

**МІНІСТЕРСТВО ВНУТРІШНІХ СПРАВ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ВНУТРІШНІХ СПРАВ
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ ЛЬОТНИЙ КОЛЕДЖ**

Циклова комісія авіаційного і радіоелектронного обладнання

ТЕКСТ ЛЕКЦІЇ

з навчальної дисципліни
«Промислова електроніка та мікросхемотехніка»
обов'язкових компонент
освітньо-професійної програми першого(бакалаврського) рівня вищої освіти

Електромеханіка

за темою - Напівпровідникові прилади

Харків 2022

ЗАТВЕРДЖЕНО

Науково-методичною радою
Харківського національного
університету внутрішніх справ
Протокол від 30.01.2023 № 1

СХВАЛЕНО

Методичною радою Кременчуцького
льотного коледжу
Протокол від 19.12.2022 № 5

ПОГОДЖЕНО

Секцією Науково-методичної ради
ХНУВС з технічних дисциплін
Протокол від 27.01.2023 № 1

Розглянуто на засіданні циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання, протокол від 10.12.2022 № 8.

Розробник: к.т.н., спеціаліст вищої категорії, викладач-методист циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання Волканін Є.Є.

Рецензенти:

1. Інженер з технічного обслуговування, ремонту та діагностики авіаційної техніки ТОВ «ЕЙР ТАУРУС» Калінін О.В.
2. Професор циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання, к.т.н., спеціаліст вищої категорії Гаврилюк Ю.М.

План лекції:

1. Напівпровідникові діоди.
2. Транзистори.
3. Тиристори.
4. Комбіновані транзистори.

Рекомендована література:**Основна література:**

1. Промислова електроніка: навч. посібник / укл.: Г.О. Андрущак, І.П. Козярьський, Е.В. Майструк. – Чернівці: Чернівець. нац. ун-т ім. Ю. Федьковича, 2021. 120 с.
2. Победаш К.К., Трубіцин К.В. Промислова електроніка: Навчальний посібник К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. - 228с.
3. Power electronics handbook / Muhammad H. Rashid Ph.D., Fellow IEEE / Professor and Director. University of West Florida Joint Program and Computer Engineering / Printed in Canada, 2010. – 892 pages.

Допоміжна література:

1. Промислова електроніка. Лабораторні роботи: навчальний посібник для студентів, які навчаються за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», спеціалізацій «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод», «Електричні машини і апарати», «Інжиніринг та автоматизація електротехнічних комплексів» й «Мехатроніка енергоємних виробництв» / К.К. Победаш, О.В. Петрученко, В.А. Святненко, К.В. Трубіцин – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 88 с.
2. Колонтаєвський Ю.П., Сосков А.Г. Промислова електроніка та мікросхемотехніка: теорія і практика: навч. посібник / За ред. А.Г. Соскова. 2-е вид.- К.: Каравела, 2004. – 432 с.
3. ПРОМИСЛОВА ЕЛЕКТРОНІКА. Розділ «Напівпровідникові прилади». Лабораторний практикум / Укладачі: Лупенко А.М., Мовчан Л.Т. Тернопіль, 2014. – 34 с.

Інформаційні ресурси в Інтернеті

1. https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/48007/1/PE_KL.pdf
2. <https://www.etcourse.com/news-blog/what-industrial-electronics-and-what-does-it-look-2022>
3. https://www.mdpi.com/journal/electronics/sections/Industrial_Electronics
4. <https://ieeexplore.ieee.org/xpl/RecentIssue.jsp?punumber=41>
5. <https://www.ieee-ies.org>

Текст лекції

1. Напівпровідникові діоди.

Різновиди діодів.

Напівпровідниковий діод – це напівпровідниковий прилад з одним електричним р–п-переходом. За допомогою двох кон-тактних з'єднань забезпечується контакт металу з напів-провідником, до яких приєднуються два виводи. Електричний перехід найчастіше утворюється між двома напівпровідниками з різним типом домішкової електропровідності (р- або п-типу), одна з областей (низькоомна) є емітером, інша (високоомна) – база. Структура діода, його конструкції умовне позначення у схемах подані на рис.

Класифікують діоди за різними ознаками:

- 1) за основним напівпровідниковим матеріалом – крем-нієві, германієві, з арсеніду галію; в силовій електроніці пере-важно використовують кремнієві через більш високу допустиму температуру кристала;
- 2) за фізичною природою процесів роботи напівпро-відників – тунельні, лавинні, фотодіоди, світлодіоди та ін.;
- 3) за технологією виготовлення р–п-переходу – сплавні, дифузійні та ін.

Основною, з практичного погляду зору, є класифікація за призначенням діода. Відповідно з нею розрізняють випрямні, лавинні, імпульсні діоди, стабілітрони, варикапи та ін.

Застосування діодів досить різноманітне. Низькочастотні діоди малої та середньої потужності використовують у схемах живлення радіоапаратури, а високочастотні діоди з високою робочою напругою та струмом силові діоди використовують у потужних джерелах живлення як випрямлячі і частотні пере-творювачі: в електротехнологічних установках (зварювальних, плазмових та ін), у системах автоматичного керування виробництвом (для тягових електродвигунів, приводів верстатів та ін.). Високочастотні діоди застосовують також у системах радіозв'язку, радіолокації, телевимірювальної техніки, а над-високочастотні (НВЧ-діоди) - для модуляції і детектування коливань у діапазоні сотень мегагерц.

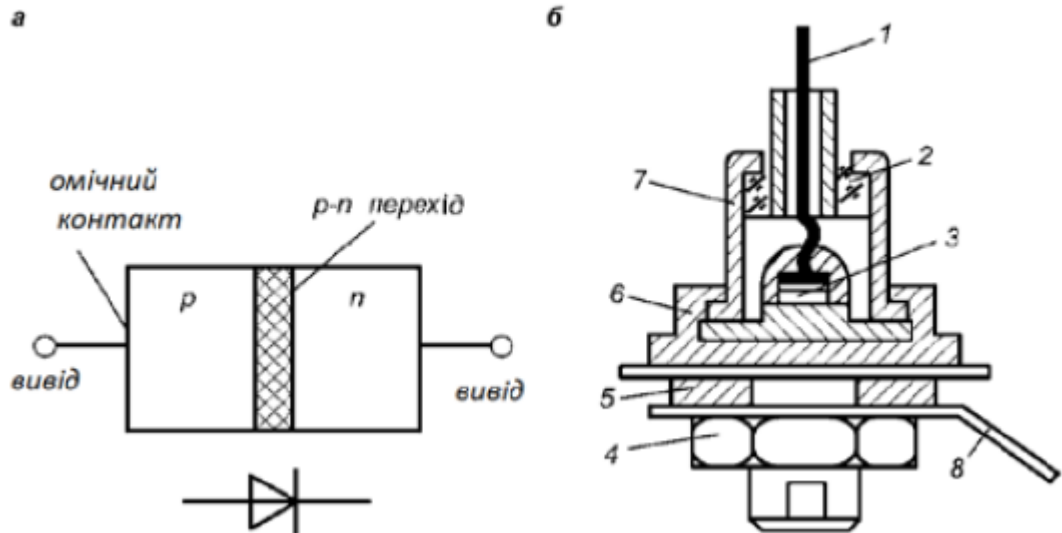


Рис. Напівпровідниковий діод

а – структура і позначення; б – конструкція діода: 1 – вивід; 2 – скляна втулка; 3 – напівпровідник; 4 – гайка для кріплення; 5 – шайба;

6 – основа для охолодження; 7 – корпус; 8 – вивід для паяння.

Коефіцієнтом випрямлення називають відношення прямо-го і зворотного струмів при однаковій напрузі. Чим менше ємність р–п-переходу, тим більше коефіцієнт випрямлення діода. Оскільки ємність р–п-переходу залежить від прикладеної у зворотному напрямку напруги, це дає можливість використо-вувати в схемотехніці такі діоди – варикапи як змінної ємності.

Випростовуючі діоди. Такі діоди застосовують як вентиля, які пропускають змінний струм тільки в одному на-прямку. Вентильні властивості діода залежать від того, на-скільки малий зворотний струм. Для зменшення зворотного струму необхідно знижувати концентрацію неосновних носіїв, що може бути забезпечено за рахунок високого ступеня очищен-ня вихідного напівпровідника. Вольт-амперні характеристики р–п-переходу дещо відрізняються від характеристик реальних діодів. Їх вигляд залежить від роду основного напівпровід-никового матеріалу, площі р–п-переходу і температури. Прямі гілки вольт-амперних характеристик діодів, виконаних на основі германію і кремнію, зображені на рис. а. Особливо сильно вплив температури спостерігається на зворотній гілці ха-рактеристики (рис. б), оскільки зі збільшенням темпера-тури зростає тепловий струм.

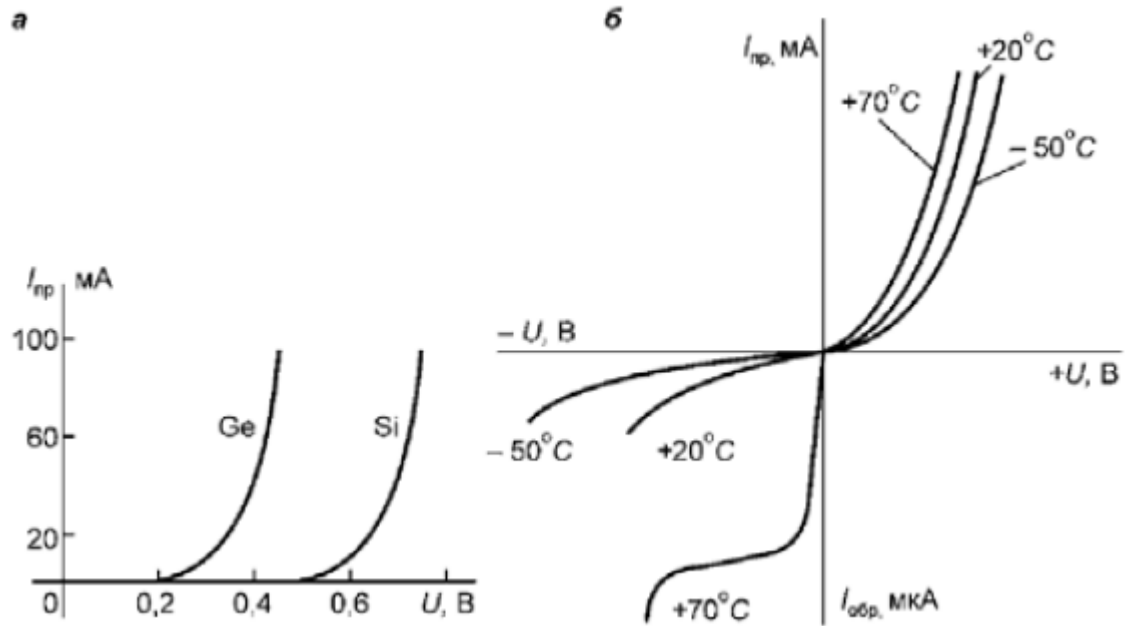


Рис. – Вольт-амперні характеристики діодів
 а – прямі гілки вольт-амперної характеристики;
 б – температурні залежності

У германієвих діодах збільшення температури на десять градусів викликає збільшення зворотного струму в два рази, в кремнієвих діодах – у два з половиною рази. З ростом зворотного струму збільшується нагрівання р–п-переходу, що може привести до теплового пробою. Верхня межа робочих температур для германієвих діодів становить 85...100 °С, для кремнієвих – 200 °С у пристроях автоматики та обчислювальної техніки.

Імпульсні діоди. Діоди, призначені для роботи в імпульсних режимах, називають імпульсними. Такі діоди вико-ристовують, наприклад, в обчислювальних пристроях (у ключах, логічних схемах та ін.). В імпульсних режимах через проміжки часу, що дорівнює одиницям або часткам мікросекунди, діоди перемикаються з прямої напруги на зворотну напругу. При цьому кожен новий стан діода не може встановлю-ватися миттєво, тому істотне значення тут набувають так звані перехідні процеси.

Основними параметрами імпульсних діодів є час віднов-лення і бар'єрна Сб, а також зворотний струм при певній зво-ротній напрузі, постійна пряма напруга при постійному пря-мому струмі, максимально допустимий імпульсний прямий струм, максимально допустима зворотна напруга та ін.

Тунельні та зворотні діоди. Тунельним діодом називають напівпровідниковий прилад, сконструйований на основі вирод-женого напівпровідника (тобто напівпровідника з великим вмістом домішки), в якому при зворотній і невеликій прямій напрузі виникає тунельний ефект і вольт-амперна характе-ристика має ділянку з негативним диференціальним опором. При-стрій тунельних діодів майже не відрізняється від пристрою інших діодів, але для їх виготовлення застосовують напів-провідникові

матеріали з великим вмістом домішок. Унаслідок цього питомий опір областей р–п-типів дуже малий, а ширина р–п-переходу становить приблизно 0,02 мкм, що в сто разів менше, ніж в інших напівпровідникових діодів. Напруженість електричного поля в таких р–п-переходах досягає величезного значення – до 108 В/м.

Тунельні діоди володіють підсилювальними властивостями і можуть працювати у схемах (на ділянці а-б-в) як активні елементи. Вони знаходять широке застосування в надшвидко-діючих ЕОМ як швидкодіючі імпульсні перемикаючі пристрої (швидкість перемикання складає частки наносекунд) і в генераторах високочастотних коливань. На тунельних діодах складаються схеми мультивібраторів, тригерів, які служать основою для побудови логічних схем, запам'ятовуючих пристроїв, регістрів і т. д. Тунельні діоди можуть працювати в широкому діапазоні температур від 4 до 640К, вони прості за конструкцією, компактні. Тунельні діоди виготовляють на основі сильнолегованого германію або арсеніду галію, р–п-перехід отримують методом вплавлення домішок.

Обернений (зворотний) діод – діод на основі напівпровідника з критичної концентрацією домішок, в якому провідність при зворотній напрузі внаслідок тунельного ефекту значно більше, ніж при прямій напрузі. Принцип дії зворотного діода заснований на використанні тунельного ефекту. Однак в обернених діодах концентрацію домішок роблять менше, ніж у звичайних тунельних діодах. Тому контактна різниця потенціалів у зворотних діодів менша, а товщина р–п-переходу більше. Це призводить до того, що під дією прямої напруги прямий тунельний струм не створюється. Прямий струм в обернених діодах створюється інжекцією неосновних носіїв зарядів через р–п-перехід, тобто прямий струм є дифузійним. При зворотній напрузі через перехід протікає значний тунельний струм, створюваний переміщенням електронів крізь потенційний бар'єр з р-області в п-область. Робочим ділянкою вольт-амперної характеристики оберненого діода є зворотна гілка (рис. 1.16, б).

Таким чином, зворотні діоди володіють випрямляючим ефектом, але пропускний (провідний) напрямок у них відповідає зворотному ввімкненню, а зворотний (непровідний) прямому ввімкненню. Обернені діоди застосовують в імпульсних пристроях, а також як перетворювачі сигналів (змішувачів і детекторів) в радіотехнічних пристроях.

2. Транзистори.

Біполярні транзистори

За конструктивними особливостями і принципом роботи транзистори поділяють на два основних класи: біполярні і польові. Біполярним транзистором називають напівпровідниковий прилад із двома взаємодіючими електричними переходами і трьома (або більше) виводами. Біполярний транзистор є аналогом лампового тріода і може виконувати функції підсилювальні, генераторні і ключові. Підсилювальні властивості

біполярного транзистора зумовлені інжекцією і екстракцією неосновних носіїв заряду.

Основою конструкції біполярного транзистора є пластина монокристала напівпровідника (рис.) з електропровідністю р- або n-типу, по обидва боки якої вплавлені напівпровідники, що володіють іншим типом електропровідності.

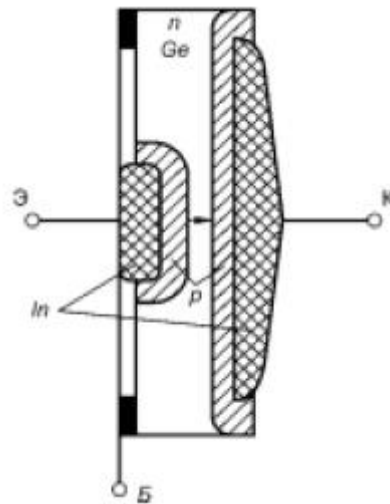


Рис. Схематичне зображення структури транзистора

На межі поділу областей із різним типом електропровідності утворюються р-п- або п-р-переходи. Кожна з областей називається емітером, колектором і базою, забезпечується омичним контактом, від якого виводи, які позначаються Е і К і Б відповідно. Стрілкою позначено напрямок «руху» дірок (рис.). Корпус може бути металевим, пластмасовим або скляним.

Структурні схеми транзисторів подані на рис. Транзистор р-п-р-типу зображений на рис. а. На рис б зображений транзистор з іншим чергуванням областей (п-р-п); на рис. г відповідно до структурної схеми умовні позначення транзистора. Різниця в принципі роботи транзисторів обох структур немає, але полярність підключення виводів до джерела живлення протилежна. Оскільки транзистор має симетричну структуру, конструктивно колектор може бути емітером, проте в реальних конструкціях для забезпечення кращої роботи транзистора область колектора робиться більшою за розмірами. З тих же міркувань активна товщина бази робиться невеликою (менше дифузійної довжини неосновних носіїв). Перехід «емітер-база» називають емітерним, «колектор-база» колекторним. Призначення емітера це – інжекція (впорскування) в область бази неосновних для неї носіїв заряду, для чого область емітера виконують більш насиченою основними носіями (більш низько-омною), ніж область бази. Призначення колектора – це екстракція (втягування) носіїв із бази.

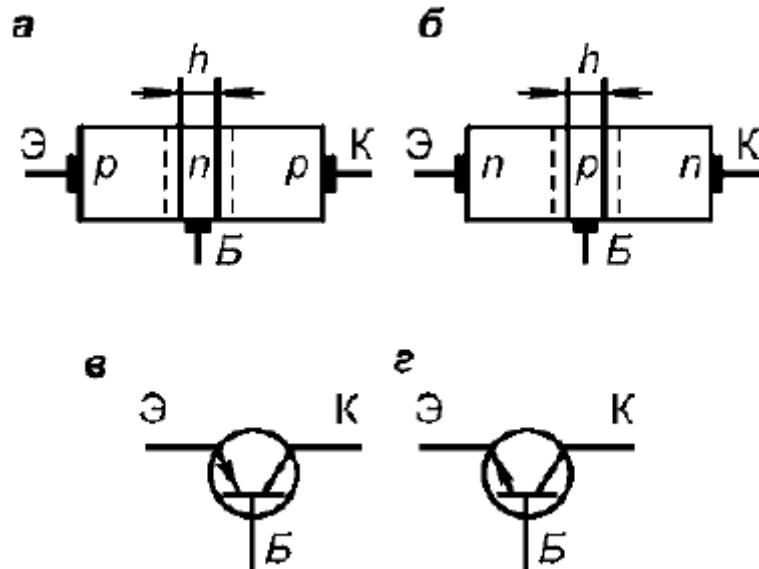


Рис. Транзистори: а – р-п-р – провідності;
б – п-р-п – провідності; в, г – їх позначення (відповідно)

Транзистори класифікують за різними ознаками за потужністю – малою, середньою, великою; за діапазоном робочих частот – низькою, середньою, великою; за методом виготовлення – сплавні, мікросплавні, дифузійні, планарні та ін.

Під'єднання джерел живлення транзисторів. При ввімкненні транзистора до кола один з його виводів роблять загальним для входних і вихідних кіл. Тому схеми під'єднання бувають: із загальною базою (ЗБ) (рис. а); із загальним емітером (ЗЕ) (рис. б); із загальним колектором (ЗК) (рис. в). Най-більше застосування має схема під'єднання з ЗЕ. Схема під'єднання з ЗБ має ряд недоліків і використовується рідше.

Залежно від зміщення, створеного на емітерному і колекторному р-п-переходах, транзистор може працювати в трьох режимах. Якщо один перехід зміщений у прямому напрямку, а інший у зворотному, режим називають активним (рис. а). Якщо в прямому напрямку під'єднання емітерний перехід, а колекторний – у зворотному таке під'єднання називають нормальним (рис.). Якщо зсув на р-п-переходах протилежний, під'єднання називають інверсним (рис. в). В останньому випадку колектор виконує роль емітера, а емітер – роль колектора.

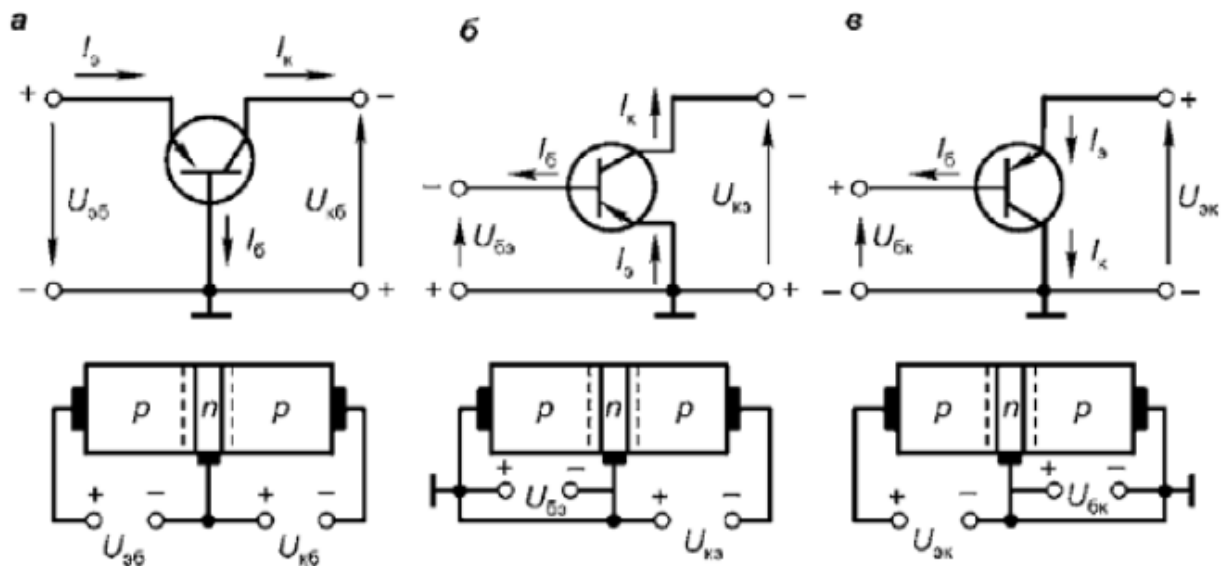


Рис. Схема ввімкнення p-n-p – транзисторів і їх структура:

а – із спільною базою; б – із спільним емітером;

в – із загальним колектором

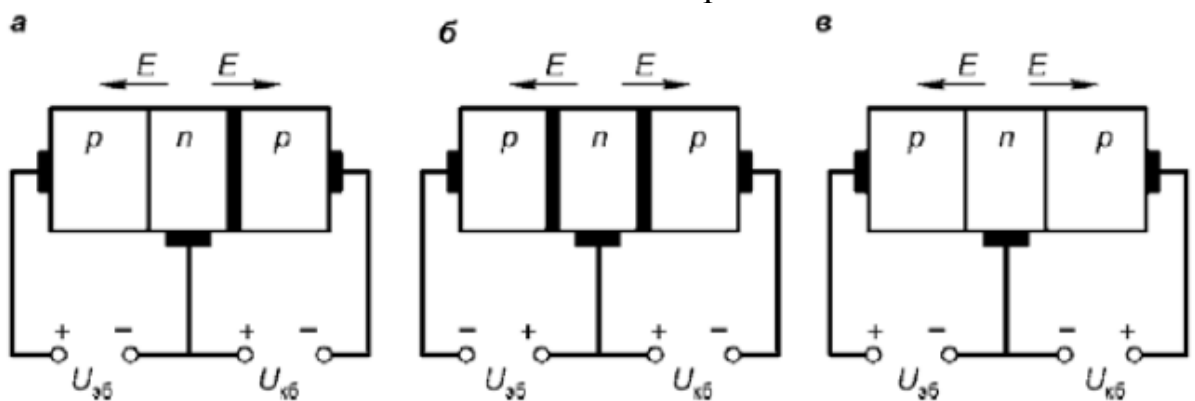


Рис. Режими роботи транзистора:

а – активний; б-нормальний; в – інверсний

Підсилювальні властивості біполярного транзистора залежать від схеми ввімкнення (ЗБ, ЗЕ, ЗК). Транзистор підсилює або струм, або напругу, або те й інше.

У схемі із ЗБ значення струму колектора близьке до значення струму емітера, тобто підсилення по струму не відбувається. Однак у цьому випадку є підсилення по напрузі і, отже, по потужності.

При роботі транзистора в підсилювальному режимі на його вхід подається змінний сигнал, який потрібно посилювати. Напруга джерела живлення постійна, але змінна напруга, що подається на колектор (навіть незначна), призводить до великих змін (коливань) змінної напруги на колекторному резисторі, тобто у схемі відбувається підсилення малого змінного вхідного сигналу.

У схемі з ЗЕ відбувається підсилення і по струму, і по напрузі. Вхідним струмом є струм бази, значно менший за струм емітера. Змінюючи вхідну напругу, змінюється висота потенційного бар'єра і кількість основних носіїв заряду емітера через базу і відповідно через колектор. Оскільки до бази від

джерела надходить менше носіїв, ніж інжектується з емітера в базу і колектор, то незначне збільшення струму у вхідному колі ви-кликає істотну зміну струму у вихідному колі. Таким чином, транзистор, ввімкнений за схемою з ЗЕ, характеризується великим підсиленням по струму. При цьому є і підсилення по напрузі: оскільки вихідний опір великий, до кола колектора можна під'єднати резистор колектора з великим опором, напру-га на якому буде більшою, ніж вхідна. Відповідно відбувається і підсилення по потужності.

У схемі з ЗК відбувається підсилення по струму і по потужності, а підсилення по напрузі відсутнє.

3. Тиристори.

Принцип роботи тиристорів та їх різновиди

Тиристор – це чотиришаровий напівпровідниковий при-лад, що має два стійких стани: закритий і відкритий.

У даний час ці прилади отримали широке застосування в перетворювачах електричної енергії і безконтактної пуско-регулюючої апаратури. До переваг тиристорів відносяться: великий термін служби, високий ККД, мала чутливість до вібрації і механічних перевантажень, здатність працювати при низьких (прямих) і високих (зворотних) напругах, а також при дуже великих струмах, досягають одиниць кілоампер. Основна властивість тиристора забезпечує йому найрізноманітніші засто-сування в автоматичі, електроніці, енергетиці – це здатність перебувати у двох стійких станах: закритому і відкритому. У закритому стані опір тиристора становить десятки мегаом, і він практично не пропускає струм при напругах тисяч одиниць вольт, а у відкритому стані опір тиристора незначний. Падіння напруги на ньому близько 1 В при токах в сотні ампер. Перехід тиристора з одного стану в інший відбувається за дуже короткий час. Різновидами тиристорів є динистор, симетричний ти-ристор і фототиристор. Серед них виділяють диністори. Цей прилад є різновидом тиристора з двома електродами (виводами). У нього відсутній керуючий електрод. Перехід динистора з одного стану в інший здійснюється зміною значення чи полярності напруги на виводах.

Тиристор має три електроди. Керуючий електрод дозволяє за допомогою невеликого сигналу керування (імпульсу напруги) перевести тиристор з закритого стану у відкритий при незмінній (заданій) напрузі на основних електродах. Зворотний перехід з відкритого стану в закритий за допомогою керуючої напруги не-можливий.

Структура тиристора містить чотири (p-n-p-n) або п'ять (p-n-p-n-p) шарів. В останньому випадку тиристор називають симетричним (симистор).

Чотиришарова структура тиристора зображена на рис. Тиристор містить три p–n-переходи П1, П2, П3. Щоб підвищити ефективність керуючого сигналу, шар, до якого під'єднаний керуючий електрод, роблять тонше за інші.

При відсутності напруги на керуючому електроді і при негативній напрузі на аноді щодо катода електронно-діркові переходи П1 і П3 виявляються під'єднаними у зворотному напрямку, а перехід П2 – у прямому напрямку. При цьому протікає дуже малий струм. Наявність струму через керуючий перехід в цьому випадку не змінює загального стану структури, і тиристор залишається замкненим. Якщо до р-п-р-п-структур і прикладено пряму напругу (плюс на аноді), переходи П1 і П3 зміщуються в прямому напрямку, а перехід П2 – у зворотному. При відсутності напруги на керуючому електроді тиристора залишається замкненим, і вся напруга виявляється прикладеною до переходу П2.

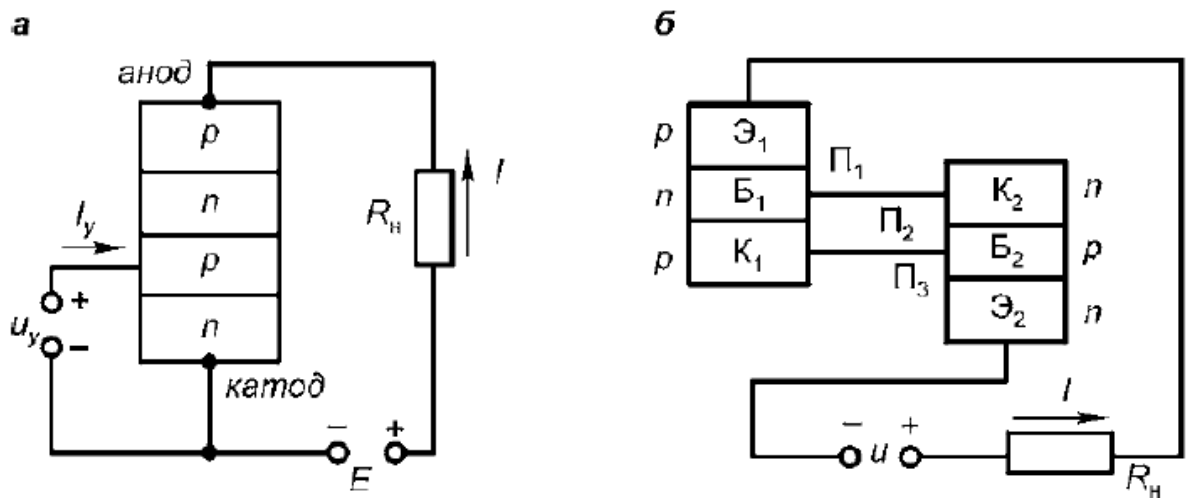


Рис. Тиристор
а – структура; б – двотранзисторний аналог

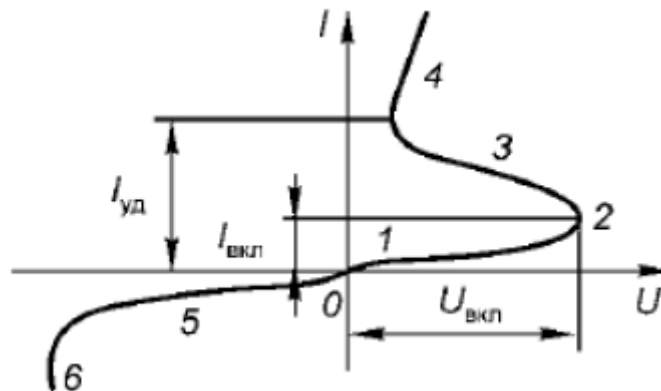


Рис. Вольт-амперна характеристика тиристора

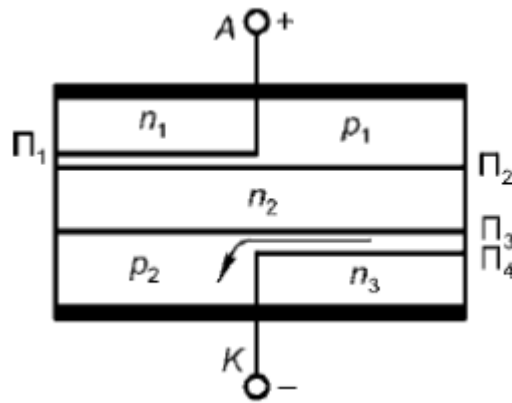


Рис. Структура династора: А – анод; К – катод

Робота тиристора відображена вольт-амперною характеристикою показує, залежність струму в навантаженні від напруги кола. На характеристиці (рис. 1. 44) можна виділити кілька характерних ділянок. При малих значеннях напруги U струм в колі, а отже, і коефіцієнти α_1 і α_2 малі, при цьому $I \approx I_0$ тиристор веде себе як діод, ввімкнений у зворотному напрямку (ділянка 1). При досягненні напругою критичного значення (точка 2) коефіцієнти швидко зростають, і струм стрибком переходить на зростаючу гілку характеристики (ділянка 4). При цьому він перевищує деяке значення струму утримання тиристора у відкритому стані $I_{уст}$. Ділянка 3 характеристики відповідає незначному зростанню струму навіть при зниженні напруги. Це свідчить про те, що на даній ділянці тиристор має негативний опір. Зміна напруги на тиристорі на зворотню призводить до зворотного зсуву переходів П1 і П3 (ділянка 5). При цьому має місце зворотний струм витіку тиристора. При збільшенні зворотної напруги до деякого значення відбувається пробій переходів (ділянка 6), який може призвести до руйнування тиристора. Характерним значенням струму є струм включення $I_{вкл}$, при якому опір тиристора стає негативним.

Утримати тиристор у ввімкненому стані можна, збільшивши анодний струм вище деякого значення струму утримання (на вольт-амперній характеристиці струм утримання відповідає перемикаю тиристора в провідний стан при струмі керування, що дорівнює нуль.)

4. Комбіновані транзистори.

Обмежені можливості щодо створення транзисторів MOSFET (польових транзисторів з ізолюваним затвором) великої потужності, що мають великий опір у відкритому стані, зумовили створення комбінованого приладу нового типу. Новий прилад був створений у 1980-ті роки і отримав назву біполярний транзистор з ізолюваним затвором. У результаті різних модифікацій цього приладу розроблено комбінований пристрій, що вдало поєднує MOSFET на вході і біполярний транзистор – на виході. Це дозволило поєднати переваги даних елементів в один прилад, який називається IGBT (insulated gate bipolar transistor). У даний час це найбільш досконалий напівпровідниковий прилад, вироблений серійно. Хоча швидкодія

розширила можливості його використання у високочастотних режимах до 150 кГц (у до 10⁶ Гц), гранична потужність залишається нижче, ніж у тиристорів.

Принцип роботи IGBT

Біполярно-польова структура IGBT поєднує в собі принцип польового керування і біполярний механізм перенесення струму. Транзистор є повністю керованим – його увімкнення і вимкнення здійснюється поданням і зняттям позитивної напруги між затвором і витоком. Його позначення і еквівалентна схема ввімкнення двох транзисторів подані на рис.

Стандартна тришарова структура IGBT IV покоління зображена на рис. 1. 56. Вона має відносно низькі втрати в статичному режимі роботи і виконана за технологією "втопленого каналу" (trench-gate technology). Структура включає в себе позначений на рисунку польовий транзистор MOSFET з n-каналом і біполярний транзистор р-n-p-типу. Польовий (вхідний) транзистор утворений шарами: n-витік, n-стік і «металева пластина - засувка». Вихідний біполярний транзистор утворений шарами: р-емітер, n-база і р-колектор.

Процес увімкнення IGBT відбувається у два етапи: після подання позитивної напруги між затвором і витоком відбувається відкриття польового транзистора, при цьому формується n-канал між витоком і стоком. При позитивній напрузі в n-шар інжектуються неосновні носії заряду, що дозволяє управляти провідним каналом. Далі рух зарядів з n-області в р-область призводить до відкриття біполярного транзистора і виникнення струму від емітера до колектора. Таким чином відбувається керування польовим транзистором. Вимкнення IGBT проводиться зняттям напруги на затворі або прикладанням зворотної напруги. Використана в IV поколінні IGBT технологія дозволила знизити опір між р-базами і відповідно зменшити падіння напруги на приладі в провідному стані до 1,8 ... 2,0 В.

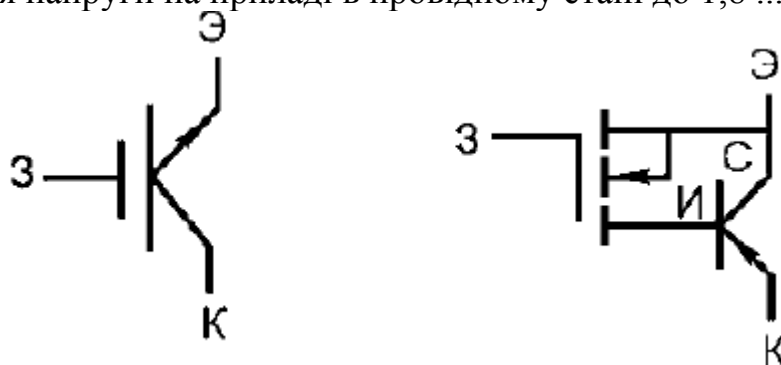


Рис. Позначення і еквівалентна схема IGBT відповідно

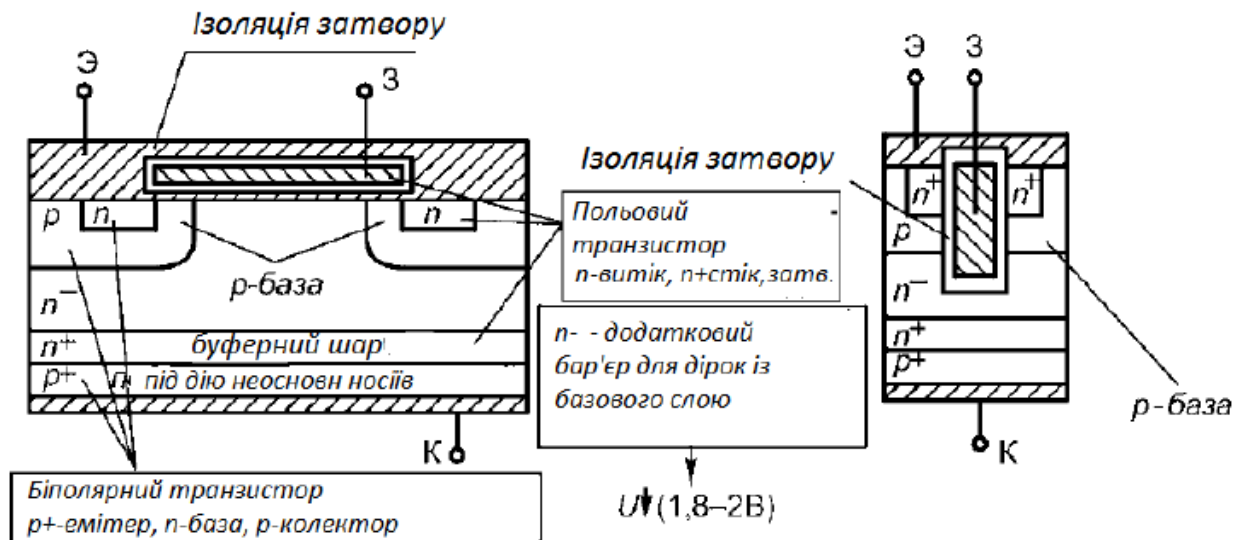


Рис. Структура IGBT

Перевагою IGBT є значне зниження послідовного опору (порівняно з MOSFET) силового кола у відкритому стані. Завдяки цьому знижуються теплові втрати на замкненому ключі. Дослідження також показують, що у транзистора IGBT відсутня ділянка вторинного пробою, характерного для класичних біполярних транзисторів. Швидкодія IGBT нижче швидкодії транзисторів MOSFET, а значить, їх важко використовувати в джерелах живлення з високими частотами перетворення. Однак IGBT швидше біполярних транзисторів. Обмеження загальної швидкості перемикання біполярних транзисторів з ізольованим затвором криється в кінцевому часі життя неосновних носіїв у базі р-п-р-транзистора.

Контрольні запитання.

1. Різновиди діодів.
2. Класифікація діодів.
3. Застосування діодів.
4. Імпульсні діоди.
5. Тунельні та зворотні діоди.
6. Обернений (зворотний) діод.
7. Біполярні транзистори.
8. Структурні схеми транзисторів.
9. Принцип роботи тиристорів та їх різновиди.
10. Структура тиристора.
11. Комбіновані транзистори.
12. Принцип роботи IGBT.
13. Переваги IGBT.