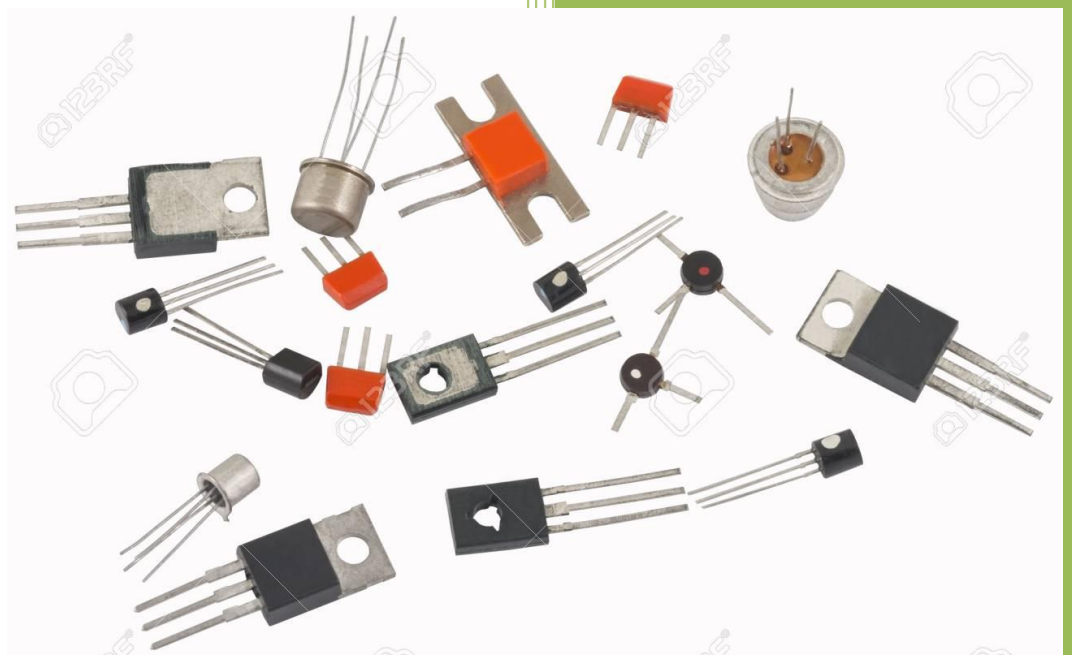


Електронні прилади та підсилювачі

Модуль 1



Конспект лекцій

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ КОЛЕДЖ

Для спеціальності

*151 «Автоматизація та комп'ютерно-
інтегровані технології»*

Конспект лекцій

з навчальної дисципліни

«Електронні прилади та підсилювачі»

МОДУЛЬ 1. ЕЛЕКТРОННІ ЕЛЕМЕНТИ

ХДПК - 2018 р.

Конспект лекцій з дисципліни «Електронні прилади та підсилювачі» для студентів спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, спеціалізації» 5.151.2 «Обслуговування пристроїв електрозв'язку».

Укладач: Слобожанюк Р.І. – ХДПК, 2018. – 88с.

Конспект лекцій розглянутий та рекомендований цикловою комісією

«Транспорту та електрозв'язку»

(назва циклової комісії)

Протокол № _____ від “ ____ ” _____ 2018 р.

Голова циклової комісії _____ (Руденко А.І.)

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Схвалено методичною радою Харківського державного політехнічного коледжу

Протокол № _____ від “ ____ ” _____ 2018р.

Голова методичної ради _____ (Величко В.О.)

(Підпис)

(прізвище та ініціали)

Вступ

Електронні прилади та пристрої застосовуються практично в усіх галузях науки і техніки, промисловості і транспорту, зв'язку і побуту. Тому студенти будь-якої технічної спеціальності мають вивчити основи електронної техніки з метою подальшого застосування набутих знань при вивченні фахових дисциплін, в своїй практичній діяльності.

Програмою дисципліни, незалежно від її назви в навчальному плані конкретної спеціальності, передбачено вивчення елементної бази електроніки та сучасної схемотехніки.

Даний конспект лекцій є складовою частиною методичного забезпечення дисципліни, а також може бути використаний студентами в їх навчальній діяльності.

ТЕМАТИЧНИЙ ПЛАН

№ п/п	Форма занять	Обсяг годин	Зміст занять
1	2	3	4
Модуль 1 Електронні елементи			
1	лекція 1	2/2	Вступ. Основні поняття і визначення електроніки. Короткий історичний огляд і перспективи розвитку електроніки. Роль електроніки в пристроях електрозв'язку.
			Змістовий модуль 1. Фізичні основи роботи напівпровідникових приладів
2	лекція 2	2/4	Фізичні властивості напівпровідників. Власна та домішкова провідність
			Змістовий модуль 2. Напівпровідникові діоди
3	лекція 3	2/6	Класифікація, позначення, характеристики та параметри діодів
4	лекція 4	2/8	Різновидності напівпровідникових діодів.
			Змістовий модуль 3. Біполярні транзистори
5	лекція 5	2/10	Класифікація та будова транзисторів
6	лекція 6	2/12	Статичний режим роботи біполярних транзисторів. Система h–параметрів транзисторів.
7	лекція 7	2/14	Динамічний режим роботи біполярних транзисторів
8	лекція 8	2/16	Порівняння параметрів транзистора у схемах з ЗБ, ЗЕ, ЗК
			Змістовий модуль 4. Польові транзистори
9	лекція 9	2/18	Польові транзистори з керуючим р-n переходом. Польові транзистори з ізольованим затвором.
			Змістовий модуль 5. Тиристори
10	лекція 10	2/20	Будова та вольт-амперна характеристика тиристора.
			Змістовий модуль 6. Оптиoeлектронні напівпровідникові прилади
11	лекція 11	2/22	Фізичні процеси у фотоелектричних та випромінюючих напівпровідникових приладах, область їх використання
12	лекція 12	2/24	Лазери
13	лекція 13	2/26	Оптиoeлектронні індикатори

			Змістовий модуль 8. Інтегральні мікросхеми
14	лекція 14	2/28	Загальні відомості про напівпровідникові інтегральні мікросхеми. Планарна- дифузійна і планарно-епітаксійна технологія.
15	лекція 15	2/30	Загальні відомості про ГІМС. Тонкоплівкові та товстоплівкові ГІМС

Лекція 1

Тема: **Короткий історичний огляд та перспективи розвитку електроніки.**

План

- 2 Основні етапи розвитку електронної техніки
- 3 Класифікація напівпровідникових приладів.

Теоретичні відомості:

Електронними називають прилади, в яких струм створюється рухом електронів у вакуумі, газі або напівпровіднику.

У своєму розвитку електроніка пройшла кілька етапів.

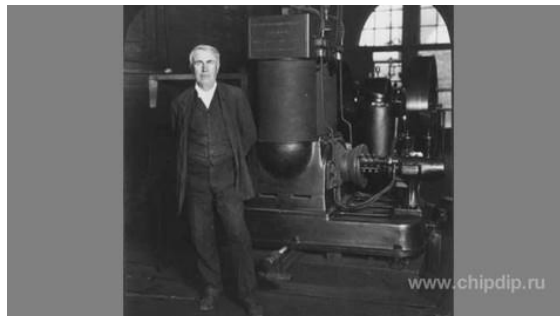
Історію розвитку електроніки можна умовно поділити на чотири періоди.

Перший відноситься до кінця XIX століття і пов'язаний з рядом важливих відкриттів в науці і техніці:

- термоелектронна емісія (Т. Едісон, 1883 р.);

Чесць відкриття термоелектронної емісії належить знаменитому Томасу Едісону, який в 1883 році намагаючись продовжити термін служби освітлювальної лампи з вугільною ниткою розжарювання, ввів в балон лампи, з якої відкачано повітря, металевий електрод.

Явище термоелектронної емісії відкрито в 1883 р знаменитим американським винахідником Едісоном. Це явище спостерігалось їм у вакуумній лампі з двома електродами - анодом, який має позитивний потенціал, і катодом з негативним потенціалом. Катодом лампи може служити нитка з тугоплавкого металу (вольфраму, молібдену, танталу і т. ін.), що нагрівається електричним струмом. Така лампа називається вакуумним діодом. Явище випускання електронів нагрітими тілами (емітерами) в вакуум називається *термоелектронної емісією*.



- фотоелектричний ефект (А.Г.Столетов, 1888 р.);
- радіозв'язок (О.С.Попов, 1895 р.).

Перші електронні пристрої виконувалися на електровакуумних приладах (так званих катодних або електронних лампах).

Другий період охоплює першу половину XX століття:

- створення перших електронних ламп - діодів і тріодів (1904-1907 р.р.);
- створення багатосіткових електронних ламп (1924-1935 р.р.);
- створення високочастотних і надвисокочастотних електронних ламп (30 – 40 роки);
- створення напівпровідникового елемента (1920 р.).

Третій період (кінець 40-х – початок 50-х років) характеризується стрімким розвитком дискретної напівпровідникової техніки:

- створення біполярного транзистора (1948 р.);
- створення квантових оптичних генераторів (лазерів);
- розвиток телевізійної техніки.

З середини XX в. широке застосування знайшли напівпровідникові прилади (транзистори, діоди, тиристори), виготовлені як окремі, самостійні елементи, з яких збиралися електронні пристрої.

Четвертий період бере початок в 60-і роки і характеризується мікромініатюризацією напівпровідникових пристроїв на базі інтегральних мікросхем (мікроелектроніка), що викликано стрімким розвитком інформатики та обчислювальної техніки.

В останній чверті XX ст. основою багатьох електронних пристроїв стали інтегральні мікросхеми, що представляють собою пластинку напівпровідника з розміщеним на ній безліччю транзисторів та інших елементів електричних ланцюгів. З часу їх винаходу (США, 1959 г.) інтегральні мікросхеми постійно удосконалюються і ускладнюються. У сучасних надвеликих інтегральних схемах рахунок іде вже на десятки і сотні мільйонів транзисторів та інших елементів.

В даний час для вирішення тих чи інших завдань (перетворення виду енергії, посилення сигналів, генерування потужних випромінювань, управління електродвигунами, обробка цифрової інформації та її відображення і тому подібне) використовуються всі види електронних приладів, але явна перевага зберігається за напівпровідниковими приладами і мікросхемами.

Подальший розвиток електроніки пов'язаний з поглибленням мікромініатюризації електронних виробів на основі фізичних процесів підсилення, генерування, які відбуваються на молекулярному рівні. Це дозволить створити електронні системи нового покоління.

2 Класифікація напівпровідникових приладів

Прилади, принцип дії яких засновано на використанні властивостей напівпровідників, називають напівпровідниковими. Класифікація напівпровідникових приладів, наведена на рис. 1

Напівпровідникові резистори і діоди є двохелектродними приладами.

Транзистори і тиристори мають три електроди (виводи).

Тиристори можуть бути і двохелектродними

Електричні характеристики напівпровідникових резисторів визначають властивості однорідного напівпровідникового матеріалу, з якого вони виготовлені.

Напівпровідниковий матеріал може мати один з двох типів електропровідності, які позначають латинськими літерами p та n .

У напівпровідникових діода використовують напівпровідники з різними типами електропровідності, які утворюють один так званий p - n перехід.

Електричні характеристики діода визначають електричні властивості такого p — n переходу.

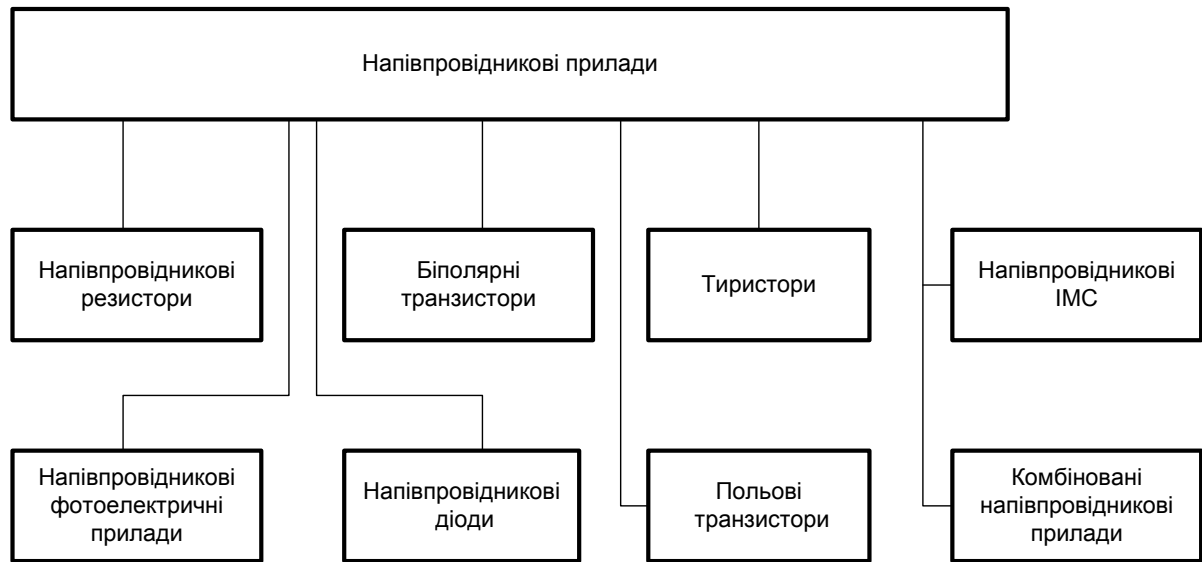


Рисунок 1

У біполярних транзисторах використовують два p — n переходи. Взаємодія цих переходів визначає електричні властивості транзисторів. У польових транзисторах застосовують напівпровідники з різними типами провідностей і використовують взаємодію одного з цих однорідних напівпровідників з p — n переходом.

У тиристорах застосовують напівпровідники з різними типами електропровідності, які утворюють три і більше p — n -переходи.

У напівпровідникових фотоелектричних приладах використовують ефект генерації світла і зміни електричних характеристик напівпровідникових структур під впливом електромагнітного опромінювання оптичного діапазону.

Комбіновані напівпровідникові прилади являють собою декілька різних напівпровідникових приладів, об'єднаних у одному корпусі.

Напівпровідникові інтегральні мікросхеми — мікроелектронні вироби, які виконують певну функцію обробки сигналу і в яких всі елементи та міжелементні з'єднання виконані в об'ємі та на поверхні напівпровідника.

В подальшому будуть розглядатися властивості наведених у класифікації рис. 1. приладів, а також основні електронні пристрої, створені з їх використанням.

У напівпровідникових приладах використовуються ефекти, обумовлені переміщенням заряду в твердому тілі. Вони призначені для підсилення, генерації та перетворення електричних сигналів. Параметри напівпровідникових приладів визначаються геометричними розмірами і властивостями напівпровідника, на яких ґрунтується дія приладу.

При виготовленні напівпровідникових приладів, а також інтегральних мікросхем найчастіше використовують такі напівпровідники, як германій, кремній та арсенід галію.

До напівпровідників відносять також *селен, телур, оксиди, карбіди та сульфід деяких хімічних елементів.*

Напівпровідникові матеріали мають тверду кристалічну структуру і за своїм питомим опором ($\rho=10^{-4}...10^{10}\text{Ом}\cdot\text{см}$) займають проміжне місце між провідниками електричного струму ($\rho=10^{-6}-10^{-4}\text{Ом}\cdot\text{см}$) і діелектриками ($\rho=10^{10}-10^{15}\text{Ом}\cdot\text{см}$).

Більшість напівпровідникових приладів, що застосовуються в пристроях промислової електроніки, можна поділити на такі групи: напівпровідникові діоди, транзистори, тиристори. Напівпровідникові діоди — це двохелектродні прилади, транзистори — трьохелектродні. Тиристори виготовляють як у двохелектродному (диністори), так і в трьохелектродному (триністори) виконанні. Основою напівпровідникових приладів названих груп є кристал напівпровідника з одним або кількома *p-n*-переходами.

Малопотужні напівпровідникові прилади виготовляються як дискретними (окремими), так і в інтегральних схемах, потужні силові пристрої — в дискретному виконанні.

Технологія виготовлення приладів суттєво впливає на їх технічні та експлуатаційні показники.

Змістовий модуль 1. Фізичні основи роботи напівпровідникових приладів

Лекція 2

Тема: Фізичні властивості напівпровідників.

Власна та домішкова провідність

План

1 Фізичні властивості напівпровідників

2 Власна та домішкова провідність

Теоретичні відомості:

1 Фізичні властивості напівпровідників.

Всі речовини утворені атомами, що складаються з позитивно заряджених ядер і обертаються навколо них негативно заряджених електронів. Ядро включає електрично нейтральні частинки - нейтрони і позитивно заряджені протони. Кількість протонів визначає заряд ядра. Негативний заряд електрона по величині дорівнює позитивному заряду протона. У нормальному стані число електронів, створюючих електронну оболонку атома, дорівнює числу протонів в ядрі, і атом електрично нейтральний. Електрони обертаються навколо ядра по орбітах, згрупованим в шари. Кожному шару відповідає строго певна енергія електрона W (так званий дозволений енергетичний рівень). Кількість електронів в шарах строго визначено: у першому, найближчому до ядра шарі може перебувати не більше двох електронів, у другому - не більше восьми і т.ін. Електрони цілком заповнених шарів стійкі до зовнішніх впливів. "Не вмістилися" у внутрішніх шарах електрони утворюють незаповнений зовнішній шар, який легко віддає і приймає електрони. Ці електрони визначають валентність елемента при хімічних реакціях. Чим далі від ядра розташована орбіта електрона, тим більшою енергією він володіє. Під впливом енергії теплоти, світла, радіації або яких-небудь інших зовнішніх факторів електрон з валентної зони може перейти на нову, більш віддалену від ядра орбіту. Такий електрон називається збудженим, а при подальшому збільшенні енергії, званої роботою виходу, електрон залишає поверхню речовини.

У кристалі відбувається взаємодія між сусідніми атомами, що полягає в тому, що на електрони атома впливають ядра сусідніх атомів. У результаті дозволених енергетичних рівнів електронів зміщуються і розщеплюються на декілька - по числу сусідніх атомів у кристалічній решітці. Ці рівні створюють енергетичні зони. Сукупність енергетичних рівнів, що відповідають зовнішньому шару електронів, утворює **валентну зону**. Розрішення рівні енергії, які залишаються незайнятими, складають **зону провідності**, так як її рівні можуть займати збуджені електрони, що забезпечують електропровідність речовини. Між валентною зоною і зоною провідності може розташовуватися **заборонена зона**.

Зонна структура лежить в основі поділу речовин на провідники, напівпровідники і діелектрики.

У напівпровідникових приладах використовуються ефекти, обумовлені переміщенням заряду в твердому тілі. Вони призначені для підсилення, генерації та перетворення електричних сигналів. Параметри напівпровідникових приладів визначаються геометричними розмірами і властивостями напівпровідника, на яких ґрунтується дія приладу.

Напівпровідник (англ. *semiconductors*) — матеріали, електропровідність яких має проміжне значення між провідностями провідника та діелектрика. Відрізняються від провідників сильною залежністю питомої провідності від концентрації домішок, температури

та різних видів випромінювання. Основною вирізняльною властивістю цих матеріалів є збільшення електричної провідності з ростом температури.

Напівпровідниками є речовини, ширина забороненої зони яких становить близько кількох електронвольт (eV). Наприклад, алмаз можна віднести до широкозонних напівпровідників, а арсенід індію — до вузькозонних.

При виготовленні напівпровідникових приладів, а також інтегральних мікросхем найчастіше використовують такі напівпровідники, як германій, кремній та арсенід галію.

До напівпровідників відносять також селен, телур, оксиди, карбіди та сульфід деяких хімічних елементів. Напівпровідникові матеріали мають тверду кристалічну структуру і за своїм питомим опором ($\rho = 10^{-4} \dots 10^{10} \text{ Ом} \cdot \text{см}$) займають проміжне місце між провідниками електричного струму ($\rho = 10^{-6} \dots 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{см}$) і діелектриками ($\rho = 10^{10} \dots 10^{15} \text{ Ом} \cdot \text{см}$).

Основу сучасної промислової електроніки утворюють напівпровідникові прилади, виготовлені на базі германія, кремнія та інших хімічних елементів.

Напівпровідникові хімічні елементи відносяться до четвертої групи таблиці Менделєєва і у чистому вигляді мають високий питомий електричний опір, що наближає їх за електропровідністю до діелектриків. Значення питомого електричного опору чистих напівпровідникових матеріалів лежать у діапазоні від 0,65 Ом*м (германій) до 108 Ом*м (кремній), що перевищує питомий опір міді приблизно в $35 \cdot 10^6$ і $55 \cdot 10^{13}$ раз.

Напівпровідники за своїми електропровідними властивостями займають проміжне положення між металами та діелектриками.

Більшість напівпровідникових приладів, що застосовуються в пристроях промислової електроніки, можна поділити на такі групи: напівпровідникові діоди, транзистори, тиристори. *Напівпровідникові діоди* — це двохелектродні прилади, транзистори — трьохелектродні. Тиристори виготовляють як у двохелектродному (диністори), так і в трьохелектродному (триністори) виконанні. Основою напівпровідникових приладів названих груп є кристал напівпровідника з одним або кількома *p-n*-переходами.

Малопотужні напівпровідникові прилади виготовляються як дискретними (окремими), так і в інтегральних схемах, потужні силові пристрої — в дискретному виконанні. Технологія виготовлення приладів суттєво впливає на їх технічні та експлуатаційні показники.

Характерною особливістю напівпровідників є сильна зміна їхнього питомого опору під дією електричного поля, опромінення світлом або іонізованими частинками, а також при внесенні в напівпровідник домішки або внаслідок його нагрівання. При нагріванні питомий опір провідників збільшується, а напівпровідників і діелектриків — зменшується. Це свідчить про різний характер провідності названих матеріалів.

Всі речовини, які зустрічаються у природі, за спроможністю проводити електричний струм розділяються на провідники, діелектрики та напівпровідники.

Напівпровідникові матеріали мають тверду кристалічну структуру і за своїм питомим опором займають проміжне місце між провідниками і діелектриками. При виготовленні напівпровідникових приладів найчастіше використовують такі напівпровідникові матеріали, як германій (Ge), кремній (Si), арсенід галію (GaAs). Використовують також оксиди, карбіди, та сульфіди деяких хімічних елементів.

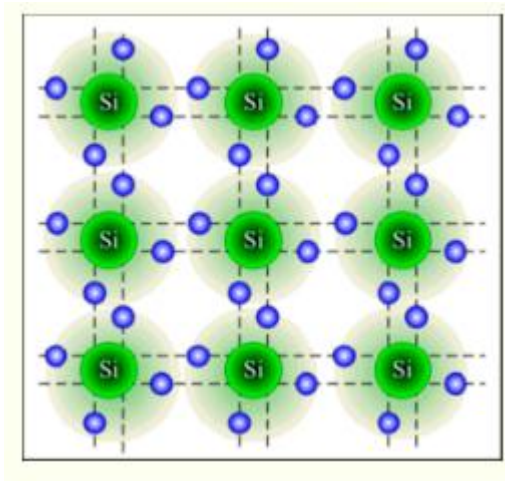


Рисунок 1 – Фрагмент кристалічної ґратки чистого напівпровідника

Електропровідність напівпровідника значною мірою залежить від наявності мізерної кількості домішок. Це широко використовується в сучасній електронній промисловості для надання напівпровідникам заданих властивостей.

Найпоширеніший напівпровідниковий матеріал – кремній - чотиривалентний, тобто має чотири валентних електрони, що знаходяться на зовнішній оболонці атома кремнію. Кремній має кристалічну будову – атоми кремнію розміщені у вузлах кристалічної ґратки і зв'язані з чотирма сусідніми атомами ґратки ковалентними зв'язками (рис.1).

Для домішок використовують або п'ятивалентні елементи (сурма, миш'як, фосфор), або тривалентні (індій, галій, алюміній). Наприклад, у разі заміщення у кристалічній ґратці атома кремнію атомом п'ятивалентного миш'яку, чотири валентних електрона миш'яку утворюють ковалентні зв'язки з сусідніми атомами кремнію, а п'ятий електрон буде вільним (рис.2) Домішка, внесення якої збільшує концентрацію вільних електронів, називається донорною домішкою. З погляду зонної теорії внесення донорної домішки у напівпровідник створює домішкову валентну зону яка або перекривається зоною провідності, або віддалена від неї вузькою забороненою зоною (рис.3).

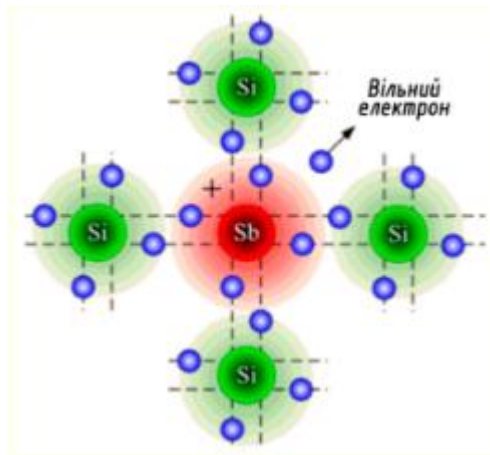


Рисунок 2 – Отримання примісного напівпровідника типу n

Для напівпровідника з донорною домішкою достатньо електричного поля з незначною напруженістю для того, щоб електрони з домішкової зони, долаючи невеликий бар'єр, змогли перейти у зону провідності і забезпечили б проходження струму. Електропровідність напівпровідника з донорною домішкою забезпечується електронами, і тому такий напівпровідник називається n - напівпровідником (від negative – негативний).

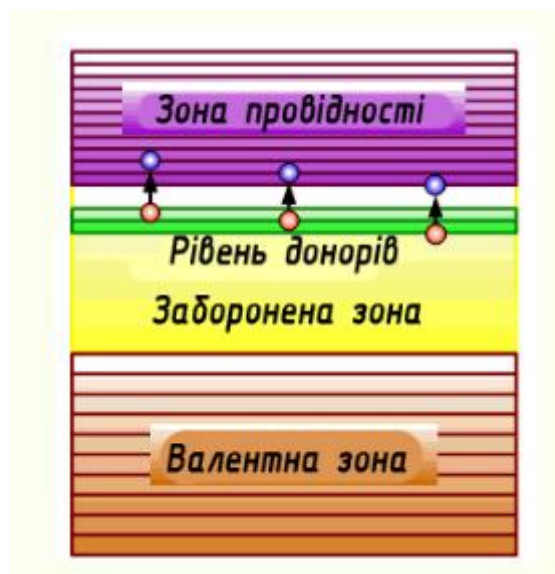


Рисунок 3

Розглянемо процеси у напівпровіднику, до складу якого внесли тривалентну домішку (наприклад, індій). Атом індій заміщує у вузлі кристалічної ґратки атом кремнію. Три валентні електрони індію утворюють ковалентні зв'язки з трьома сусідніми атомами кремнію. Для утворення четвертого ковалентного зв'язку не вистачає одного електрона, тобто утворюється вакантне незайняте місце – дірка (рис.4). Домішка, внесення якої збільшує концентрацію дірок, називається акцепторною.

Внесення акцепторної домішки у напівпровідниках створює домішкову валентну зону, яка або перекривається валентною зоною, або віддалена від неї вузькою забороненою зоною (рис.5). Для переходу електрона з валентної зони у домішкову необхідно подолати незначний бар'єр. Перехід електрона з валентної зони у домішкову породжує дірку у валентній зоні. Якщо подіяти на такий напівпровідник електричним полем, то електричний струм забезпечуватимуть в основному дірки валентної зони.

Тому напівпровідник з акцепторною домішкою має діркову провідність і називається *p*-напівпровідником (від positive – позитивний).

У *p*-напівпровідниках концентрація дірок зумовлена внесення акцепторної домішки, набагато більша за концентрацію електронів власної електропровідності напівпровідника. Тому дірки у *p*-напівпровіднику називаються основними носіями заряду, а електрони – неосновними.

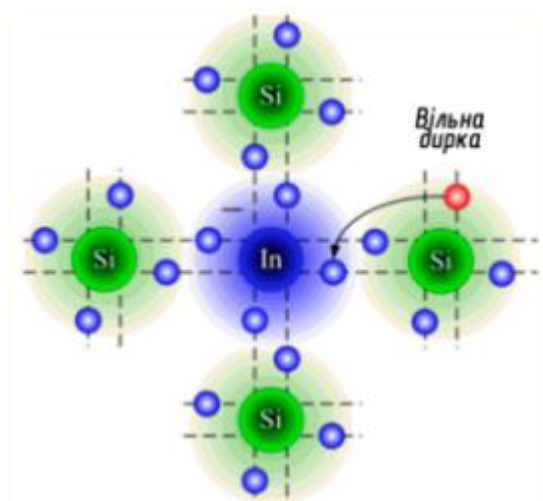


Рисунок 4 – Утворення примісного напівпровідника типу *p*



Рисунок 5

Контрольні запитання

- 1 Назвіть найбільш поширені напівпровідникові матеріали.
- 2 В чому полягають особливості структури напівпровідникових матеріалів?
- 3 Які два типи носіїв струму існують в напівпровідниках?
- 4 Поясніть механізм утворення електронної та діркової провідності в напівпровідниках.
- 5 Що таке основні і неосновні носії струму?
- 6 Що таке генерація і рекомбінація носіїв струму?

Змістовий модуль 2. Напівпровідникові діоди

Лекція 3

Тема: Класифікація, позначення, характеристики та параметри діодів

План

- 1 Класифікація діодів і умовні позначення напівпровідникових діодів.
- 2 Будова, принцип дії та ВАХ діодів
- 3 Основні параметри діодів

Теоретичні відомості:

1 Класифікація діодів і умовні позначення напівпровідникових діодів.

Напівпровідниковий діод - електронний прилад з одним р- n- переходом (переходом метал - напівпровідник) і двома виводами.

Класифікація та умовні позначення діодів подані на рис.1

Класифікують діоди за такими ознаками:

- 1 - основним напівпровідниковим матеріалом:** кремнієві, германієві, арсенід-галієві.
- 2 - фізичною природою процесів:** фотодіоди, світлодіоди та ін.;
- 3 – функціональним призначенням** – випрямні діоди; стабілітрони; імпульсні діоди; високочастотні діоди; варикапи; тунельні і зворотні діоди; надвисокочастотні діоди
- 4 – технологією виготовлення:** сплавні, дифузійні та ін.
- 5 - по конструктивно-технологічному принципу (за типом переходу)** - точкові, площинні, мікросплавні діоди.
- 6 - потужністю:** малопотужні, середньої потужності, потужні; **3) За частотою:** низькочастотні, високочастотні, НВЧ;

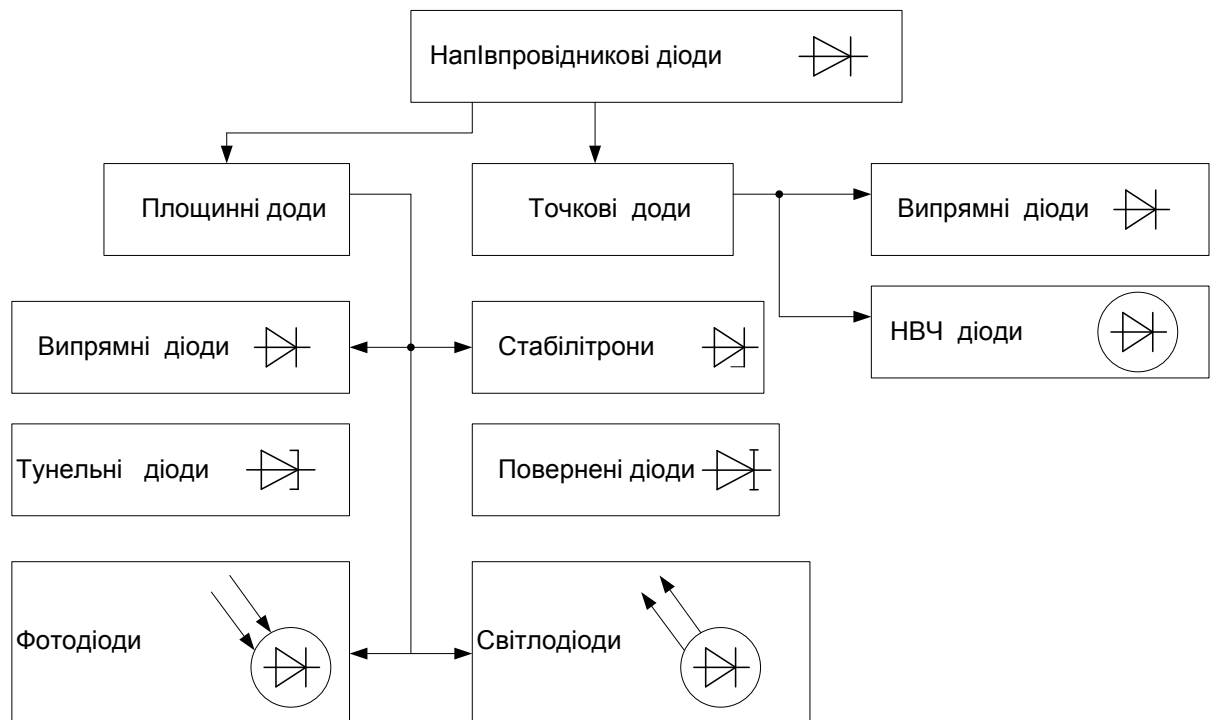


Рисунок 1 – Класифікація діодів

Конструкція напівпровідникових діодів.

Основою площинних і точкових діодів є кристал напівпровідника n-типу провідності, що називається базою діода. База припаюється до металевої пластинки, що називається кристалотримачем. Для площинного діода на базу накладається матеріал акцепторної домішки і у вакуумній печі при високій температурі (500 °C) відбувається дифузія акцепторної домішки в базу діода, в результаті чого утвориться область р-типу провідності й рп перехід великої площини (звідси назва). Вивід від р-області називається анодом, а вивід від n-області - катодом (див. рис.2.)

Площинні діоди

Площинні сплавні діоди мають площинний електричний перехід, лінійні розміри якого, що визначають його площу, значно більше ширини р- n- переходу. Перехід в таких діодах може виконуватися методом сплаву n/p з металом або сплавом. На шар n/p накладають метал або сплав, який вміщує донорні або акцепторні домішки. Після цього матеріал нагрівають до температури, яка достатня для того, щоб частина n/p розчинилася в отриманому розплаві. При подальшому охолодженні відбувається рекристалізація початкового напівпровідника з домішкою вплавленого металу і виходить р- n- перехід.

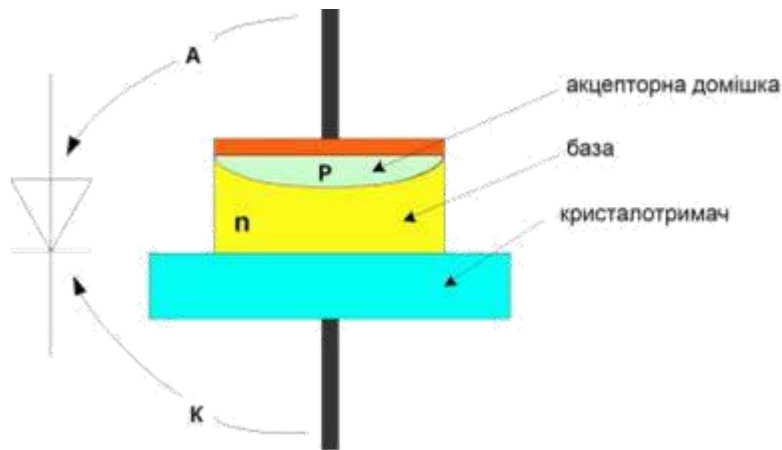


Рисунок 2- Конструкція площинного діода

Площинні мають значну площу p - n -переходу і здатні пропускати струми різної величини. Більша площа p - n переходу площинних діодів дозволяє їм працювати при більших прямих струмах, але за рахунок великої бар'єрної ємності вони будуть низькочастотними.

Точкові діоди

Точкові мають значно меншу площу p - n -переходу, розраховані на невеликі струми і характеризуються малою ємністю p - n -переходу, що важливо для роботи на високих частотах.

Точковий діод виходить в місці контакту невеликого шару n/p і вістря металевого дроту - пружини. Тому лінійні розміри переходу менше його ширини. Для надійнішого контакту через перехід пропускають імпульс струму в декілька ампер, який вплавляє вістря металу в напівпровідник. Відбувається дифузія металу в n/p шар і виходить півсферичний p - n перехід. Завдяки малій площі діод має дуже малу ємність переходу і використовується на частотах в декілька сотень мегагерц.

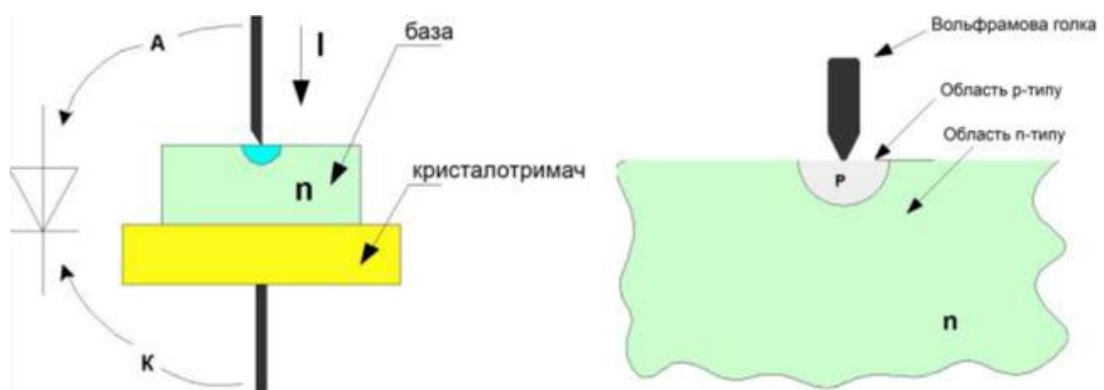


Рисунок 3 – Конструкція точкового діода

До бази точкового діода підводять вольфрамовий дріт, легований атомами акцепторної домішки, і через нього пропускають імпульси струму силою до 1А. У точці розігріву атоми акцепторної домішки переходять у базу, формуючи р-область (див. рис.3). Виходить р-n перехід дуже малої площі. За рахунок цього точкові діоди будуть високочастотними, але можуть працювати лише на малих прямих струмах (десятки міліампер).

Мала площа переходу визначає невеликий допустимий струм діода. Точкові діоди зазвичай виконуються на основі Ge.

Мікросплавні діоди.

Їх одержують шляхом сплавки мікрокристалів напівпровідників р- і n- типу провідності. За своїм характером мікросплавні діоди будуть площинні, а по своїх параметрах - точкові.

Дифузійні діоди виготовляються за допомогою дифузії в напівпровідниковий шар домішки, яка знаходиться в газоподібній, рідкій або твердій фазах.

Якщо дифузія домішки здійснюється через отвір в захисному шарі, нанесеному на поверхню напівпровідника, то отримують так званий планарний р- n- перехід.

Дифузійні діоди відрізняються від сплавних меншою ємністю і великою швидкодією.

Позначення діодів



Рисунок 4 - Структура коду

Маркірування діодів здійснюється за загальноприйнятою для більшості напівпровідникових приладів системою літерно-цифрових позначень.

Перший елемент (літера або цифра)

характеризує матеріал напівпровідника: Г або 1 – германій; К або 2 – кремній; А або 3 - арсенід галію.

Другий елемент (літера) визначає клас (групу) приладів:

Д – діоди випрямні, імпульсні ; Ц – випрямні діоди та блоки; С – стабілітрони, В – варикапи, И- тунельні діоди, Ф- фотоприлади, Л- випромінюючі діоди

Третій елемент (числа від 101 до 999) установлює належність приладу до певної групи за призначенням, потужністю, частотним діапазоном роботи тощо. Тризначне число, яке визначає технологічний тип діоду, його призначення і номер розробки (останні дві цифри, окрім стабілітронів і стабісторів). Перша цифра числа 3-го елемента відповідає різновиду діодів:

- для НВЧ діодів (А):

1 – змішувальні, 2 – детекторні, 4 – параметричні, 5 – регулювання, 6 – помноження, 7 – генераторні;

- для варікапів (В): 1 – підстройки, 2 – помноження;

- для діодів (Д): 1 – випрямні малої потужності ($I_{пр}$ до 0,3 А); 2 – випрямні середньої потужності ($I_{пр}$ до 10 А); 3 – універсальні (з робочою частотою до 1 ГГц); 4 – імпульсні з часом відновлення: 5 – більше 150 нс, 6 – $30 \div 150$ нс, 7 – $5 \div 30$ нс, 8 – $1 \div 5$ нс, 9 – менше 1 нс;

- для тунельних та оборотних діодів (И):

1 – підсилювальні, 2 – генераторні, 3 – перемикання, 4 – оборотні;

- для стабілітронів і стабісторів (С) останні дві цифри означають:

– при напрузі стабілізації $U_{ст} < 10$ В – десяті долі $U_{ст}$;

– при $U_{ст} = 10 \div 99$ В – номінальну напругу $U_{ст}$;

– при $U_{ст} = 100 \div 199$ В – різницю між номінальною $U_{ст}$ і 100 В.

Четвертий елемент (літера) (або дві), що означає класифікацію діодів по одному або декількох електричним параметрам, тобто визначає різновид приладів за технологічним типом. Якщо стоять дві літери, то остання з них означає конструктивну модифікацію даного діода

Наприклад, КД104А, КЦ401Г, КС156А....

Найважливішими перевагами напівпровідникових діодів є:

- малі габаритні розміри і маса;
- високий коефіцієнт корисної дії (понад 99 %);
- відсутність розжарюваного джерела електронів;
- практично необмежений термін служби (при виконанні відповідних правил експлуатації);
- висока надійність.

Широке застосування отримали

- **кремнієві стабілітрони**, призначені для стабілізації напруги,
- **варікапи** (ємність р – n переходу яких змінюється при зміні підведеної до них напруги),

- **тунельні діоди** (що мають на вольт – амперній характеристиці ділянку з негативним опором),
- **швидкодіючі імпульсні діоди** (для роботи в схемах з імпульсами мікросекундного і наносекундного діапазону),
- різноманітні діоди надвисокочастотного (НВЧ) діапазону (для роботи як модуляторів, змішувачів, дільників і перемножувачів частоти),
- **фотодіоди** (що реагують на світлове опромінення).

Крім перерахованих, усе більш широке застосування знаходять *світлодіоди, діоди Ганна, лавино-пролітні діоди* й інші.

3 Будова, принцип дії та ВАХ діодів.

Діодом називається напівпровідниковий прилад на основі одного р-п-переходу. Як і сам р-п-перехід, діод може вмикатися в *прямому* і *зворотному* напрямку (рис.6). Принцип роботи діода базується на основній властивості р-п-переходу – його здатності пропускати струм тільки в одному напрямку. Таким чином, *діод має односторонню провідність*.

На рис. 5 а наведено умовне графічне позначення напівпровідникового діода на електричних схемах, його структура - на рис. 5 б. Електрод діода, підключений до області р, називають *анодом*, а електрод, підключений до області п, - *катодом*. Статична вольт-амперна характеристика діода показана на рис.5в.

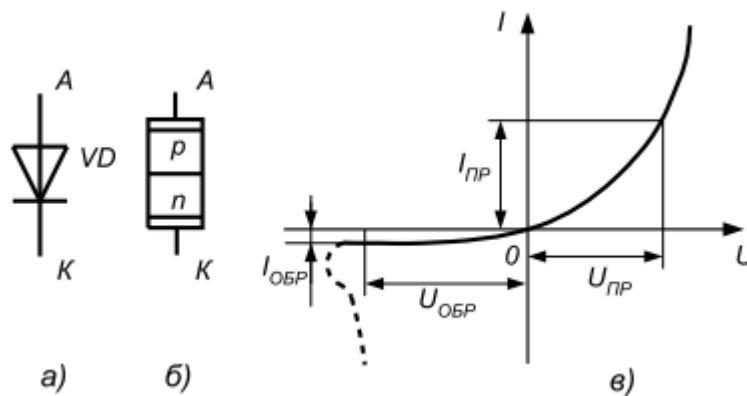


Рисунок 5 - Умовне позначення (а), структура (б) статична вольт-амперна характеристика (в) напівпровідникового діода

Вольт-амперна характеристика діода (рис.7) – це графік залежності між струмом і напругою діода в прямому і зворотному напрямках. Прямі і зворотні вітки характеристики відображають властивість односторонньої провідності діода. Як свідчить характеристика, діод є нелінійним елементом.

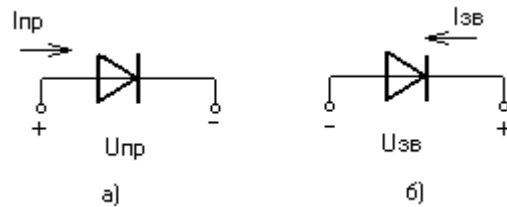


Рисунок 6 - Пряме (а) і зворотнє (б) вмикання діода.

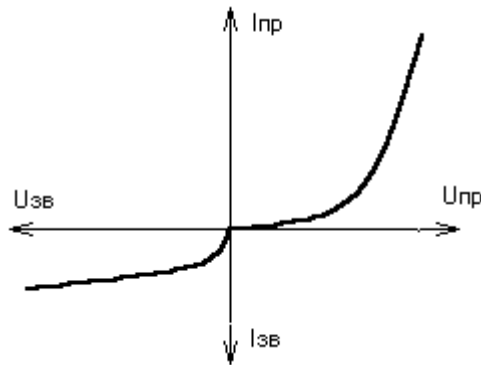


Рисунок 7 - Вольт-амперна характеристика діода

Контрольні запитання до теми:

- 1 Поясніть особливості конструкції площинних і точкових діодів.
- 2 Назвіть основні типи напівпровідникових діодів і поясніть їх призначення.
- 3 Поясніть вольт-амперну характеристику випрямного діода.
- 4 Як розраховується опір діода постійному струму та диференційний опір в прямому та зворотному напрямку?

Література: [Л.2] с.24-26, [Л.1] с.12-19,[Л.5] с.47-77.

Лекція 4

Тема: **Різновидності напівпровідникових діодів.**

За призначенням напівпровідникові діоди поділяють на

- випрямні,
- високочастотні та надвисокочастотні,
- імпульсні, опорні (стабілітрони),
- чотиришарові перемикаючі,
- фотодіоди,
- світлодіоди та ін.

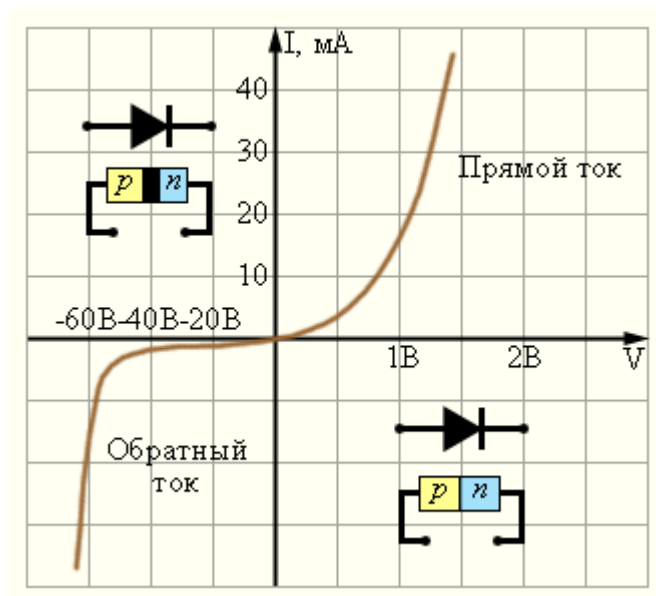


Рисунок 1 - Типова вольт - амперна характеристика кремнієвого діода.

1 Випрямні діоди. Найчастіше випрямні діоди застосовують як випрямлячі змінного струму низької частоти 50—100 000 Гц. Крім цього, випрямні діоди широко використовують у схемах керування та комутації для обмеження паразитних викидів напруг у колах з індуктивними елементами, як елементи розв'язки в електричних колах та ін.

В залежності від початкового напівпровідникового матеріалу діоди підрозділяють на дві групи: германієві та кремнієві. Останні одержали найбільшого поширення, оскільки мають у багато разів менші зворотні струми і більші зворотні напруги порівняно з германієвими діодами, які доцільно застосовувати при низьких напругах, оскільки при однакових струмах спад напруги на германієвому діоді, зміщеному в прямому напрямі, менший, ніж на кремнієвому діоді.

Основою випрямного діода є напівпровідниковий кристал, в якому методом сплавлення або дифузії сформований *p-n*-перехід. Область діодів з низькою концентрацією домішкових атомів має звичайно електронну провідність (провідність *n*-типу) і її називають базою. Товщина бази значно більша за товщину високолегованої області з дірковою провідністю (провідністю *p*-типу), яка межує з базою і яку називають *емітером*.

Монокристал з *p-n*-переходом вміщують у металевий або коваровий корпус з двома зовнішніми виводами від емітера і бази (відповідно від анода і катода). Це забезпечує захист *p-n*-переходу від впливу атмосфери.

Основними методами одержання електронно – діркових переходів для випрямних діодів являються сплавлення і дифузія. Електронно – дірковий перехід малопотужного сплавленого кремнієвого діода утворюється вплавленням алюмінію в кремній.

На рис.2 приведена конструкція малопотужного та потужного діодів.

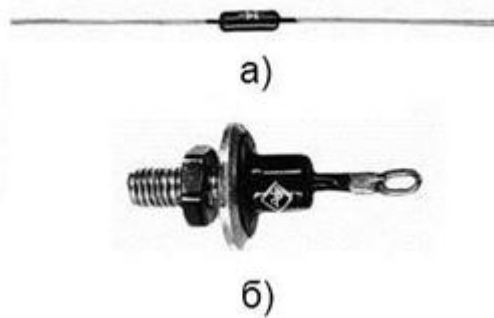


Рисунок 2- . Конструкція малопотужного (а) та потужного (б) діодів.

Робота напівпровідникового випрямного діода базується на властивостях електронно-діркового переходу пропускати струм тільки в одному напрямку. Основною характеристикою напівпровідникових діодів є вольт-амперна характеристика (рис.3).

З вольт-амперної характеристики видно, що електронно-дірковий перехід являється нелінійним елементом, опір якого сильно залежить від величини і полярності прикладеної напруги. З підвищенням прямої напруги опір електронно – діркового переходу зменшується. При зміні полярності прикладеної напруги опір електронно-діркового переходу різко зростає. Необхідно відмітити, що зворотна напруга кремнієвих діодів може досягати 1000 ... 1500 В, в той час, як у германієвих вона лежить в межах 100 ... 400 В. Кремнієві діоди можуть працювати при температурах від - 60 до

150°C, а германієві від - 60 до + 85°C. Це пояснюється тим, що при температурах вище 85°C різко збільшується власна провідність германію, яка приводить до недопустимого зростання зворотного струму. Разом з тим пряме падіння напруги в кремнієвих діодах більше ніж у германієвих. Це пояснюється тим, що величина прямого опору в германієвих діодах в 1,5 - 2 рази менша ніж у кремнієвих при однаковому струмі навантаження. В зв'язку з цим у випрямляючих пристроях низьких напруг вигідно застосовувати германієві діоди.

Досить часто на практиці застосовують групове вмикання діодів. Так, при відсутності високовольтного діода можна послідовно ввімкнути декілька низьковольтних зразків (на рис. показано послідовне з'єднання трьох діодів, сумарна допустима зворотна напруга яких $3U_{Rmax}$ перевищує зворотну напругу, що діє в розглянутому електричному колі).

Для ліквідації нерівномірності розподілу зворотної напруги між послідовно з'єднаними діодами останні шунтують опорами $R_{ш} = 1 \dots 10$ кОм, які забезпечують стійкий рівномірний розподіл зворотної напруги як в часі, так і зі зміною температури.

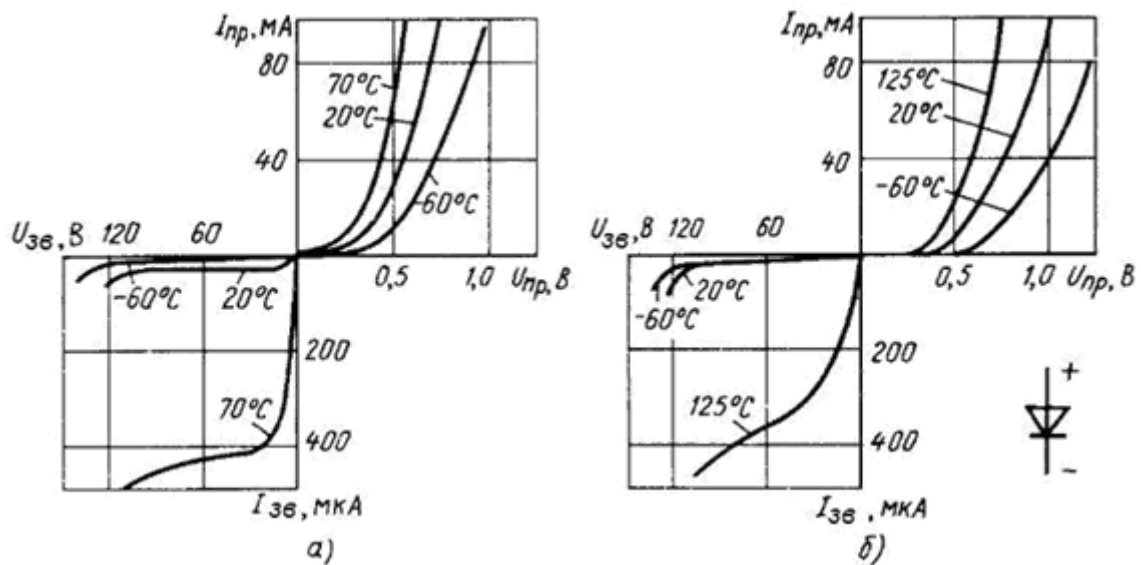


Рисунок 3 - Воль-амперні характеристики германієвого (а) і кремнієвого (б) діодів.

Якщо прямий струм в електричному колі перевищує значення, допустиме для одного діода, то рекомендується застосувати паралельне ввімкнення діодів.

Однак внаслідок неідентичності прямих віток вольт-амперних характеристик випрямних діодів навіть одного типу струм, що протікає через одну з паралельних віток, може значно перевищувати струми, що протікають в інших вітках паралельного з'єднання діодів. При цьому один з діодів перегрівається, його пробивна напруга знижується, що викликає подальший розігрів діода за рахунок збільшення зворотного струму, і діод виходить з ладу. Таким чином, паралельне з'єднання діодів допустиме лише в тому випадку, коли в кожен вітку послідовно з діодом ввімкнений додатковий опір R_d , що становить одиниці або частини Ом.

Якщо випрямлений струм більший від максимально допустимого прямого струму діода, то в цьому випадку допускається паралельне включення діодів (див.рис.4).

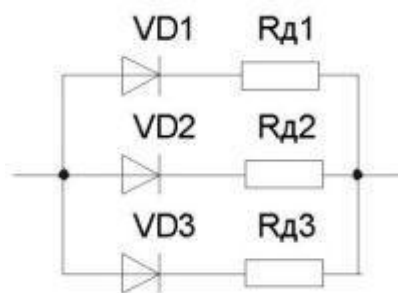


Рисунок 4 - Паралельне ввімкнення діодів

Додаткові опори R_d величиною від одиниць до десятків Ом включаються з метою вирівнювання струмів у кожній з віток.

Якщо напруга в колі перевищує максимально допустиму зворотну напругу діода, то в цьому випадку допускається послідовне увімкнення діодів (див. рис. 9).

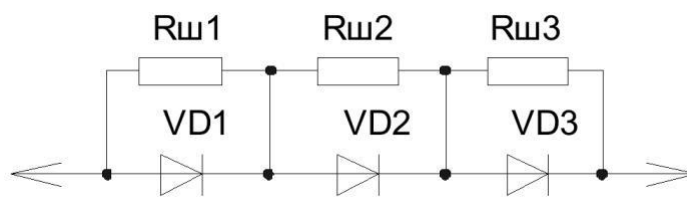


Рисунок 5 - Послідовне увімкнення діодів

Шунтувальні опори величиною декілька сотень кОм включають для вирівнювання спада напруги на кожному з діодів.

Для зручності використання випрямних діодів у випрямлячах напруг промисловість випускає випрямні напівпровідникові блоки. Такі блоки складаються з випрямних напівпровідникових діодів, з'єднаних за певною електричною схемою в єдину конструкцію, що має більше двох виводів. Найчастіше використовують з'єднання діодів за матовими схемами. Так, на рис. 6, а приведено електричну схему мостового випрямляча, а на рис. б деякі конструкції блоків.

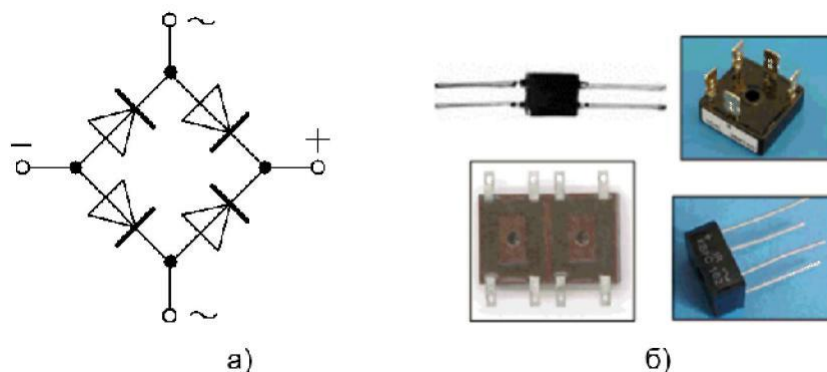


Рисунок 6 - Електрична схема мостового випрямляча (а); типові конструкції випрямних блоків (б)

У наш час серійно випускається велика номенклатура випрямних стовпів та блоків, що вміщують в одному корпусі сукупності діодів або закінчені схеми випрямлячів. Відповідним з'єднанням зовнішніх виводів можна вмикати діоди паралельно або послідовно, створювати схеми мостових однофазних і трифазних випрямлячів та ін.

З порівняння вольт-амперних характеристик реального діода і $p-n$ -переходу можна зробити висновок про адекватність цих характеристик.

Основними параметрами випрямних діодів, що характеризують їх роботу у випрямних схемах, є:

- середнє за період значення випрямленого струму I_{FAV} , який може тривалий час протікати

через діод за припустимого його нагрівання;

- *середнє за період значення прямої напруги U_{FAV} , яке однозначно знаходять з вольт-амперної характеристики при заданому значенні I_{FAV} ;*
- *середнє за період значення зворотного струму I_{FRV} при заданому значенні зворотної напруги U_R гранична частота f_{max} діапазону, в межах якого струм діода не зменшується нижче заданого значення.*

Важливе значення мають також параметри граничного електричного режиму випрямного діода, а саме:

максимально допустима постійна зворотна напруга U_{Rmax} , яку довгочасно витримує діод, зберігаючи нормальну роботу;

максимально допустимий постійний прямий струм $I_{F(OV)}$ діода.

Випрямні діоди підрозділяють на діоди малої потужності ($I_{FAV} \leq 0,3$ А), середньої потужності ($0,3A \leq I_{FAV} \leq 10$ А) і великої потужності ($I_{FAV} > 10$ А). Останні називають *силовими* і позначають буквою В.

2 Високочастотні діоди — це напівпровідникові прилади універсального призначення, їх застосовують в тих самих електронних пристроях, що й випрямні діоди, однак при меншому електричному навантаженні, а також в модуляторах, детекторах, перетворювачах частоти й інших нелінійних перетворювачах електричних сигналів. Випрямлячі змінного струму, в яких використовують високочастотні діоди, працюють в широкому діапазоні частот (до кількох сотень мегагерц).

У ранніх розробках вони мали точкові *p-n*-переходи, в зв'язку з чим до нашого часу за ними збереглася назва точкові. Однак із впровадженням електрохімічного методу виготовлення *p-n*-переходів широкого застосування набули мікросплавні високочастотні напівпровідникові діоди з *p-n*-переходами площинного типу дуже малих розмірів. Порівняно з точковими мікросплавні діоди мають більші допустимі струми і кращі характеристики при зворотному ввімкненні.

Конструкцію типового високочастотного діода показано на рис., а його умовне графічне позначення і вольт-амперну характеристику — на рис.. Пряма вітка вольт-амперної характеристики високочастотного діода не відрізняється від відповідної вітки характеристики випрямного діода. Однак в зворотній вітці характеристики внаслідок малої площі *p-n* -переходу ділянка насичення відсутня, і зворотний струм з ростом напруги рівномірно зростає за рахунок струмів витоку і термогенерації. Постійний прямий струм точкових діодів не перевищує 50 мА, а допустима постійна зворотна напруга становить 150 В. Для мікросплавних діодів ці параметри мають більші значення.

Одним з основних параметрів високочастотних діодів є *статична ємність* C_d між зовнішніми выводами, яка визначається бар'єрною ємністю p - n -переходу

$$C_d = S \sqrt{\frac{\varepsilon \varepsilon_0 q N_d}{2(\varphi_K - U_R)}}$$

де ε - відносна діелектрична проникність;

ε_0 - діелектрична проникність вакууму;

N_d - концентрація домішки n -типу;

S - площа p - n -переходу;

U_R — зворотна напруга.

Чим менше значення C_d , тим ширший діапазон робочих частот діода.

Звичайно $C_d \leq 1$ пФ. Інші параметри високочастотних діодів такі самі, як у випрямних.

У діапазоні підвищених частот необхідно враховувати інерційність діода, пов'язану з накопиченням заряду в області бази і емітера поблизу p - n -переходу. Інерційність діода, а також ємність на дуже високих частотах роблять сумірними амплітуди прямого і зворотного струмів робочих сигналів, і діод втрачає властивість односторонньої провідності.

За частотними властивостями високочастотні діоди поділяють на дві групи:

1) $f_{max} \leq 100$ МГц;

2) $300 \text{ МГц} \leq f_{max} \leq 1000 \text{ МГц}$.

На більш високих частотах використовують НВЧ-діоди з дуже малим радіусом точкового контакту (2—3 мкм).

3 Імпульсні діоди використовують як ключові елементи в пристроях імпульсної техніки. Конструкція імпульсних діодів та їх вольт-амперні характеристики такі, як і у високочастотних діодів (). Крім високочастотних властивостей, імпульсні діоди повинні мати мінімальну тривалість перехідних процесів у момент вмикання та вимикання. Виготовляються точкові й площинні імпульсні діоди.

Після вмикання прямого струму I_{FM} (рис.) в базі діода поблизу p - n -переходу виникає надлишкова концентрація неосновних носіїв заряду, в результаті чого знижується прямий опір діода, а, отже, напруга на діоді U_{FMm} перевищує усталену напругу U_{Fgr} (рис.). Відношення U_{FMm}/I_{FM} називають найбільшим імпульсним опором R_{Mm} . Оскільки надлишковий нерівноважний заряд в базі розсмоктується за час, що не менший за час життя неосновних носіїв заряду (час, протягом якого концентрація нерівноважних носіїв заряду зменшується в e раз, для германію і кремнію він становить 10... 100 нс), то напруга на діоді знижується до $1,2U_{Fgr}$ за кінцевий інтервал часу, який називають часом встановлення прямого опору (напруги) t_{gr} . Найбільш кардинальний спосіб зниження t_{gr} — зменшення товщини бази.

Якщо U_{Fgr} швидко змінити на зворотну U_R (рис.), то зворотний струм різко зростає до значення I_{Rm} (рис.) за рахунок того, що накопичені в базі (n -шарі) при протіканні прямого струму дірки втягуються полем p - n -переходу назад в емітер (p -шар). При цьому зворотний опір різко зменшується. В результаті подальшого процесу рекомбінації дірок з електронами, що займає кінцевий відрізок часу, концентрація дірок досягає рівноважного значення, а зворотний струм зменшується до встановленого значення I_0 . Проміжок часу з моменту припинення прямого струму до моменту, коли зворотний струм досягає свого встановленого значення I_0 , називають часом відновлення зворотного опору (струму I_0) діода.

Імпульсні діоди, як і випрямні, характеризуються статичними параметрами I_{FAV} та I_R , а також параметрами граничного режиму I_{Fm} та U_{RM} . Проте основні імпульсні параметри такі: C_d , f_{gr} та R_{Mm} , а також струм I_{Mm} , який може значно перевищувати I_{FAV} , оскільки при короткочасних (обумовлених у довіднику) імпульсах прямого струму можна не побоюватись перегріву діода. Імпульсні параметри покращуються, якщо використати при виготовленні діодів напівпровідникові матеріали з малим часом життя нерівноважних носіїв заряду. Суттєве зниження часу життя нерівноважних носіїв заряду (до 0,5—0,8 нс) досягається легуванням германію та кремнію золотом (так звані імпульсні діоди із золотою зв'язкою). При цьому також знижуються ємність C_d та зворотний струм діода.

Тепер промисловістю освоєний випуск кремнієвих діодних матриць і збірок, що об'єднують один або декілька імпульсних діодів за певною схемою вмикання. Такі матриці і збірки можна застосовувати як окремі функціональні вузли при проектуванні імпульсних та інших схем. Вони випускаються або в пластмасовому корпусі, або без нього і призначені для використання в гібридних мікросхемах із загальною герметизацією.

5 Варикапи. Варикапи – напівпровідникові діоди, в яких використовується бар'єрна ємність закритого p - n переходу, що залежить від величини зворотної напруги прикладеної до діода. Отже варикап використовується як конденсатор змінної ємності, який керується напругою. Для використання властивостей варикапа до нього необхідно прикласти зворотну напругу

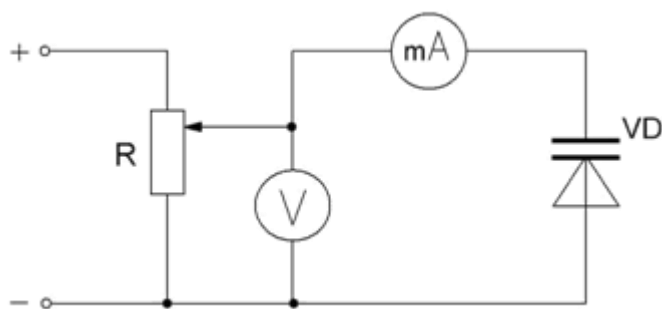


Рисунок 7 - Схема ввімкнення варикапа

Принцип роботи. Якщо до р-п переходу подати зворотну напругу то ширина потенціального бар'єру збільшиться (рис.8.), а відповідно бар'єрна ємність зменшиться.

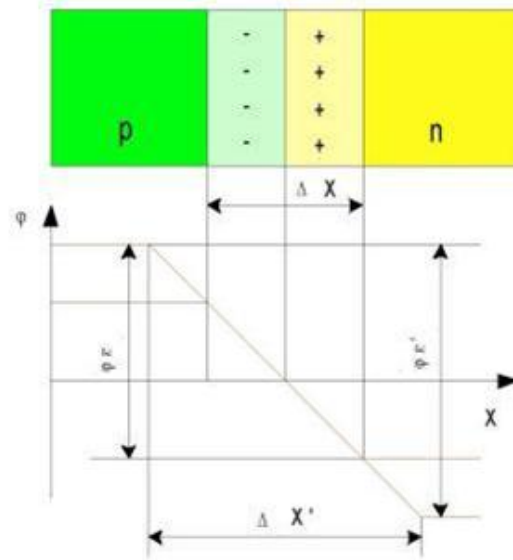


Рисунок 8 - Принцип роботи варикапа

Нагадаємо, що при подачі зворотної напруги **p-n**- структура уподібнюється конденсатору, пластинами якого є **p**- і **n**-області, розділені діелектриком (переходом, майже вільним від носіїв заряду). Утворюється при цьому бар'єрна ємність може бути використана в якості конденсатора в електронній апаратурі.

Варикапи - це напівпровідникові діоди, робота яких заснована на явищі бар'єрної ємності замкнутого **p-n**- переходу. Оскільки розміри області рп-переходу залежать від значення прикладеного до нього зворотної напруги, то і величина бар'єрної ємності змінюється разом з цим напругою.

Зовнішнє зворотна напруга, втягуючи електрони вглиб n-області, а дірки - вглиб p-області, розширює рп-перехід і змінює бар'єрну ємність. Основною характеристикою варикапа є залежність його ємності від значення зворотної напруги - вольт-фарадні характеристика.

На рис. 10 приведена схема ввімкнення варикапа в коливальний контур. Керувальна напруга на варикап подається через багатотомний резистор R2. Це виключає шунтування ємності варикапа малим внутрішнім опором джерела керувальної напруги. Змінюючи значення керувальної напруги, змінюють зворотну напругу на варикапі і відповідно його ємність. Паралельно варикапу вмикається коливальний LC-контур, налаштування якого регулюють за допомогою варикапа. Роздільний конденсатор С_р вмикають для запобігання шунтуванню варикапа малим опором індуктивності для постійної напруги.

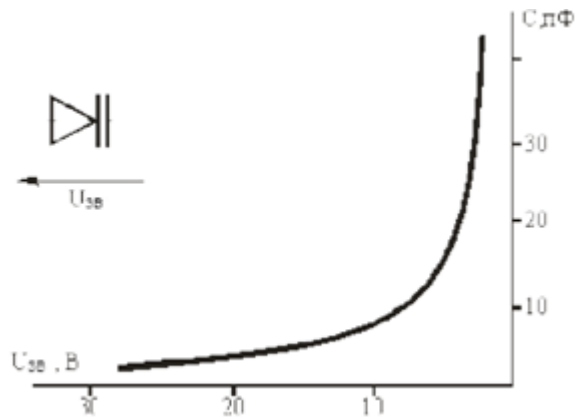


Рисунок 9 - Вольт – фарадна характеристика варикапів

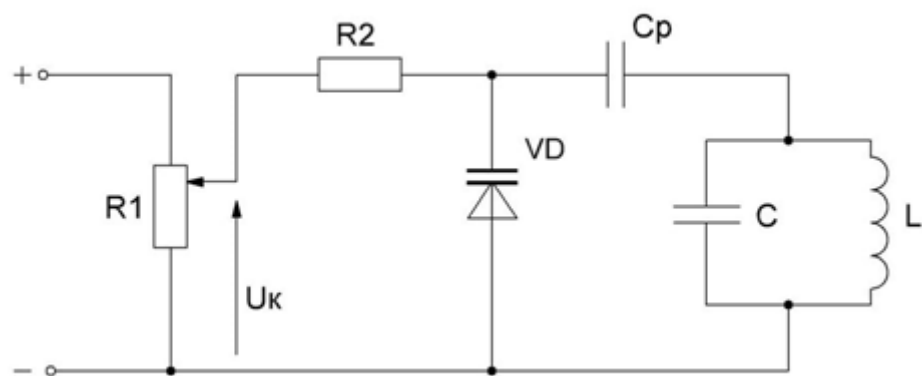


Рисунок 10 - Схема вмикання варикапа

Основи використання варикапа – керування (настройка) частотою коливального контуру.

Залежність ємності варикапа від прикладеної напруги визначається технологією виготовлення p - n -переходу.

Основними параметрами варикапов є номінальна ємність і діапазон її зміни, а також допустимі зворотна напруга і потужність.

Параметри варикапів:

Номінальна ємність - ємність між виводами варикапа при номінальній напрузі зсуву.

Максимальна ємність - ємність варикапа при заданій мінімальній напрузі зсуву.

Мінімальна ємність - ємність варикапа при заданій максимальній напрузі зсуву.

Коефіцієнт перекриття - відношення максимальної ємності діода до мінімальної.

Добротність - відношення реактивного опору варикапа до повного опору втрат, зміряне на номінальній частоті при температурі 20°C .

Максимально допустима напруга - максимальне миттєве значення змінної напруги, що забезпечує задану надійність при тривалій роботі.

Температурний коефіцієнт ємності (ТКЕ) - відношення відносної зміни ємності при заданій напрузі до того, що викликав його абсолютній зміні температури навколишнього середовища.

Максимально допустима потужність - максимальне значення потужності, що розсіюється на варикапі, при якому забезпечується задана надійність при тривалій роботі.

Варикапи застосовуються для електричної настроювання коливальних контурів у радіоапаратурі

5 Стабілітрон

Стабілітрони (опорні діоди) призначені для стабілізації рівня постійної напруги.

Стабілітрон – це напівпровідниковий діод, на якому напруга в зоні електричного пробою майже не залежить від струму. Стабілітрон використовують для стабілізації рівня постійної напруги. Стабілізація - підтримка якогось рівня незмінним.

По конструкції стабілітрони завжди площинні й кремнієві. Це зумовлено малим значенням зворотного струму в кремнієвих діодах, що виключає можливість їх саморозігріву і теплового пробою *p-n*-переходів. Принцип дії стабілітрона заснований на тім, що на його вольт – амперній характеристиці є ділянка, на якій напруга практично не залежить від величини струму, що протікає через діод (рис.11).

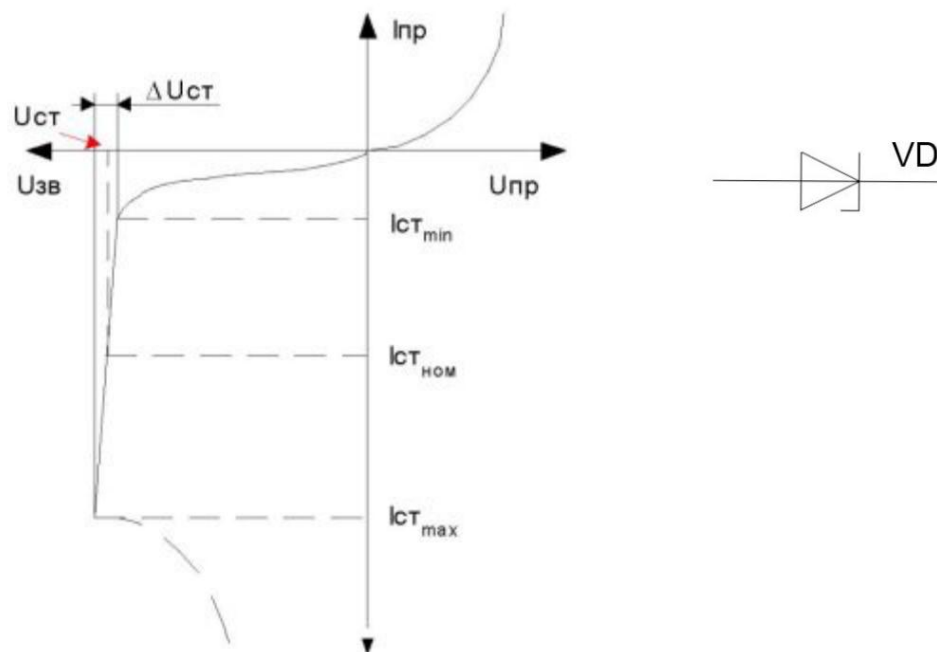


Рисунок 11 - ВАХ стабілітрона та його умовно-графічне позначення

Такою ділянкою є ділянка електричного пробою, а за рахунок легуючих добавок

у напівпровідник струм електричного пробою може змінюватися в широкому діапазоні, не переходячи в тепловий пробій.

Так як ділянка електричного пробою - це зворотна напруга, то в схемах стабілізаторів має місце зворотне увімкнення стабілітрона.

На рис.12. приведена схема елементарного (параметричного) стабілізатора напруги.

Вона складається із баластного резистора R_B і стабілітрона VD . Стабілізатор під'єднується до виходу випрямляча з фільтром, а навантаження під'єднується паралельно до стабілітрона.

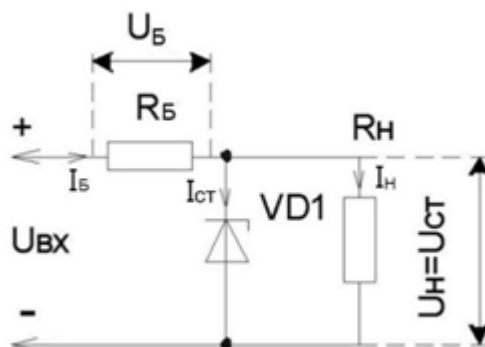


Рисунок 12 - Принципова електрична схема параметричного стабілізатора

Принцип роботи. Нехай напруга на вході стабілізатора U_{BX} збільшиться на величину ΔU_{BX} . Це приводить до збільшення напруги на стабілітроні і навантаженні. Але навіть незначне збільшення напруги на стабілітроні спричинить різке зростання струму стабілітрона, а значить і струму через баластний резистор R_B . Струм, який протікає через R_B :

$$I_B = I_{CT} + I_H$$

Як тільки почне збільшуватись струм стабілітрона, почне збільшуватись і струм через баластний резистор, що, в свою чергу, посилить спад напруги на ньому:

$$U_{R6} = (I_B + \Delta I_{CT}) \times R_6$$

Автоматична схема регулювання напруги на R_H $U_H = U_{BX} - I_B \times R_H$, робота якої ґрунтується на властивостях ВАХ стабілітрона, забезпечує майже однакові зміни $\Delta I_B \times R_B \approx U_{BX}$. Аналогічно схема працює під час зменшення вхідної напруги.

Висновок: стабілітрон підтримує постійність напруги при зміні струму через нього від $I_{CT.min}$ до $I_{CT.max}$

Основними параметрами стабілітронів є:

напруга стабілізації U_{CT} ;

мінімальний струм стабілізації $I_{CT.min}$, при якому настає стійкий електричний пробій р-п-переходу; Мінімальний струм стабілізації $I_{st.min}$ обмежується величиною і нестабільністю зворотного струму в передпробійний період.

максимальний струм стабілізації $I_{ст.мах}$, при якому потужність, що розсіюється на стабілітроні, не перевищує допустимого значення. Перевищення струму призводить до теплового пробою p - n -переходу.

Напруга стабілізації сучасних стабілітронів лежить у межах 1 - 1000 В, а значення мінімального та максимального струмів стабілізації відповідно в межах $I_{стmin} \approx 1...10$ мА, $I_{стmax} \approx 50...2000$ А;

диференціальний опір r диф. В робочій точці на ділянці стабілізації $r_R = dU_{ST} / dI_{ST}$, що визначає ступінь зміни напруги стабілізації при зміні струму через стабілітрон. На ділянці стабілізації звичайно $r_R = 0,5 \dots 200$ Ом;

максимальна потужність розсіювання P тах, при якій ще не настає тепловий пробій p - n -переходу;

температурний коефіцієнт стабілізації α_T - відношення відносної зміни напруги стабілізації до абсолютного зміни температури навколишнього середовища (виражається в% / град):

$$\alpha_T = [dU_{ST} / U_{ST} * dT] * 100\%$$

За напругою стабілізації стабілітрони поділяють на низьковольтні ($U_{ST} < 5,4$ В) та високовольтні ($U_{ST} > 5,4$ В).

Рівень напруги стабілізації залежить від товщини збідненого шару p - n -переходу, а отже, ступеня легування кремнію домішкою.

Щоб одержати низьковольтні стабілітрони, потрібно використати сильно легований кремній з дуже малою товщиною p - n -переходів. Низьковольтну напругу в межах 0,3 ... 1В стабілізують, використовуючи пряму вітку вольт-амперної характеристики кремнієвих діодів, що називаються стабісторами.

На різний характер пробою високовольтних і низьковольтних стабілітронів вказує знак при α_T . У низьковольтних стабілітронів з підвищенням температури напруга стабілізації зменшується, у високовольтних збільшується, і α_T має негативний знак.

Якщо вхідна напруга стабілізатора збільшується, то це приводить до збільшення струму через стабілітрон і резистор R_δ ($R_H = \text{const.}$). Надлишок вхідної напруги виділяється на R_δ , а напруга $U_{вих}$ - на опорі навантаження, що дорівнює $U_{СТ}$ (навантаження під'єднане паралельно до стабілітрона), залишається незмінною. Із зміною опору R_H струм, що протікає через опір R_δ , залишається незмінним, але змінюється розподіл струмів між стабілітроном і навантаженням, а напруга $U_{вих}$, як і раніше, зберігається незмінною. Для зменшення α_T послідовно із стабілітроном з'єднують термозалежний опір R_T , наприклад p - n -перехід, зміщений у прямому напрямі.

Випускаються кремнієві стабілітрони на напругу стабілізації від 5 до 400 В і на потужність від 250 мВт до 50 Вт

- 6 **Стабістори** - для стабілізації напруги менше 3В, і в них використовується пряма вітка ВАХ (див. рис.13).

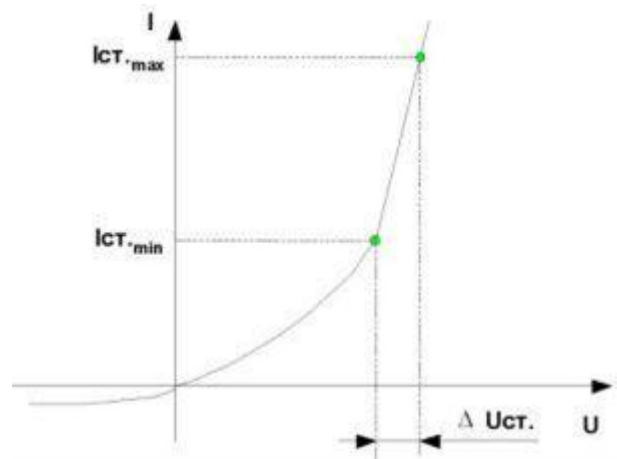


Рисунок 13 - ВАХ стабістора

Використовуються стабістори в прямому включенні.

7 **Світлодіоди**. На основі явищ, що відбуваються в *p-n*-переході при протіканні через нього прямого струму, можна отримувати напівпровідникові прилади, здатні генерувати оптичне випромінювання. Такими приладами є *напівпровідникові світлодіоди*. Робота світлодіодів заснована на *інжекційній електролюмінесценції*, тобто генерації оптичного випромінювання в *p-n*-переході, що знаходиться під прямою зовнішньою напругою.

Під впливом зовнішньої енергії електрони в атомах переходять в збуджений стан з більш високим рівнем енергії W_2 , званим метастабільним рівнем збудження. При поверненні цих електронів з метастабільного рівня W_2 на вихідний W_1 відбувається випуск фотонів з довжиною хвилі, яка визначається співвідношенням:

До переваг напівпровідникових світлодіодів відносяться високий в порівнянні з лампами розжарювання ККД, відносно вузький спектр випромінювання і хороша діаграма спрямованості, висока швидкодія і мала напруга живлення. Все це забезпечує зручність узгодження з інтегральними мікросхемами, високу надійність, довговічність і технологічність.

Спектр випромінювання, а отже і його колір, залежить від використовуваного напівпровідникового матеріалу.

Світлодіоди виготовляють не на основі кремнію або германію, як більшість напівпровідникових приладів, а на основі арсеніду-фосфіду галію.

Яскравість світіння пропорційна прямому струму світлодіода.

Струму в кілька міліампер вже достатньо для виразної індикації.

Світлодіоди виготовляють як у вигляді окремих індикаторів, так і у вигляді семисегментних або точкових матриць. Семисегментні матриці складаються з семи підсвічених стовпчиків - сегментів, з яких можна синтезувати зображення будь цифри від 0 до 9 (такі матриці використовуються, наприклад, в електронному годиннику з цифровою індикацією). У точкових матрицях зображення формується з світяться точок. На основі точкових матриць можна синтезувати зображення вже не тільки цифри, але й будь-якого знака (літери, спеціального символу і т.ін.).

8 Фотодіоди

Найпростіший *фотодіод* являє собою звичайний напівпровідниковий діод (див. Рис. 1.4, а), в якому забезпечується можливість впливу оптичного випромінювання на р-п-перехід. У рівноважному стані, коли потік випромінювання повністю відсутній, концентрація носіїв, розподіл потенціалу та енергетична зонна діаграма фотодіода повністю відповідають звичайній р-п-структурі.

При дії випромінювання 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. Ці електрони і дірки називають фотоносіями. При дифузії фотоносіїв вглиб *n*-області основна частка електронів і дірок не встигає рекомбінувати і доходить до кордону рп-переходу. Тут фотоносії розділяються електричним нулем р-п-переходу, причому дірки переходять в *p*-область, а електрони не можуть подолати поле переходу і скупчуються біля кордону р-п-переходу і *n*-області.

Таким чином, струм через рп-перехід обумовлений дрейфом неосновних носіїв - дірок. Дрейфовий струм фотоносіїв називається *фотострумом* $I_{\text{ф}}$. Фотоносії - дірки - заряджають *p*-область позитивно щодо *n*-області, а фотоносії - електрони - заряджають *n*-область негативно по відношенню до *p*-області. Виникаюча різниця потенціалів називається фотоЕДС - $E_{\text{ф}}$. Генерований струм в фотодіоді - зворотний, він спрямований від катода до анода. Причому його величина тим більше, чим більше освітленість.

Фотодіоди можуть використовуватися для отримання електричної енергії. Так, сонячні батареї виготовляють на основі фотодіодів з великою площею р-п-переходу.

9 Оптрони

Світлодіоди і фотодіоди часто використовуються в парі. При цьому вони поміщаються в один корпус таким чином, щоб світлочутлива майданчик фотодіода розташовувалася навпроти випромінюючої майданчики світлодіода. Напівпровідникові прилади, що використовують пари "світлодіод-фотодіод", називаються оптронами (рис. 14). Вони широко використовуються в електронній апаратурі для гальванічної розв'язки вхідних і вихідних ланцюгів.

Вхідні і вихідні ланцюги в таких приладах виявляються електрично ніяк не пов'язаними, оскільки передача сигналу здійснюється через оптичне випромінювання.

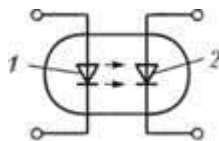


Рисунок 14 - Оptrон:

1 - світлодіод; 2 - фотодіод

Використання оптронів в електронно-обчислювальних пристроях є одним з основних методів підвищення завадостійкості апаратури.

Основний носій перешкод в радіoeлектронній апаратурі - корпус. Корпус використовується як один з полюсів електроживлення, тому підключення до нього різних силових пристроїв призводить до наведення короткочасних імпульсних перешкод при комутаціях потужнострумових ланцюгів. У той же час для передачі інформації чисто електричним шляхом між пристроями - джерелом і приймачем інформації - повинна бути електрична зв'язок по корпусу. Якщо до цього ж корпусу підключені силові ланцюги, то перешкоди, викликані комутаціями в цих ланцюгах, призводять до збоїв у роботі інших пристроїв, підключених до корпусу.

Передача інформації за допомогою оптронів дозволяє розв'язати електричні ланцюги живлення джерела і приймача інформації, оскільки носієм інформації є електрично нейтральне оптичне випромінювання. Таким чином, пристрої можуть мати різні корпуси, тобто виявляються гальванічно розв'язаними і не схильними впливу перешкод.

Крім захисту від впливу перешкод, гальванічна розв'язка на основі оптронів дозволяє вирішити ще одну задачу - спільну роботу пристроїв, що знаходяться під різними потенціалами. Будь-яка, навіть невелика, різниця потенціалів не дозволяє чисто електрично з'єднувати різні пристрої, оскільки це призведе до виходу їх з ладу. Передача сигналу в оптроні можлива, навіть якщо ланцюга світлодіода і фотодіода знаходяться під різними (в деяких оптронах до 500 В) напруженнями. Таким чином, пристрої, інформаційно пов'язані з допомогою оптронів, можуть перебувати під різними потенціалами.

10 Діоди Шотткі. В основі випрямляючих діода може використовуватися не тільки перехід між напівпровідниками p - і n -типу, але і між напівпровідником і металом. Такі діоди називаються *діодами Шотткі*.

Розглянемо структуру метал-напівпровідник n-типу. Якщо робота виходу електронів у металу вище, ніж у напівпровідника, то переважаючим буде переміщення електронів з напівпровідника в метал (вільним електронам металу важче придбати енергію, рівну роботі виходу, ніж електронам напівпровідника). У результаті метал заряджається негативно, а що залишилися в напівпровіднику іони донорної домішки створюють в його прикордонному шарі позитивний потенціал (рис. 15, *а*). Такий розподіл зарядів створює контактну різницю потенціалів $U_{\text{до}}$ (потенційний бар'єр), що перешкоджає подальшому переміщенню електронів. При цьому тонкий прикордонний шар напівпровідника збіднюється носіями. Таким чином, в місці контакту металу і напівпровідника виникає перехід, аналогічний р-n-переходу. Якщо до такого переходу прикласти зворотне напруга, що збігається з $U_{\text{до}}$, то ширина збідненої області збільшиться, а опір переходу зросте. Якщо прикласти пряма напруга, то воно буде протидіяти $U_{\text{до}}$, при цьому перехід звужується, потенційний бар'єр зменшується і через перехід починає текти струм. Вольт-амперні характеристики такого переходу і р-n-переходу виявляються аналогічними.

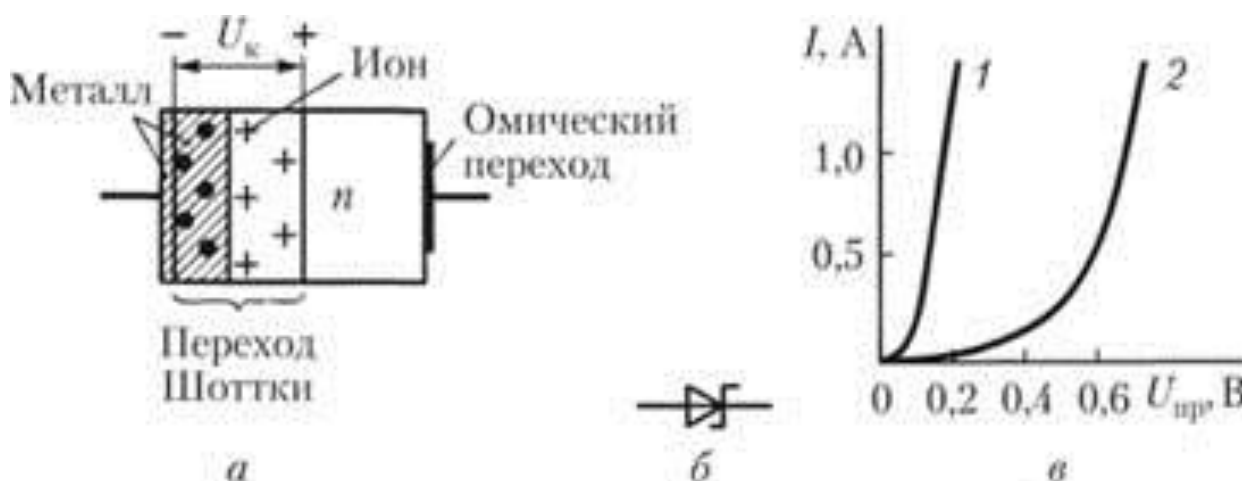


Рисунок 15 - Металлополупроводниковий діод Шоттки:

а - структура діода; *б* - умовне позначення; *в* - вольт-амперна характеристика; *1* - перехід Шоттки; *2* - р-n-перехід

Основною відмінною особливістю характеристик діода Шоттки є значно меншу пряме падіння напруги в порівнянні з діодами на основі р-n-переходу (рис. 15, *в*). Це пояснюється тим, що в діоді Шоттки одне з речовин переходу - метал, і отже, його електричний опір (і відповідне падіння напруги на ньому) значно менше, ніж у напівпровідника.

Інша особливість діода Шоттки - відсутність проникнення неосновних носіїв заряду з металу в напівпровідник (у розглянутому випадку - дірок, які для n-області є неосновними). Це

значно підвищує швидкодію діодів Шотткі у порівнянні зі звичайними діодами, оскільки відпадає необхідність у розсмоктуванні таких носіїв при зміні полярності зовнішньої напруги.

Діоди Шотткі, у яких випрямляючий перехід являє собою тонку плівку молібдену або алюмінію, нанесену на пластинку кремнію методом вакуумного напилення, володіють ємністю, що не перевищує 0,01 пФ.

Це забезпечує надзвичайно малий час їх перемикання (частки наносекунди) і гранично високу частоту роботи (десятки гігагерц). Потужні діоди дозволяють пропускати струми в десятки ампер при зворотних напругах до 500 В. Завдяки меншому прямому напрузі (0,3 В замість 0,7 В у діодів р-п-типу) вони забезпечують більш високий ККД. Умовне позначення металлополупроводникового діода Шотткі наведено на рис. 15, б.

Контрольні запитання:

1. Що таке варикап?
2. Будова та призначення варикапа?
3. Які основні параметри варикапа?
4. Що називається стабілітроном?
5. Основними параметрами стабілітрона?
6. Як графічно позначається стабілітрон на принципіальних електричних схемах?
7. Привести схему стабілізації напруги.
8. Які використовуються способи з'єднання діодів при розробці схем випрямлячів?

Змістовий модуль 3. Біполярні транзистори

Лекція 5

Тема: Класифікація та будова транзисторів

План

- 1 Класифікація транзисторів
- 2 Будова біполярних транзисторів
- 3 Режим роботи біполярного транзистора (БТ)

Теоретичні відомості

Транзистор трьохелектродний підсилювальний прилад. Винайдений у 1948 році. За винахід транзистора Шоклі, Бардін та Браттейн були удостоєні Нобелівської премії.

Транзистор взагалі - це н/п прилад з одним або декількома електричними переходами, придатний для підсилення потужності і має три або більше виводів.

Біполярні транзистори

Біполярний транзистор - транзистор, в якому використовуються заряди носіїв обох полярностей.

Являє собою кристал напівпровідника, що складається з трьох шарів з чередуванням провідностей і забезпечений трьома виводами.

На відміну від н/п діода біполярні транзистори мають два електронно-дірочних переходи.

У тришаровій структурі є два електронно-дірочних переходи; *емітерний* - між емітером і базою; *колекторний* - між базою і колектором.

Основою приладу служить пластина н/п, так звана база. З двох сторін в неї вплавлена домішка, що створює області з провідністю відмінною від провідності бази. Таким чином отримують транзистори типу р-п-р, коли крайні області є напівпровідниками з доречний провідністю, а середня н/п з електронною провідністю п-р-п.

В якості матеріалу для виготовлення транзисторів використовують германій, кремній

При виготовленні транзистора необхідно виконати такі дві умови:

1 Товщина бази (відстань між емітером і колектором) повинна бути малою порівняно з довжиною вільного пробігу носіїв заряду;

2 Концентрація домішок заряду в емітері повинна бути значно більше ніж в базі.

Струми в транзисторі залежать від температури навколишнього середовища, що є загальним недоліком н/п приладів. З ростом температури, зростає струм $I_{кб0}$, збільшується концентрація неосновних носіїв в шарах, збільшується коефіцієнт передачі в базі.

Транзистором називають електроперетворювальний напівпровідниковий прилад, що має один чи декілька електронно-діркових переходів, і три, або більше, виводів. *Основні функції транзисторів* – підсилення, генерування, перетворення електричних сигналів.

БТ - це напівпровідниковий прилад з двома взаємодіючими випрямними переходами і трьома виводами, який забезпечує посилення потужності електричних сигналів.

В БТ використовуються два типи носіїв заряду - електрони і дірки (звідси і назва - біполярний).

Переходи транзистора утворені трьома областями напівпровідника з різним видом провідності. Залежно від характеру електропровідності зовнішніх шарів розрізняють транзистори типу р-п-р і п-р-п. Внутрішню область монокристалла Т., яка розділяє р-п-переходи, називають базою (Б). Зовнішній шар монокристала, який призначений для інжектування (впровадження) носіїв заряду в базу, називають емітером (Е), а р-п-перехід, який

примикає до емітера, емітерним. Інший зовнішній шар, екстрагують носії заряду з бази, називають колектором, а перехід - колекторним.

Основні властивості транзистора визначаються процесами в базі. Якщо концентрація домішок по всьому об'єму базового шару однакова, то є база однорідна, то рух носіїв заряду в ній (при відсутності зовнішньої напруги) носить чисто дифузійний характер. Якщо ж база неоднорідна, то за рахунок утвореного в ній внутрішнього електричного поля рух носіїв буде комбінованим: дифузія об'єднується з дрейфом носіїв заряду в цьому полі.

Т. з однорідною базою називають дифузійними, з неоднорідною - дрейфовими. Останні мають кращі частотними властивостями і набули найбільшого поширення.

Залежно від матеріалу, що застосовується для виготовлення транзистора розрізняють Ge, Si і GaAs транзистори, в залежності від технології виготовлення - сплавні, дифузійні, епітаксійно-планарні транзистори.

Транзистори використовують в схемах підсилення, переключення й генерації сигналів і є широко розповсюдженими в телекомунікаційній апаратурі завдяки своїм перевагам: малими розмірами та масою, високому коефіцієнту корисної дії, високій механічній стійкості, великому терміну експлуатації (десятки тисяч годин).

До основних недоліків транзисторів відносять значний розкид параметрів і їх залежність від температури.

За видом носіїв зарядів їх поділяють на біполярні та уніполярні (польові).

1 Класифікація транзисторів

При вивченні цього питання необхідно засвоїти відомості про класифікацію транзисторів.

За основним напівпровідниковим матеріалом (германієві, кремнієві та арсенід галієві транзистори)

За функціональним призначенням розрізняють транзистори підсилювальні, генераторні, перемикаючі, імпульсні, універсальні та інші.

За робочим діапазоном частот транзистори прийнято поділяти на 4 групи: низькочастотні (з граничною частотою до 3 МГц), середньої частоти (3-30 МГц), високочастотні (30-300 МГц), надвисокочастотні (більше 300 МГц).

За потужністю транзистори бувають малопотужні (розсіюють потужність до 0,3 Вт), середньої потужності (0,3-1,5 Вт) та потужні (більше 1,5 Вт).

За матеріалом й конструкцією корпусу (металеві, скляні, пластмасові, керамічні).

За структурою (польові, біполярні та однопереходні).

За виконанням (дискретні транзистори у складі інтегральних схем);

За технологією виготовлення транзистори бувають сплавні, дифузійні, планарні, епітаксійні та інші.

В сплавних транзисторах р-п-переходи формують шляхом вплавлення домішок у кристал. Такі транзистори мають значну площу і велику ємність р-п-переходів і характеризуються низькою граничною частотою.

Дифузійні транзистори виготовляють методом дифузії домішок у кристал, тому вони мають вищу граничну частоту (до 300 МГц).

Планарні транзистори виготовляють у вигляді плоских структур, де формування р-п-переходів і зовнішніх виводів здійснюється обробкою однієї сторони кремнієвої пластинки.

В епітаксійних транзисторах р-п-переходи формують у так званому епітаксійному шарові напівпровідника, який нарощують на напівпровідниковій підкладці. Перевагою планарних та епітаксійних транзисторів є висока робоча частота та підвищений коефіцієнт підсилення.

2 Будова біполярних транзисторів

Біполярний транзистор – це трьохелектродний напівпровідниковий прилад, що має два взаємодіючих р-п-переходи, проходження струму в якому обумовлені рухом зарядів обох знаків – електронів і дірок.

Біполярний транзистор містить три напівпровідникові області зрізним типом провідності, що чергується (рис. 1) р-п-р (а) або п-р-п (б). Одна з крайніх областей завжди легірується сильніше, її називають емітером, призначення її – інжекція носіїв в середню область структури, що називається – базою. Іншу крайню область називають колектором, вона менш легірована, аніж емітер, призначений для екстракції носіїв із базової області.

Електронно-дірковий перехід між емітером і базою називається *емітерним*. Перехід на межі базу-колектор – називають колекторним. Він збирає в базу носії, які інжектуються з емітера та передає їх в колекторну область.

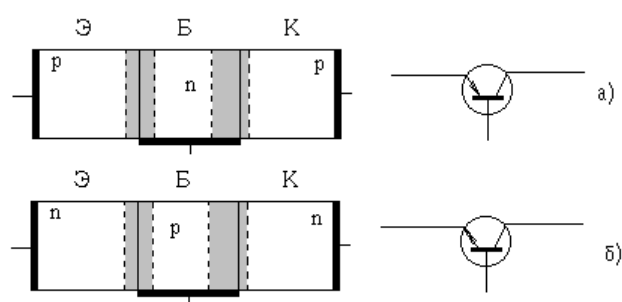


Рисунок 1 – Структури та умовні графічні позначення транзисторів р-п-р (а) і п-р-п (б) типу.

Стрілка в умовному графічному позначенні показує напрям струму у проводі емітера за прямої напруги на емітерному переході.

3 Режим роботи біполярного транзистора (БТ)

Залежно від типу провідності транзистора змінюється полярність підключення джерел живлення, а отже, і напрямку струмів. Режим роботи БТ залежать від стану р-п-переходів. Розрізняють чотири режими роботи біполярних транзисторів: *насичений, відсікання, інверсний, активний*.

Можливі поєднання стану переходів і відповідні їм режими роботи наведені в таблиці 1.

Режими роботи БТ

Режим роботи біполярного транзистора залежить від струму керування I_b і визначається станом емітерного та колекторного переходів транзисторної структури.

Кожен перехід БТ можна включити або в прямому, або в зворотному напрямку. Залежно від цього розрізняють наступні режими роботи транзистора:

- **активний режим** - на емітерний перехід подається пряма напруга, а на колекторний - зворотне; При цьому опір силового кола може змінюватися і залежить від струму бази I_b .

- **режим насичення** (подвійної інжекції) - обидва переходу знаходяться під прямим напругою, тобто емітерний та колекторний переходи зміщені у прямому напрямку. При цьому опір силового кола є мінімальним

- **режим відсічення** - до обох переходах підводять зворотні напруги, тобто емітерний та колекторний переходи зміщені у зворотному напрямку. При цьому опір силового кола є максимальним.

- **інверсний режим** (інверсне включення) - до колекторного переходу подається пряма напруга, а до емітерного - зворотна.

- **ключовий режим** роботи транзистора – режим, при якому транзистор по чергово перебуває у режимах насичення та відсічення.

Основним режимом роботи БТ в аналогових пристроях є активний режим (нормальний включення).

Режими насичення і відсічення зазвичай застосовуються в цифрових пристроях.

Таблиця 1

Стан переходів	Режим роботи	
	Емітерний	Колекторний
Активний	Відкритий	Закритий
Насичення	Відкритий	Відкритий
Відсікання	Закритий	Закритий
Інверсний	Закритий	Відкритий

Як видно із таблиці 1 при роботі у *активному (основному) режимі* на емітерному переході напруга пряма, а на колекторному – зворотна.

Режим відсікання (запирання) досягається подачею зворотної напруги на обидва переходи.

При роботі у *режимі насичення* на обох переходах напруга пряма, транзистор повністю відкритий.

При інверсному режимі до емітерного переходу прикладена зворотна напруга, а до колекторного переходу – пряма.

В активному режимі здійснюється ефективне управління величиною колекторного струму за допомогою малого базового струму. При цьому на КП виділяється велика потужність в результаті порівняно високих значень струму переходу і падіння напруги на ньому, що дозволяє реалізовувати ефект посилення.

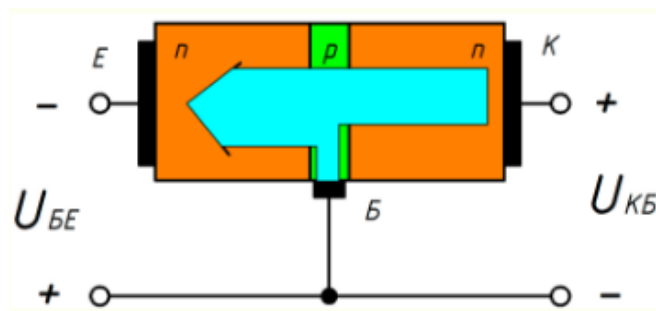


Рисунок 2

До емітерного переходу транзистора в активному режимі прикладена напруга прямої полярності, достатня для того, щоб основні носії заряду емітера змогли здолати потенціальний бар'єр.

Під дією прикладеної напруги основні носії з ділянки емітера переходять (інжектуються) в базу, створюючи струм емітера I_E . оскільки база виготовляється вузькою (розмір бази приблизно дорівнює дифузійній довжині носіїв) і низкою концентрацією основних носіїв, то переважна більшість (99...99,8%) носіїв заряду, інжектованих із емітера в базу, не стикаються на своєму шляху з носіями зарядів іншої полярності і досягають колекторного переходу. Незначна кількість інжектованих із емітера в базу носіїв рекомбінує в базі, створюючи струм бази I_B .

Інжектовані з емітера носії заряду для бази є неосновними, тому, досягнувши колекторного переходу, вони потрапляють у прискорювальне електричне поле колекторного джерела енергії, напруга якого добирається набагато більшою за напругу емітерного джерела. Прискорені електричним полем носії заряду досягають колектора, створюючи струм I_K . Таким чином для БТ можна записати рівняння струмів в активному режимі

$$I_E = I_K + I_B$$

Відношення вихідного струму I_K транзистора, ввікненого за схемою зі спільною базою до вхідного струму I_B коефіцієнтом підсилення струму емітера

$$\alpha = \frac{I_K}{I_E}$$

За коефіцієнтом підсилення струму α і рівнянням струму транзистора визначають коефіцієнт підсилення струму бази

$$\beta = \frac{I_K}{I_B} = \frac{1 - \alpha}{\alpha}$$

Коефіцієнт підсилення струму емітера α менший за одиницю і становить. 0,90... 0,999

Режим насичення характерний малими падіннями напруги, а **режим відсічення** - малими струмами. Ці режими відповідають крайнім станам БТ при його роботі в режимі перемикавання.

Режим насичення - у цьому режимі на обидва переходи транзистора подається напруга прямої полярності і обидва переходи відкриваються. У базу інжектуються основні носії як і з емітера так і колектора. Опір емітерного та колекторного переходу різко зменшується, а отже різко зменшується опір між усіма трьома електродами транзистора.

Режим насичення (рис.3) застосовується у тому разі, якщо потрібно зменшити майже до нуля опір між двома елементами кола, з'єднаними через транзистор, тобто для комутації елементів електричного кола.

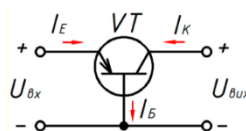


Рисунок 3

Режим відсічення (рис.4). У режимі відсічення на емітерний та колекторний p-n переходи подається напруга зворотної полярності і обидва переходи закриваються. В емітерному та колекторному колах протікають теплові струми неосновних носіїв заряду, абсолютне значення яких становить одиниці мікроампер. Опори емітерного та колекторного переходів настільки великі, що можна вважати емітерне та колекторне поле розімкненими. Режим відсікання транзистора застосовується для розмикання електричних кіл.

Якщо у процесі роботи транзистор під дією імпульсів керування переходить від режиму насичення до режиму відсікання і навпаки, то вважають, що транзистор працює у ключовому режимі. Ключовий режим транзистора застосовують для вмикання, вимикання

та перемикання електричних кіл, тобто у ключовому режимі транзистор працює як швидкодіючий електронний комутатор.

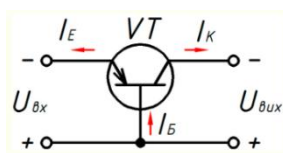


Рисунок 4

Інверсний режим транзистора може бути реалізований тільки в мікропотужному режимі в зв'язку з несиметрією структури реального транзистора.

У схемах із транзисторами зазвичай утворюються два кола.

Вхідне (керуюче) коло призначено для керування роботою транзистора, і у це коло вмикається джерело енергії; у вихідному (керованому) колі утримуються коливання, і у це коло вмикається навантаження.

Робота транзистора в ключовому режимі:

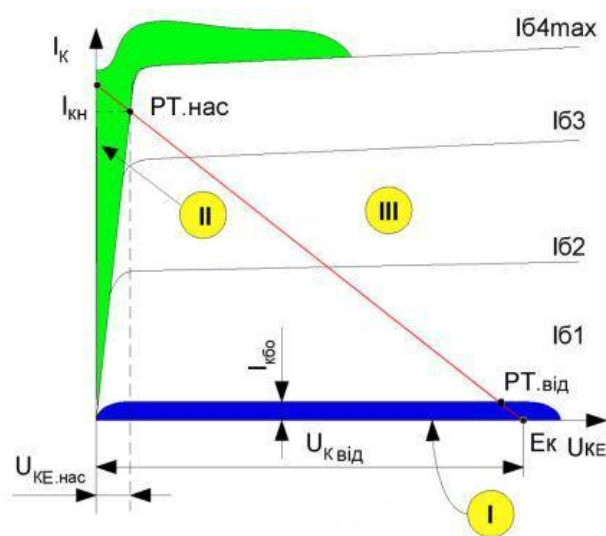


Рисунок 5 - Графічне пояснення роботи транзистора в ключовому режимі:

I – режим відсікання; II – режим насичення; III – активний режим.

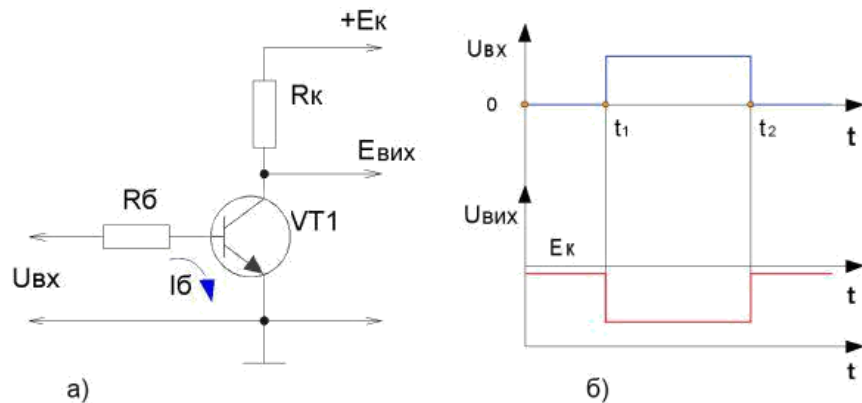


Рисунок 6 - Ключовой режим роботи транзистора:
а – схема транзисторного ключа; б – діаграма входних та вихідних напруг.

Резистор $R_б$ обмежує струм бази транзистора, щоб він не перевищував максимально припустимого значення. У проміжок часу від 0 до t_1 (рис.6,б) входна напруга й струм бази близькі до нуля, і транзистор перебуває в режимі відсікання.

Напруга $U_{кэ}$, є вихідною і буде близькою до E_k . У проміжок часу від t_1 до t_2 входна напруга й струм бази транзистора стають максимальними, і транзистор перейде в режим насичення. Після моменту часу t_2 транзистор переходить у режим відсікання. Транзисторний ключ є інвертором, тобто змінює фазу сигналу на 180° .

2 Принцип работы биполярного транзистора.

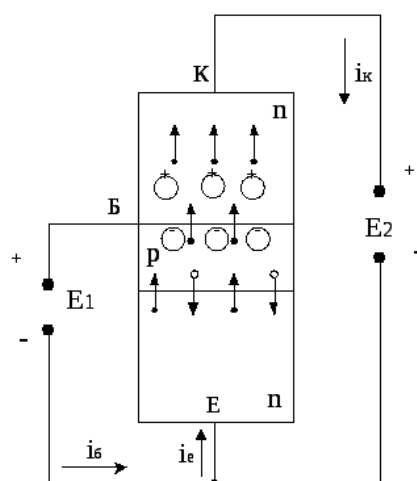


Рисунок 5

Для розгляду принципу роботи біполярного транзистора скористаємося схемою п-р-п транзистора, приведеною на рис.5.

Транзистор являє собою два напівпровідникових діоди, що мають одну загальну область — базу, причому до емітерного р-п переходу прикладена напруга E_1 у прямому (пропускному) напрямку, а до колекторного переходу прикладена напруга E_2 у зворотному напрямку, причому $|E_2| \gg |E_1|$. Напруги у біполярному транзисторі пов'язані наступним чином: напруга колектор-емітер дорівнює сумі напруг база-емітер і база-колектор, $U_{к-е} = U_{к-б} + U_{б-е}$.

При роботі транзистора у активному режимі $U_{б-е} = U_{к-б}$, відповідно $U_{к-е} \gg U_{к-б}$. ВАХ емітерного переходу являє собою ВАХ напівпровідникового діода при прямому струмі, а ВАХ колекторного переходу подібна до ВАХ діода за зворотного струму.

Принцип роботи транзистора полягає у тому, що пряма напруга емітерного переходу (ділянки база-емітер) істотно впливає на струми емітера і колектора.

Чим більша напруга $U_{б-е}$, тим більше струми емітера i_e і колектора i_k . При цьому зміни струму колектора лише незначно менше зміни струму емітера.

Таким чином, напруга $U_{б-е}$ керує струмом колектора. Підсилення електричних коливань за допомогою біполярного транзистора засновано саме на цьому явищі.

Лекція 6

Тема: Статичний режим роботи біполярних транзисторів. Система h-параметрів транзисторів.

Питання до теми:

- 1 Статичний режим роботи біполярних транзисторів.
- 2 Система h-параметрів транзисторів.

Теоретичні відомості:

1 Статичний режим роботи біполярних транзисторів

Як елемент електричного кола транзистор використовують звичайно таким чином, що один з його електродів є входним, а другий — вихідним. Третій електрод є загальним відносно входу і виходу. В коло входного електрода вмикають джерело входного сигналу, а в коло вихідного — опір навантаження.

В залежності від того, який електрод є загальним, розрізняють три схеми вмикання транзисторів:

- із загальною базою (ЗБ),
- із загальним емітером (ЗЕ)
- із загальним колектором (ЗК)

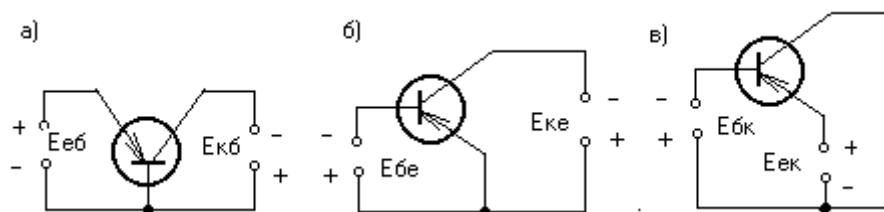


Рисунок 1 - Схеми вмикання транзисторів: а – ЗБ, б – ЗЕ, в – ЗК.

При цьому кожна схема характеризується двома сім'ями статичних характеристик, які визначають співвідношення між струмами в колах електродів транзисторів і напругами, що прикладені до цих електродів.

Такими характеристиками є:

- вхідні $I_{ВХ} = \varphi(U_{ВХ}) U_{(ВХ)} = \text{const}$
- вихідні $I_{ВИХ} = \varphi(U_{ВИХ}) I_{(ВХ)} = \text{const}$

Характеристики графічно відображають залежність між величинами струмів транзистора і напругами на р-п переходах в різних схемах вмикання (рис.2).

Для схеми зі спільним емітером:

- вхідні характеристики – $I_{б} = f(U_{бе})$ при $U_{ке} = \text{const}$;
- вихідні характеристики – $I_{к} = f(U_{ке})$ при $I_{б} = \text{const}$.

Характеристики використовуються для розрахунку параметрів транзисторів, визначення режимів їх роботи.

Наведені характеристики називають *статичними*, оскільки вони описують залежність між двома змінними величинами за умови постійності деякої третьої.

Зауважимо, що ВАХ транзистора істотно залежать від температури навколишнього середовища: зі збільшенням температури вхідні характеристики зміщуються ліворуч, а вихідні – вгору, що еквівалентно збільшенню струмів транзистора за незмінних зовнішніх напруг.

Основне призначення транзисторів – електронна комутація напруги.

Статичні ВАХ найчастіше використовують для визначення статичних робочих точок транзисторів під час аналізу електронних схем у режимі постійного струму. Для розв'язання

таких задач застосовують відповідні графоаналітичні методи. Крім того, на підставі статичних ВАХ розраховують низькочастотні малосигнальні параметри транзисторів у робочій точці, про що йтиметься далі.

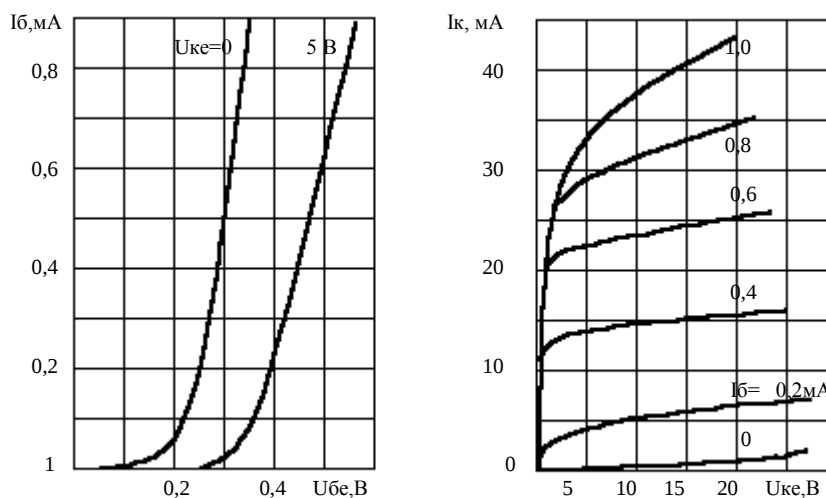


Рисунок 2 - Вхідні і вихідні характеристики транзистора КТ312 А

2 Система h -параметрів транзистора

Властивості транзисторів характеризуються багатьма різноманітними параметрами, які, як правило, містяться в спеціальних довідниках з напівпровідникових приладів і використовуються при проектуванні електронних пристроїв, їх обслуговуванні і ремонті.

В подальшому при вивченні дисципліни, в практичних і лабораторних роботах, взагалі в практиці широко використовується так звана змішана, або гібридна (hybrid) система параметрів – h -параметрів.

При цьому транзистор в будь-якій схемі вмикання представляється як *чотириполюсник* (рис.1), який має два вхідних виводи (1-1) та два вихідних (2-2).

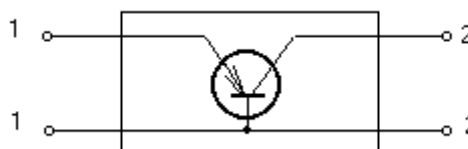


Рисунок 1 - Транзистор як 4-полюсник

Система має чотири h -параметри.

Для схеми зі ЗЕ вони визначаються так:

$h_{11} = \Delta U_{be} / \Delta I_b$ при $U_{ce} = \text{const}$ – вхідний опір транзистора;

$h_{21} = \Delta I_k / \Delta I_b$ при $U_{ке} = \text{const}$ - коефіцієнт передачі струму;

$h_{12} = \Delta U_{бе} / \Delta U_{ке}$ при $I_b = \text{const}$ – коефіцієнт зворотного зв'язку за напругою;

$h_{22} = \Delta I_k / \Delta U_{ке}$ при $I_b = \text{const}$ - вихідна провідність.

Дані параметри розраховуються по статичним характеристикам транзисторів і є статичними параметрами.

Приклад. За даними характеристиками (рис.3) визначити вхідний опір h_{11e} і коефіцієнт передачі струму h_{21e} в розрахунковій точці O ($I_b = 0,3 \text{ мА}$; $U_{ке} = 20 \text{ В}$).

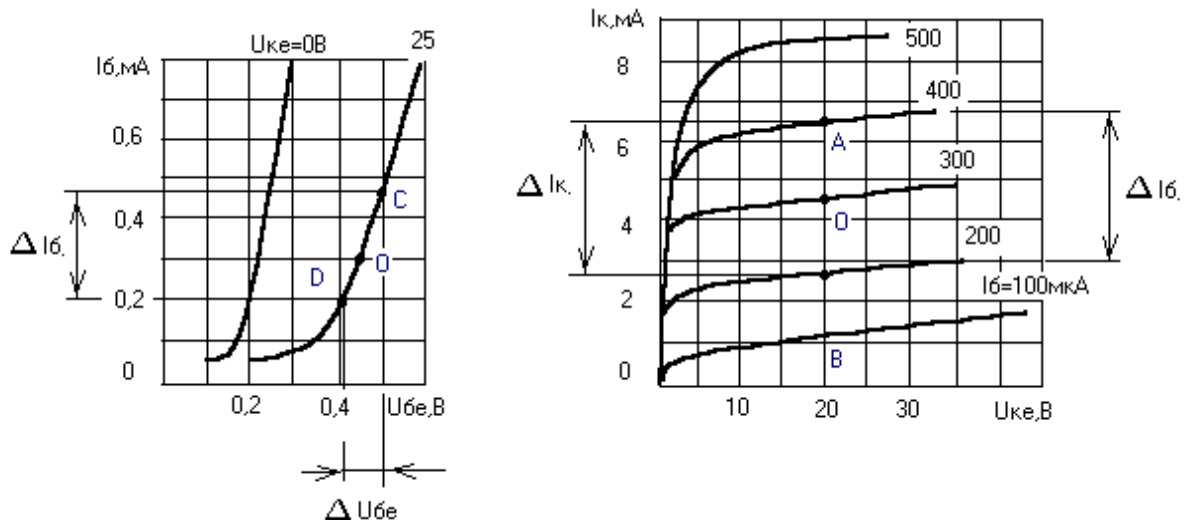


Рисунок 3 - Визначення h-параметрів транзистора з ЗЕ.

Розрахунок виконується в такій послідовності.

1. На вхідних і вихідних характеристиках позначається за даними координатами розрахункова точка O.
2. Вхідний опір h_{11e} визначається по вхідним характеристикам:

$$h_{11e} = \Delta U_{бе} / \Delta I_b \quad (\text{при } U_{ке} = \text{const}),$$

де $\Delta U_{бе}$ – приріст напруги база-емітер,

$$\Delta U_{бе} = U_{бе(C)} - U_{бе(D)} = 0,5 - 0,41 = 0,09 \text{ В};$$

ΔI_b – приріст струму бази,

$$\Delta I_b = I_{b(C)} - I_{b(D)} = 0,48 - 0,2 = 0,28 \text{ мА}.$$

При цьому використовується усереднена вхідна характеристика.

$$h_{11e} = 0,09 / 0,28 \cdot 10^{-3} = 321,4 \text{ Ом}.$$

3. Коефіцієнт передачі струму визначається по вихідним характеристикам. Для цього на вертикалі, яка відповідає $U_{ке} = \text{const}$, для даного прикладу 20В, помічають точки А і В на сусідніх з розрахунковою точкою характеристиках.

$$h_{21e} = \Delta I_k / \Delta I_b \quad (\text{при } U_{ке} = \text{const}),$$

де ΔI_b – приріст струму бази,

$$\Delta I_b = I_{b(A)} - I_{b(B)} = 400 - 200 = 200 \text{ мкА};$$

де ΔI_k – відповідний приріст струму колектора,

$$\Delta I_k = I_{k(A)} - I_{k(B)} = 6,5 - 2,5 = 4 \text{ мА}.$$

$$h_{21e} = 4 \cdot 10^{-3} / 200 \cdot 10^{-6} = 20.$$

Лекція 7

Динамічний режим роботи біполярних транзисторів

Теоретичні відомості:

В реальних електронних схемах транзистори працюють в динамічному режимі (рис.1).

Динамічним називається такий режим роботи транзистора, при якому в його вихідне коло вмикається опір навантаження, а у вхідне коло – джерело вхідного сигналу. Саме в динамічному режимі транзистор працює як підсилювальний елемент.

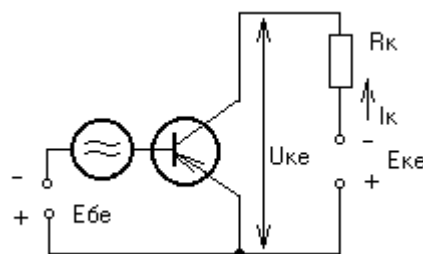


Рисунок 1 - Робота транзистора в динамічному режимі

У цьому режимі струми і напруги на електродах транзистора не залишаються постійними, а безупинно змінюються.

Розглянемо роботу транзистора, включеного за найбільш розповсюдженою схемою з загальним емітером, у динамічному режимі (рисунок 2, а).

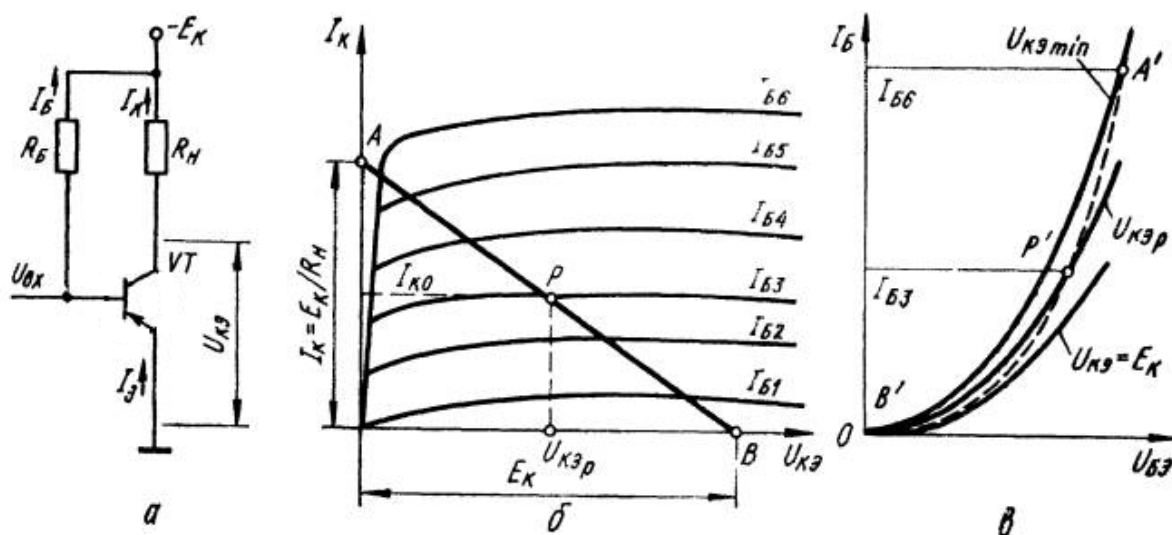


Рисунок 2 – Динамічний режим роботи транзистора:

а – схема включення; б – динамічна характеристика в сімействі статичних вихідних характеристик; в – вхідна динамічна характеристика

У цій схемі напруга джерела живлення E_K розподіляється між ділянкою колектор — емітер (виходом схеми) і навантажувальним опором R_H так, що напруга

$$U_{KE} = E_K - I_K R_H,$$

Залежність між струмом і напругою вихідного кола описується **рівнянням динамічного режиму**: $U_{ke} = E_{ke} - I_K R_K$.

Зміни напруги на вході транзистора викликають відповідні зміни струму емітера, бази, а отже, і струму колектора I_K . Це приводить до зміни напруги на R_H , у результаті чого змінюється і напруга U_{KE} .

Характеристики транзистора, що знаходиться в динамічному режимі, відрізняються від характеристик статичного режиму, тому що вони визначаються не тільки властивостями самого транзистора, але і властивостями елементів схеми.

Динамічні характеристики транзистора:

- вхідна $I_B = f(U_{be})$;
- вихідна характеристики $I_K = f(U_{ke})$.

На рисунку 2, б зображені вихідні статичні характеристики транзистора і приведена динамічна характеристика (навантажувальна пряма) АВ, яка відповідає опору навантаження R_H .

Положення навантажувальної прямої на статичних характеристиках однозначно визначається напругою джерела живлення E_K і опором резистора R_H . Точка В перетину навантажувальної прямої з віссю напруг збігається з точкою, у якій напруга на колекторі дорівнює E_K . Дійсно, ця точка відповідає випадку, коли струм колектора дорівнює нулю. При

цьому струм у навантажувальному опорі відсутній і спадання напруги на опорі навантаження дорівнює нулю. Отже, вся напруга джерела живлення E_K виявляється прикладеною до ділянки колектор — емітер транзистора.

Точка А перетину навантажувальної прямої з віссю струмів збігається з точкою, для якої задовольняється умова $I_K = \frac{E_K}{R_H}$, так як струм колектора у випадку, як щоб транзистор можна було відкрити цілком (чи закрити), обмежувався б тільки величиною опору R_H .

Усі проміжні положення точок на лінії навантаження характеризують можливі напруги і струми у відповідних ланцюгах транзистора при подачі сигналу з урахуванням опору навантаження. Кожному струму бази відповідають цілком визначені значення струму колектора і колекторної напруги. Наприклад, якщо в режимі спокою (до надходження вхідного сигналу) був установлений струм бази I_{BE} то робоча точка Р на навантажувальній прямій вкаже відповідні цьому струму значення I_{KR} і U_{KEP} (рисунок 2, б).

Вхідна динамічна характеристика являє собою залежність вхідного струму від вхідної напруги в динамічному режимі (рисунок 2, в).

Для щоб побудувати вхідну динамічну характеристику, потрібно для кожної напруги на колекторі (для якої є статична вхідна характеристика) визначити по вихідній динамічній характеристиці відповідний струм бази. Потім на вхідних стичних характеристиках слід зазначити точки, що відповідають знайденим значенням струмів бази. Якщо з'єднати ці точки А', Р', В', (рисунок 2, в) плавної кривою лінією, то одержимо вхідну динамічну характеристику транзистора.

Динамічні параметри транзистора:

- коефіцієнт підсилення струму $k_c = I_{km} / I_{bm}$;
- коефіцієнт підсилення напруги $k_n = U_{km} / U_{bm}$;
- коефіцієнт підсилення потужності $k_c k_n$;

де I_{km} , I_{bm} , U_{km} , U_{bm} - амплітудні значення струмів і напруг відповідно кіл колектора і бази.

Контрольні запитання до теми

- 1 Що називається динамічним режимом роботи біполярного транзистора?
- 2 Як будується вихідна динамічна характеристика транзистора (навантажувальна)?
- 3 Поясніть підсилювальні властивості біполярного транзистора.
- 4 Основні динамічні параметри транзистора

Лекція 8

Тема: Порівняння параметрів транзистора у схемах з загальною базою (ЗБ), загальним емітером (ЗЕ), загальним колектором (ЗК)

План

- 1 Схеми вмикання БТ
- 2 Особливості схем увімкнення БТ

Теоретичні відомості

1 Схеми вмикання БТ. Як елемент електричного ланцюга транзистор використовують зазвичай таким чином, коли один з його електродів є входним, а другий - вихідним. Третій електрод є загальним відносно входу і виходу. У ланцюг входного електроду включають джерело входного сигналу, а у вихідний ланцюг - опір навантаження. Залежно від того, який електрод є загальним, розрізняють три схеми включення транзисторів: із загальним емітером (ЗЕ), загальною базою (ЗБ) і загальним колектором (ЗК) (рис.1).

Схема ЗБ, загальним електродом якої для входної і вихідної ланцюгів є база транзистора, використовується для посилення напруги і потужності. Проте ця схема не посилює струму, оскільки входним струмом є струм емітера I_e , а вихідним - струм колектора $I_k = I_e - I_b < I_e$.

У схемі ЗЕ, яка застосовується найчастіше, входним є струм бази, вихідним - струм колектора, а емітер є загальним електродом для входної і вихідної ланцюгів транзистора. Схема ЗЕ дає значне посилення по струму. Оскільки ця схема дає також підсилення по напрузі, то підсилення по потужності схеми значно більше а ніж в схемі з ЗБ.

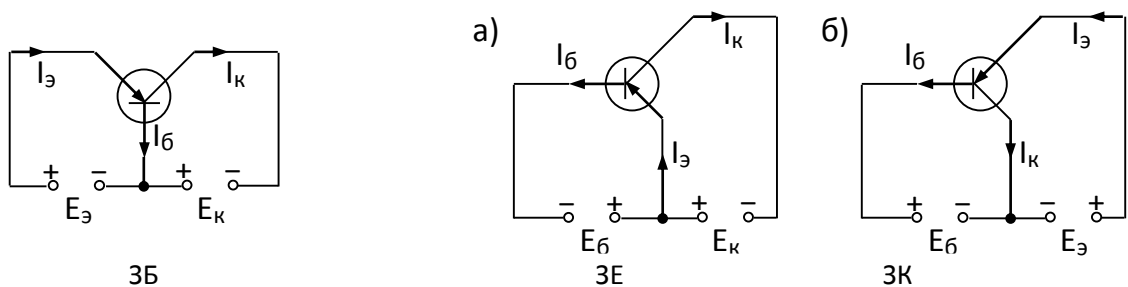


Рисунок 1- Схеми вмикання БТ типу р-п-р

В схемі ЗК вхідним струмом, як і для схеми з ЗЕ, являється струм бази I_b , а вихідним - струм емітера I_e . Коефіцієнт передачі струму в цій схемі $K_{i_k} = \frac{I_e}{I_b} = \beta_o + 1$ дещо більше, ніж в схемі ЗЕ. Схема ЗК посилює вхідний сигнал також і по потужності.

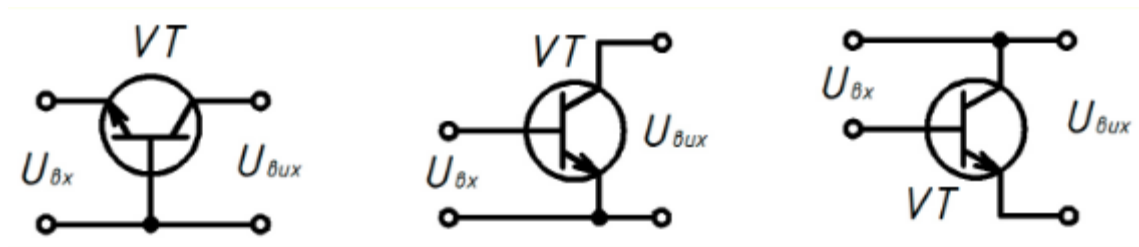


Рисунок 2 - Схеми вмикання БТ типу n-p-n

2 Особливості схем увімкнення БТ

Таблиця 1 – Порівняння різних схем вмикання БТ

Параметр	Схема ЗЕ	Схема ЗБ	Схема ЗК
коефіцієнт підсилення по струму	десятки-сотні	менше одиниці	десятки-сотні
коефіцієнт підсилення по напрузі	десятки-сотні	десятки-сотні	менше одиниці
коефіцієнт підсилення по потужності	сотні-десятки тисяч	десятки-сотні	десятки-сотні
вхідний опір	сотні ом – одиниці кілоом	одиниці-десятки ом	десятки – сотні кіоом
вихідний опір	одиниці – десятки кілоом	сотні кілоом – одиниці мегаом	сотні ом – одиниці кілоом

Порівнюючи властивості різних каскадів на біполярному транзисторі, можна зробити наступні висновки:

каскад зі спільним емітером (ЗЕ) дає підсилення як по струму, так і по напрузі, причому він інвертує вхідний сигнал. Включення транзистора із загальним емітером (ЗЕ) дозволяє отримати підсилення як струму, так і напрузі сигналу. Коефіцієнт підсилення потужності при такому

включенні найбільший, однак сильно змінюється при зміні режиму транзистора, температури і заміні екземплярів транзисторів.

Вхідний опір транзистора при включенні з ЗЕ значно вище, ніж при включенні з ЗБ, і знаходиться в межах від декількох Ом (для транзисторів великої потужності) до тисячі Ом (для транзисторів малої потужності). При збільшенні опору навантаження вхідний опір зменшується. Вихідний опір транзистора менше, ніж при включенні з ЗБ, і зменшується при збільшенні внутрішнього опору джерела сигналу. Коефіцієнт гармонік при включенні транзистора з ЗЕ більше, ніж при інших включеннях. Однак таке включення застосовується найбільш широко, так як забезпечує найбільші підсилення потужності і напруги при заданому опорі навантаження.

У схемах увімкнених зі спільним емітером (ЗЕ) відношення вхідного і вихідного опорів нетаке різне, як у попередніх схем, крім того, коефіцієнт підсилення струму і коефіцієнт підсилення напруги набагато більший за одиницю, тому ця схема застосовується для побудови різного ряду підсилювачів і перетворювачів електричних сигналів.

- **каскад зі спільною базою (ЗБ)** є підсилювачем напруги (коефіцієнт підсилення по струму менше одиниці), він має низький вхідний опір. Включення транзистора із загальною базою (ЗБ) забезпечує тільки посилення напруги. Коефіцієнт посилення струму при такому включенні менше одиниці і мало змінюється при зміні режиму роботи, температури і заміні екземплярів транзистора. Вхідний опір транзистора при включенні з ЗБ менше, ніж при інших включеннях, і знаходиться в межах від десятих часток Ом (для транзисторів великої потужності) до десятків Ом (для транзисторів малої потужності).

При збільшенні опору навантаження вхідний опір зростає. Вихідний опір при включенні з ЗБ більше, ніж при інших включеннях, і росте при збільшенні внутрішнього опору джерела сигналу. Коефіцієнт гармонік при включенні транзисторів з ЗБ зазвичай не перевищує кількох відсотків при повному використанні транзистора. Тому включення з ЗБ часто застосовується в вихідних каскадах підсилювачів звукових частот. Схема увімкнення із спільною базою (ЗБ) має великий вихідний опір і малий вхідний коефіцієнт підсилення струму, що майже дорівнює одиниці, тому застосовується для побудови стабілізованих джерел струму і напруги, у складних підсилювачах, електронних комутаторах тощо.

- **каскад зі спільним колектором (ЗК)** (емітерний повторювач) посилює струм, тоді як його коефіцієнт підсилення по напрузі менше одиниці (може бути дуже близький до одиниці), і відрізняється малим вихідним опором і широкою смугою пропускання.

Схема увімкнення зі спільним колектором (ЗК) має вхідний опір набагато більший за вихідний, а коефіцієнт підсилення напруги майже дорівнює одиниці, тому ця схема

застосовується для узгодження вхідних і вихідних опорів каскадно з'єднаних електронних пристроїв.

Позначення транзистора складається з трьох елементів:

- 1-й елемент (цифра або буква) – відповідає напівпровідниковому матеріалу: 1(Г) – германій; 2(К) – силіцій; 3(А) – арсенід галію;
- 2-й елемент (буква): Т – для біполярного транзистора, П – для польового транзистора;
- 3-й елемент (три цифри) – перша характеризує частоту й потужність транзистора, друга й третя – номер розробки за порядком.

Запитання для самоперевірки:

- Дайте визначення біполярного транзистора.
- Які існують структури біполярних транзисторів?
- Назовіть і приведіть три схеми вмикання біполярних транзисторів.
- Що означає активний режим вмикання біполярного транзистора?
- Поясніть струмопроходження в транзисторі.
- Що являють собою вхідні і вихідні характеристики біполярного транзистора?
- Назвіть h -параметри транзистора, поясніть їх фізичну суть.
- Як розраховуються параметри h_{11} та h_{21} ?
- Що називається динамічним режимом роботи біполярного транзистора?
- Як будується вихідна динамічна характеристика транзистора (навантажувальна)?
- Поясніть підсилювальні властивості біполярного транзистора.

Змістовий модуль 4. Польові транзистори

Лекція 9

Тема: Польові транзистори з керуючим р-п переходом.

Польові транзистори з ізолюваним затвором.

План

- 1 Загальні відомості про польові транзистори. Їх особливості та класифікація
- 2 Будова та принцип дії польового транзистора з керуючим р-п-переходом
- 3 МОП- транзистори
- 4 Характеристики та параметри польових транзисторів

Теоретичні відомості

1 Загальні відомості про польові транзистори. Їх особливості та класифікація

Польовий транзистор (ПТ) – це активний напівпровідниковий прилад, в якому управління вихідним струмом здійснюється шляхом зміни провідності струмопровідної області (каналу) за допомогою поперечного електричного поля.

Польовий транзистор — напівпровідниковий пристрій, переважно із трьома виводами, в якому сила струму, що протікає між двома електродами (витоком і стоком) регулюється напругою, прикладеною до третього електрода (затвора). Усі транзистори такого типу мають витік, стік та затвор. Струм в транзисторі протікає через канал, що утворено легованою областю напівпровідника, розташованою між підкладкою та затвором. До каналу під'єднані два електроди — витік, що є джерелом носіїв заряду й стік, до якого носії заряду стікаються. Контакти між витоком, стоком і каналом робляться омічними. Для цього приконтактні області сильно легують.

Особливості польових транзисторів.

- 1. Транзистор є уніполярним приладом, оскільки струм в області, що проводить (каналі), створюється носіями заряду одного знаку (основними носіями).*
- 2. Основні носії заряду дрейфують уздовж каналу від витоку до стоку під дією подовжнього електричного поля. Вихідні параметри транзистора визначаються каналом, тому цю структуру називають каналним транзистором.*
- 3. Ланцюг управління транзистора (затвор) ізольований від струмопровідного шару (каналу) зворотню зміщеним р - п- переходом або діелектриком. Область затвор-канал є конденсаторною структурою, тому транзистор має високий вхідний опір ($10^8 \dots 10^{10}$ Ом) на постійному струмі.*
- 4. У транзисторі реалізований польовий принцип управління. Провідність каналу змінюється під дією поперечного електричного поля.*
- 5. Польовий транзистор має принципово нижчий рівень низькочастотних шумів, оскільки в ньому відсутні процеси інжекції та поверхневі рекомбінаційні явища.*

Принципові відмінності польових транзисторів від біполярних

Основною відмінністю польових транзисторів від біполярних є те що польові транзистори є уніполярними приладами, тобто в переносі заряду бере участь лише один вид носіїв, тому відсутні процеси інжекції і екстракції, що покращує їх частотні властивості.

В польових транзисторах інформаційний сигнал (керуюча дія) задається у вигляді напруги або електричного поля, а в біполярних керування відбувається вхідним струмом.

Вхідний опір в уніполярних транзисторів значно більший, тому досягається високий коефіцієнт підсилення за струмом.

Вихідний опір великий, але має певне значення, який зумовлений поверхневими втратами й модуляцією довжини каналу, а в біполярних транзисторах модуляція ширини бази – ефект Ірлі.

2) При фіксованій напрузі зміщення на затворі струм в каналі збільшується зі зростанням напруги на стоці доки при деякій порівняно невеликій напрузі $U_c = U_{\text{нас}}$ не відбувається насичення струму.

Основною особливістю польових транзисторів, у порівнянні з біполярними, є їх високий вхідний опір, який може досягати $10^9 - 10^{10}$ Ом. Таким чином, ці прилади можна розглядати як керовані потенціалом, що дозволяє на їх основі створювати схеми з надзвичайно низьким споживанням енергії в статичному режимі. Сказане особливо суттєво для електронних статичних мікросхем пам'яті з великою кількістю запам'ятовуючих комірок.

Так само, як і біполярні, польові транзистори можуть працювати в ключовому режимі, однак падіння напруги на них в увімкненому стані досить значне, тому ефективність їх роботи в потужних схемах є меншою, ніж у біполярних приладів.

Польові транзистори можуть мати як р, так і n канали, управління якими проводиться при різній полярності напруги на затворах. Ця властивість компліментарності розширяє можливості при конструюванні схем та широко застосовується при створенні запам'ятовуючих комірок і цифрових схем на основі МДП транзисторів (CMOS) схеми.

Польові транзистори відносяться до приладів уніполярного типу, це означає, що принцип їх роботи базується на дрейфі основних носіїв заряду. Ця обставина значно спрощує їх аналіз у порівнянні з біполярними приладами, оскільки, в першому наближенні, можна знехтувати дифузійними струмами, неосновними носіями заряду та їх рекомбінацією.

Класифікація польових транзисторів.

Типи польових транзисторів відрізняються структурою області, що управляє, затвор-канал.

Серед чисельних різновидів польових транзисторів можна виділити два основні класи: польові транзистори із затвором у виді р-n переходу та польові транзистори із затвором, який ізольований від робочого напівпровідникового об'єму діелектриком.

Прилади цього класу часто також називають МДН транзисторами (від словосполучення метал - діелектрик - напівпровідник) та МОН транзисторами (від словосполучення метал - окис - напівпровідник), оскільки в якості діелектрика найчастіше використовується оксид кремнію.

Існують два основні види транзисторів :

- польові транзистори з керуючим $p - n$ - переходом (1952р.);

- польові транзистори з ізолюваним затвором, тобто МОП- транзистори або МДП-транзистори (1960р. - Д. Кінг, М. Аталла).

Польові транзистори з керуючим переходом виконуються на основі $p - n$ - переходу або переходу метал-напівпровідник (Шотки) – МЕН - транзистор.

МОН-транзистори реалізуються у вигляді двох типів:

- з вбудованим каналом;

- з індукованим каналом.

Сукупність взаємодіючих МДН-структур, виконаних за інтегральною технологією, є приладом із зарядовим зв'язком (ПЗЗ). ПЗЗ-структури є подальшим розвитком технології приладів з польовим принципом управління.

Польові транзистори з керуючим p - n -переходом – уніполярні напівпровідникові прилади, принцип дії яких заснований на дрейфі основних носіїв заряду. Такі транзистори мають менший вхідний опір порівняно з МДН-транзисторами, однак він є набагато більшим від вхідного опору біполярного транзистора. Розрізняють польові транзистори з керуючим p - n -переходом як прилади з каналом p - або n -типу провідності.

Польові транзистори з керуючим p - n -переходом перш за все використовуються в підсилювальному режимі. Тут в багатьох випадках вони мають переваги над МДН-транзисторами. Зокрема важливою перевагою польових транзисторів з керуючим p - n -переходом є малий рівень власних шумів і висока стабільність параметрів в часі. Причиною цих переваг є те, що канал в польових транзисторах з керуючим p - n -переходом відокремлений від поверхні p - n - переходом. На межі каналу й ОПЗ відсутні поверхневі дефекти, які зумовлюють як нестабільність параметрів, так і додаткові шуми в МДН-транзисторах. Такі транзистори відзначаються високою радіаційною стійкістю.

Технологія розробки транзистора

В сучасній технології виготовлення напівпровідників легування є одним з базових процесів виготовлення польових транзисторів з керуючим p - n - переходом. Неуклінне збільшення швидкодії і ступеня інтеграції МДН-ІС, так і біполярних ІС досягається постійним зменшенням геометричних розмірів структур за рахунок удосконалення методів локального легування .

Методи легування можна поділити на наступні групи: високотемпературна дифузія; іонна імплантація; радіаційно- стимульована дифузія.

Для кожної групи характерно використання спеціалізованого технологічного обладнання, що забезпечує проведення процесу в жорстко контрольованому режимі.

Високотемпературна дифузія. Методи дифузії являються основними і найбільш розповсюдженими при легуванні напівпровідників.

Дифузія представляє собою обумовлений тепловим рухом переміщення в напрямку зменшення їх концентрації.

При дифузії в кристалі розрізняють переміщення атомів даного твердого тіла. Швидкість дифузії залежить від градієнта концентрації атомів.

Радіаційно-стимульована дифузія. Цей метод дифузії оснований на введенні домішок в результаті бомбардування напівпровідникового кристалу легкими іонами з енергією, достатньою для зміщення атомів підкладки в міжвузля.

2 Будова та принцип дії польового транзистора з керуючим р-п-переходом

Польовим (уніполярним) називається транзистор, струм в якому зумовлений рухом в так званому каналі носіїв заряду лише одного типу (електронів або дірок).

Польовими називаються транзистори, робота яких заснована на зміні опору струмоведучих області (каналу) за допомогою зміни напруженості поперечно-прикладеного електричного поля. У них в створенні електричного струму беруть участь носії заряду тільки одного типу (електрони або дірки), тому інша назва даного типу транзисторів - уніполярні.

Уніполярними, чи польовими, транзисторами називаються напівпровідникові прилади, у яких регулювання струму здійснюється зміною провідності провідного каналу за допомогою електричного поля, перпендикулярного напрямку струму. Обидві назви цих транзисторів досить точно відбивають їхні основні особливості проходження струму в каналі обумовлено тільки одним типом зарядів, і керування струмом каналу здійснюється за допомогою електричного поля.

Електроди, підключені до каналу, називаються стоком (Drain) і витоком (Source), а керуючий електрод називається затвором (Gate). Напряга керування, що створює поле в каналі, прикладається між затвором і джерелом. У залежності від виконання затвора уніполярні транзистори поділяються на дві групи: з керуючим р - п-переходом і з ізолюваним затвором.

Як і більшість транзисторів, польовий транзистор з керуючим р-п переходом виготовляється по планарній технології (рис. 1, а). На підкладці з р-кремнію створюється тонкий епітаксціальний шар напівпровідника п-типу, що виконує функції каналу, тобто область, опір якої регулюється електричним полем. Канал ізолюваний р-п переходами як від підкладки, так і від знаходиться над ним області затвора (р +), під якою створюється електричне поле, що впливає на опір каналу. Нижній перехід (канал-підкладка) служить також для установки початкової товщини каналу.

Підкладка може служити другим керуючим електродом, або підключатися до затвору.

Польовий транзистор має напівпровідниковий кристал, наприклад n-типу, в якому утворено два зовнішніх виводи – *витік і стік*. Третій вивід утворюється від з'єднаних між собою областей з протилежним типом провідності, які утворюють так званий *затвор*. Рух носіїв струму відбувається в тій частині кристалу, що називається *каналом*. Між областями затвору і каналом утворюються р-n-переходи. Вихідним колом транзистора є коло витік – стік з джерелом живлення $E_{св}$ і опором навантаження R_c . Керуючою є напруга на затворі, тобто на р-n переходах, які джерелом напруги $E_{зв}$ увімкнуті в зворотному напрямку.

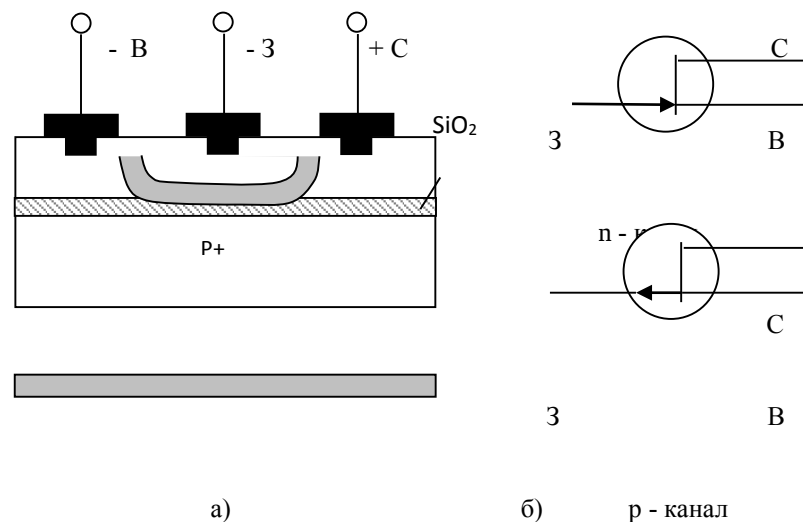


Рисунок 1 - Структура польового транзистора з керуючим р-n переходом (а), його умовне графічне позначення (б).

Струм в колі стоку залежить від ширини каналу. При збільшенні зворотної напруги на затворі р-n-переходи розширюються і звужують канал, що приводить до зменшення струму стоку і навпаки. Таким чином здійснюється керування струмом в польовому транзисторі.

Подібно до біполярних транзисторів, існує три схеми вмикання польових транзисторів: зі спільним виток, спільним стоком і спільним затвором. Польові транзистори можуть бути двох структур: з n-каналом та р-каналом.

Характеристики та параметри польових транзисторів

Основні характеристики польових транзисторів:

- вихідні (стокові) $I_c = f(U_{св})$ при $U_{зв} = \text{const}$;
- перехідні (стокзатворні) $I_c = f(U_{зв})$ при $U_{св} = \text{const}$.

Основні параметри польових транзисторів:

- крутість характеристики $S = \Delta I_c / \Delta U_{зв}$ при $U_{св} = \text{const}$;
- коефіцієнт підсилення напруги $\mu = \Delta U_{св} / \Delta U_{зв}$ при $I_c = \text{const}$;

- вхідний опір $R_{вх} = \Delta U_{зв} / \Delta I_3$ при $U_{св} = \text{const}$.

Порівняно з біполярними польові транзистори мають більший вхідний опір і більш високий рівень граничної частоти.

Польові транзистори з ізолюваним затвором (МДН-транзистори)

Якщо в польових транзисторах з керуючим р-n-переходом затвор має електричний контакт із каналом, то в нульовій транзисторах з ізолюваним затвором такий контакт відсутній. У цих транзисторах затвор являє собою тонку плівку металу, ізолюваного від напівпровідника. Залежно від виду ізоляції розрізняють МДП і МОП-транзистори. Абревіатура "МДП" розшифровується як "метал - діелектрик - напівпровідник", а "МОП" - як "метал - оксид - напівпровідник". В останньому випадку йод "оксидом" розуміється оксид кремнію, який є високоякісним діелектриком.

Витік і стік формують у вигляді сильно легованих областей напівпровідника. За рахунок цього області витіку і стоку мають високу концентрацію носіїв, що відзначено на малюнку знаком "+". Як МДП-, так і МОП-транзистори можуть бути виконані з каналом *p*- і *n*-типу. Канал в цій групі транзисторів може бути **вбудованим** (тобто створеним при виготовленні) та **індукованим** (тобто наведених під впливом напруги, прикладеної до затвора).

На відміну від ПТ з керуючим *p-n* переходом, у яких затвор має безпосередній електричний контакт із суміжною областю струмопровідного каналу, у МДН-транзисторів затвор, що являє собою, наприклад, алюмінієву плівку (Al), ізолюваний від зазначеної області шаром діелектрика. Тому МДН-транзистори відносять до класу ПТ з ізолюваним затвором. Наявність діелектрика забезпечує високий вхідний опір цих транзисторів ($10^{12} - 10^{14}$ Ом).

Частіше у якості діелектрика використовують оксид кремнію і тоді ПТ називають МОН-транзистором (метал - оксид – n/p). Такі транзистори бувають із вбудованим і індукованим каналами. Останні більш розповсюджені.

На відміну від польових транзисторів з керуючим р-n-переходом у польових транзисторів з ізолюваним затвором (рис.1,б) останній виготовляється у вигляді напилення металеві плівки на шар діелектрика, розташований над каналом напівпровідникового кристалу. Оскільки як діелектрик звичайно використовується двооксид кремнію SiO_2 , то такі транзистори із структурою метал-оксид-напівпровідник називають *МОН-транзисторами*.

Є дві різновидності МОН-транзисторів: з вбудованим каналом та наведеним каналом. Відрізняються вони способом формування каналу. МОН-транзистори, окрім виводів стоку, витоку та затвору, мають ще четвертий вивід – від підкладки (так зветься кристал, в якому сформована структура транзистора).

МОН-транзистори не потребують подачі напруги зміщення на затвор, що вигідно відрізняє їх від транзисторів з керуючим р-n-переходом.

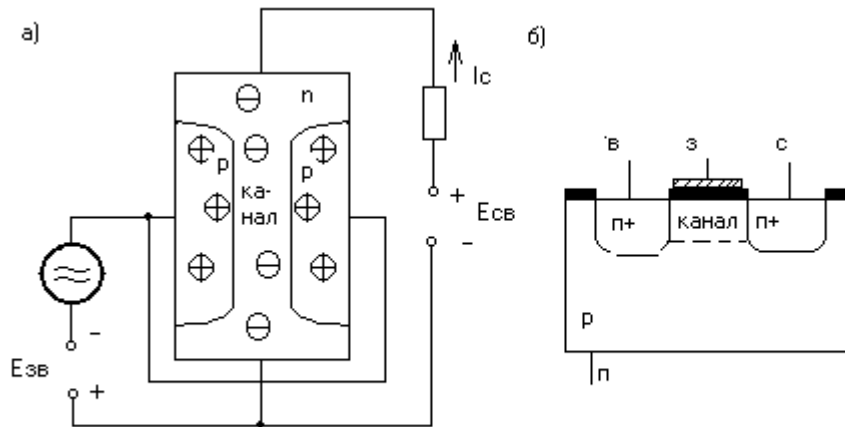


Рисунок 1 - Польові транзистори з керуючим р-n-переходом (а)
та ізольованим затвором (б)

На відміну від польових транзисторів із затвором у вигляді р—n-переходу у польових транзисторів з ізольованим затвором між металічним затвором: областю напівпровідника є шар діелектрика (МДН-транзистори).

Оскільки як діелектрик звичайно використовують двооксид кремнію SiO_2 , то транзистори із структурою метал— оксид— напівпровідник дівають МОН-транзисторами.

В них підкладку роблять із слаболегованої кремнієвої напівпровідникової пластинки, яка має провідність n- або р-типу. Є дві різновидності МОН-транзисторів:

- із вбудованим каналом.
- наведеним каналом.

В процесі окислення на поверхні пластинки створюється тонкий 0,2—0,3 мкм шар двооксиду кремнію. Через отвори в діелектрику в тілі підкладки створюються дві сильнолеговані області, що мають провідність протилежного типу по відношенню до провідності підкладки (в даному випадку p^+ -типу).

Домішка через отвори вводиться методом дифузії.

Одержані сильнолеговані області обладнуються зовнішніми виводами і

використовуються як витік В (S) та стік С (D), віддаль між якими порядку 5 ... 10 мкм.

Контакти електродів виготовляють технологічними методами, що запобігають ефекту випрямлення у переходах.

Над шаром двооксиду кремнію між виток і стоком наносять металічний шар, від якого зроблено вивід, що використовується як затвор (3) G.

Діелектрик між затвором і вбудованим або наведеним каналами в МОН-транзисторі знімає обмеження на полярність напруги на затворі, характерне для польових транзисторів з керуючим р—п-переходом. Підкладка в робочому режимі з'єднується, як правило, з витком, однак може бути використана як додатковий керуючий електрод.

Тонкий поверхневий канал для струму основних носіїв заряду між витком і стоком в МОН-транзисторі з вбудованим каналом створюється штучно або виникає природно в результаті контактних явищ на межі напівпровідника з діелектриком. Тип провідності каналу збігається з типом провідності витку і стоку. За наявності напруги між витком і стоком струм у колі стоку (каналу) I_D буде протікати навіть при нульовому зміщенні на затворі $U_{GS}=0$. Якщо до затвору відносно витку і підкладки прикласти від'ємну напругу, то дірки з підкладки втягуватимуться в канал, а електрони виштовхуватимуться. Провідність каналу, що позбавлений частини основних носіїв, зменшується, в результаті чого знижується струм стоку (режим збіднення). За $U_{GS} = U_{GS0}$ природний канал зникає, і струм стоку дорівнює нулю.

Позитивне зміщення на затворі ($U_{GS}>0$) викликає приток у канал основних носіїв заряду (електронів), в результаті чого зростає струм стоку. Такий режим роботи МОН-транзистора називається режимом збагачення.

Отже, МОН-транзистор з вбудованим каналом за своїми властивостями та характеристиками подібний до польового транзистора з керуючим р—п-переходом і відрізняється лише тим, що для його закриття потрібне негативне зміщення у випадку канапа з провідністю n-типу і позитивне зміщення — у випадку провідності p-типу.

У МОН-транзистора з наведеним каналом за відсутністю зміщення на затворі канал відсутній і струм стоку I_D практично дорівнює нулю. За деякої позитивної (для транзисторів з n-підкладкою— негативної) відносно витку напруги на затворі, що називається пороговою U_{B0} , в поверхневому шарі між витком і стоком через наявність діелектрика SiO_2 відбувається явище інверсії. В результаті створюється тонкий канал інверсійного шару, товщина якого і питома провідність для основних носіїв заряду збільшуються із зростанням напруги на затворі. Якщо при цьому до стоку прикласти напругу такої ж полярності, які на затворі, то струм стоку I_D зі збільшенням напруги U_{GS} зростає. Напругу U_{B0} можна трактувати як напругу відсікання U_{GS0} польового транзистора з керуючим р—п-переходом. За зовнішнім виглядом вихідні вольт-амперні характеристики МОН-транзистора аналогічні однойменним характеристикам

польового транзистора з керуючим р—п- переходом .

Відсутність струму стоку при нульовому зміщенні на затворі, а також однакова полярність напруги на затворі та стоку в МОН-транзисторів з індукованим каналом є сприятливою передумовою для побудови високоекономічних імпульсних схем. При використанні МОН-транзисторів в аналогових пристроях орієнтуються на їх дуже великий вхідний опір, що досягає через наявність шару діелектрика 10^{15} Ом.

ПТ широко використовують як дискретні компоненти електронних пристроїв, а також у складі інтегральних мікросхем.

Параметри польових транзисторів з ізольованим затвором в першому наближенні такі, як і в транзисторів з керуючим р—п-переходом. Полярність робочих напруг на електродах для різних типів польових транзисторів вказані в табл. 1.1.

Таблиця 1.1.

Тип транзистора	Тип каналу	Тип підкладки	Режим роботи	Полярність робочої напруги на електродах польових транзисторів		
				U_{GS}	U_{DS}	U_{GS0}
З керуючим р-п-	р	п	Збіднення	>0	<0	>0
	п	р		<0	>0	<0
МОН-структура з	р	п	Збіднення	>0	<0	>0
	п	р	Збагачення	<0		
			Збіднення	<0		
МОН-структура з наведеним	р	п	Збагачення	<0	<0	<0
	п	р		>0	>0	>0

Переваги польових транзисторів:

- 1) високий вхідний опір у схемі з ОІ;
- 2) малий рівень власних шумів, так як перенесення струму здійснюють тільки основні для каналу носії і, отже, немає рекомбінаційного шуму;
- 3) висока стійкість проти температурних і радіоактивних впливів;
- 4) висока щільність розташування елементів при виготовленні інтегральних схем.

Відзначимо також цікаву особливість польових транзисторів: в принципі витік і стік в транзисторах рівноправні, тобто залежно від прикладеної полярності напруги витік і стік

можуть мінятися місцями. На цій властивості ґрунтується використання польових транзисторів в якості електронних ключів замість звичайних контактних перемикачів.

Польові транзистори широко використовуються в підсилювачах, генераторах і іншій радіоелектронній апаратурі, а МОП-транзистори є основою для розробки всіх сучасних засобів обчислювальної техніки, включаючи мікропроцесори, мікроконтролери, напівпровідникову пам'ять.

Маркування транзисторів

Маркування транзисторів здійснюється за тими ж принципами, що і діодів.

В позначенні типу приладу для біполярних транзисторів використовують літеру Т, для польових транзисторів – літеру П. Наприклад, ГТ109А, КП201Е...

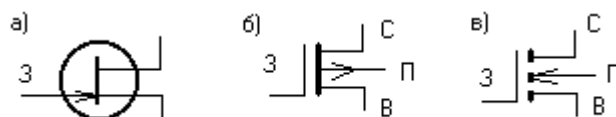


Рисунок 2 - Умовні позначення польових транзисторів:

- а – з керуючим р-п-переходом, б – МОН-транзистор з вбудованим каналом,
в – МОН-транзистор з наведеним каналом

Запитання для самоперевірки:

- Чим польові транзистори відрізняються від біполярних?
- Які бувають типи польових транзисторів?
- Поясніть будову і принцип роботи польового транзистора з керуючим р-п переходом.
- На чому ґрунтується принцип роботи уніполярних транзисторів?
- Поясніть особливості будови польових транзисторів з ізольованим затвором. Чому їх називають МОН-транзисторами?
- Чим відрізняються МОН-транзистори з вбудованим каналом та наведеним каналом?
- Назвіть основні схеми вмикання польових транзисторів.
- Як польові транзистори позначаються в схемах?

Лекція 10

Тема: Будова та вольт-амперна характеристика тиристора

План

- 1 Будова і принцип роботи діодного тиристора(діодного)
- 2 Будова і принцип роботи керованого тиристора (триністора)
- 3 Особливості застосування тиристорів

Теоретичні відомості

Тиристори - багатошарові структури з електронно-дірковими областями, які чергуються.

Тиристорами називають напівпровідникові прилади з трьома і більше р-п переходами, які мають два стійких стани рівноваги: стан з низькою провідністю і стан з високою провідністю.

Перехід з одного стану в інший обумовлений дією зовнішніх чинників: напруги, світла, температури і т.д.

До числа факторів, найбільш широко використовуваних для відмикання тиристорів, відноситься вплив напругою, струмом або світлом (фототиристори).

Основними типами є діодні (рис.1, а) і тріодних (рис. 1, б-е) тиристори.

Двохелектродні тіристори називають діністорами, трьохелектродні - триністорами. Деколи тіристори називають кремнієвими керованими вентилями, що підкреслює їх основне призначення в силовій електроніці - управління потужністю на навантаженні.

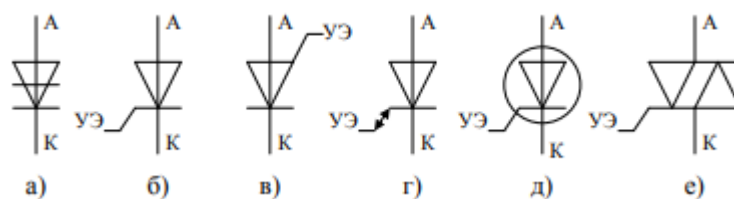


Рисунок 1 -Умовні позначення тиристорів: диністора (а), незапираємого тиристора з керуванням по катоду (б) і з керуванням по аноду (в), запираємого тиристора (г), фототиристора (д), семистора (е)

Існують кілька різновидів тиристорів, серед яких найбільш поширеними є діодні і тріодні тиристори. Діодним тиристором (діністором) називається прилад, який має два електроди, через які протікає як основний струм, так і струм управління.

Тиристор, що має два основних і один керуючий електрод, називається тріодний тиристором (тріністором).

Функціонально тіристори є електронними ключовими елементами, опір яких, при визначеній пороговій напрузі на них змінюється з високого (вимкнений стан) на низький (увімкнений стан).

1 Будова і принцип роботи діодного тиристора(діодного)

Діністор має постійний поріг спрацювання, поріг тріністора може змінюватись струмом управляючого електрода.

Діністор представляє собою чотирьохшарову н/п структуру типу р-п-р-п з трьома р-п-переходами (рис. 2), в якій р₁-шар виконує функцію анода, а п₂-шаро - катода. Шари р₂ і п₁ є базами динистора

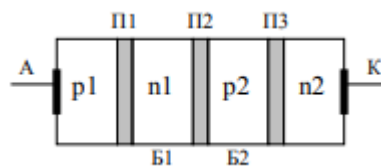


Рисунок 2 - Напівпровідникова структура діністора

Розглянемо роботу динистора при подачі на нього зворотної напруги. Зворотній напрузі динистора відповідає підключення зовнішньої напруги між анодом і катодом негативним полюсом до анода і позитивним до катода. Прикладання зворотної напруги до діністорів викликає зміщення середнього переходу П2 в прямому напрямку, а двох крайніх переходів П1 і П3 - в зворотному. Перехід П2 відкритий і падіння напруги на ньому мале. Тому можна припустити, що зворотна напруга розподіляється головним чином по обернено зміщеним переходах П1 і П3. Струм, що протікає через динистор в цьому режимі, визначається тільки неосновними носіями заряду. Отже, зворотна гілка вольтамперної характеристики динистора матиме вигляд зворотно зміщеного р-п-переходу.

При прямій напрузі на динисторі, переходи П1 і П3 зміщуються в прямому напрямку, а перехід П2 - в зворотному. В процесі виготовлення тиристора концентрація домішки в шарах п₁ і р₂ забезпечується досить високою і перехід П2 виходить вузьким. Тому, навіть при невеликій напрузі цей перехід вступає в режим електричного пробоя і динистор починає пропускати струм. Величина напруги пробоя є одним з основних параметрів динистора. Замикання динистора здійснюється зміною полярності напруги в ланцюзі анод - катод.

Вольтамперна характеристика динистора приведена на малюнку 3. Вид характеристики на ділянці "0-а" визначається величиною зворотного струму переходу П2. У точці "а" напруга

на динисторі досягає значення, при якому перехід П2 пробивається і динистор переходить у відкритий стан.

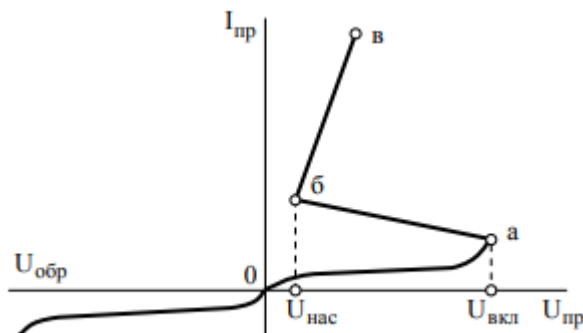


Рисунок 3 - Вольтамперна характеристика динистора

При цьому опір динистора значно зменшується, що призводить до зниження падіння напруги на ньому до рівня напруги насичення $U_{нас}$ і деякого збільшення струму в ланцюзі (точка б). Далі залежність струму від напруги має лінійну залежність (ділянка б-в).

2Будова і принцип роботи керованого тиристора (триністора)

Тиристор має таку ж структуру, як і динистор, за винятком того, що концентрація носіїв в шарах n_1 і p_2 набагато нижче і перехід П2 виходить багато ширше. Тому при робочих напругах мимовільний пробій переходу П2 неможливий. Для цієї мети з однією з баз робиться окремий вивід, що отримав назву керуючий. У тріодних тиристорах (триністорах) управління станом приладу проводиться по ланцюгу третього - керуючого електрода. По ланцюгу керуючого електрода при цьому можуть виконуватися або одна (відкривання), або дві (відкривання і закривання) операції зміни стану тиристора. Залежно від цього розрізняють замикаючі і незамикаючі тиристори. Залежно від того, від якої з баз зроблений керуючий висновок, тиристори поділяються на тиристори з управлінням по катоду (рисунок 4, а) і тиристори з управлінням по аноду (рисунок 4, б). Позитивним напругою, щодо катода (рисунок 4, а), створюються умови для деякого звуження переходу П2 і він буде пробитий. Тиристор переходить у відкритий стан, і буде перебувати в ньому як завгодно довго. Закрити тиристор можна тільки зміною полярності живлення. Наявність керуючої напруги на відкритому тиристорі не обов'язково. Більш того, щоб уникнути подачі напруги, що управляє при зворотному живленні транзистора, керуючу напругу подають у вигляді короткого імпульсу.

У разі застосування тиристора з керуванням по аноду, для отримання того ж ефекту, на керуючий електрод необхідно подавати негативну напругу щодо катода (рисунок 4, б).

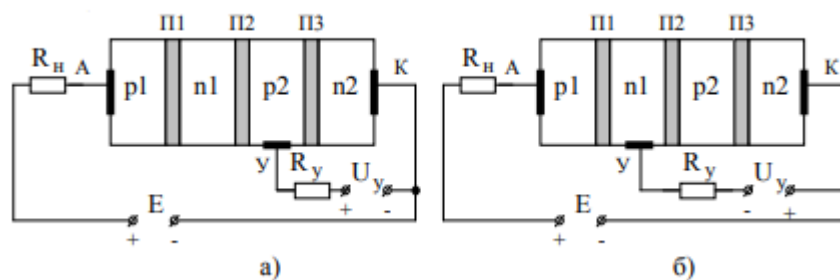


Рисунок 4 - Напівпровідникова структура тиристора з управлінням по катоду (а) і з управлінням по аноду (б)

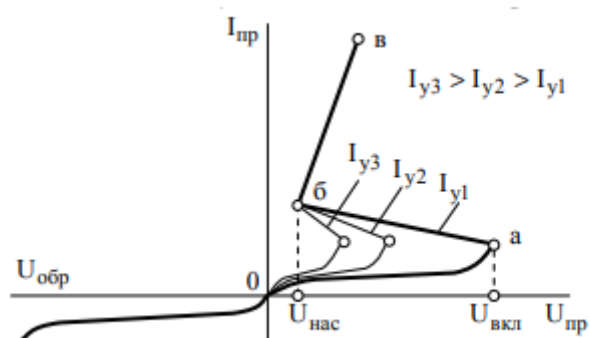


Рисунок 5 – Вольт-амперна характеристика тиристора

Вольт-амперна характеристика тиристора має такий же вигляд як і у динистора, за тим лише винятком, що напруга включення тиристора визначається величиною струму в ланцюзі управління (рис. 5). З ростом струму управління точка "а" зміщується в бік зменшення напруги включення тиристора. У незапираємих тиристорах (див. рис. 1, б, в) по ланцюгу керуючого електрода можна здійснити тільки відмикання тиристора.

Тиристри, що замикаються (див. рис. 1, г) допускають по ланцюгу керуючого електрода як відмикання, так і замикання приладу. Для замикання на керуючий електрод подається негативний імпульс напруги. У фототиристора (див. Рисунок 3.41, д) відмикання приладу проводиться за допомогою світлового імпульсу.

Всі перераховані прилади виконують функцію безконтактного ключа, який має однобічну провідність струму.

Прилад, що дозволяє проводити струм в обох напрямках, називають симетричним тиристором (симистором). За своїм призначенням симистор (див. рис. 1, е) покликаний

виконувати функції двох звичайних тиристорів включених зустрічно-паралельно з об'єднаним керуючим входом.

3 Особливості застосування тиристорів

Тиристор є струмовим ключовим граничним пристроєм односпрямованого або двоскерованої дії. При наявності керуючого виводу порогом включення тиристора можна управляти. Керуючий сигнал може бути постійним (квазистатическим), аналоговим (що змінюється в часі) або імпульсним.

Можливість застосування імпульсного сигналу пов'язана з регенеративним механізмом включення тиристора за принципом ПЗЗ.

Тиристор закривається при зменшенні напруги по основному ланцюгу внаслідок зменшення струму нижче значення струму утримання.

Тому цей ключовий елемент ефективно використовується в ланцюгах змінного струму. У ланцюгах постійного струму для виключення тиристора по анодному ланцюгу потрібно застосовувати спеціальні схеми комутації.

Цей електронний прилад дозволяє комутувати ланцюги з великою потужністю при невеликій потужності в ланцюзі управління.

Тиристори як порогові ключові елементи застосовують в різних імпульсних схемах (імпульсних модуляторах, формувачах потужних імпульсів та ін.), керованих випрямлячах, схемах автоматичного регулювання та керування потужністю, споживаною навантаженням змінного струму, релаксаційних генераторах.

Основними перевагами цих ключових елементів є:

- висока вихідна потужність і порівняно невеликий струм керування;
- простота схемотехніки;
- низька вартість.

З недоліків тиристорів слід зазначити їх порівняно низькі робочі частоти (десятки кілогерц).

Змістовий модуль 6. Оптоелектронні напівпровідникові прилади

Лекція 11

Тема: Фізичні процеси у фотоелектричних та випромінюючих напівпровідникових приладах, область їх використання

Теоретичні відомості:

Оптоелектроніка - один з найбільш розвинених напрямів у функціональній мікроелектроніці, оскільки оптичні і фотоелектричні явища досить добре вивчені, а технічні засоби, засновані на цих явищах, тривалий час використовуються в електроніці (фотоелементи, фотоелектронні помножувачі, фотодіоди, фототранзистори і ін.). Проте оптоелектроніка як самостійний науково-технічний напрям виникла порівняно недавно, а її досягнення нерозривно пов'язані з розвитком сучасної мікроелектроніки.

Спочатку оптоелектроніка вважалася порівняно вузькою галуззю електроніки, що вивчає лише напівпровідникові світловипромінювачі і фотоприймачі. Проте останнім часом поняття «оптоелектроніка» значно розширилося. Тепер в нього включають і такі недавно виниклі напрями, як *лазерна техніка, волоконна оптика, голографія* і ін. Відповідно до рекомендацій МЕК (Міжнародній електротехнічній комісії) оптоелектронний прилад визначається як прилад, чутливий до електромагнітного випромінювання у видимій, інфрачервоній або ультрафіолетовій областях; або прилад, що випромінюючий і перетворює некогерентне або когерентне випромінювання в цих же спектральних областях; або ж прилад, що використовує таке електромагнітне випромінювання для своєї роботи.

Оптоелектроніка заснована на електронно-оптичному принципі отримання, передачі, обробки і зберігання інформації, носієм якої є електрично нейтральний фотон. Поєднання в оптоелектронних функціональних пристроях двох способів обробки і передачі інформації - оптичного і електричного - дозволяє досягати величезної швидкодії, високої щільності розміщення інформації, що зберігається, створення високоефективних засобів відображення інформації. Дуже важливою перевагою елементів оптоелектроніки є те, що вони оптично зв'язані, а електрично ізольовані між собою. Це забезпечує надійне узгодження різних оптоелектронних ланцюгів, сприяє однонаправленості передачі інформації, перешкодостійкості каналів передачі сигналів. Виготовлення напівпровідникових елементів оптоелектроніки - оптронів - сумісно з інтегральною технологією, тому їх створення може бути включене в єдиний технологічний цикл виробництва інтегральних мікросхем.

До оптоелектронних приладів відносяться фотоприймачі та світловипромінювачі, а також інші прилади на їх основі. Фотоприймачі перетворюють енергію світлового випромінювання в електричну, а світловипромінювачі – навпаки.

Елементна база сучасної оптоелектроніки містить в собі такі групи приладів:

- 1) джерела випромінювання (лазери, світлодіоди);
- 2) фотоприймачі випромінювання (фоторезистори, фотодіоди, фототранзистори, фототиристри, фоточутливі прилади з зарядовим зв'язком (ПЗЗ);
- 3) оптрони і оптоелектронні мікросхеми;
- 4) прилади для відображення інформації;

5) оптичні канали зв'язку.

До оптоелектронних приладів відносяться фотоприймачі та світловипромінювачі, а також інші прилади на їх основі. Фотоприймачі перетворюють енергію світлового випромінювання в електричну, а світловипромінювачі – навпаки.

Лекція 12

Тема: Лазери

Питання до теми:

1 Основні властивості і види оптичного випромінювання

2 Джерела оптичного випромінювання. Лазери.

Теоретичні відомості:

1 Основні властивості і види оптичного випромінювання

Оптичне випромінювання має таку ж фізичну природу як і радіохвилі, тобто відноситься до класу електромагнітних хвиль.

Оптичне випромінювання – це електромагнітні хвилі з довжиною хвилі в діапазоні від 1 мн до 1 нм. Цей діапазон містить три піддіапазони – ультрафіолетовий УФ (УФ-А,УФ-В,УФ-С), видимий та інфрачервоний ІЧ (ІЧ-А,ІЧ-В,ІЧ-С).

Ультрафіолетовий спектр випромінювання відповідає довжинам хвиль 1нн .. 0,38мкм, видимий – 0,38... 0,78 мкм, інфрачервоний – 0,78 мкм ... 1мн.

Електромагнітне випромінювання оптичного діапазону має подвійну природу.

Для однієї групи явищ – це хвильовий процес із частотою коливань або довжиною хвилі, а для другої – потік елементарних частинок, які називають фотонами.

Таким чином, атом випромінює не безперервну хвилю, а хвильовий «пакет» (хвильовий «цуг») (рис.1). У хвильовому пакеті вкладаються мільйони оптичних коливань.

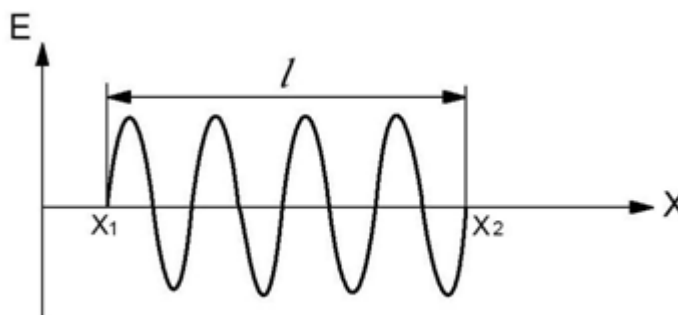


Рисунок 1

В загальному випадку оптичне випромінювання – це несинусоїдна хвиля, яка може бути приставлена рядом гармонічних складових. Амплітуди і початкові рази різних гармонійних складових визначають склад оптичного випромінювання.

Виділяють два види оптичного випромінювання: *некогерентне* та *когерентне*. Випромінювання квантів світла з напівпровідників здійснюється в результаті рекомбінації електронів, їх переходу на більш низький енергетичний рівень. Випромінювальна рекомбінація носіїв заряду може відбуватися мимоволі (спонтанно) або вимушено (індуковано). Спонтанне випромінювання є *некогерентним*. Таке некогерентне випромінювання є хаотичним, багаточастотним, не має строгої спрямованості і характеризується лише інтенсивністю.

Випущене випромінювання є *когерентним*. Хвилі називаються когерентними, якщо різниця їх фаз залишається сталою за часом. Когерентними можуть бути лише коливання, які мають однакову частоту. Для цього коливання всіх випромінювальних атомів мають бути узгоджені в часі

2 Джерела оптичного випромінювання. Лазери.

Напівпровідникові оптичні випромінювачі можна розділити на дві групи:

- *Випромінювачі, основані на принципі спонтанної інжекційної електролюмінесценції;*
- *Оптичні генератори когерентного випромінювання (лазери).*

Властивість напівпровідників створювати електромагнітне нетеплове випромінювання, тривалість якого значно перевищує період світлових коливань, називається люмінесценцією. На відміну від світіння розжарених тіл для люмінесценції не потрібне нагрівання. Крім того, люмінесценція продовжується ще деякий час після вимкнення збуджувальної енергії. Якщо цей час більший ніж 10^{-3} явище називають фосфоресценцією, а якщо менший – флюоресценцією. Люмінесценція має два основні етапи. На першому етапі під дією збуджувальної енергії відбувається генерація носіїв заряду, на другому – генеровані носії заряду рекомбінують. Енергія, яка виділяється, перетворює або в оптичне випромінювання, або в теплоту.

Залежно від видів збуджувальної енергії, що зумовлює збудження атомів, розрізняють:

- електролюмінесценцію (електричним полем);
- катодолімінесценцію (бомбардування напівпровідника електронами);
- фотолімінесценцію (освітлюванням) тощо.

Інжекційна люмінесценція – це генерація оптичного випромінювання в р-п переході. Вона об'єднує два процеси: інжекцію носіїв і власну електролюмінесценцію. За допомогою інжекції забезпечується створення нерівноважних носіїв заряду, для чого р-п перехід зміщується джерелом напруги у прямому напрямі. У такому режимі електрони з n- області напівпровідника інжектують у р – область, де вони є не основними носіями заряду, а дірки – в

зустрічному напрямі. Далі відбувається рекомбінація зайвих неосновних носіїв заряду з електричними зарядами протилежного знаку. Випромінювальною є область лише з одного боку р-п переходу, для чого n-область легують сильніше, ніж акцепторну р-область. Таким чином, у несиметричній структурі інжекція є односторонньою – з n-емітера в р-базу – і випромінює базова область. Принцип інжекційної люмінесценції використовується у світлодіодах. На рис. 2. а. приведено будову та схему вмикання лазерного світлодіода.

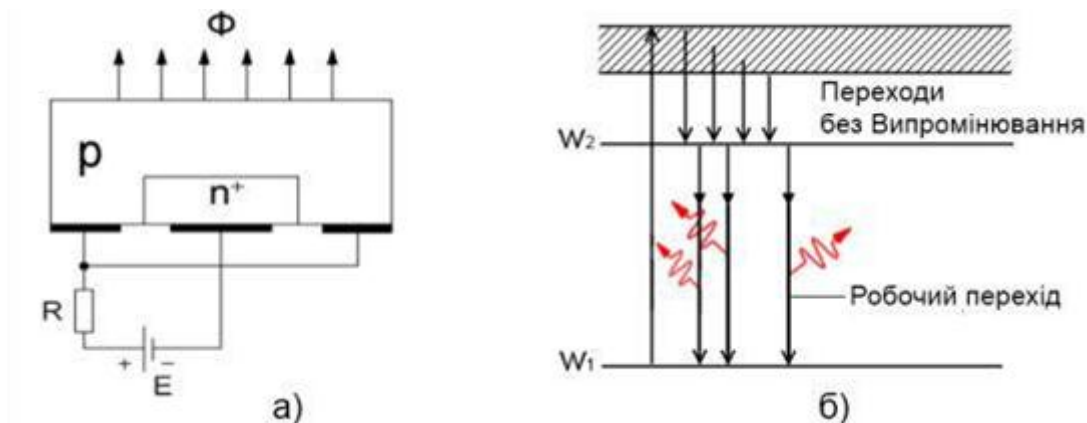


Рисунок 2

а – будова та схема вмикання лазерного світлодіода; б – схема енергетичних переходів в лазерному світлодіоді

В лазерному світлодіоді за рахунок відкритого р-п переходу (під дією E) частина електронів із нижніх енергетичних рівнів W_1 переходить на більш високі рівні, а потім знаходиться на деякому рівні збудження (метастабільному рівні) (рис.2, б) Повернення цих електронів із рівня W_2 на рівень W_1 характеризується електромагнітним випромінюванням, довжина хвилі якого визначається за виразом:

$$\lambda = \frac{1,23}{W_2 - W_1}$$

де λ - довжина хвилі, мкм;

W_1, W_2 , - рівні енергії, eВ.

Оптичне випромінювання люмінесцентного напівпровідника являє собою накладання (суперпозицію) електромагнітних хвиль, що випромінюються великою кількістю збуджених атомів.

Так як в групі атомів внаслідок їх взаємного впливу енергетичні рівні постійно змінюються, то частоти електромагнітних хвиль їх випромінювання будуть різними.

Випадковість і незалежність процесів випромінювання в цьому випадку включає визначеної фазової залежності між випромінюваннями атомів, в різних моменти часу. Таким чином, оптичне випромінювання світлодіодного лазера є некогерентним.

Напівпровідникові лазери.

Напівпровідниковий лазер – це випромінювальний напівпровідниковий прилад (генератор випромінювання), який перетворює електричну енергію або енергію некогерентного випромінювання назвали **лазерами** (laser – light wave amplification by stimulated emission of radiation, підсилення світлових хвиль за допомогою стимульованого випромінювання). Це пристрій для генерування або підсилення монохроматичного світла, створення вузького пучка світла, здатного поширюватися на великі відстані без розсіювання і створювати винятково велику густину потужності випромінювання при фокусуванні (10^8 Вт/см² для високоенергетичних лазерів).

Фізичною основою роботи лазера служить квантовомеханічне явище вимушеного (індукованого) випромінювання.

Випромінювання лазера може бути безперервним, з постійною потужністю, або імпульсним, що досягає гранично великих пікових потужностей.

Процес виникнення вимушеного випромінювання дуже спрощено полягає в наступному. Представимо собі, що атом вже збуджений і знаходиться на рівні енергії більший за (рис.3 а). Якщо на такий атом подає квант зовнішньої електромагнітної хвилі, то атом переходить в не збуджений стан, і при цьому виникає вимушене випромінювання

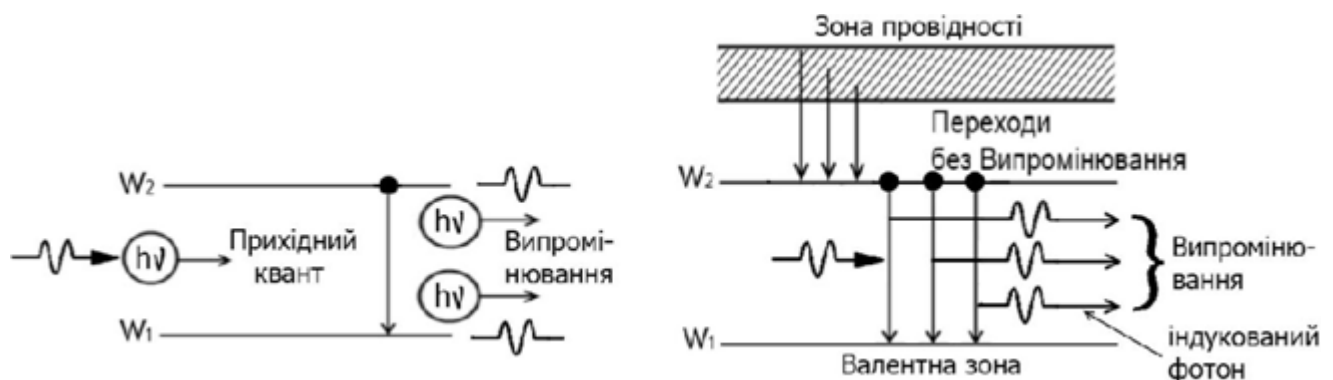


Рисунок 3 - Виникнення вимушеного випромінювання:

а – для одного атома; б – для групи атомів

Обидві хвилі, зовнішня та індукована, поширюється в одному напрямі. Нагадаємо, що при накладанні в прості двох когерентних хвиль у різних його точках створюється підсилення між фазами цих хвиль (інтерференція хвиль). Таким чином отримуємо подвійне підсилення енергії випромінювання за рахунок збудженого атома. Подібне явище можна спостерігати і в групі атомів, наприклад в кристалі (рис. 3б) Під час вимушеної рекомбінації формується когерентне випромінювання, що є принциповою відмінністю напівпровідникових лазерів від світлодіодів. Створивши умови для вимушеної рекомбінації, можна керувати випромінюванням збуджених атомів напівпровідника за допомогою електромагнітних хвиль і таким чином підсилювати та генерувати когерентне випромінювання. Для роботи лазера необхідне переважання вимушеної випромінювальної рекомбінації над поглинанням квантів світла. Переважання випромінювання над поглинанням залежить від співвідношення в кристалі напівпровідника збуджених і не збуджених атомів, тобто від населеності енергетичних рівнів були більш заповнені електронами, ніж нижні. Такий стан напівпровідника називають станом з інверсною населеністю. Для створення інверсної населеності необхідна додаткова енергія – енергія накачування, яка надходить від зовнішнього джерела. Існують різні способи накачування лазерів (оптичне накачування, електричне накачування, електронне та ін.) Поширеними є спосіб створення інверсної населеності інжекційним накачуванням : за допомогою інжекції носіїв заряду під час прямого вимикання р-п- переходу (інжекційні лазери). Для створення когерентного випромінювання необхідно створити в напівпровіднику стан інверсної населеності. Середовище, в якому підтримується такий стан, називають активним середовищем або лазерним активним середовищем. Інжекційних лазерах для створення такого середовища р-п- перехід вмикають в прямому напрямі. Необхідно також створити умови для внутрішнього підсилення випромінювання, коли створення фотонів за рахунок вимушеного випромінювання переважає втрати випромінювання на поглинання то розсіювання. Таке підсилення оптичного випромінювання, яке ґрунтується на використанні вимушеної рекомбінації, називають лазерним підсиленням. Для реалізації лазерного підсилювача треба забезпечити проходження кожного кванта світла в площині р-п- переходу декілька разів. Для цього в лазерах формують оптичні резонатори. Найпростіший резонатор складається з двох дзеркал, які забезпечують багаторазове проходження з двох дзеркал, які забезпечують багаторазове проходження хвилі випромінювання через активне середовище. Для виведення випромінювання дзеркало роблять прозорим. За допомогою такої системи створюється позитивний зворотний зв'язок з такими параметрами, щоби енергія випромінювання , яка передається з виходу лазерного підсилювача на його вхід, була б достатньою для компенсації втрат та виникнення лавиноподібного процесу лазерного випромінювання. Так лазерний підсилювач перетворюється в лазер-генератор. Широкого розповсюдження набули інжекційні лазери з арсенід галію. Типовий лазер

виготовляють у формі паралелепіпеда. На рис. 4 приведена конструкція типового напівпровідникового інжекційного лазера.

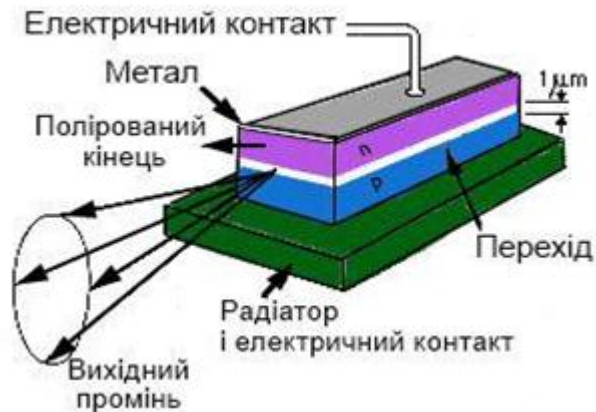


Рисунок 4

Лазери використовуються: для зв'язку (лазерний промінь може переносити набагато більше інформації, ніж радіохвилі), різання, пропалювання отворів, зварювання, спостереження за супутниками, медичних і біологічних досліджень і в хірургії, як лазерна зброя (зокрема у ППО).

У деяких схемах робочий елемент лазера використовується як оптичний підсилювач для випромінювання від іншого джерела.

Змістовий модуль 8. Інтегральні мікросхеми

Лекція 13

Тема: Загальні відомості про напівпровідникові інтегральні мікросхеми. Планарно-дифузійна і планарно-епітаксійна технологія.

План

- 1 Загальні відомості про ІМС
- 2 Напівпровідникові інтегральні мікросхеми
- 3 Основні технологічні операції при виготовленні планарно-дифузійних ІМС

Теоретичні відомості:

1 Загальні відомості про ІМС

Мікроелектроніка - це напрямок електроніки, що дозволяє за допомогою комплексу технологічних, конструктивних і схемотехнічних засобів створювати малогабаритні, високонадійні і економічні електронні пристрої.

Мікроелектроніка заснована на застосуванні інтегральних мікросхем (ІМС), в яких елементи неподільно пов'язані між собою і представляють єдине ціле. ІМС виготовляють на основі кристала напівпровідника, в якості якого найчастіше використовують кремній. У кристалі кремнію створюються р-п-переходи, що утворюють як активні, так і пасивні елементи електричної схеми. Елементи мікросхеми зв'язуються між собою електрично за допомогою тонких металевих перемичок. Такий кристал називають чіп (англ. Chip - кристал).

В основу технології виготовлення виробів мікроелектроніки покладений інтегрально-груповий принцип, що передбачає одночасне формування великого числа елементів в неподіленому стані на загальній пластині (підкладці). При цьому кожний елемент утворюється як інтегральний результат оброблення окремих ділянок початкового матеріалу і додання їм властивостей відповідно до функціонального призначення елементу.

Головне завдання технології мікроелектроніки – створення ІМС з мінімальними розмірами структурних елементів, високим ступенем їх інтеграції, стабільністю властивостей і характеристик і високою надійністю.

Інтегральною мікросхемою (ІМС) називається мікроелектронний пристрій, що складається з електрично зв'язаних між собою компонентів, виготовлених у єдиному технологічному циклі, розташованих на одній підкладці і поміщених у загальний корпус.

На відміну від електронних пристроїв, складених методом монтажу окремих (дискретних) елементів, ІМС є закінченими функціональними виробами, які виконують функції підсилювачів, генераторів, регістрів, лічильників імпульсів тощо.

ІМС дають змогу створювати складні електронні пристрої, для яких потрібна велика кількість елементів. При цьому пристрої на основі ІМС мають високі якісні показники роботи і надійність, що не можуть забезпечити схеми на дискретних елементах.

Складність ІМС характеризується ступенем інтеграції, яка відображує щільність пакування її елементів.

Характеристикою складності ІМС є рівень інтеграції, оцінюваний числом транзисторів, які можуть бути реалізовані на кристалі.

Залежно від рівня інтеграції ІМС ділять на кілька категорій:

- малі ІМС - до 10 елементів (MIC);
- середні ІМС - від 10 до 100 елементів (CIC);
- великі ІМС - від 100 до 105 елементів (BIC);
- надвеликі ІМС - 105 і більше елементів (HBIC).

В якості елементів в мікросхемах найчастіше виступають транзистори, що особливо стосується цифрових мікросхем. Сучасні НВІС містять кілька сотень мільйонів транзисторів, причому ступінь інтеграції постійно підвищується. Необхідно відзначити, що чіткої межі між ВІС і НВІС не існує, і часто їх об'єднують в один клас ВІС / НВІС. На сьогоднішній день практичне використання знаходять всі категорії ІМС.

Крім ступеня інтеграції ІМС можуть класифікуватися залежно від їх функціонального призначення на два великі класи: цифрові й аналогові.

За видом сигналів, які обробляються мікросхемою, ІМС бувають аналоговими та цифровими.

Аналогові обробляють сигнали, які мають характер безперервної функції. Аналогові ІМС виконують різноманітні функції: посилення сигналів змінного і постійного струмів, генерування коливань різної форми, забезпечення інших ІМС стабілізованою напругою живлення, цифроаналогове і аналого-цифрове перетворення сигналів, фільтрацію сигналів, їх модуляцію і демодуляцію і т.п.

Цифрові ІМС обробляють сигнали, які мають двійковий характер, тобто оперують з вхідними напругами, дискретно міняють своє значення, яке відповідає або "1", або "0". Аналогові ІМС використовуються для перетворення безперервно змінюються у часі сигналів.

Цифрові ІМС в залежності від ступеня інтеграції можуть виконувати найпростіші логічні перетворення (МІС), утворювати цілі вузли цифрових пристроїв, таких як малоразрядні регістри, лічильники, дешифратори, суматори і т.п. (СІС).

Цифрові ВІС / НВІС здатні виконувати функції вже не окремого вузла, а цілої системи. До них відносяться всі мікропроцесорні ІМС, мікросхеми пам'яті, ІМС програмованої логіки, ІМС, що реалізують стратегію «Система в кристалі».

За технологією виготовлення розрізняють *напівпровідникові монолітні (НІМС)* та *гібридні (ГІМС)* мікросхеми.

2 Напівпровідникові інтегральні мікросхеми

Напівпровідниковими монолітними називають ІМС, всі елементи яких і з'єднання між ними формуються в об'ємі кремнієвого кристалу (підкладці).

Виготовлення напівпровідникових ІМС здійснюють, використовуючи два основних технологічних процеси: *дифузію домішок*, що створюють в напівпровіднику область з типом провідності, протилежним вихідного, і *епітаксіальне нарощування шару кремнію* на кремнієву підкладку, що має протилежний тип провідності.

Всі елементи схеми формуються в так званих *острівцях*, утворених у кристалі і ізольованих між собою. Металеві смужки, необхідні для з'єднання елементів в електричну

схему, напильюють на поверхню пластини-кристала. Для цього електроди всіх елементів виводяться на поверхню пластини і розміщуються в одній площині, в одному **плані**.

Тому технологія виготовлення схем за допомогою дифузії називається **планарно-дифузійної**, а за допомогою епітаксійного нарощування - **епітаксійних-планарної**.

Вихідним матеріалом для виготовлення ІМС по планарно-дифузійній технології є слабо легована пластинка кремнію **p**-типу, на яку методом фотолітографії наносять захисний шар SiO₂ (рис. 1.). Через вікна в захисному шарі проводиться дифузія домішки **n**-типу, в результаті чого утворюються острівці, межі яких впираються знизу в захисний шар, що різко знижує можливість протікання струмів витоку по поверхні. Між острівцями і підкладкою утворюється **p-n**-перехід, до якого підключають напругу таким чином, щоб цей перехід був замкнений (тобто мінусом на **p**-підкладка). У результаті острівці стають ізольованими один від одного.

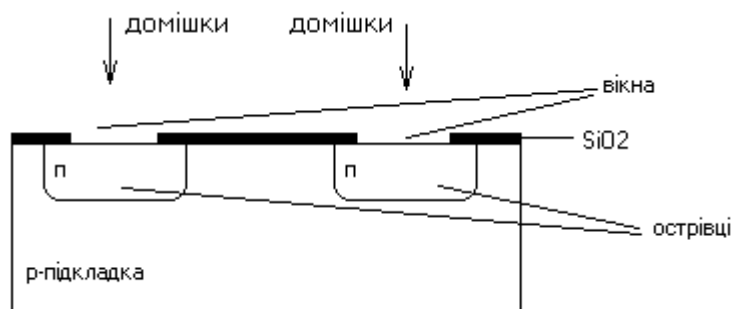


Рисунок 1 - Утворення острівців в планарно-дифузійних ІМС.

Основні технологічні операції при виготовленні планарно-дифузійних ІМС

Основою виготовлення ІМС є так звана планарна технологія, суть якої полягає в формуванні елементів мікросхеми обробкою однієї площини підкладки.

Існує два різновиди планарної технології: *планарно-дифузійна* і *планарно-епітаксійна*.

Основні технологічні операції при планарно-дифузійній технології:

- заготівельні операції (отримання кремнієвих заготовок у вигляді пластинок);
- дифузія (введення в кристал або окремі його ділянки донорної чи акцепторної домішки для створення електронної або діркової провідності);
- окислення (створення на поверхні підкладки захисного шару двооксиду кремнію);
- фотолітографія (комплекс технологічних операцій для видалення захисного шару двооксиду кремнію з тих ділянок підкладки, на яких буде відбуватися дифузія, тобто

виготовлення так званих “вікон” для утворення методом дифузії “острівців”, в яких будуть розміщені елементи мікросхеми);

- металізація (утворення на поверхні підкладки тонких металевих плівок для міжелементних з’єднань і контактних площинок).

Таким чином, головна особливість планарно-дифузійних ІМС – формування елементів у дифузійних острівцях підкладки.

Планарно-епітаксійні ІМС

Недоліком планарно-дифузійних ІМС є нерівномірність концентрації домішок по глибині острівців, що знижує якісні показники елементів і в цілому мікросхеми.

Більш високу якість мають планарно-епітаксійні ІМС, в яких острівці формуються не в підкладці, а в так званому *епітаксійному шарі*.

Епітаксійний шар нарощується на підкладці і являє собою шар кремнію, який має таку ж структуру, як і підкладка, але протилежний тип провідності.

Вихідним матеріалом при епітаксійних-планарної технології служить пластина кремнію n-типу з шаром SiO_2 , в якій витравлюють поздовжні і поперечні канавки. Отриману фігурну поверхню (у вигляді шахівниці) знову окислюють, створюючи ізоляційний шар діоксиду кремнію. На цей шар епітаксійних нарощують шар кремнію власної провідності, а верхній шар кремнію n-типу сошліфовують. Формування самих острівців здійснюється такими ж технологічними засобами, як і при планарно-дифузійній технології. Таким чином, острівці планарно-епітаксійних ІМС мають рівномірну концентрацію домішок по їх глибині.

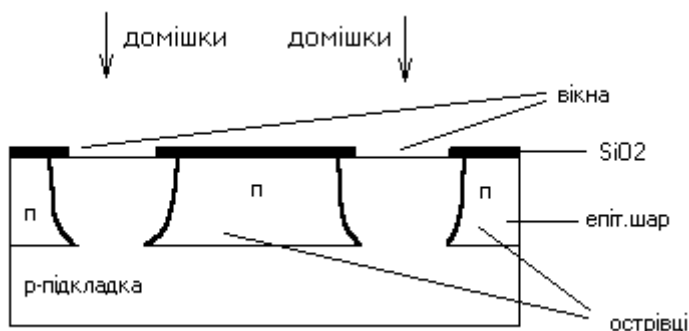


Рисунок 2 - Утворення острівців в планарно-епітаксійних ІМС.

Отримані таким чином острівці **надійно ізольовані один від одного фігурним шаром діелектрика і ємність між ними істотно менше, ніж у попередньому випадку.** Однак така технологія ІМС складніше і вартість їх виготовлення вище.

В отриманих тим чи іншим способом острівцях формують як активні, так і пасивні елементи методом дифузійної технології або епітаксіальним нарощуванням.

Характеристика основних елементів НІМС

Найбільш складними є *біполярні транзистори*, для яких в острівці утворюють два р-п-переходи. Колектор формується епітаксійним способом, база і емітер – послідовно дифузією домішок в колекторний острівець. Для збільшення провідності колектора в ньому може бути передбачений так званий “прихований шар” з підвищеною концентрацією носіїв. У цифрових ІМС використовуються також багатоемітерні транзистори.

Польові транзистори в НІМС найчастіше виготовляються МОН – типу. Вони можуть формуватися одночасно з біполярними транзисторами n-p-n – структури.

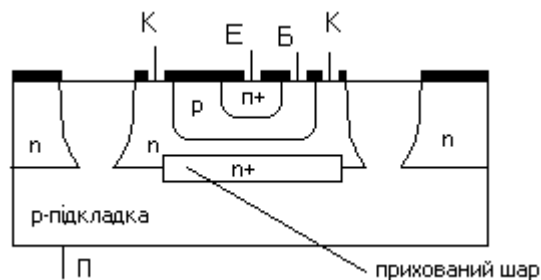


Рисунок 3 - Біполярний транзистор в структурі НІМС.

Для виготовлення *діодів* можуть бути використані поодинокі р-п-переходи, сформовані в острівцях. Однак, виходячи з конструктивно-технологічних умов, доцільно як діоди використовувати р-п-переходи біполярних транзисторів, які для цього вмикаються за діодними схемами.

В НІМС як *резистори* використовують тонкий шар напівпровідника емітерної або базової області транзисторної структури, опір якого залежить від концентрації домішки (так званий “дифузійний резистор”). Високоомні резистори виготовляють на основі біполярної структури або МОН-транзистора.

За зазначеними вище принципами планарної технології одночасно з формуванням транзисторів і резисторів виготовляють і *конденсатори*, використовуючи для цього ємності р-п-переходів транзисторів.

Міжелементні з'єднання і контактні площинки виготовляють після завершення формування елементів в острівцях. Для цього використовують напилені на поверхню тонкі плівки алюмінію, хрому, танталу, золота. Контактні площинки приєднують до зовнішніх виводів золотими провідниками ультразвуковим або термокомпресійним зварюванням.

Ізоляція елементів здійснюється зворотним вмиканням р-п-переходів між острівцями і підкладкою або діелектричним способом з використанням двооксиду кремнію.

Лекція 14

Тема: Загальні відомості про ГІМС. Тонкоплівкові та товстоплівкові ГІМС

Теоретичні відомості:

Характеристика основних елементів плівкових ГІМС

Гібридними називаються інтегральні мікросхеми, в конструкції яких поєднані плівкові пасивні елементи та навісні активні компоненти.

Розрізняють тонкоплівкові (з товщиною плівок 1 мкм) і товстоплівкові (до 70 мкм) ГІМС.

Основою ГІМС є підкладка з ізоляційного матеріалу (скло, кераміка, а найчастіше – склокристалічний матеріал – ситал). Підкладка повинна мати високу теплопровідність, електричну та механічну міцність, хімічну стійкість до матеріалів, які напиляються та сприяти їх адгезії.

Резистори виготовляють методами вакуумного напилення або катодного розпилення з використанням як чистих металів (хром, тантал), так їх сплавів (ніхром), а також мікрокомпозицій, до складу яких крім металів входять діелектрики або напівпровідники.

Конденсатори виготовляють тришарової або гребінчастої конструкції з використанням для обкладок алюмінію і танталу, а для діелектрика – їх оксидів.

Міжелементні з'єднання і контактні площинки виготовляють у вигляді плівок золота, срібла, міді, алюмінію.

Дискретними навісними компонентами ГІМС найчастіше є корпусні або безкорпусні діоди і транзистори, мікрозбірки, невеликі НІМС.

Конструктивні елементи гібридних інтегральних мікросхем, маркування гібридних мікросхем

Гібридні ІМС складаються з таких конструктивних вузлів:

1) ізоляційна основа із склопластику або керамічна, на поверхню якої у вигляді плівок нанесені резистори, конденсатори невеликої ємності, котушки невеликої індуктивності, електричні з'єднання;

2) дискретні безкорпусні НІП прилади;

3) дискретні конденсатори великої ємності, трансформатори, дроселі;

4) ізоляційний корпус, що забезпечує герметизацію усіх елементів ІМС і має вивідні контакти.

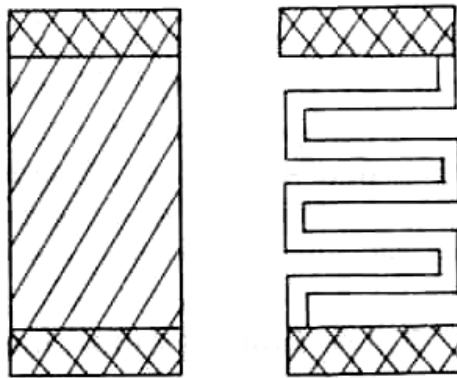


Рис. 1 – Конструкція плівкових резисторів з малим (а) і великим (б) опором

На рис. 1 показано конструкцію плівкових резисторів з малим і великим опором. Тонку плівку з чистого хрому, ніхрому або танталу наносять безпосередньо на ізоляційну основу. У такий спосіб одержують резистори з опором від 0,001 до десятків кілоом. Щоб одержати більш високоомні резистори (до десятків мегаом), використовують металодіелектричні суміші (наприклад, хром та монооксид кремнію).

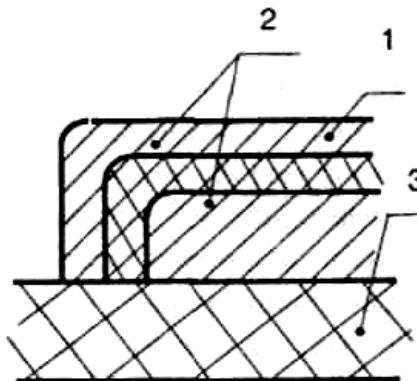


Рис. 2. - Конструкція плівкового конденсатора

На рис. 2 зображена конструкція плівкового конденсатора. Нижня та верхня обкладки конденсатора 2 є тонкими плівками із міді, срібла або золота. Діелектриком 1 є плівка із силікату алюмінію, двооксиду титану або кремнію. Розміщені вони на діелектричній основі 3.

Ємність таких конденсаторів може бути від десятих часток мікрофарад до десятків тисяч мікрофарад.

Провідники виконують у вигляді тонкої (1 мкм) плівки із золота чи міді з підшарком нікелю або хрому.

Дискретні елементи із гнучкими виводами (золотий дріт діаметром 30 – 50 мкм) приєднуються до плівкової мікросхеми пайкою або зваркою.

Електронні пристрої на гібридних ІМС можуть мати щільність монтажу до 60 – 100

елементів на 1 см^3 . За такої щільності об'єм пристрою, що має 10^7 елементів, може складати $0,1\text{--}0,5 \text{ м}^3$, а середній час безвідмовної роботи - $10^3\text{--}10^4$ годин і більше.

На відміну від гібридних ІМС, *напівпровідникові* виконуються на основі кристалу НП, де окремі його області виконують ролі транзисторів, діодів, конденсаторів, резисторів і т. ін., які з'єднуються за допомогою алюмінієвих плівок, що наносяться на поверхню кристалу.

Електронні пристрої на напівпровідникових ІМС можуть мати щільність монтажу до 500 елементів у 1 см^3 і цей параметр з року в рік зростає.

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Колонтаєвський Ю.П., Сосков А.Г. Промислова електроніка та мікросхемотехніка: теорія і практикум. За ред А.Г.Соскова.- К.: Каравела, 2003.-368с. (в подальшому в тексті- [Л.1])
2. Руденко В.С. та ін. Промислова електроніка: Підручник/ В.С.Руденко, В.Я.Ромашко, В.В.Трифонюк.-К.: Либідь, 1993.-432с. [Л.2]
3. Бодилевский В.Г. Полупроводниковые и электровакуумные приборы в устройствах автоматики, телемеханики и связи: Учебник для техникумов ж.-д. трансп.- 5-е изд.,- М.: Транспорт, 1986.- 440с. [Л.3]

4 <https://stud.com.ua/28255/>