зруйнувати квантові стани, і тоді квантові обчислення матимуть помилки, які потрібно буде виправляти. По-перше, квантовий комп'ютер (на відміну від звичайного) в якості носіїв інформації використовує квантові об'єкти, а для проведення обчислень квантові об'єкти повинні бути з'єднані в квантову систему. **Квантовий об'єкт** – об'єкт мікросвіту (квантового світу), який проявляє квантові властивості: має певний стан з двома граничними рівнями; знаходиться в суперпозиції свого стану до моменту вимірювання; заплутується з іншими об'єктами для створення квантових систем; виконує теорему про заборону клонування (не можна скопіювати стан об'єкта). **Квантова система** – система заплутаних квантових об'єктів, що володіє наступними властивостями: квантова система знаходиться в суперпозиції всіх можливих станів об'єктів, з яких вона складається; не можна дізнатися стан системи до моменту вимірювання; у момент вимірювання система реалізує один з можливих варіантів своїх граничних станів.

Перша властивість квантової системи полягає в тому, що якщо вона не спостерігається, то вона знаходиться в суперпозиції всіх можливих станів, тобто, у випадку квантової системи з N кубітів, вона знаходиться в стані, що є суперпозицією усіх базових станів, тому зміна системи стосується всіх 2^N базових станів одночасно – **квантовий регістр** ("ланцюжок") з 20 заплутаних кубітів здатен збері-

гати в собі 2^{20} значень квантових станів одночасно, а з 50 заплутаних кубітів – уже 2^{50} значень. Завдяки суперпозиції кубіт може приймати значення, отримані шляхом їх комбінування, і перебувати у всіх цих станах одночасно – квантова система одночасно рухається по всім можливим шляхам. У цьому полягає паралельність квантових обчислень, тобто відсутність необхідності послідовно перебирати всі можливі варіанти станів системи. Крім того, для опису точного стану системи квантовому комп'ютеру не потрібна величезна обчислювальна потужності і обсяги оперативної пам'яті, так як для розрахунку системи з 100 частинок досить лише 100 кубітів, а не трильйон трильйонів біт. Фактично, робота звичайного і квантового комп'ютерів може бути проілюстрована пошуком виходу з лабіринту: звичайний комп'ютер послідовно перебирає всі можливі варіанти, впираючись в глухі та повертаючись, а квантовий комп'ютер може перевірити всі можливі ходи за один раз.

Друга властивість квантової системи – властивість квантової заплутаності (зв'язку один з одним незалежно від відстані), що описує сильні кореляції квантових частинок, навіть в разі якщо ці частинки досить сильно просторово віддалені. Робочий регістр квантового комп'ютера являє собою набір деяким чином пов'язаних (заплутаних) кубітів, і цей взаємозв'язок забезпечує можливість виконання операцій одночасно над усіма станами кубітів, внаслідок чого при кожній зміні стану одного з декількох кубітів інші змінюються узгоджено з ним. Фактично, у стані квантової заплутаності і суперпозиції в квантовому регістрі відбувається вибудовування амплітуд кубітів таким чином, що позитивні значення амплітуди одних кубітів нейтралізують негативні амплітуди інших кубітів, і відбувається скасування невірних обчислень (позитивні амплітуди кубітів, навпаки, підсилюють один одного). Так формуються сценарії отримання вірної відповіді.

Ще одна властивість описує **декогеренцію** – вразливість, крихкість квантових станів, що обумовлена взаємодією квантово-механічної системи з навколишнім середовищем. Щоб подолати цю істотну технічну перешкоду на шляху створення квантових комп'ютерів, розробляються спеціальні методи ізоляції квантової системи від навколишнього середовища (використання вкрай низьких температур, вакууму тощо), які дозволяють утримувати кубіти в стані суперпозиції. Однак, чим більше система, тим вище її схильність до зовнішніх впливів.

Заклучна властивість, яка демонструє принципову відмінність класичної теорії інформації від квантової – це **теорема про заборону клонування**. Якщо в квантовому світі є довільний квантовий стан, заздалегідь невідомий, то його не можна скопіювати. Якщо спробувати виміряти поточний стан і послати таку ж інформацію, то це можна буде зробити тільки з помилкою, що відразу буде помітно (криптографія).

Інтеграція описаних вище принципів в роботі комп'ютера відкриває можливість для вирішення завдань, які до теперішнього часу не могли бути реалізовані навіть в рамках найпотужніших комп'ютерів світу. Наприклад, рішення класу задач по оптимізації комерційної діяльності.

Таким чином, знання проривних технологій та обладнання Індустрії 4.0 дозволить в подальшому використовувати можливості перспективних універсальних квантових комп'ютерів для самих різноманітних завдань від задач оптимізації, пошуків в базах даних, робіт з квантовими криптографічними кодами, до розрахунку нових матеріалів та роботи зі "справжнім" штучним інтелектом.

**Питання, що виносяться на практичні заняття
з дисципліни "Фізичні основи елементної бази сучасних ЕОМ"**

**Тема 1: "Основні поняття, історія розвитку та елементна база
електронної обчислювальної техніки"**

1. Поняття комп'ютера (ЕОМ) та інших видів ОМ.
2. Поняття інформації та її класифікації. Інформаційні революції.
3. Історія розвитку комп'ютерної техніки. Перше покоління ЕОМ.
4. Друге покоління ЕОМ.
5. Третє та четверте покоління ЕОМ.
6. П'яте покоління ЕОМ.
7. Шосте покоління ЕОМ.
8. Експоненціальний розвиток і закон Мура.
9. Винайдення напівпровідникових транзисторів
10. Навісний та наскрізний монтаж. Друковані плати. Створення ІС.
11. МОН-транзисторів, КМОН-транзисторів, транзисторно-транзисторної логіки. Сучасні інтегральні схеми.
12. Материнська плата. Основні компоненти системної плати.
13. Напівпровідникові та плівкові мікросхеми. Ступені інтеграції напівпровідникових інтегральні мікросхеми.
14. Цифрові та аналогові інтегральні мікросхеми.
15. МОН-логіка. КМОН-логіка. ТТЛ. ТТЛШ. ЕЗЛ. ПЛ. БіКМОН.
16. Основні напрями технології створення й отримання надвеликих ІМС.
17. Характеристики технологічного процесу планарного виробництва мікросхем. Основні види літографії.
18. Основні види та етапи фотолітографії.

Тема 2: "Фізичні основи електропровідності металів і напівпровідників"

1. Поняття електричного заряду та елементарного електричного заряду.
2. Сім основних одиниць вимірювання Міжнародної системи одиниць SI.
3. Поняття електрону, протону, нейтрону, атома та його ядра.
4. Електрично нейтральний атом хімічного елементу, іон, іонізація, електронний газ в металах, діелектрики.
5. Електричний струм провідності, сила струму, густина струму.
6. Основні закони постійного струму.
7. Поняття електропровідності та питомої електропровідності. Поділ матеріалів, що використовуються в твердотільних електронних компонентах сучасної комп'ютерної електроніки та ЕОМ на чотири основні групи в залежності від величини питомого опору (питомої електропровідності) при кімнатній температурі.
8. Температурна залежність питомого опору провідників і напівпровідників. Рухливість вільних носіїв заряду.
9. Кристалічні та аморфні структури твердих тіл, їх особливості.
10. Просторова решітка (гратка) кристалічних твердих тіл, її період. Елементарні комірки та їх типи. Полікристали, поліморфізм.
11. Види хімічних зв'язків у твердих тілах (атомні, металеві, іонні та молекулярні кристали).
12. Сполуки та тверді розчини в однофазних твердих кристалічних тілах.
13. Кристалічні та некристалічні напівпровідники та їх основні групи.
14. Структурні дефекти кристалів (точкові, лінійні, двомірні, об'ємні).
15. Поняття електрону як центрального об'єкту квантової механіки. Корпускулярно-хвильовий дуалізм. Принцип (співвідношення) невизначеності Гейзенберга. Хвильова функція. Найважливіші властивості атомів і молекул як квантово-механічних систем. Спектр поглинання й спектр випромінювання атома гідрогену та інших водневоподібних атомів і йонів.
16. Основи зонної теорії твердого тіла.
17. Заповнення енергетичних зон електронами.
18. Класифікація твердих тіл за зонною теорією.
19. Домішкові рівні у напівпровідниках.
20. Електропровідність твердих тіл.

21. Власна і домішкова провідність напівпровідників.
22. Концентрація рівноважних носіїв заряду і положення рівня Фермі у власному напівпровіднику.
23. Концентрація рівноважних носіїв заряду і положення рівня Фермі у домішковому напівпровіднику.
24. Фотопровідність напівпровідників.
25. Захоплення та рекомбінація носіїв заряду у напівпровідниках.

Тема 3: "Електронні прилади та електронні компоненти.

Пасивні елементи комп'ютерної електроніки.

Напівпровідникові резистори та діоди"

1. Сучасні електронні прилади. Електровакуумні та напівпровідникові прилади.
2. Основні види твердотільних електронних компонентів, що є елементною базою сучасної комп'ютерної електроніки (пасивні, активні, електромеханічні, оптоелектронні та інші компоненти).
3. Поняття резистора. Види резисторів. Основні параметри резисторів. Послідовне, паралельне та змішане з'єднання резисторів.
4. Основні характеристики резисторів. Маркування резисторів.
5. Поняття конденсатора. Основні класифікації конденсаторів за видом діелектрика, можливістю зміни своєї ємності, за призначення, за способом монтажу.
6. Основні властивості та характеристики конденсаторів. Паралельне, послідовне та змішане з'єднання конденсаторів.
7. Номінальна та пробивна напруга конденсаторів. Умовні графічні позначення конденсаторів на електричних схемах. Номінальні значення ємностей та маркування конденсаторів.
8. Котушка індуктивності. Основні параметри котушок індуктивності. Послідовне та паралельне сполучення котушок індуктивності.
9. Трансформатори, їх види та основні параметри.
10. Класифікація та умовне позначення напівпровідникових резисторів.
11. Лінійний резистор. Варистори, їх основні параметри, практичне використання.
12. Терморезистори. Термістори. Позистори. Основні параметри терморезисторів, їх практичне застосування.
13. Тензорезистори. Основні параметри тензорезисторів.
14. Фоторезистори, схема їх увімкнення. Основні параметри та практичне застосування фоторезисторів.
15. Магніторезистори, їх принцип дії. Магніторезистивні датчики.
16. Електронно-дірковий ($p-n$) перехід, його характеристики.
17. Пробої $p-n$ переходу (тепловий, лавинний, тунельний, і поверхневий).
18. Напівпровідникові діоди, їх класифікації та умовні позначення. Точкові та площинні (планарні) діоди.
19. Випрямні напівпровідникові діоди, їх будова, основні параметри та класифікації. Застосування випрямних діодів.
20. Імпульсні напівпровідникові діоди, їх будова та основні параметри.
21. Діоди Шотткі, їх будова та характеристики.
22. Стабілітрони (діоди Зенера), їх основні параметри та схеми ввімкнення. Варикапи, їх основні параметри.

Тема 4: "Напівпровідникові транзистори та тиристори"

1. Транзистори та їх основні види.
2. Біполярні транзистори, їх будова та технології виготовлення. **$p-n-p$ -транзистори та $n-p-n$ -транзистори.**
3. Схеми вмикання біполярного транзистора. Особливості будови та електропровідності емітера, бази та колектора.
4. Особливості роботи біполярного транзистора на прикладі **$p-n-p$ -структури.**
5. Статичні характеристики біполярних транзисторів.
6. Режим роботи біполярних транзисторів.
7. Польові транзистори, їх основні групи.
8. Польовий транзистор з керуючим **$p-n$ -переходом**, його будова, умовно-графічне позначення та особливості роботи.

9. Стік-затворні (вхідні) та стокові (вихідні) статичні характеристики польових транзисторів. Основні параметри *ПТ* з *p-n-переходами*.
10. Польові транзистори з ізольованим затвором. Польові транзистори із вбудованим каналом, їх структура, режими роботи та характеристики.
11. Польові транзистори з індукованим каналом, їх структура, режими роботи та характеристики. Схеми вмикання польових транзисторів.
12. Перемикаючі напівпровідникові приладів. Тиристори. Диністори. Закритий та відкритий стан диністора.
13. Триністори, їх особливості будови, роботи та основні параметри.
14. Симістори, їх особливості будови та роботи.
15. Двоопераційні (запірні) тиристори, їх особливості будови, роботи та характеристики.
16. Одноперехідні транзистори, їх особливості будови, роботи, основні параметри.
17. Система позначень напівпровідникових приладів.

Тема 5: "Напівпровідникові джерела і приймачі оптичного випромінювання"

1. Поняття випромінювального діоду. Основні види випромінювальних діодів. Спектр електромагнітних хвиль.
2. Світлодіоди, їх будова та принципи роботи.
3. Світлодіоди з люмінофорним покриттям.
4. Основні параметри і характеристики випромінювальних діодів.
5. Застосування світлодіодів. Збірки світлодіодів та світлодіодні модулі. Напівпровідникових джерел білого світла.
6. Органічні світлодіоди та їх застосування.
7. ІЧ-діоди.
8. Лазерні діоди.
9. Фотодіоди, їх особливості будови та принципи роботи.
10. Фотодіодний режим.
11. Основні параметри та характеристики фотодіодів.
12. Режим фотогенератора.
13. Фотоелемент. Сонячні батареї.
14. Фототранзистори, їх особливості будови, роботи та основні параметри й характеристики.
15. Фототиристори, їх особливості будови, роботи, основні параметри й характеристики.
16. Оптрони, їх будова, класифікації. Оптопарі.
17. Основні параметри, характеристики, недоліки та застосування оптронів.
18. Оптоелектронна ІМС. Оптотиристори (тиристорні оптрони).

Тема 6: "Інтегральні мікросхеми"

1. Поняття інтегральної мікросхеми, її конструктивне виконання (корпусна, безкорпусна).
2. Особливості *ІМС*, метод й технології їх виробництва.
3. Проектування інтегральних схем.
4. Класифікації інтегральних схем за конструктивно-технологічними ознаками та видом сигналу, що оброблюється.
5. Переваги цифрових інтегральних мікросхем у порівнянні з аналоговими. Класифікація інтегральних схем за функціональним призначенням
6. Позначення *ІМС*.
7. Напівпровідникові інтегральні мікросхеми, їх основні елементи.
8. Технології та процеси виготовлення напівпровідникових *ІМС*.
9. Транзистори у напівпровідникових *ІМС*.
10. Діоди у напівпровідникових *ІМС*.
11. Резистори у напівпровідникових *ІМС*.
12. Конденсатори у напівпровідникових *ІМС*.
13. Ізопланарна технологія *ІМС* та технологія виготовлення структур "метал-діелектрик-напівпровідник".
14. Складність, рівень інтеграції та ступінь інтеграції *ІМС*.
15. Плівкові інтегральні мікросхеми, їх будова та методи формування.
16. Плівкові резистори, конденсатори та котушки індуктивності.

17. Технологія товстоплівкових ІС.
18. Гібридні інтегральні мікросхеми, їх будова та переваги.
19. Технологічні процеси виготовлення гібридних ІС. Степінь інтеграції ГІС.
20. Суміщені інтегральні мікросхеми.

Тема 7: "Функціональна елементна база сучасних ЕОМ"

1. Аналогова та цифрова форми подання (представлення) інформації.
2. Способи представлення цифрової інформації в ЕОМ. Одиниці вимірювання інформації.
3. Фізичне представлення інформації в комп'ютері. Позитивна і негативна логіки. Ключовий режим роботи комутуючого елемента.
4. Логічні елементи їх типи та характеристики.
5. Класифікація логічних елементів.
6. Діодні логічні елементи.
7. Тригер.
8. Транзисторно-транзисторні та діодно-транзисторні логічні елементи. Основні параметри логічних елементів.
9. Зовнішня пам'ять комп'ютера та її види.
10. Фізичні основи процесів запису і відтворення інформації. Сучасні джерела монохроматичного світла – лазери.
11. Магнітний запис з використанням оптичних явищ.
12. НГМД – накопичувачі на гнучких магнітних дисках.
13. Оптичні (лазерні) CD і DVD диски.
14. Накопичувачі на жорстких магнітних дисках (HDD).
15. Твердотільні накопичувачі (SSD).
16. Перспективи пристроїв оптичної пам'яті.
17. Згладжувальні фільтри і стабілізатори напруги.
18. Блок живлення в комп'ютері.
19. Загальна схема блоку живлення стандарту ATX.
20. Чергове живлення + 5VSB.

Тема 8: "Перспективи розвитку елементної бази ЕОМ, квантові комп'ютери"

1. Основні напрямки сучасної твердотільної електроніки.
2. Суперпроцесори Cerebras Wafer Scale Engine (WSE, WSE-2) та мінісуперкомп'ютер зі штучним інтелектом Jetson AGX Orin – їх елементна база.
3. Сучасні найпотужніші суперкомп'ютери та їх елементна база.
4. Перспективи переходу на серійне виробництво мікропроцесорів за 5-нм, 3-нм, 2-нм і 1-нм техпроцесами.
5. Кріоелектроніка (кріогенна електроніка).
6. Молекулярна електроніка.
7. Обмеження в роботі сучасних ЕОМ та необхідність застосування "технологій майбутнього".
8. Технології напруженого кремнію у виробництві елементної бази твердотільної наноелектроніки.
9. Тривимірні технології у виробництві елементної бази твердотільної наноелектроніки.
10. ДНК-транзистор.
11. Інтеграція живих нейронів в твердотільну електроніку.
12. Neuralink.
13. Поняття квантового комп'ютера, квантового біту (кубіту).
14. Напрямки створення сучасних квантових комп'ютерів.
15. Послідовність макрооперацій, які необхідно реалізувати для виконання квантових обчислень на квантовому комп'ютері. Основні етапи квантових алгоритмів. Труднощі при побудові квантових комп'ютерів.
16. Фізичні основи роботи квантових комп'ютерів – поняття квантового об'єкту, квантової системи. Властивості квантових комп'ютерних систем (суперпозиція станів, квантова заплутаність, декогеренція, теорема про заборону клонування).
17. Перспективи застосування квантових комп'ютерів.

Список літератури з дисципліни "Фізичні основи елементної бази сучасних ЕОМ"

1. Карлаш Г.Ю. Квантові інформаційні системи. Навчальний посібник. Київ: факультет радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем Київського національного університету ім. Тараса Шевченка, 2018. 77 с.
2. Коробченко Е.В. Квантовый компьютер: основные понятия, класс решаемых задач, перспективы развития. *Экономическая безопасность и качество*. 2018. № 3 (32). С. 48-51.
3. Фізичні основи комп'ютерної електроніки: навчальний посібник для студ. вищ. навч. закл., які навчаються за напрямом підготовки "Комп'ютерна інженерія" / І.І. Бех, С.М. Левитський. Київ: "Карбон", 2010. 233 с.
4. Величко С.П., Сальник І.В., Царенко О.М. Вибрані питання загальної фізики: на-вчальний посібник . Кіровоград: РВВ КДПУ ім. В. Винниченка, 2011. 255 с.
5. Царенко О.М. Основи фізики напівпровідників і напівпровідникових приладів: навчальний посібник . Кіровоград: РВВ КДПУ ім. В. Винниченка, 2011. 243 с.
6. Комп'ютерна електроніка [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 151 "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології", спеціалізації "Комп'ютерно-інтегровані оптико-електронні системи та технології"/ К.К. Победаш. КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 364 с.
7. Квітка С.О. Електроніка та мікросхемотехніка: підручник. Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2019. 223 с.
8. Войцеховский А.В., Ижнин И.И., Савчин В.П. В658 Физические основы полупроводниковой фотоэлектроники : учебное пособие. Томск : Издательский Дом Томского государственного университета, 2013. 560 с.
9. Фізичні основи електроніки: курс лекцій [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 171 «Електроніка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: К.С. Дрозденко. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 153 с.
10. Агеев И.М. Физические основы электроники и нанoeлектроники: учебное пособие. Санкт-Петербург: Лань, 2020. 324 с.
11. Архітектура комп'ютерних систем: навчальний посібник / Тарарака В.Д. Житомир : ЖДТУ, 2018. 383 с.
12. Матвієнко М.П. Основи електроніки. Підручник. Вид. 2-ге перероб. та доп. К.: Видавництво Ліра-К, 2017. 364 с.
13. Шошин Е.Л. Электроника. Полупроводниковые приборы: учебное пособие. Москва: Ай Пи Ар Медиа, 2021. 238 с.
14. Основи комп'ютерної техніки: Компоненти, системи, мережі. Навчальний посібник / Кравчук С.О., Шонін В.О. К.: Каравела, 2012. 296 с.
15. Ляшенко О.В., Жабітенко М.К. Фізичні основи електронних обчислювальних машин. К: КПІ, 2000. 204 с.
16. Физические основы микро- и нанoeлектроники : учебное пособие / А.А. Дурнаков ; Мин-во науки и высшего образования РФ. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2020. 247 с.
17. Кравчук С.О. Основи комп'ютерної техніки. Компоненти, системи, мережі. К.: Каравела, 2005. 344с.
18. Голотенко О.С. Конспект лекцій з дисципліни «Архітектура комп'ютерних систем» // Тернопіль : Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2016 120 с.

Зміст

Вступ.....	3
Лекція № 1. Тема: "Вступ до курсу. Основні поняття, історія розвитку та елементна база електронної обчислювальної техніки"	4
Лекція № 2. Тема: "Фізичні основи електропровідності металів і напівпровідників"	22
Лекція № 3. Тема: "Електронні прилади та електронні компоненти. Пасивні елементи комп'ютерної електроніки"	62
Лекція № 4. Тема: "Напівпровідникові резистори та діоди"	79
Лекція № 5. Тема: "Напівпровідникові транзистори та тиристори"	97
Лекція № 6. Тема: "Напівпровідникові джерела і приймачі оптичного випромінювання"	120
Лекція № 7. Тема: "Інтегральні мікросхеми"	137
Лекція № 8. Тема: "Основи функціональної елементної бази ЕОМ"	165
Лекція № 9. Тема: "Перспективи розвитку елементної бази ЕОМ, квантові комп'ютери"	190
Питання, що виносяться на практичні заняття.....	198
Список літератури.....	202

НАВЧАЛЬНО-МЕТОДИЧНЕ ВИДАННЯ

Ткачук Андрій Іванович

**ФІЗИЧНІ ОСНОВИ
ЕЛЕМЕНТНОЇ БАЗИ
СУЧАСНИХ ЕОМ**

КУРС ЛЕКЦІЙ

**навчально-методичний посібник
для студентів закладів вищої освіти
за освітнім рівнем "бакалавр"**

**СВІДОЦТВО ПРО ВНЕСЕННЯ СУБ'ЄКТА ВИДАВНИЧОЇ СПРАВИ
ДО ДЕРЖАВНОГО РЕЄСТРУ ВИДАВЦІВ,
ВИГОТІВНИКІВ І РОЗПОВСЮДЖУВАЧІВ ВИДАВНИЧОЇ ПРОДУКЦІЇ
Серія ДК № 1537 від 22.10.2003 р.**

**Підп. до друку 01.02.2022 р. Формат 60×841/16. Папір газ.
Друк різнограф. Ум. др. арк. 13,68. Тираж 50. Зам. № 9598.**

РЕДАКЦІЙНО-ВИДАВНИЧИЙ ВІДДІЛ
Центральноукраїнського державного педагогічного
університету імені Володимира Винниченка
25006, Кропивницький, вул. Шевченка, 1
Тел.: (0522) 24-59-84.
Факс.: (0522) 24-85-44.
E-Mail: mails@cuspu.edu.ua