

Лекція 1.

ТЕМА: ВСТУПНЕ ЗАНЯТТЯ . ОСНОВНІ ВИЗНАЧЕННЯ І ІСТОРІЯ СТАНОВЛЕННЯ

1. Основні визначення.

2. Основні дати відкриттів і винаходів в електроніці

Електроніка, як наука, займається вивченням електронних явищ і процесів, пов'язаних із зміною концентрації і переміщенням заряджених часток в різних середовищах (в вакуумі, газах, рідинах, твердих тілах) і умовах (при різній температурі, під дією електричних і магнітних полів).

Задача електроніки, як галузі техніки, - розробка, виробництво і експлуатація електронних пристроїв самого різного призначення.

Ефективність електронної апаратури зумовлена високою швидкістю, точністю і якістю елементів, які входять в неї, самими важливими з яких є електронні прилади. Крім того, за допомогою електронних приладів вдається перетворювати неелектричну енергію в електричну і навпаки (наприклад, фотоелементах, терморезисторах). Різноманітні електронні датчики і вимірювальні прилади дозволяють з високою точністю вимірювати, реєструвати і регулювати зміни різних неелектричних величин - температури, тиску, прозорості і т.д.

Становлення і розвиток електроніки стало можливим дякуючи зусиллям багатьох сотень вчених-фізиків, які пробували на протязі довгого часу пізнати і науково пояснити природу електричних явищ.

Ще в Давній Греції Фалес із Білета побачив, що янтар, потертий об вовну, притягує легкі предмети. Від грецької назви янтарю і виникла назва "електрика".

Від перших дослідів по вивченню електричних явищ до відкриття електрона пройшло більше 2 тисяч років. Лише в 1892 році англійський фізик Дж. Стоні, спираючись на досліди Фарадея, Максвела і других вчених, ввів в науку поняття "електрон", розуміючи під цим елементарну кількість електрики.

Основні дати відкриттів і винаходів в електроніці

- 1880р. Італійський вчений А. Вольта побудував перше електрохімічне джерело постійного струму.
- 1872р. Побудова російським вченим А. Н. Лодигінім лампи накалювання.
- 1887р. Силами багатьох вчених світу відкрито явище термоелектронної емісії.
- 1802р. Відкриття електричної дуги академіком В.Петровим
- 1873р. Російський електротехнік А.Н. Лодигін винайшов перший в світі електровакуумний прилад - лампу розжарення.
- 1884р. Т.А. Едісон відкрив термоелектронну емісію.
- 1887р. Німецький фізик Г.Р. Герц відкрив фотоелектричний ефект.
- 1888р. Російський вчений Столетов відкрив явище фотоелектронної емісії.
- 1895р. Російським вченим Поповим здійснені передача і приймання радіосигналів. Відкриття радіо стало стимулом подальшого бурного розвитку радіоелектроніки.
- 1904р. Англійський вчений Флемінг сконструював найпростішу лампу - вакуумний діод, який використовувався в радіотехніці в якості детектора радіосигналів.
- 1907р. Через три роки після Флемінга вчений де Форест Лі ввів в лампу Флемінга керуючий електрод - сітку і побудував триод, здатний генерувати і підсилювати електричні сигнали.
- 1913р. Німецький вчений Мейснер винайшов ламповий генератор синусоїдних коливань.
- 1914р. Російські вчені Паполексі і Бонч-Бруєвич незалежно один від одного виготовили перші електронні лампи в Росії.
- 1918р. Бонч-Бруєвич розробив лампову схему тригера, який в подальшому використовувався як основний елемент запам'ятовування двійкового цифрового коду.
- 1922р. Радянський інженер Лосєв винайшов можливість отримання

підсилення за потужністю електричних коливань за допомогою напівпровідникового кристалічного діода.

30-ті роки ХХ ст.
Виділення електроніки в самостійну науку. В цей час побудовані: електричний мікроскоп, термоелектричний генератор, лампи з трьома сітками (пентоди), комбіновані лампи, передаючі та приймальні телевізійні трубки та інш.

1945 р.
Англійські вчені Моучлі і Д. Еккерт завершили побудову першої ЕОМ ЕНІАК (ENIAC - Electronic Numerical Integrator and Computer - електронний цифровий інтегратор і обчислювач

Містила > 18 тис. електронних ламп, 1,5 реле.

1948р.
Американські вчені Д. Бардін і В. Браттейн побудували германієвий крапковий транзистор.

1952р.
Під керівництвом академіка Лебедева в СРСР виготовлена перша електронна обчислювальна машина.

1955р.
Басов і Прохоров (радянські вчені) побудували перший квантовий генератор - лазер.

1958 - 1960рр.
Перші розробки в СРСР інтегральних мікросхем.

70-тірр.
Розробка великих інтегральних мікросхем (ВІС). Поява перших мікропроцесорів.

80-ті рр.
ЗВІС (зверхвеликі інтегральні схеми), широке впровадження персональних ЕОМ.

В сільському господарстві зараз використовують електронну апаратуру термометри, вологоміри, вимірювачі жирності молока, товщини жирового пару тварин, лазерні системи для керування землекопальними машинами, системи керування рухом трактора по міжряддях, та ін.). Поряд з цим розвиваються і нові напрямки в використанні електроніки для сільськогосподарського виробництва. До них можна віднести автоматизацію технологічними процесами збиральних комбайнів та тваринних комплексів, регулювання мікроклімату в теплицях, боротьба із шкідниками в сільському господарстві і т.д.

За допомогою електронної техніки можна підвищити надійність сільськогосподарських машин, поліпшити використання тракторів, комбайнів, автомобілів. Контрольно-діагностичне обладнання на основі обчислювальної техніки, а також розвинена мережа диспетчерського зв'язку поліпшують оперативність і якість ремонту та обслуговування сільськогосподарської техніки, її зберігання.

Для сільського господарства розробляються різні прилади, в яких використовується сама сучасна електронна техніка - мікропроцесори та мікро-ЕОМ, ультразвукові установки, пристрої з використанням кріогенної техніки і т.д

Тому сучасний технік-електрик сільського господарства повинен бути озброєний знаннями з електроніки, техніки зв'язку і вміти їх використовувати у своїй практичній роботі. Йому слід добре уявляти роль і місце електроніки в технічному процесі, знати історичні етапи розвитку радіоелектроніки, усвідомлювати величезні завдання, які ставляться перед нею.

ЛЕКЦІЯ 3

ТЕМА: ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ НАПІВПРОВІДНИКІВ

План

- 3.1 Фізичні властивості напівпровідників
- 3.2 Власна провідність напівпровідників
- 3.3 Домішкова провідність напівпровідників
- 3.4 Електронно-дірковий перехід
- 3.5 Властивості p-n переходу

3.1 Фізичні властивості напівпровідників

З точки зору зонної теорії, до напівпровідників відносяться речовини, ширина забороненої зони яких не перебільшує 3 еВ.

Найважливішою властивістю напівпровідників є залежність їх електричних властивостей від зовнішніх умов: температури, освітлення, тиску і т. п.

Характерною особливістю напівпровідників є зменшення їх питомого опору із збільшенням температури.

Найбільш широке використання в напівпровідниковій техніці отримали германій, кремній, селен, а також напівпровідникові з'єднання типу арсенід галію, карбід кремнію, сульфід кадмію та інші.

Для напівпровідників характерна кристалічна будова, тобто закономірне і впорядковане розміщення їх атомів в просторі. В кристалах пов'язані між собою атоми розміщуються строго визначеним чином і на однакових відстанях один від одного, в результаті чого створюється решітка із атомів, яку прийнято називати *кристалічною решіткою твердого тіла*.

Між атомами кристалічної решітки існують зв'язки. Вони утворюються валентними електронами, які взаємодіють не лише з ядром свого атома, але й з

сусідніми. В кристалах германію зв'язок між двома сусідніми атомами здійснюється двома валентними електронами - по одному від кожного атома. Такий зв'язок між атомами називається *двоелектронним* або *ковалентним*.

Кристалічна решітка, в якій кожний електрон зовнішньої орбіти зв'язаний ковалентними зв'язками з іншими атомами речовини -- ідеальна. В такому кристалі всі валентні електрони тісно пов'язані між собою і вільних електронів, які могли б приймати участь у переносі зарядів, немає. Таку кристалічну решітку мають всі хімічно-чисті бездомішкові напівпровідники при температурі абсолютного нуля (273°C), або ($T=0^{\circ}\text{K}$). В цих умовах напівпровідники мають властивості ідеальних ізоляторів.

3.2 Власна провідність напівпровідників

Під дією зовнішніх факторів деякі валентні електрони атомів кристалічної решітки отримують енергію, достатню для вивільнення від ковалентних зв'язків.

При звільненні електрону із ковалентного зв'язку в останньому виникає ніби вільне місце, яке має елементарний позитивний заряд. Таке звільнене в електронному зв'язку місце умовно назвали *діркою* (рис. 2.1), а процес утворення пари електрон-дірка отримав назву *-генерація зарядів*.

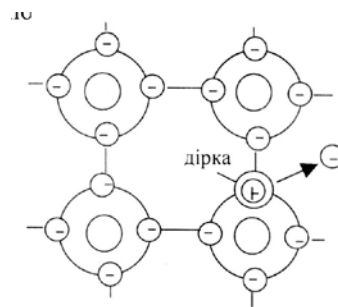
Дірка має позитивний заряд, тому вона може приєднати до себе електрон сусіднього заповненого ковалентного зв'язку. В результаті цього відновлюється один зв'язок (цей процес - рекомбінація) і порушується сусідній.

Концентрація дірок в ідеальній кристалічній решітці хімічно-чистого напівпровідника завжди дорівнює концентрації вільних електронів ($n_i = p_i$).

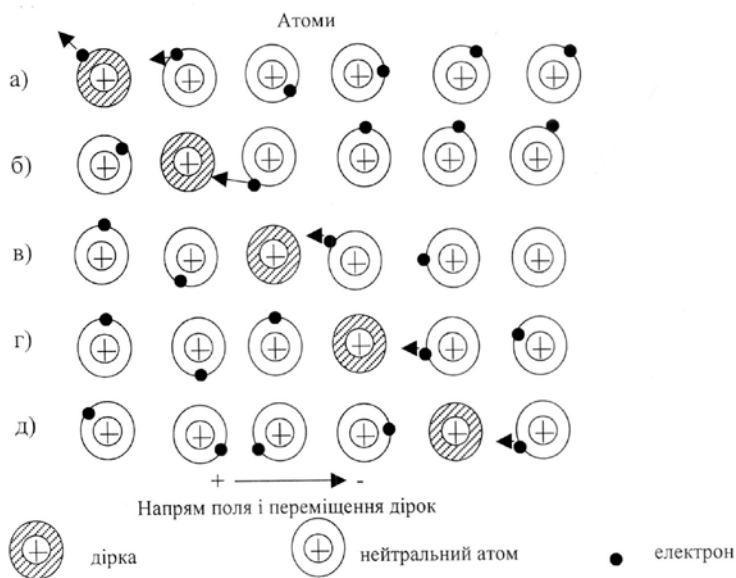
Електрична провідність чистого напівпровідника визначається кількістю власних носіїв n_i і p_i . Швидкість генерації носіїв (як і швидкість рекомбінації) визначається властивостями напівпровідника і його температурою. Швидкість рекомбінації, крім того, пропорційна концентрації електронів і дірок, так як

чим більша кількість носіїв, тим вірогідніше, що їх зустріч завершиться рекомбінацією.

Рис. 2.1. Плоска схема структури атомної решітки кристалу кремнію



При відсутності зовнішнього електричного поля електрони і дірки пересуваються в кристалі хаотично внаслідок теплового руху. В цьому випадку



струм в напівпровіднику не виникає. Якщо ж на кристал діє електричне поле, рух дірок і електронів стає впорядкованим і в кристалі виникає електричний струм. Щоб зрозуміти, як переміщуються дірки, розглянемо рис. 2.2., на

якому зображено декілька одних і тих же атомів, розміщених вздовж напівпровідника, в різні моменти часу.

Таким чином, провідність напівпровідника зумовлена переміщенням як вільних електронів, так і дірок. В першому випадку носії зарядів негативні, в другому - позитивні.

Рис. 2.2. Принцип діркової провідності

Відповідно розрізняють два види провідності напівпровідників - *електронна або провідність типу n і діркова або провідність типу p*.

В хімічно-чистому кристалі напівпровідника кількість дірок завжди дорівнює кількості вільних електронів і електричний струм в ньому утворюється в результаті одночасного переносу зарядів обох знаків.

Така електронно-діркова провідність називається *власною провідністю напівпровідників*. При цьому загальний струм в напівпровіднику дорівнює сумі електронного і діркового струмів.

Висновок:

1. Питома провідність напівпровідника залежить від концентрації електронів і дірок та від їх рухливості.
2. Питома електропровідність залежить від типу речовини та її температури.

3.3 Домішкова провідність

Наявність домішок суттєво змінює провідність напівпровідників. В залежності від того, атоми якої речовини будуть введені в кристал, можна отримати перевагу надлишкових електронів або дірок.

Домішкова провідність – провідність, яка створена присутністю в кристалі напівпровідника домішків із атомів з іншою валентністю.

Домішки, які викликають в напівпровіднику збільшення вільних електронів, називаються *донорними*, дірок - *акцепторними*.

Напівпровідники, електропровідність яких підвищилась внаслідок утворення надлишку вільних електронів при введенні домішку, називаються напівпровідниками з *електронною провідністю (типу n)*, навпаки — *напівпровідники з дірковою провідністю (типу p)*.

Дрейфовий і дифузний струми в напівпровіднику

Струм в напівпровіднику з'являється як наслідок направленого руху носіїв заряду. Розрізняють два можливий випадки появи струму в

напівпровіднику.

Струм, обумовлений зовнішнім електричним полем, називається *дрейфовим*.

Струм, який виникає в результаті дифузії носіїв із області, де їх концентрація підвищена, в напрямку області з більш низькою концентрацією, називається *дифузним*.

Нерівномірність концентрації може виникнути під дією світла, нагрівання, електричного поля і т.д.

3.4 Електронно-дірковий перехід

Припустимо, що є два домішкових напівпровідника: один р-типу, інший n-типу провідності. Концентрація носіїв в рівновазі $N_e = N_d$. Наблизимо їх до контакту (рис.2.3). Електрони із напівпровідника n-типу почнуть дифундувати в напівпровідник р-типу, і навпаки. В граничному р- шарі пройде рекомбінація дірок, а в граничному n- шарі - об'єднання електронами.

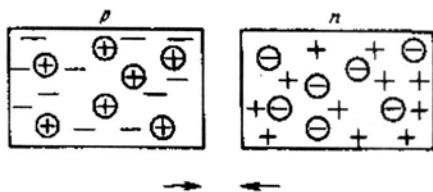


Рис.2.3. Зближення двох примірників домішкових напівпровідників різного типу провідності при $N_e = N_d$: ⊕ - дірка; ⊖ - електрон; -, + - від'ємні і додатні іони

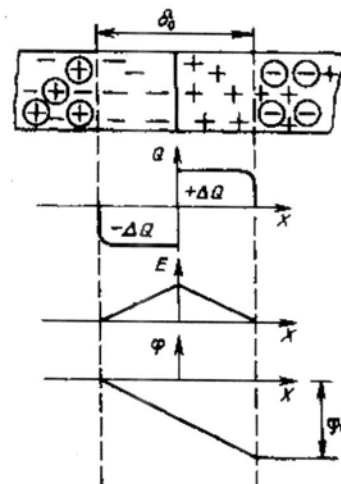


Рис. 2.4. Створення р-n переходу

Із двох граничних шарів утворюється шар δ_0 , який містить нерухомі додатні і від'ємні іони, які в свою чергу, утворюють додатній і від'ємний об'ємні заряди ($+\Delta Q$ $-\Delta Q$) (рис.2.4). Об'ємні заряди викликають утворення електричного поля E . Під дією електричного поля виникає контактна різниця потенціалів ϕ_k між межами шару δ_0 - Контактний шар δ_0 . об'єднаний носіями

електричних зарядів, прийнято називати електричним переходом, р-п переходом або електронно-дірковим переходом.

Електричний перехід - перехідний шар в напівпровідниковому матеріалі між двома областями напівпровідника, одна з яких має провідність n-типу, а інша - р-типу, або різними значеннями питомої електропровідності.

Електронно-дірковий перехід – електричний перехід між двома областями напівпровідника з різними типами провідності.

Контактна різниця потенціалів різниця потенціалів, обумовлена власним електричним полем р-п переходу.

Слід відмітити, що електронно-дірковий перехід не можливо отримати простим дотиком напівпровідникових тіл з різною провідністю із-за наявності нерівностей і окисних покриттів дотичних поверхонь. Справжній р-п перехід отримують в одному монокристалі, в який особливими технологічними методами "впорскують" домішкові атоми.

3.5 Властивості р-п переходу

Визначальною властивістю р-п переходу - *одностороння провідність*.

Якщо до напівпровідника прикласти електричну напругу, то в залежності від полярності цієї напруги, р-п перехід проявляє зовсім різні властивості.

Коли негативний полюс джерела (рис. 2.5, а) підімкнений до n-області кристалу, а позитивний - до р-області, зовнішнє електричне поле і поле р-п переходу направлені в протилежні сторони. Тому електричне поле р-п переходу виявиться в значній мірі послабленим, і тепер вже електрони із n - області зможуть проникати в р- область, а дірки із р-області в n-область. Таким чином, в колі живлення напівпровідника виникає електричний струм.

Полярність прикладеної напруги, при якій через напівпровідник протікає струм - *пряма полярність*.

Коли ж негативний полюс джерела живлення (рис. 2.5, б) підімкнений до р-області кристалу, а позитивний - до n-області, електричні поля джерела і р-п переходу співпадають. Сумарне поле збільшується і в ще більшій мірі буде

перешкоджати руху електричних зарядів через р-п перехід. Якщо розглядати ідеальний випадок, електричного струму через перехід не буде. Така полярність - *зворотня*.

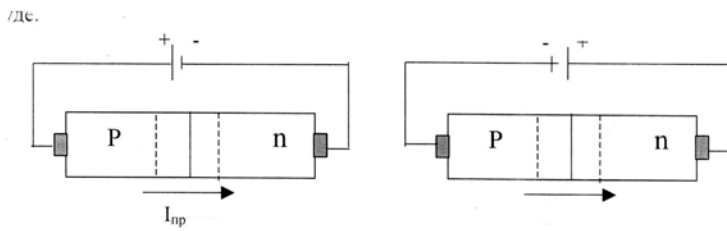


Рис. 2.5. Пряме (а) і зворотнє (б) підключення р-п переходу

Але в реальних умовах в НП, крім основних носіїв електричних зарядів - електронів і дірок, які утворюються при введенні домішків, є і неосновні носії зарядів (їх значно менше) - електрони і дірки, які виникають внаслідок теплового руху атомів в кристалі. Частина цих електронів і дірок здатна проходити через р-п перехід при зворотній полярності прикладеної до напівпровідника напруги. В цьому випадку виникає *зворотній струм*, який набагато менший прямого.

Властивості електронно-діркового переходу наочно ілюструються його вольт-амперною характеристикою (рис.2.6), яка показує залежність струму через р-п перехід від величини і полярності прикладеної напруги.

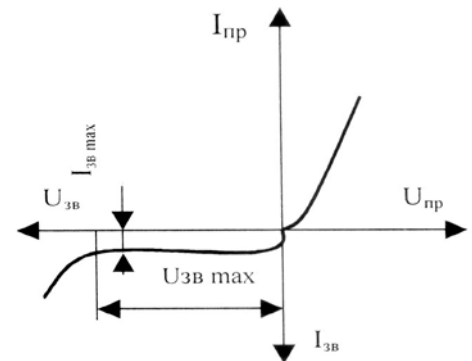


Рис.2.6. Вольт-амперна характеристика р-п переходу

Проаналізувавши ВАХ, можна зробити висновок, що р-п перехід володіє випрямними властивостями, тобто проводить струм в прямому напрямі і практично не проводить його в зворотному напрямі. При збільшенні зворотної напруги зворотній струм стає рівним струму насичення і в визначених межах залишається величиною практично постійною. Зазвичай він має величину порядку мікроампернавіть

У напівпровіднику $U_{зв} \gg U_{пр}$, а $I_{зв} \ll I_{пр}$, але при деякому збільшеному значенні $U_{зв}$ настає явище пробую р-п переходу і $I_{зв}$ різко збільшується.

Електричний пробій р-n переходу обумовлений тунельним ефектом. При цьому швидкість електронів досягає швидкості іонізації.

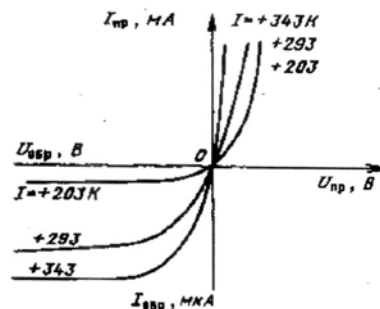
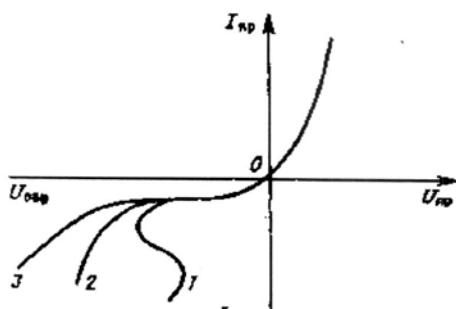
Тунельний пробій - електричний пробій переходу, викликаний тунельним ефектом, природа якого пов'язана з проходженням електронів в зону провідності без повідомлення їм необхідної енергії, яка відповідає ширині забороненої зони.

Електричний і тунельний пробіи протікають одночасно, і якщо не обмежити струм через р-n перехід, то може наступити *тепловий пробій*, який виникає внаслідок виділення теплової потужності $P = U_{зв} \cdot I_{зв}$

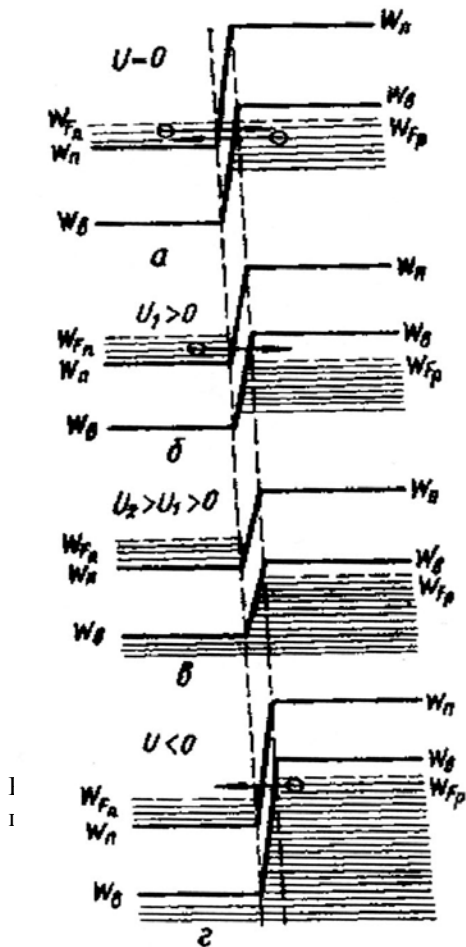
В діапазоні зворотних напруг, які не перевищують напруги пробою, перехід проявляє *ємнісні властивості*, і поводить себе як конденсатор. Причому, ємність переходу обернено пропорційна прикладеній напрузі. Ця властивість широко використовується там, де виникає необхідність використання конденсаторів змінної ємності.

Властивості р-n переходу суттєво залежать від температури навколишнього середовища. При підвищенні температури зростає генерація пар носіїв заряду - електронів і дірок, тобто збільшується концентрація неосновних носіїв і власна провідність напівпровідника. Отже, при нагріванні (рис. 2.8) сильно зростає зворотній струм, зростання струму в прямому напрямі проходить набагато слабше. Це пояснюється тим, що прямий струм виникає в основному за рахунок домішкової провідності, але концентрація домішок від температури практично не залежить.

1



температури на
характеристику р-n пе



Для германієвих і кремнієвих p-n переходів зворотній струм зростає приблизно в 2-2,5 рази при підвищенні температури на кожні 10^0 C.

Властивості p-n переходу залежать також від частоти прикладеної напруги, це пояснюється наявністю власної ємності між шарами напівпровідника з різними типами провідності.

В 1958 р. японський вчений Лео Есаки відкрив явище тунельного ефекту.

Тунельний ефект заключається в тому, що електрони проходять через потенціальний бар'єр p-n переходу, не змінюючи своєї енергії. Для отримання тунельного ефекту використовується

напівпровідниковий матеріал (германій, арсенід галію) з дуже великою концентрацією домішок (до 10^{21} домішкових атомів в 1 см^3), в той час як зазвичай концентрація домішок в напівпровідниках не перевищує 10^{15} см^{-3} .

Напівпровідники з таким високим вмістом домішків називаються виродженими, а їх властивості дуже близькі до властивостей металів.

Внаслідок великого вмісту домішків в обох областях напівпровідникового кристалу ширина p-n переходу виявляється дуже малою (не більше $0,01 \text{ мкм}$), що приводить до значного підвищення напруженості електричного поля на переході (біля 10^8 В/м). В цих умовах є кінцева вірогідність того, що електрон, який рухається в сторону дуже вузького бар'єру, пройде крізь нього (як через "тунель") і займе вільний стан з такою ж енергією по іншу сторону від бар'єрного шару. Дане явище було названо тунельним ефектом.

Відомо, що збільшення концентрації донорних домішків зміщує рівень Фермі вгору, а збільшення концентрації акцепторних домішків - вниз відносно середини забороненої зони, при концентрації домішків порядку 10^{21} см⁻³ рівень Фермі напівпровідника n - типу розміщується всередині зони провідності, а рівень Фермі напівпровідника p-типу - всередині валентної зони.

Із рисунка 2.9 (а) видно, що при відсутності зовнішньої напруги рівні Фермі зони провідності і валентної зони співпадають, можливості переходу електронів через потенціальний бар'єр із одного шару в інший немає.

Якщо до p-n переходу прикласти невелику пряму напругу, то висота потенціального бар'єру і перекриття зон зменшується (рис. 2.9, б). Енергетична діаграма напівпровідника n-типу підніметься вгору, а напівпровідника p-типу опуститься вниз. При цьому рівні деяких електронів провідності n - області розмістяться проти вільних рівнів валентної зони p - області. Тим самим створюються умови для тунельного переходу електронів і електронного напівпровідника в дірковий. Тому через p-n перехід тунельний струм, величина якого буде залежати від величини прикладеної прямої напруги. Слід відмітити, що при прямій напрузі через p-n перехід, крім тунельного струму, проходить і дифузний струм $I_{\text{диф}}$, який створюється переміщенням електронів і дірок провідності. Отже повний струм p-n переходу при тунельному ефекті складає

$$I = I_{\text{т.пр}} + I_{\text{диф}}$$

При подачі прямої напруги, яка перевищує певне значення тунельний струм починає різко спадати. При деякому значенні прямої напруги (рис 2 9 в) коли напруженість електричного поля в p-n переході різко знижується, тунельний струм припиняється, а p-n перехід набуває звичайні властивості, пов'язані з проходженням через нього дифузного струму.

При подачі на p-n перехід зворотної напруги (рис.2.9, г) енергетична діаграма напівпровідника n - типу опускається вниз, а напівпровідника p-типу - вверх. Ширина зони перекриття збільшується, що призводить до зростання зворотного тунельного струму, оскільки виникають умови для вільного

тунельного переходу валентних електронів із р-області в зону провідності п-області. Величина зворотного струму залежить від величини зворотної напруги.

Одностороння провідність р-п переходу при тунельному ефекті повністю відсутня.

Контрольні питання і вправи

1. Назвіть основні специфічні властивості напівпровідників.
2. Що таке дірка?
3. Поясніть процес проходження струму в чистих напівпровідниках.
4. Від чого залежить електропровідність домішкових напівпровідників?
5. Що таке основні та неосновні носії зарядів?
6. Які струми можуть протікати в напівпровіднику?
7. Поясніть залежність питомої провідності напівпровідника від температури.
8. Дайте визначення р-п переходу.
9. Чому р-п перехід часто називають запираючим шаром?
10. Що так попернений і непопернений електричний пробій р-п переходу?
11. як пояснити вплив температури на форму вольт амперної характеристики р-п переходу?
12. Чому прямий струм через р-п перехід набагато більший за зворотній?
13. Чим пояснюється ємнісна властивість р-п переходу?

ЛЕКЦІЯ 4

ТЕМА ПАСИВНІ ЕЛЕМЕНТИ ЕЛЕКТРОНІКИ

ПЛАН

- 4.1. Резистори
- 4.2. Конденсатори
- 4.3. Котушки індуктивності. Трансформатори
- 4.4. Коливальні контури
- 4.5. Напівпровідникові резистори

4.1. Резистори

Резистори – елементи електричного ланцюга, призначені для використання їх опору.

За видом вольт-амперної характеристики розрізняють резистори:

- *лінійні* (постійного і змінного опору);
- *нелінійні* (за струмопровідний елемент використовують різні напівпровідникові матеріали).

В залежності від виду резистивного елемента резистори діляться на :

- *дротяні* (виготовляють із високоомного дроту (манганін, константан, ніхром та ін), намотаного на діелектричний корпус);
- *недротяні* (виготовляються із високоомної речовини (металу або вуглецевого з'єднання) шляхом напилювання його на ізоляційну основу, наприклад на керамічний стержень або трубку, на кінцях якого закріплені контакти). Такі резистори мають лінійну ВАХ і, як правило, використовуються як пасивні елементи в схемах електронних пристроїв.

За способом захисту резистивного елемента розрізняють резистори:

- *неізолювані;*
- *ізолювані (лаковані);*
- *компаундовані;*
- *опресовані пластмасою;*
- *герметизовані;*
- *вакуумовані.*

В залежності від призначення резистори поділяють на :

- *загального призначення*(до таких резисторів не пред'являються підвищені вимоги по відношенню до точності їх виготовлення і стабільності параметрів);
- *спеціального призначення* (до них відносять резистори підвищеної стабільності, високочастотні, високомегаомні, а також резистори для мікромодулів та мікросхеім).

Основні параметри резисторів.

Номінальний опір – значення опору, який повинен мати резистор у відповідності з нормативною документацією. Фактичний опір кожного екземпляру резистора може відрізнитися від номінального, але не більше ніж на допустиме відхилення. Найбільш можливе відхилення виражають у відсотках.

Номінальна потужність – максимально допустима потужність, яка розсіюється на резисторі, при якій параметри резистора зберігаються у встановлених межах на протязі довгого часу.

Температурний коефіцієнт опору (ТКО) – відносна зміна опору резистора при зміні температури зовнішнього середовища на 1°C.

Електрична міцність – характеризується граничною напругою, при якій резистор може працювати на протязі строку служби без електричного пробую. Залежить від атмосферного тиску, температури і вологості повітря.

Рівень власних шумів.

Маркування резисторів.

Якщо рівень шумів резистора менший 1 мкВ/В, на ньому ставиться буква А.

Резистори постійного опору позначаються буквою С, змінного – СП.

Цифра, що стоїть після букв означає:

1 – вуглецевий; 2 – металоплівковий або металооксидний; 3 – плівковий композиційний; 4 – об'ємний композиційний; 5 – дротяний.

Після дефісу слідує номер розробки резистора.

Приклад: С2-10

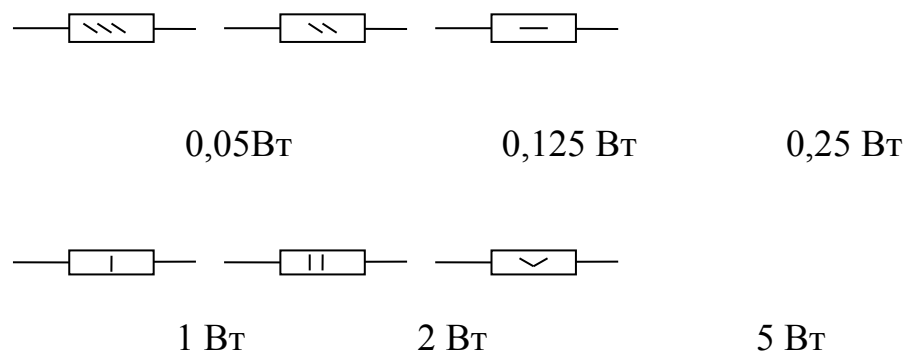
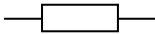
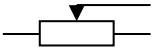
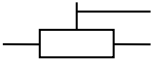


Рис. 2.1.1. Позначення номінальної потужності резистора

В схемах номінальну потужність вказують значками всередині умовного графічного зображення (рис. 2.1.1).

Умовні графічні зображення резисторів за можливістю зміни їх номінального опору:

- постійні 
- змінні 
- підстроювальні 

Опір двох резисторів, один з яких має великий опір, а інший – малий, які з'єднані послідовно (паралельно), приблизно дорівнює більшому (меншому) з двох опорів.

Опір однакових паралельно з'єднаних резисторів дорівнює 1/n-й частині опору одного з них.

4.2 Конденсатори

В першому наближенні *конденсатори* – це частотно залежні резистори.

Конденсатор – це радіоелемент, призначений для використання їх ємності.

Конденсатор – це пристрій, який має два виводи і властивість:

$$Q = C \cdot U$$

(2.1.1)

(конденсатор, який має ємність C фарад, до якого прикладена напруга U вольт, накопичує заряд Q кулон).

Якщо продиференціювати вираз, отримаємо

$$I = C \left(\frac{dU}{dt} \right)$$

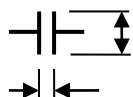
(2.1.2)

Отже, конденсатор – це більш складний елемент ніж резистор: струм пропорційний не просто напрузі, а швидкості зміни напруги. Якщо напруга на конденсаторі, який має ємність 1 Ф , зміниться на 1 В за 1 с , то отримаємо струм 1 А .

Ємність, яка дорівнює 1 Ф , дуже велика і тому частіше мають справу з мкФ (мікрофарадами) і пФ (пікофарадами).

Промисловість випускає конденсатори різних форм і розмірів.

Найпростіший конденсатор складається з двох провідників (обкладинок), розміщених на невеликій відстані між собою. Щоб отримати більшу ємність, потрібні більша площа і менша відстань між провідниками. Зазвичай для цього один з провідників покривають тонким шаром ізолюючого матеріалу.



плоского конденсатора

1,5

Основні параметри конденсаторів.

Номінальна ємність

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{l}$$

(1.2.3)

де ϵ_0 – діелектрична проникність вакууму, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-3}$

ϵ - відносна діелектрична проникність, $\epsilon \geq 1$

S – площа електроду, мм²

l - відстань між електродами, мм

Температурний коефіцієнт ємності (ТКЄ)

$$TKC = \frac{\Delta C \cdot 100}{C \cdot \Delta T}$$

(1.2.4)

де ΔC – зміна ємності при зміні температури на 1°C.

Номінальна напруга ($U_{ном}$) – максимально допустима напруга, при якій конденсатор може працювати довгий час без можливості електричного пробою.

Значення номінальної напруги та ємності вказуються на корпусі конденсатора

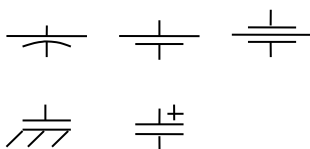
Опір ізоляції ($R_{із}$) – електричний опір конденсатора постійному струму.

Тангенс Q – відношення активної складової потужності конденсатора до її реактивної складової при синусоїдальній напрузі визначеної частоти. Кут Q є доповненням до кута зсуву фаз ϕ між дійсним значенням напруги на конденсаторі і струмом, який проходить через нього.

Широке розповсюдження отримали такі типи конденсаторів: керамічні, електролітичні, слюд

В загальному можна сказати, що для некритичних схем підходять керамічні і майнарові конденсатори; в схемах, де потрібна велика ємність, застосовуються танталові конденсатори, а для фільтрації в джерелах живлення використовують електролітичні конденсатори.

На рисунку 2.1.2 показані умовні графічні



а)

б)

в)

г)

д)

е)

є)

Рис. 1.2.2. УГЗ конденсаторів: а) прохідні; б) опорний; в) поляризований; г) оксидний полярний; д) оксидний неполярний; е) змінної ємності; є) підстроювальний; ж) вариконд; з) термоконденсатор

ж)

з)

4.3 Котушки індуктивності. Трансформатори

Якщо порівняти індуктивність (рис.1.2.3) і конденсатор, то ми побачимо, що в індуктивності швидкість зміни струму залежить від прикладеної напруги, а в конденсаторі швидкість зміни напруги залежить від струму, що протікає.



Рис. 1.2.3. УГЗ індуктивності

Рівняння індуктивності має наступний вигляд

$$U = L \left(\frac{dI}{dt} \right)$$

(1.2.4)

Напруга, прикладена до котушки індуктивності, викликає зростання струму, що протікає через неї, при чому зміна струму відбувається за лінійним законом; напруга величиною 1 В, прикладена до котушки і індуктивності 1 Гн, призводить до зростання струму через котушку зі швидкістю 1 А в 1с.

Умовно котушку індуктивності зображують у вигляді декількох витків дроту – таку конструкцію має найпростіша індуктивність. Інші конструкції включають осердя, на яке намотується дріт. Матеріалом для осердя найчастіше служить залізо (пластинки, прокатані із сплавів заліза або виготовлені методами порошкової металургії) або ферит, що являє собою крихкий непровідний магнітний матеріал чорного кольору. Осердя дозволяє збільшити індуктивність котушки за рахунок магнітних властивостей матеріалу осердя. Осердя може бути виготовленим у вигляді бруска, тора або може мати яку-небудь більш чудну форму, наприклад „горщика” (описати його словами не так просто: уявіть собі форму для випічки пиріжків, яка рознімається пополам).

Котушки індуктивності знаходять найбільше застосування в радіочастотних схемах, де вони використовуються в якості високочастотних дроселів і в резонансних схемах.

- ❖ *По суті справи котушка індуктивності – це протилежність конденсатору.*
- ❖ *В колі змінного струму котушки індуктивності ведуть себе як резистори, опір яких зростає із збільшенням частоти.*

Одиниці вимірювання індуктивності: Гн (Генрі); мілігенрі (мГн); мікрогенрі (мкГн).

На рисунку 1.2.4 представлені умовні графічні зображення котушок індуктивності.

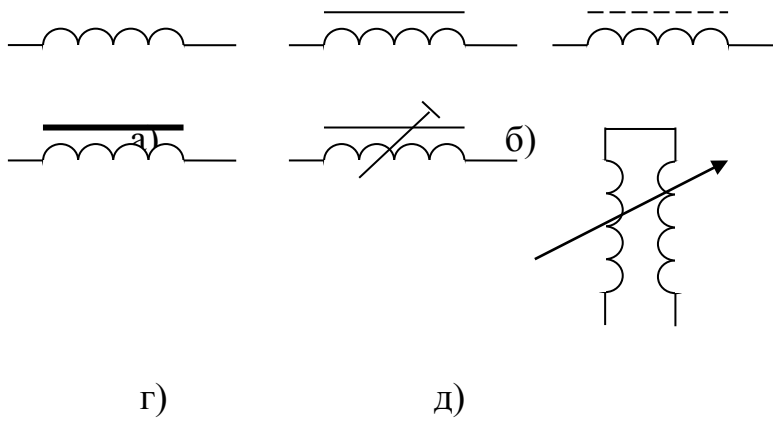


Рис. 1.2.4. УГЗ котушок індуктивності: а) без осердя; б) з осердям із немагнітного матеріалу; в) з магніто діелектричним осердям; г) з феромагнітним осердям; д) з підстроювальною індуктивністю е) варіометр

Трансформатор – це пристрій, який складається із двох пов’язаних між собою котушок індуктивності, які називаються первинною і вторинною обмотками трансформатора. Для вказання початку обмоток використовують крапку.

Мережений трансформатор – трансформатор живлення електронної апаратури, призначений для роботи від мережі змінного струму.

Вихідний трансформатор – служить для узгодження вихідного повного електричного опору каскаду електронної апаратури з повним опором навантаження.

Узгоджувальний трансформатор – служить для узгодження різних повних опорів електричних ланцюгів при передачі електричних сигналів від одного каскаду до іншого.

Імпульсний трансформатор – служить для передачі, формування, перетворення і запам’ятовування імпульсних сигналів.

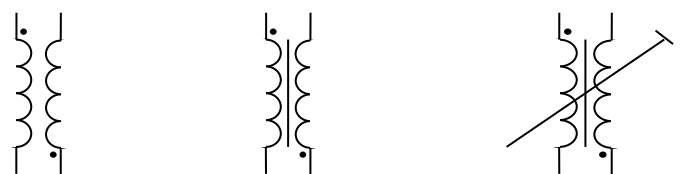
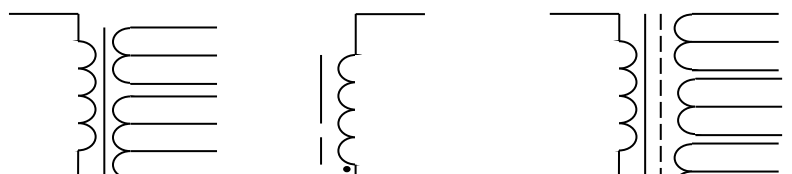


Рис. 1.2.5. УГЗ трансформаторів:
а) без осердя;
б) з осердям;
в) підстроювальний;
г) для роботи в широкій смузі



в)

а)

б)

г)

д)

е)

Трансформатор володіє досить високим коефіцієнтом корисної дії (потужність на його виході майже дорівнює потужності на вході); в зв'язку з цим підвищуючий трансформатор забезпечує ріст напруги при зменшенні струму. Трансформатор з відношенням числа витків обмоток рівним n змінює повний опір в n^2 раз. Якщо вторинна обмотка не навантажена, то в первинній протікає дуже невеликий струм.

В електронних приладах трансформатори виконують дві важливі функції: по-перше, вони перетворюють напругу змінного струму мережі до потрібного, зазвичай більш низького значення, яке можна використати в схемі, і, по-друге, вони „ізолюють” електронну схему від безпосереднього контакту з силовою мережею, так як обмотки трансформатора електрично ізолювані між собою.

На рисунку 1.2.5. представлені умовні графічні зображення деяких видів трансформаторів.

4.4 Коливальні контури

Коливальний контур – найпростіша частотно-залежне коло, яке складається з котушки індуктивності L і конденсатора C .

Для отримання в контурі електричних коливань необхідно спочатку повідомити конденсатору початковий запас енергії, тобто зарядити його. Для цього в схемі (рис. 1.2.6) перемикач SA поставимо в положення 1, внаслідок чого конденсатор C зарядиться до напруги батареї U_m , а в електричному полі між обкладинками конденсатора запасеться енергія

$$W_c = \frac{CU_m^2}{2}$$

(1.2.5)

Якщо тепер поставимо перемикач в положення 2, то конденсатор стане замкненим на котушку і почне розряджатися. Через котушку пройде струм, який створить навколо неї магнітне поле. Напруга на конденсаторі при розряді зменшиться, а струм в котушці поступово буде зростати. Це означає, що енергія, що була накопичена в електричному полі конденсатора, поступово зменшується і перетворюється в енергію магнітного поля котушки. В той момент, коли струм розряду досягне максимального значення, енергія магнітного поля котушки буде дорівнювати

(1.2.6)

В цей момент конденсатор повністю розрядиться і напруга на ньому впаде до нуля. Далі струм в контурі почне зменшуватися, що призведе до зменшення енергії магнітного поля котушки. При цьому за законом Ленца в котушці виникає ЕРС самоіндукції, яка підтримує струм, що зменшується.

Цей струм знову зарядить конденсатор, але полярність напруги на обкладинках виявиться протилежною порівняно з попереднім випадком. В процесі перезарядки конденсатора відбувається перехід енергії магнітного поля котушки в енергію електричного поля конденсатора. В той момент, коли струм впаде до нуля, напруга на конденсаторі досягне початкової

величини. Після цього конденсатор почне розряджатися в протилежному напрямі і процес обміну енергією між конденсатором і котушкою буде повторюватися.

Характер зміни напруги на конденсаторі і струму в контурі ілюструє рис. 1.2.7.

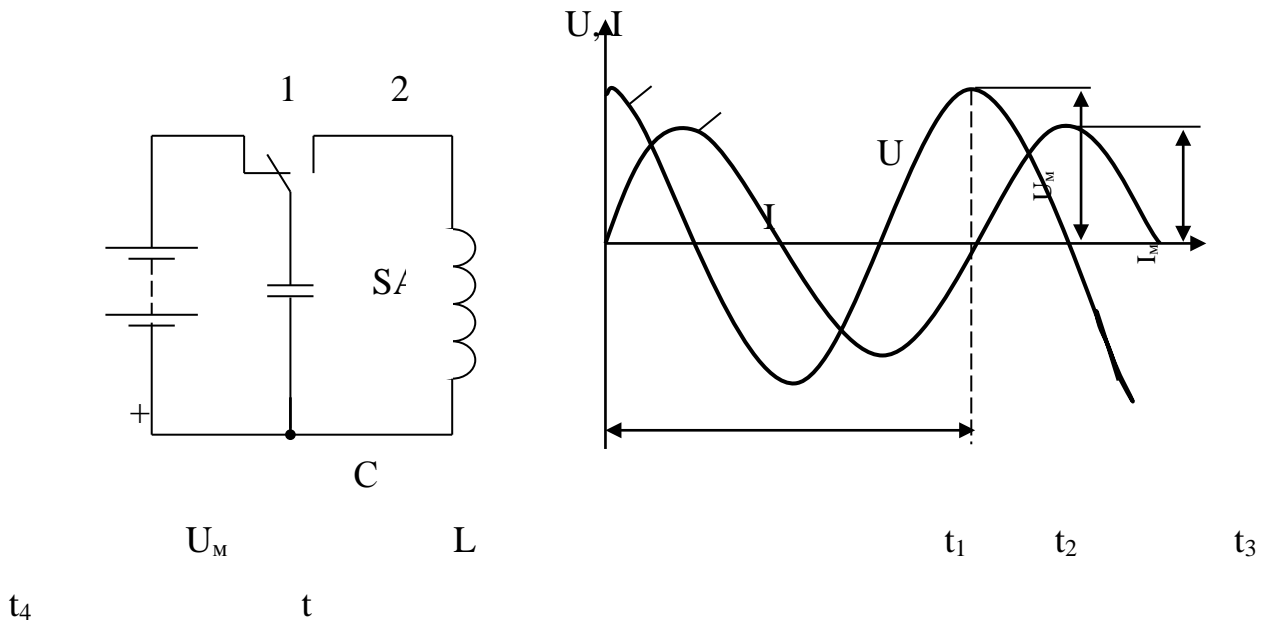


Рис. 1.2.6. Коливальний контур

Рис. 1.2.7. Графіки напруги і струму в контурі

Таким чином, в контурі проходить періодичний коливальний процес переходу енергії електричного поля конденсатора в енергію магнітного поля котушки і навпаки. Такий процес називається *процесом електромагнітних коливань*.

❖ *Коливання, які проходять в контурі при відсутності в ньому джерела змінної ЕРС, називають вільними коливаннями.*

❖ Частоту вільних коливань визначають величини L і C контуру таким чином, що чим більші ємність і індуктивність контуру, тим нижча частота його власних коливань.

Період T_0 вільних коливань (час, на протязі якого здійснюється повний цикл обміну енергією) визначають за формулою

$$(1.2.7) \quad T_0 = \frac{1}{f_0} = 2\pi\sqrt{LC}$$

Число коливань в секунду називають частотою

$$(1.2.8) \quad f_0 = \frac{1}{T_0}$$

Амплітудне значення струму в контурі

$$(1.2.9) \quad I_m = \frac{U_m}{\sqrt{\frac{L}{C}}} = \frac{U_m}{\rho}$$

де $\rho = \frac{U_m}{I_m} = \sqrt{\frac{L}{C}}$ - хвильовий опір контуру.

Кругова частота вільних коливань в контурі

$$(1.2.10) \quad \omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Процес вільних коливань в контурі міг би продовжуватись нескінченно довго, якби контур складався лише із ємності і індуктивності. Практично в будь-якому реальному контурі коливання достатньо швидко затухають, так як при кожному переході енергії із конденсатора в котушку і навпаки частина її витрачається на активний опір провідників, в діелектрику

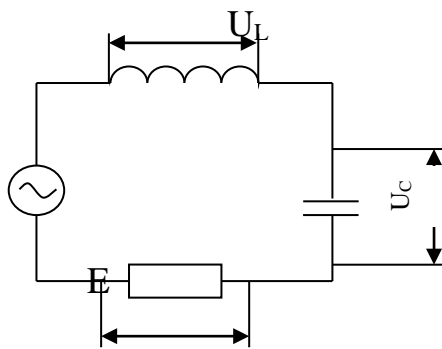
конденсатора, а також в результаті розсіювання електромагнітної енергії в навколишнє середовище. Тому процес вільних коливань в контурі є *затухаючим*.

Якщо контур підключити до генератора змінного струму, то при цьому в контурі будуть виникати незатухаючі коливання, які називаються *вимушеними*, так як їх частота задається частотою зовнішнього генератора.

Генератор змінного струму можна підімкнути до контуру двома способами: послідовно з елементами контуру L, C і R і паралельно їм. В першому випадку контур називають *послідовним*, а в другому – *паралельним*.

Послідовний коливальний контур

Необхідно відмітити, що хоча активний опір втрат R розподілений по всьому контуру, на рис. 1.2.8 він показаний як самостійний зосереджений елемент, до якого віднесені всі втрати енергії.



C

Рис. 1.2.8. Послідовний

коливальний контур

R

U_R

Найбільшому значенню струму в контурі відповідає умова

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}$$

(1.2.11)

В цьому випадку струм в контурі

$$(1.2.12) \quad I_{\max} = \frac{E}{R}$$

Частота генератора, яка відповідає максимальному значенню струму в контурі

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

або

$$(1.2.13)$$

Порівнюючи вирази 1.2.10 і 1.2.13, легко замітити, що частота генератора ω , яка відповідає максимальному значенню струму в контурі, співпадає з частотою власних коливань контуру ω_0 . Це явище називають **резонансом**.

- ❖ При резонансі послідовний контур є для генератора найменшим, чисто активним опором, який дорівнює за величиною опору контуру.
- ❖ При резонансі змінна напруга на конденсаторі і на котушці може в багато раз перевищувати за величиною прикладену до контуру ЕРС.
- ❖ Резонанс в послідовному контурі називають **резонансом напруг**.

Паралельний коливальний контур

Схема підключення генератора до паралельного коливального контуру показана на рис. 1.2.9.

- ❖ Явище в паралельному контурі, при якому струм в нерозгалуженій частині кола має найменше значення, а по фазі співпадає з напругою генератора, називають **резонансом струмів**.
- ❖ В момент резонансу контур виявляє генератору найбільший і при цьому чисто активний за своїм характером опір.

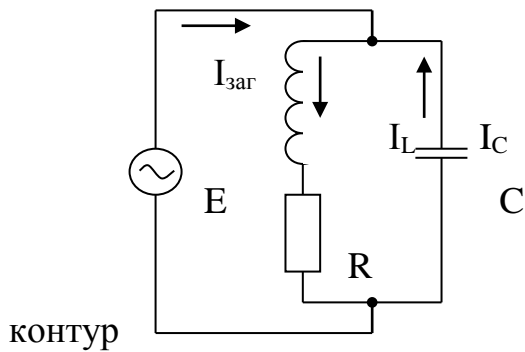


Рис. 1.2.8. Паралельний коливальний

Як і при резонансі напруг, умовою резонансу струмів є рівність $\omega L = \frac{1}{\omega C}$, тобто резонанс струмів спостерігається в коливальному контурі тоді, коли частота генератора дорівнює частоті власних коливань контуру $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$.

- ❖ Резонансний опір паралельного контуру залежить від добротності контуру $Q = \frac{\rho}{R}$: чим вона вища, тим більший резонансний опір.
- ❖ При резонансі в паралельному контурі струм в кожній із його віток наближено в Q раз перевищує струм в нерозгалуженій частині кола.

В електронних схемах явище резонансу струмів використовується дуже часто. Практично в більшості випадків паралельний контур використовують як опір навантаження в вихідному колі підсилювального елемента вибіркового підсилювача. Сам підсилювальний елемент в цьому випадку може розглядатися як генератор, який має визначений внутрішній опір.

4.5 Напівпровідникові резистори

Напівпровідникові резистори являють собою широкий клас напівпровідникових приладів, принцип дії яких базується на властивостях

напівпровідників змінювати свій опір під дією температури, електромагнітного випромінювання, прикладеної напруги та інших факторів.

До найбільш розповсюджених напівпровідникових резисторів відносяться: терморезистори, фоторезистори, варистори.

При вивченні цих приладів необхідно звернути увагу на дві найбільш суттєві особливості їх роботи:

- ❖ *Залежність електричних характеристик і параметрів від дії неелектричних зовнішніх факторів (у терморезисторах і фоторезисторах);*
- ❖ *Явно не лінійність вольт-амперних характеристики (особливо у терморезисторів і варисторів), яка дозволяє реалізувати за допомогою цих приладів досить своєрідні задачі.*

Терморезистори

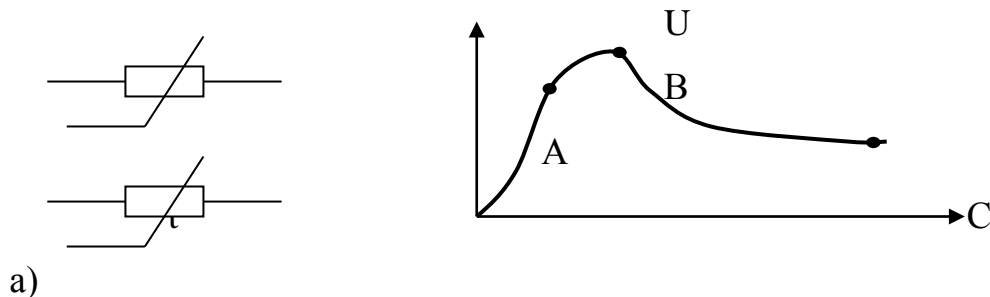
Терморезистори – прилади, опір яких суттєво змінюється при зміні температури.

Форма, габарити і конструктивні особливості сучасних терморезисторів досить різноманітні: їх виконують у вигляді дисків, плоских прямокутників, мініатюрних намистинок та ін.

В залежності від типу напівпровідникового матеріалу та габаритів чуттєвого елемента вихідний опір терморезисторів складає від декількох ом до десятків мегом.

Залежність $U_T = f(I)$ являє собою вольт-амперну характеристику терморезистора (рис.1.2.10) з трьома основними ділянками (ОА, АВ, ВС). На початковій ділянці ОА характеристика лінійна, так як при малих струмах потужність, яка виділяється в терморезисторі мала і практично не впливає на його температуру. На ділянці АВ лінійність характеристики порушується. Зі зростанням струму температура терморезистора підвищується, а його опір (внаслідок збільшення кількості електронів і дірок провідності в матеріалі напівпровідника) зменшується, при подальшому збільшенні струму на ділянці ВС зменшення опору стає настільки значним, що зростання струму

призводить до зменшення напруги на терморезисторі. Наприкінці ділянки ВС вольт-амперна характеристика все більш наближується до горизонтальної лінії, паралельної осі абсцис. Це і дозволяє використовувати деякі типи терморезисторів для стабілізації напруги.



a) t° \cap

I

б)

Рис.1.2.9. Умовні графічні зображення терморезисторів:
а) термістор, б) позистор

Рис.1.2.10. Вольт-амперна характеристика терморезистора

Крім вольт амперної характеристики, дуже важливою характеристикою терморезистора є залежність його опору від температури.

- ❖ Терморезистор, опір якого із збільшенням температури спадає, називається **термістором**.
- ❖ Терморезистор, опір якого із збільшенням температури зростає, називається **позистором**.

Типова температурна характеристика термістора показана на рис. .

Основні параметри терморезисторів:

номінальний (холодний) опір – опір робочого тіла терморезистора при температурі навколишнього середовища 20°C, Ом;

температурний коефіцієнт опору α_T , який відображає в відсотках зміну абсолютної величини опору робочого тіла терморезистора при зміні

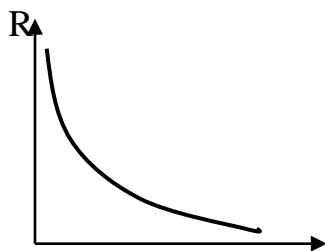
температури на 1°C. Зазвичай значення α_T для будь-якої температури в діапазоні 20-150 °C визначається із співвідношення

$$\alpha_T = -\frac{B}{T^2}, \quad ($$

1.2.14)

де $B = \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1} \ln \frac{R_{T_1}}{R_{T_2}}$ - коефіцієнт температурної чуттєвості, яка залежить

від фізичних властивостей матеріалу, К; T_1 – вихідна температура робочого тіла; T_2 – кінцева температура робочого тіла, для якого визначається значення α_T ; R_{T_1} і R_{T_2} - опори робочого тіла терморезистора при температурах відповідно T_1 і T_2 ;



характеристика термістора

Рис. 1.2.11. Температурна

Т

найбільша потужність розсіювання – потужність, при якій терморезистор, що знаходиться при температурі 20 °C, розігрівається протікаючим струмом до максимальної робочої температури;

максимальна робоча температура – температура, при якій характеристики терморезистора залишаються стабільними тривалий час (на протязі вказаного строку служби);

постійна часу τ – відношення теплоємності C до коефіцієнта розсіювання b ;

теплоємність C – кількість тепла, яке необхідно повідомити терморезистору, щоб підвищити температуру робочого тіла на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, Дж/ $^{\circ}\text{C}$;

коефіцієнт розсіювання – потужність, яка розсіюється терморезистором при різниці температур робочого тіла і навколишнього середовища в $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, Вт/град.

❖ *Термістори мають від'ємний температурний коефіцієнт, а позистори – додатний.*

Фоторезистори

Фоторезистори – прилади, принцип дії яких базується на фоторезистивному ефекті – зміні опору напівпровідникового матеріалу під дією електромагнітного випромінювання.

Фоторезистори виготовляються на основі сульфїду кадмію, селенїду кадмію, сірчастого свинцю, а також полікристалічних шарів сірчастого та селенистого кадмію. Світло чуттєві елементи зазвичай поміщаються в пластмасовий або металевий корпус, а в окремих випадках, коли потрібні малі габарити, випускаються без корпусу. В коло вони вмикаються послідовно із джерелом напруги і опором навантаження.

Якщо резистор знаходиться в темноті, то через нього протікає *темновий струм*. При освітленні фото резистора, його опір спадає і через нього тече *світловий струм*. Різниця між світловим і темновим струмами – *фотострум провідності*.

Основними характеристиками фото резистора є:

вольт-амперна (характеризує залежність фотоструму при постійному світловому потокові або темного струму від прикладеної напруги), (рис.1.2.12,а);

світлова (характеризує залежність фотоструму від падаючого світлового потоку постійного спектрального складу), (рис.1.2.12,б);

спектральна (характеризує чуттєвість фото резистора при дії на нього потоку випромінювання постійної потужності визначеної довжини хвилі; визначається матеріалом, який використовується для виготовлення світлочутливого елементу; сірчато-кадмієві фоторезистори мають високу чуттєвість в видимій області спектру, селенисто-кадмієві – в червоній, а сірчато-свинцеві – в інфрачервоній), (рис.1.2.12, в);

частотна (характеризує чуттєвість фото резистора при дії на нього світлового потоку, який змінюється з визначеною частотою), (рис.1.2.12,г).

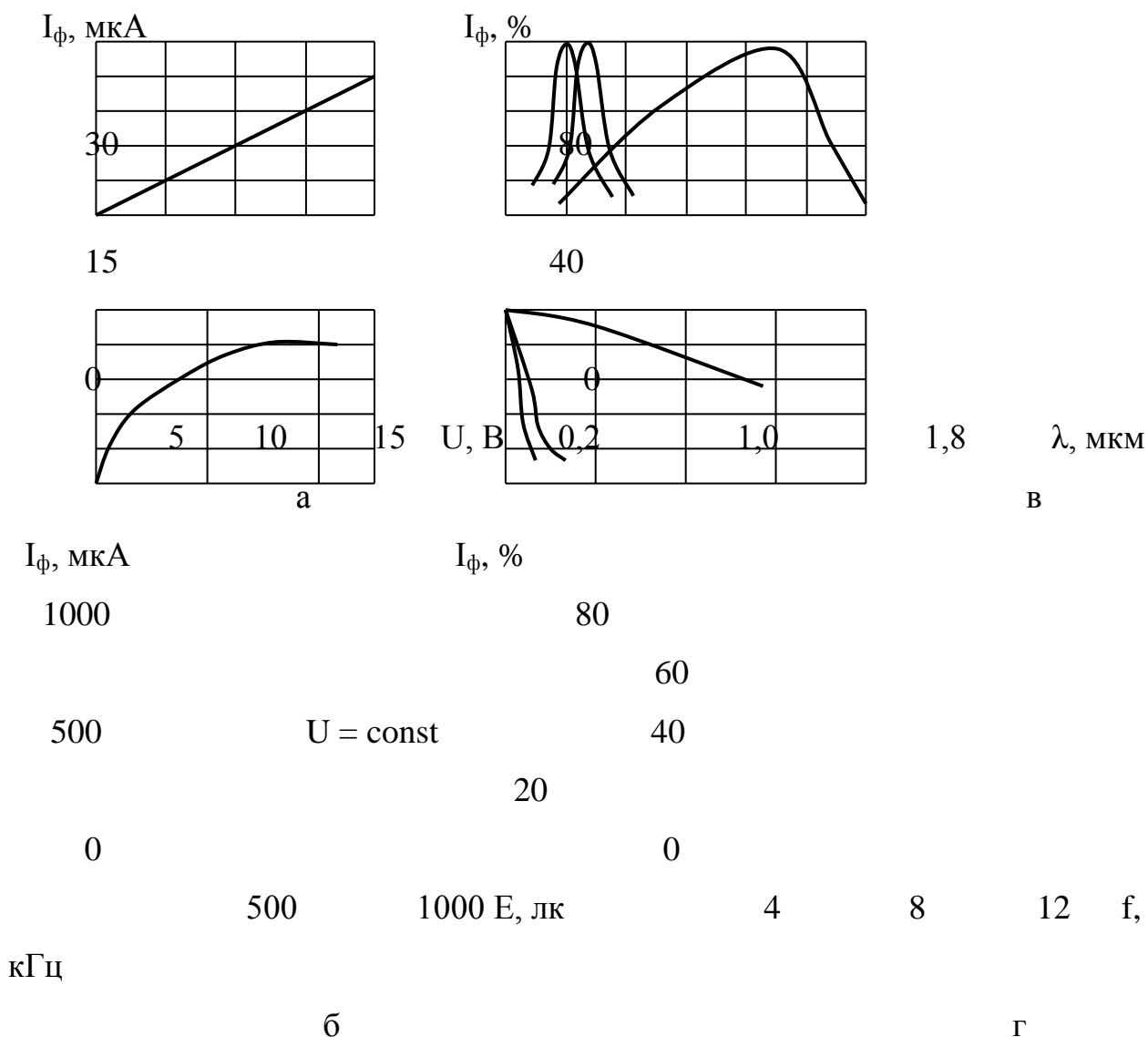


Рис. 1.2.12. Характеристики фото резисторів:

а) вольт-амперна; б) світлова (люкс амперна); в) спектральні; г) частотні

Основні параметри фоторезисторів: Робоча напруга U_p , максимально допустима робоча напруга фото резистора U_{max} , темновий опір R_T , світловий опір R_C , кратність зміни опорів K_R , допустима потужність розсіювання, загальний струм фото резистора, фотострум, питома чуттєвість, інтегральна чуттєвість, постійна часу.

4.6 Варистори

Варистори – прилади, робота яких базується на ефекті зменшення опорів напівпровідникового матеріалу при збільшенні прикладеної напруги.

Так як вольт-амперна характеристика симетрична, варистор може бути використаний в колах і постійного, і змінного струму. Сучасні варистори використовуються в різноманітних електронних схемах: для захисту приладів і елементів схем від перенапруг; стабілізації напруги і струму; регулювання і перетворення електричних сигналів.

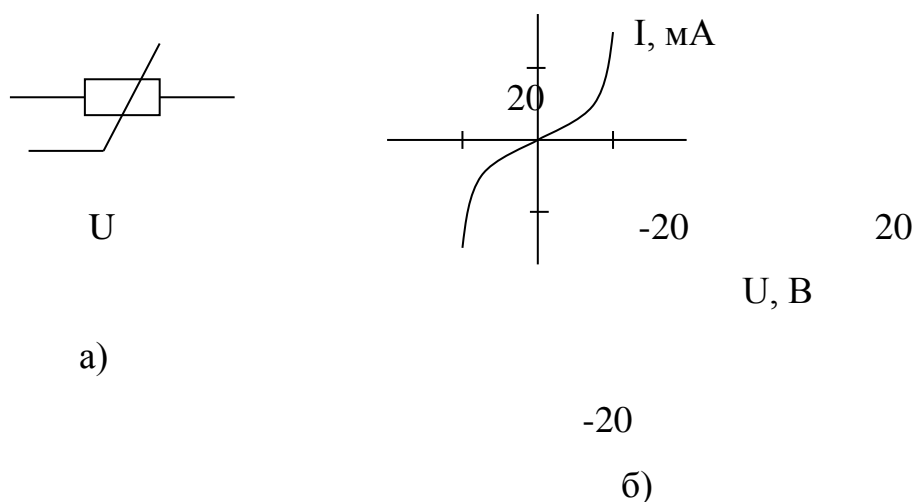


Рис.1.2.13. Умовне графічне зображення варистора (а), вольт-амперна характеристика (б)

Основні параметри варисторів:

статичний опір $R_{ст} = \frac{U}{I}$;

динамічний опір $R_{д} = \frac{\Delta U}{\Delta I}$;

коефіцієнт нелінійності $\beta = \frac{R_{ст}}{R_d} = \frac{\Delta IU}{\Delta UI}$, (для сучасних варисторів

величина β має значення 2...6 в залежності від типу і номінальної напруги варистора;

показник нелінійності $\alpha = \frac{1}{\beta}$;

в широкому діапазоні напруг і струмів вираз для вольт-амперної характеристики варистора може бути представлено у вигляді

$$I = BU^\beta \qquad U = AI^\alpha$$

де А і В – постійні коефіцієнти, пов'язані між собою відношенням

$$B = A^{\frac{1}{\alpha}} = A^{-\beta}$$

класифікаційна напруга, класифікаційний струм, температурний коефіцієнт струму, допустима потужність розсіювання.

Контрольні питання і вправи

1. Користуючись довідником, розшифруйте позначення і проведіть класифікацію вказаних приладів: СФ2-12, ФСК-П1, СН1-3, ТКП-450, СИ6-4Г, СФ3-8, ММТ-6, СТ3-23, СФ2-8, СТ5-1, Т8С2М, КМТ-4, СФ3-5, ТП6/2.

2. Визначіть, яку потужність буде розсіювати в середовище резистор з опором 1 Ом, під'єднаний до батареї автомобіля з напругою 1 В.

3. Візьмемо схему, яка працює від батареї з напругою 15 В. Доведіть, що незалежно від того, як буде ввімкнений в схему резистор, який має опір більше 1 кОм, потужність на ньому не перевищить ¼ Вт.

4. Струм 1 мА заряджає конденсатор ємністю 1 мкФ. Через який час напруга досягне 10 В?

5. Різниця потенціалів між обкладинками конденсатора ємністю 0,1 мкФ змінилася на 175 В. Визначіть зміну заряду конденсатора.

6. Поясніть фізичну суть температурного коефіцієнта опору терморезистора.

7. Визначіть коефіцієнт температурної чуттєвості терморезистора, якщо $T_1 = 290$ К, $T_2 = 310$ К, $R_{T1} = 1$ кОм, $R_{T2} = 200$ Ом.

8. Вкажіть основні особливості позистора.
9. Випишіть із довідника основні технічні параметри фото резисторів типу СФ2-1, СФ2-12, СФ3-8.
10. Розкажіть про застосування варисторів в електронних схемах.

Лекція 5

ТЕМА: НАПІВПРОВІДНИКОВІ ДІОДИ

- 5.1 Випрямні діоди
- 5.2. Високочастотні та імпульсні діоди
- 5.3. Стабілітрони
- 5.4. Варикапи
- 5.5. Тунельні діоди
- 5.6. Фотодіоди
- 5.7. Світло діоди

Напівпровідниковий діод – напівпровідниковий прилад з одним електронно-дірковим переходом і двома електричними виводами: анодом і катодом.

Служать НП діоди в основному для перетворення енергій і рідше – для підсилення електричних сигналів.

- ❖ *Електрод, який під'єднаний до області з p-провідністю називають **анодом**, а електрод, який під'єднаний до області з n- провідністю називають **катодом**.*
- ❖ *Якщо додатній потенціал напруги прикласти до анода, а від'ємний - до катода, то таку напругу називають **прямою**, в протилежному випадку – **зворотною**.*

Як перетворювачі енергій використовуються НП діоди: випрямні, імпульсні, стабілітрони, варикапи та інш.; як підсилювачі електричних сигналів за потужністю використовуються тунельні діоди.

В залежності від методу отримання електронно-діркового переходу НП діоди діляться на два типи: площинні та точкові.

У *точкових* діодів p-n перехід утворюється в місці контакту напівпровідникової пластини з вістря металеві голки (рис.2.2.1, а).

У *площинних* діодів p-n перехід утворюється на межі розділу двох шарів напівпровідника з електропровідністю різних типів (рис. 2.2.1, б)

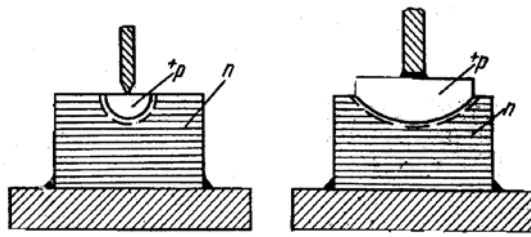


Рис. 2.2.1. Створення р-п переходу у НП діодів: а) точкових, б) площинних

а

б

За матеріалом виготовлення НП діоди бувають: кремнієві, германієві, селенові, з карбїду кремнію, арсенїду галїю тощо.

5.1 Випрямні діоди

Випрямний діод – напівпровідниковий діод призначений для перетворення змінного струму в постійний.

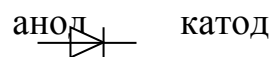
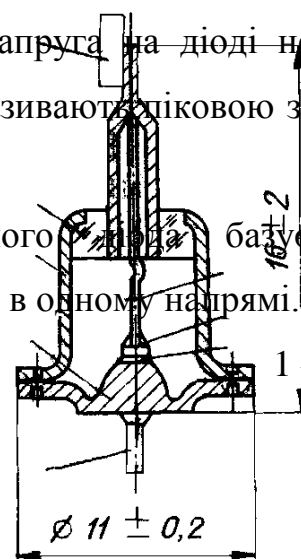


Рис. 2.2.2. Умовне позначення випрямного діоду

На умовному зображенні (рис. 2.2.2) напрям стрілки діода (так позначають анод) співпадає з напрямом струму. Зворотній струм для діодів загального призначення вимірюється в наноамперах і його, як правило, можна не брати до уваги до тих пір, поки напруга на діоді не досягне значення напруги пробоя (цю напругу також називають діковою зворотною напругою).

Робота напівпровідникового випрямного діода базується на властивості р-п переходу пропускати струм лише в одному напрямі.



- 1- зовнішні виводи, 2 – кристалотримач,
- 3 – корпус,
- 4 – скляний ізолятор, 5- алюмінієвий дріт,
- 6 – кристал, 7 - припой

Рис.2.2.3. Будова сплавного малопотужного діода

4

3

5

2

6

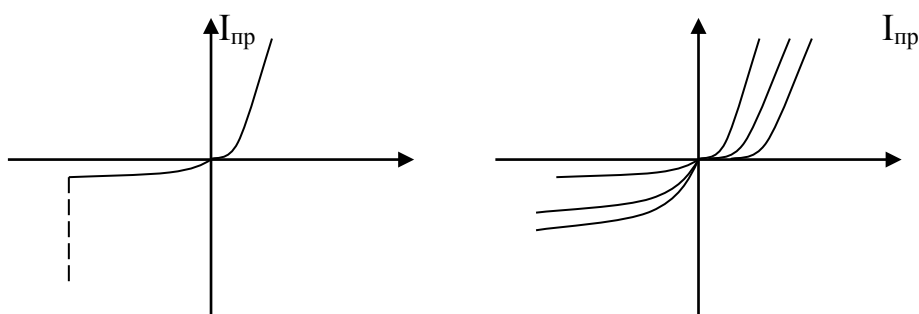
7

1

Вольт-амперна характеристика (ВАХ) випрямного діода показує залежність струму, що протікає через діод, від значення і полярності прикладеної до нього напруги (рис. 2.2.4).

❖ Чим крутіша і ближча до вертикальної осі пряма вітка ВАХ і і ближче до горизонтальної осі зворотна вітка, тим кращі випрямні властивості діода.

Нормальна робота діода в якості елемента з односторонньою провідністю можлива лише в режимах, коли обернена напруга не перевищує пробивної. Найчастіше падіння напруги на діоді, обумовлене прямим струмом через нього, складає від 0,5 до 0,8 В. Таким падінням напруги можна знехтувати, і тоді діод можна розглядати як провідник, який пропускає струм лише в одному напрямі.



$U_{зв}$ $U_{пр} \quad U_{зв}$ $U_{пр}$ $I_{зв}$ $I_{зв}$

Рис. 2.2.4. ВАХ випрямного діода

Рис. 2.2.5. Вплив температури на ВАХ випрямного діода:

- 1 - при підвищеній температурі
- 2 – при нормальній температурі
- 3 – при пониженій температурі

Слід відмітити два моменти:

- ❖ діод не підчиняється закону Ома;
- ❖ схему, яка містить діоди, не можна замінити еквівалентною.

Струми діодів залежать від температури (рис. 2.2.5). якщо через діод протікає прямий струм, то при зміні температури падіння напруги змінюється приблизно на 2 мВ/°С. При збільшенні температури зворотний струм збільшується у 2 рази у германієвих і в 2,5 – у кремнієвих на кожні 10°С.

В залежності від максимально допустимого середнього значення прямого струму випрямні діоди діляться на діоди малої (для випрямлення струмів до 300 мА), середньої (для випрямлення струмів від 300 мА до 10 А), великої (для випрямлення струмів від 10 А до 1000 А) потужності.

Промисловістю випускаються германієві і кремнієві діоди. Переваги кремнієвих діодів: малі зворотні струми, можливість використання при більш високих температурах навколишнього середовища і великих зворотних напругах; переваги германієвих діодів: мале падіння напруги при пропусканні прямого струму (0,3-0,6 В у германієвих порівняно з 0,8-1,2 В у кремнієвих).

Максимальна зворотна допустима напруга малопотужних випрямних діодів лежить в діапазоні від десятків вольт до 1200 В. На більш високі

напруги промисловістю випускаються випрямні стовпи, які використовують послідовне з'єднання діодів (рис. 2.2.6).

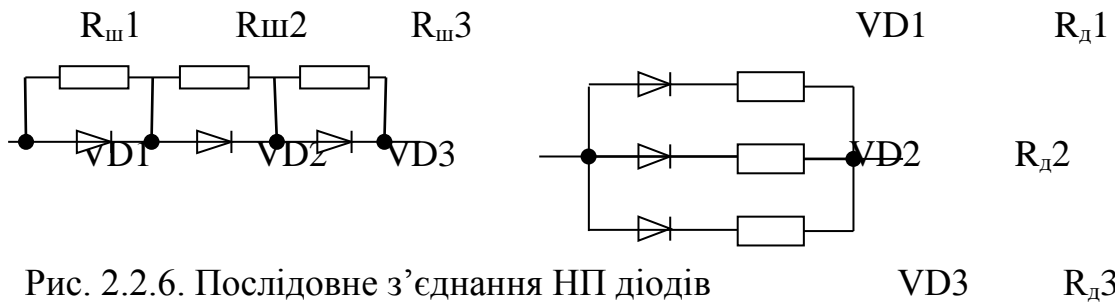


Рис. 2.2.6. Послідовне з'єднання НП діодів

Рис. 2.2.7. Паралельне

з'єднання випрямних діодів

При послідовному з'єднанні діоди шунтуються резисторами однакового опору для того, щоб зрівняти падіння зворотних напруг на діодах послідовного ланцюга. Опір шунтуючого резистора вибирається великим, щоб виключити великі втрати потужності на ньому.

Паралельне ввімкнення випрямних діодів (рис. 2.2.7) виконується для збільшення допустимих значень випрямленого струму. Оскільки із-за технологічних відхилень є значний розкид значень прямих опорів переходів, то, вставивши в кожен із паралельних гілок по одному додатковому резистору R_d , можна зрівноважити прямі струми в паралельних вітках.

До основних стандартизованих параметрів випрямних діодів відносять: середній прямий струм $I_{пр.ср}$, максимально допустимий середній прямий струм $I_{пр.ср. Макс}$, середній випрямлений струм $I_{вп.ср}$, максимально допустимий середній випрямлений струм $I_{вп.ср. Макс}$, постійна пряма напруга $U_{пр}$, середня пряма напруга $U_{пр.ср}$, постійна зворотна напруга $U_{зв}$, максимально допустима постійна зворотна напруга $U_{зв.макс}$, максимально допустима імпульсна зворотна напруга $U_{зв.і.макс}$, постійний зворотний струм $I_{зв}$, середній зворотний струм $I_{зв.ср}$.

5.2. Високочастотні та імпульсні діоди

Високочастотні діоди – прилади універсального призначення: вони можуть бути використані для випрямлення, детектування та інших нелінійних перетворювань електричних сигналів в діапазоні частот до 600 МГц.

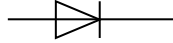
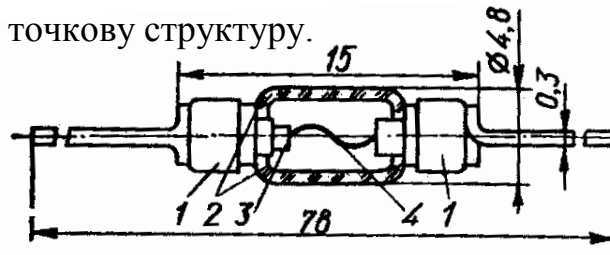


Рис. 2.2.8. Умовне графічне зображення високочастотного та імпульсного діодів

Високочастотні діоди виготовляються, як правило, із германію або кремнію і мають точкову структуру.



- 1 – виводи, 2 – скляний балон, 3 – кристал германію,
4 – електрод із вольфрамового дроту

Рис.2.2.9. Конструкція точкового високочастотного діода

Ємність р-п переходу $C > 1$ пФ, що забезпечує їх високу ефективність на високих частотах.

Високочастотні діоди можуть використовуватись в схемах детектування, в якості обмежувачів, нелінійних опорів, комутаційних елементів і т.п.

До високочастотних діодів належать діоди Шоттки. На відміну від звичайних точкових діодів, у яких контакт здійснюється притиском металевої голки, у діодів Шоттки контакт являє собою тонку плівку металу (золото, нікель, алюміній, платина, вольфрам, молібден, ванадій та ін.). У таких діодів бар'єрна ємність не перевищує 0,01 пФ, робочий діапазон $f = 5 \dots 250$ ГГц, тривалість перемикання становить $\tau_{тр} \leq 1$ нс, зворотні струми не перевищують декількох міліампер, а зворотні напруги знаходяться в інтервалі 10...1000 В.

Імпульсні діоди призначені для роботи в швидкодійних імпульсних схемах з часом перемикання 1 мкс та менше.

Під дією вхідного імпульсу додатної полярності (рис. 2.2.10, а) через діод протікає прямий струм, величина якого визначається амплітудою імпульсу, опором навантаження і опором відкритого діода. Якщо на діод, через який протікає прямий струм, подати зворотну напругу так, щоб його закрити, то діод закривається не миттєво (рис.2.2.10, б).

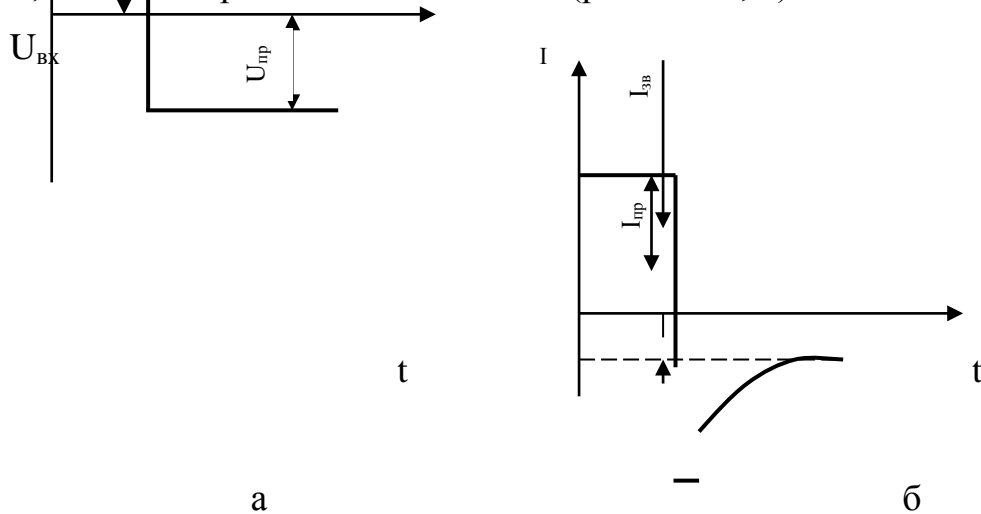


Рис. 2.2.10 . Осцилограми вхідної напруги (а) і струму (б) імпульсного діода

Основною характеристикою імпульсних діодів є *перехідна характеристика* (рис.2.2.10, б). Вона відображує процес відновлення зворотного струму і зворотної напруги діода при дії на нього імпульсної напруги зворотної полярності.

Основні параметри імпульсних діодів: час відновлення зворотної напруги τ_v , заряд перемикання $Q_{пм}$, загальна ємність C_d , імпульсна пряма напруга $U_{пр.і}$, імпульсний прямий струм $I_{пр.і}$.

5.3 Стабілітрони

Стабілітрони – площинні кремнієві діоди, які працюють на зворотній вітці вольт-амперної характеристики р-n переходу.

При ввімкненні їх в зворотному напрямку і при визначеній напрузі на переході останній „пробивається” і, не дивлячись на збільшення струму через р-n перехід, напруга не змінюється.

Стабілітрони призначені для стабілізації рівня напруги пр зміні струму, що протікає через діод.



Рис. 2.2.11. Умовні графічні зображення стабілітронів:

а) звичайного, б) двостороннього

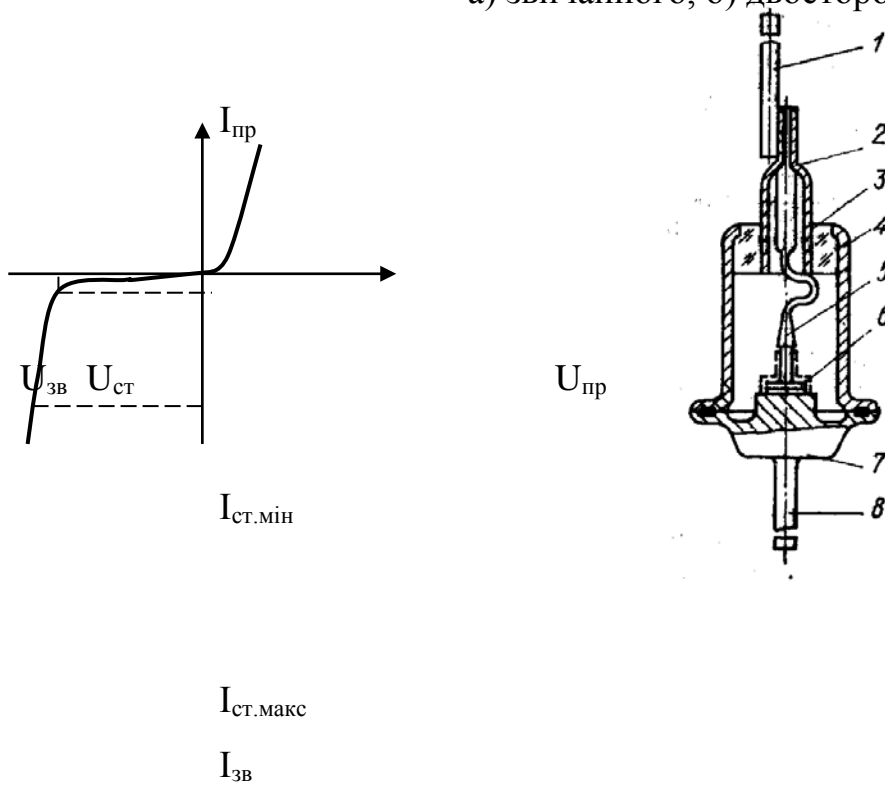


Рис. 2.2.12. Вольт-амперна характеристика стабілітрона

1, 8 – зовнішні виводи, 2 – трубка, 3 – ізолятор,

4 – корпус, 5 – внутрішній вивід, 6 – кристал з переходом, 7 – кристалотримач

Рис.2.2.13.

Конструкція кремнієвого стабілітрона

В стабілітроні робочою є пробійна частина ВАХ в області зворотних напруг. Оскільки електричний пробій настає при порівняно низькій зворотній напрузі, потужність, що виділяється в р-n переході, навіть при значних зворотних струмах буде невеликою, що застерігає р-n перехід від теплового пробою.

Підвищення гранично допустимого зворотного струму стабілітрона призводить до виходу пристрою з ладу.

Основні параметри:

напруга стабілізації U_{CT} – напруга на стабілітроні в області стабілізації при номінальному значенні струму;

можливий розкид напруги стабілізації від номінального значення $U_{CT.ном}$;

диференційний опір стабілітрона r_{CT} – відношення приросту напруги стабілізації до приросту струму в заданому діапазоні частот

$$r_{CT} = \frac{\Delta U_{CT}}{\Delta I_{CT}} ; \quad (2.2.1)$$

температурний коефіцієнт напруги стабілізації α_{CT}

$$\alpha_{CT} = \frac{\Delta U_{CT}}{U_{CT}} \cdot \frac{100}{\Delta T} (\%/^{\circ}C) \quad (2.2.2)$$

Для стабілітронів з напругою до 5 В - $\alpha_{CT} < 0$, вище - $\alpha_{CT} > 0$.

5.4 Варикапи

Варикапи – напівпровідникові діоди спеціальної конструкції, ємність яких можна змінювати в значних межах.



Рис. 2.2.14. Умовне графічне зображення варикапа

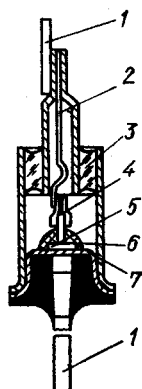
Із збільшенням зворотної напруги ємність р-п переходу зменшується за законом

$$C_d = C_0 \left(\frac{\varphi_k}{\varphi_k + U} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (2.2.3)$$

- де C_d – ємність діода при зворотній напрузі U ;
- C_0 – ємність діода при нульовій зворотній напрузі;
- φ_k – контактний потенціал (десяті частини вольт);
- n – коефіцієнт, що залежить від типу варикапа, $n=2 \dots 3$.

|| ❖ *Варикап, призначений для множення частоти сигналу – варактор.*

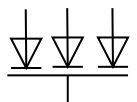
Варикапи використовують в пристроях автопідрегулювання частоти, генераторах і т.д.



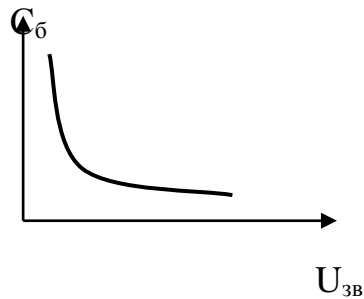
1 – вивід, 2 – внутрішній вивід, 3- балон, 4 – алюмінієвий стовпчик, 5 – кристал кремнію, 6 – омичний контакт, 7 – позолочений кристалотримач

Рис.2.2.15. Конструкція варикапа

Як і конденсатори змінної ємності варикапи часто виготовляють у вигляді блоків (матриць) із спільним катодом і роздільними анодами



Основна характеристика варикапа – залежність його ємності від величини зворотної напруги (рис. 2.2.16)



Основні параметри:

номінальна ємність C_n – ємність між виводами варикапа при номінальній напрузі зміщення ($U_{zm} = 4 \text{ В}$);

максимальна ємність $C_{\text{макс}}$ – ємність варикапа при заданій напрузі зміщення;

мінімальна ємність $C_{\text{мін}}$ – ємність при максимальній напрузі зміщення;

Рис. 2.2.16. Вольт-фарадна характеристика варикапа

коефіцієнт перекриття K_c

$$K_c = \frac{C_{\text{макс}}}{C_{\text{мін}}} ; \quad (2.2.4)$$

добротність Q – відношення реактивного опору до повного опору втрат, виміряне на номінальній частоті при температурі 20°C ;

температурний коефіцієнт ємності (ТКС)

$$\text{ТКС} = \frac{\Delta C}{\Delta T} ; \quad (2.2.5)$$

максимальна допустима потужність.

6.5. Тунельні діоди

В 1857 році японський вчений Ясаки побачив, що при збільшенні концентрації домішок до $10^9 - 10^{20} \text{ см}^{-3}$, спостерігаються аномалії.

Принцип роботи тунельного діоду базується на тунельному ефекті.

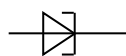


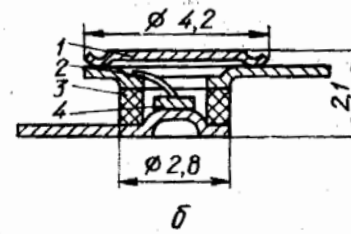
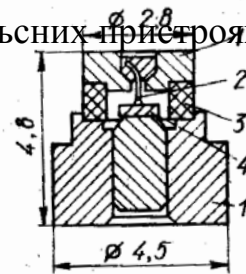
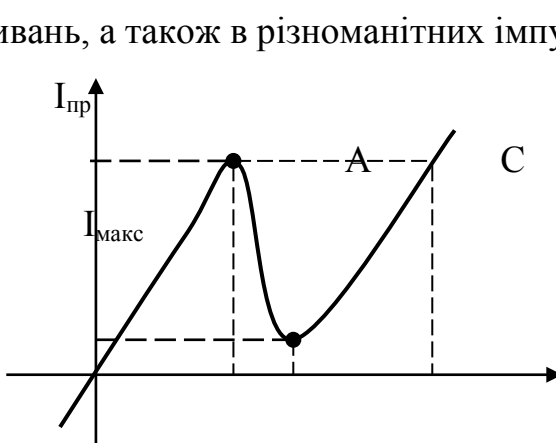
Рис. 2.2.17. Умовне графічне зображення тунельного

діода

Вольт-амперна характеристика тунельного діода містить ділянку з від'ємним диференціальним опором $R_{диф} = \frac{\Delta U}{\Delta I}$

(2.2.6)

що дозволяє використовувати діод в підсилювачах і генераторах електричних коливань, а також в різноманітних імпульсних пристроях.



В а
 $I_{пр}$
 $I_{макс}$
 $I_{мін}$
 $U_{зв}$
 $U_{пр}$
 1–виводи, 2–
 контактний дротик, 3–керамічна
 Б U_1 U_2 U_3
 втулка, 4–кристал напівпровідника
 $I_{зв}$

Рис. 2.2.18. Вольт-амперна характеристика тунельних діодів тунельного діода

Рис.2.2.19. Конструкція

Якість діода визначають протяжність і крутизна падаючої ділянки АВ вольт-амперної характеристики (рис. 2.2.18).

Основні параметри: піковий струм $I_{п}$, струм впадини $I_{вп}$, напруга піка $U_{п}$, напруга впадини $U_{в}$, напруга розтвору $U_{р}$ (сумарна напруга на другій

гілці, яка підіймається при $I_{\text{п}}$), *ємність діода* $C_{\text{д}}$ (сумарна ємність переходу і корпусу діода при заданій напрузі зміщення).

За призначенням тунельні діоди діляться на: підсилювальні, генераторні, перемикаючі.

5.6 Фотодіоди

Фотодіод – фотогальванічний приймач випромінювання без внутрішнього підсилення, фоточуттєвий елемент якого містить структуру напівпровідникового діода. Характеризуються малими масою та розмірами, великим строком служби, назькою напругою живлення, економічністю та високою чуттєвістю.

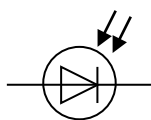
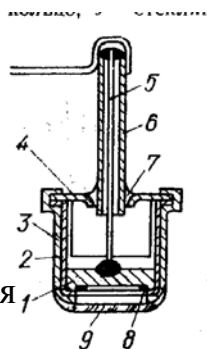


Рис. 2.2.20. Умовне графічне зображення фотодіода



- 1 – кристал германію з р-п переходом,
- 2 – кристалотримач, 3 – металевий корпус,
- 4 – кільце, 5 – вивід, 6 – металева трубка,
- 7 – скляний ізолятор, 8 – олов'яне кільце,
- 9 – скляне вікно

Рис.2.2.21. Конструкція фотодіода

Фотодіод виконаний так, що його р-п перехід однією стороною звернений до скляного вікна, через яке поступає світло, і захищений від дії світла з інших сторін.

Підключається фотодіод на зворотні напруги. Коли діод не освітлений, в колі проходить зворотний струм (темновий) невеликої величини (10-20 мкА для германієвих і 1-2 мкА для кремнієвих діодів).

При освітленні фотодіода з'являється додаткова кількість електронів і дірок, внаслідок чого збільшується перехід неосновних носіїв зарядів, що призводить до збільшення струму в колі.

Фотодіод можна вмикати в схеми:

- ❖ з зовнішнім джерелом живлення (фотодіодний режим)

❖ без зовнішнього джерела живлення (вентильний режим)

Основні характеристики фотодіода (рис. 2.2.22).

Вольтамперна характеристика визначає залежність струму фотодіода від напруги на ньому при постійній величині світлового потоку (рис. 2.2.22, а): $I_d = f(U_d)$ при $\Phi = \text{const}$. Характерною особливістю робочої області вольт-амперних характеристик є практично повна незалежність струму фотодіода від прикладеної напруги. Такий режим настає при зворотніх напругах на діоді біля 1 В.

Світлова характеристика зображує залежність струму фотодіода від величини світлового потоку при постійній напрузі на фотодіоді: $I_d = f(\Phi)$ при $U_d = \text{const}$ (рис. 2.2.22, б).

Спектральна характеристика показує залежність спектральної чуттєвості від довжини хвилі падаючого на фотодіод світла.

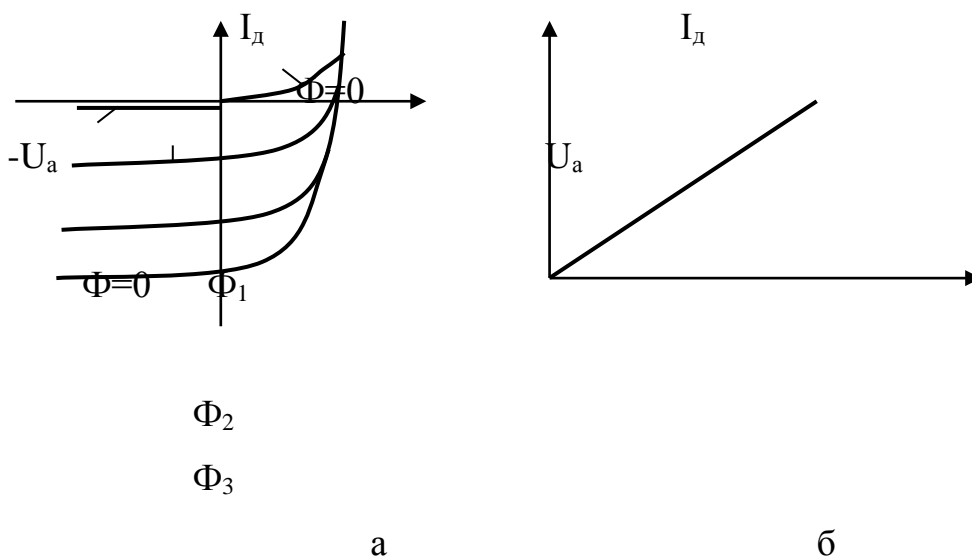
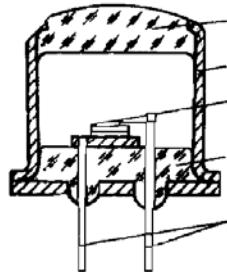
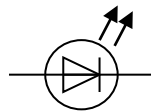


Рис. 2.2.22 . Характеристики фотодіода: а - вольтамперна, б - світлова

Параметри фотодіодів: *інтегральна чуттєвість S_{INT} , робоча напруга U_p , темновий струм I_T , довговічність.*

6.7 Світлодіоди

Світлодіод – випромінюючий напівпровідниковий прилад з одним електронно-дірковим переходом, призначений для безпосереднього перетворення електричної енергії в енергію некогерентного світлового випромінювання.



1
 1 – лінза, 2 – коваровий балон, 3 – напівпровідникова пластина з р-п переходом, 4 – ніжка, 5 – виводи

Рис. 2.2.24. Будова світлодіода

2.2.23. Умовне графічне зображення світлодіода

4

5

В залежності від ширини забороненої зони напівпровідника і особливостей рекомбінації носіїв заряду випромінювання може лежати в інфрачервоній, видимій або ультрафіолетовій частинах спектру. Найбільше розповсюдження отримали світлодіоди, які випромінюють жовте, червоне і зелене світло. Створені також зразки світлодіодів із світлом, що перебудовується.

Конструкція типового світлодіода, який використовується в якості джерела випромінювання, показана на рис. 2.2.24. Кристал напівпровідника з відповідними виводами поміщують в коваровий або керамічний балон, верхня частина якого закінчується скляною (або із епоксидної смоли) лінзою. За допомогою лінзи випромінювання набуває заданий напрямок.

Основні параметри: *яскравість свічення діода* V (кд/м²) при *максимально допустимому прямому струмі* $I_{пр.мах}$, мА, *постійна пряма напруга* $U_{пр}$, *повна потужність випромінювання* $P_{повн}$, *максимально допустима зворотна напруга* $U_{зв.мах}$, *ширина діаграми направленості світлового випромінювання.*

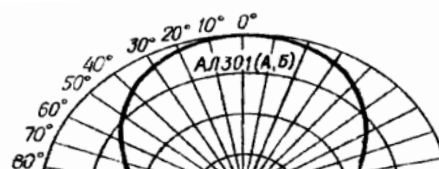
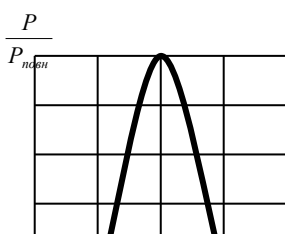




Рис. 2.2.25 Характеристики світлодіода: а) спектральна, б) направленості

Основні характеристики світлодіодів – *спектральна* (залежність відносної потужності випромінювання $\frac{P}{P_{повн}}$ від довжини хвилі, що випромінюється, при визначеній температурі середовища) і *характеристика направленості* (визначає величину інтенсивності світлового випромінювання в залежності від напрямку випромінювання).

5.8 Маркування діодів

- ❖ Для маркування діодів використовуються шість символів без будь-яких розділових знаків.

Перший елемент характеризує вихідний матеріал, з якого виготовлено прилад, позначається буквою:

К - кремній, або його з'єднання; **Г** – германій, або його з'єднання;
А – з'єднання галію.

Для приладів, які використовуються в пристроях спеціального призначення, встановлені наступні позначення, де буквам відповідають

цифри: К – 1, Г – 2, А – 3.

Другий елемент характеризує клас приладу, позначається буквою:

Д – діоди випрямні, універсальні, імпульсні;

Ц – випрямні стовпи і блоки;

А – діоди зверхвисокочастотні;

В – варикапи;

И – тунельні діоди;

Л – світлодіоди;

Г – генератори шуму,

Б – прилади з об'ємним ефектом,

К – стабілізатори струму,

С – стабілітрони і стабістори.

Третій елемент характеризує призначення приладу, позначається цифрою.

Четвертий і п'ятий елементи позначають порядковий номер розробки технологічного типу приладу, позначаються цифрами від 01 до 99.

Шостий елемент позначає ділення технологічного типу на параметричні групи, позначається буквою від А до Я.

Для стабілітронів маркування, починаючи з третього елемента, відрізняється:

Третій елемент визначає індекс потужності (цифра); *четвертий і п'ятий* – кодоване позначення мінімальної напруги стабілізації (цифри), *шостий* – послідовність розробки (буква).

Контрольні питання і вправи

1. Користуючись довідником, розшифруйте позначення таких типів напівпровідникових діодів:
1А401Б, КЛ104А, 2С447А, 2Д910В, АЛ102Г, 1И403А, 2В104Г,
ГА501Ж, ГД507А, АИ201И, КЦ403Г, ФД-1.
2. Назвіть схеми ввімкнення випрямних діодів.

3. Чи можуть кремнієві стабілітрони працювати в режимі теплового пробою?
4. Якими параметрами характеризуються стабілітрони?
5. Поясніть фізичну суть основних параметрів кремнієвих стабілітронів.
6. Які вимоги ставляться до високочастотних діодів?
7. Якими параметрами характеризуються імпульсні діоди?
8. Яка основна характеристика варикапа?
9. В яких електронних схемах використовуються тунельні діоди?
10. Чи можна використовувати властивості тунельного діода, якщо до нього підведена пряма напруга?
11. Вкажіть можливості практичного застосування світлодіодів.
12. Для забезпечення безаварійної роботи пристрою необхідно вибрати діод, умови роботи якого: прямий струм $I_{пр} = 10 \text{ А}$; напруга, що прикладається до діода $U_{зв} = 160 \text{ В}$.
13. Складіть перелік ключових слів до теми „Напівпровідникові діоди”.

Лекція 6

Тема ТРАНЗИСТОРИ. ТИРИСТОРИ (1 ЧАСТИНА)

- 6.1. Класифікація транзисторів
- 6.2. Будова та принцип роботи біполярних транзисторів
- 6.3. Схеми ввімкнення транзисторів
- 6.4. Еквівалентна схема заміщення, h -параметри транзистора
- 6.5. Температурні і частотні властивості транзистора

6.1 Класифікація транзисторів

Транзистор – електроперетворюючий напівпровідниковий прилад з одним або декількома електронними переходами, трьома або більше виводами, придатний для підсилення потужності.

Електронна промисловість випускає широкий асортимент транзисторів, застосування яких дозволяє створити економічну з живленням, малогабаритну і надійну апаратуру.

Найбільш розповсюджені транзистори мають два р-п переходи. В них використовуються носії зарядів обох полярностей. Такі транзистори називають *біполярними*. Особливу групу складають *польові*, або каналні, транзистори, які часто називають уніполярними, а також *одно перехідні* транзистори (двобазові діоди).

Специфічні функції в сучасній електронній апаратурі виконує фото транзистор, який поряд з перетворенням світлового сигналу в електричний здатен підсилити останній за потужністю.

Класифікують транзистори за вихідним матеріалом, потужності розсіювання, діапазону робочих частот, принципу дії і т.п. в залежності від вихідного матеріалу їх ділять на дві групи: германієві і кремнієві. Германієві транзистори працюють в інтервалі температур від -60 до $+78...85^{\circ}\text{C}$, кремнієві – від -60 до $+120...150^{\circ}\text{C}$. за діапазоном робочих частот їх ділять на транзистори низьких, середніх і високих частот, за потужністю – на класи

транзисторів малої, середньої і великої потужності. Транзистори малої потужності ділять на шість груп: підсилювачі низьких і високих частот, малошумні підсилювачі, перемикачі насичені, ненасичені і малоструміві; транзистори великої потужності – на три групи: підсилювачі, генератори, перемикачі. За технологічною ознакою розрізняють транзистори сплавні, сплавно-дифузні, дифузно-сплавні, планарні, епітаксильні, конверсійні, епітаксильно-планарні.

Маркування транзисторів

1 елемент – вихідний матеріал:

Г – германій або його з'єднання;

К – кремній або його з'єднання;

А – з'єднання галію.

2 елемент – підклас приладу:

Т – біполярний;

П – польовий.

3 елемент – призначення приладу.

4-5 елементи – порядковий номер розробки.

6 елемент – ділення технологічного типу на параметричні групи (від А до Я).

Приклад: 2П303А – польовий транзистор, призначений для пристроїв спеціального застосування, кремнієвий, малої потужності, високочастотний, номер розробки 03, група А.

6.2 Будова та принцип роботи біполярних транзисторів

Біполярний транзистор – електроперетворювальний напівпровідниковий прилад, що має чотиришарову структуру, два р-п переходи, три виводи та призначений для підсилення потужності.

❖ *Транзистор називається біполярним, тому що в його роботі використовуються носії обох полярностей (електрони і дірки).*

❖ Виводи транзистора названо у відповідності до напівпровідникових шарів: емітер, база, колектор.

Біполярний транзистор має два р-п переходи: один з них з'єднує базу з емітером (емітерний перехід), другий – базу з колектором (колекторний перехід).

❖ Про електропровідність бази судять за символом емітера: якщо стрілка направлено до бази, то емітер має провідність типу р, а база – n тип (транзистор р-п-р), і навпаки.

Роботу біполярного транзистора розглянемо на основі транзистора типу р-п-р.

Концентрація носіїв в базі значно менша ніж в емітері. Це призводить до того, що число дірок, інжектованих із емітера в базу, у багато раз перевищує кількість електронів, які рухаються в протилежному напрямку.

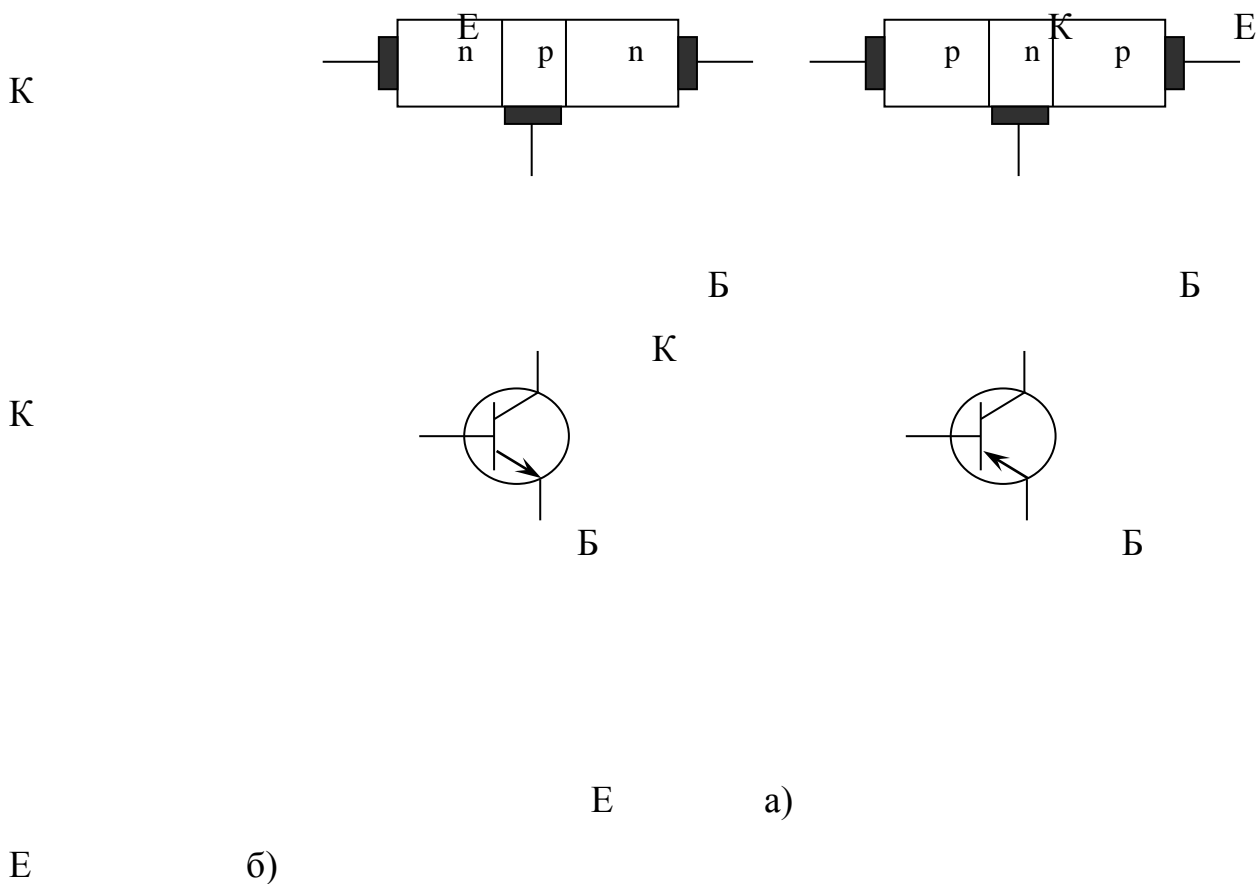


Рис. 2.3.1. Тришарові структури та умовні графічні зображення біполярних транзисторів:

а) n-p-n типу; б) p-n-p типу

Ефективність емітера оцінюється коефіцієнтом інжекції γ

$$I_E = I_{Ep} + I_{En} \quad (2.3.1)$$

Для транзистора типу p-n-p

$$\gamma = \frac{I_{Ep}}{I_{En}} = \frac{I_{Ep}}{I_{Ep} + I_{En}} = 1 + \frac{I_{Ep}}{I_{En}} \quad (2.3.2)$$

Дірки із емітерної області через емітерний перехід попадають в базу Б, ширина бази незначна, тому частина дірок рекомбінують з електронами бази, а основна маса переходить через колекторний перехід. Підходячи до колектора, дірки починають відчувати дію електричного поля колекторного переходу. Це поле для дірок є прискорюючим, тому вони швидко втягуються із бази в колектор і беруть участь у створенні *струму колектора* I_K ($I_K < I_E$). Ті дірки, які рекомбінують в області бази з електронами, беруть участь у створенні *струму бази* I_B

(2.3.3)

$$I_E = I_B + I_K \quad (2.3.4)$$

❖ *Хоч електрони і дірки рухаються в різних напрямках, струми в колах транзистора проходять в одному напрямі, який співпадає з напрямком руху дірок.*

В залежності від полярності напруг, прикладених до емітерного і колекторного переходів транзистора, розрізняють чотири режими його роботи:

1) **активний** режим (на емітерний перехід подана пряма напруга, а на колекторний – зворотна, це основний режим роботи транзистора; так як $U_K \gg U_T$, то струми в колах емітера і колектора майже рівні);

2) режим *відсічки* (до обох переходів відводять зворотну напругу, тому через них проходить лише зворотний струм – практично транзистор в режимі відсічки є закритим);

3) режим *насищення* (до обох переходів підводять пряму напругу, струм через них буде максимальним і транзистор буде повністю відкритим);

4) *інверсний* режим (до емітерного переходу підводиться зворотна напруга, а до колекторного – пряма; цей режим не відповідає нормальним умовам експлуатації транзистора).

Основні експлуатаційні параметри транзистора

Максимально допустима потужність $P_{K,max}$ яка розсіюється колектором, - це потужність струму колектора, яка перетворюється в тепло і безкорисно витрачається на нагрівання транзистора. При недостатньому тепло відведенні розігрів колекторного переходу може призвести до різкого збільшення струму I_K . Це в свою чергу призводить до зростання потужності, яка розсіюється на колекторі, і ще до більшого нагрівання колекторного переходу. Процес набуває лавиноподібного характеру, і транзистор безповоротно виходить з ладу.

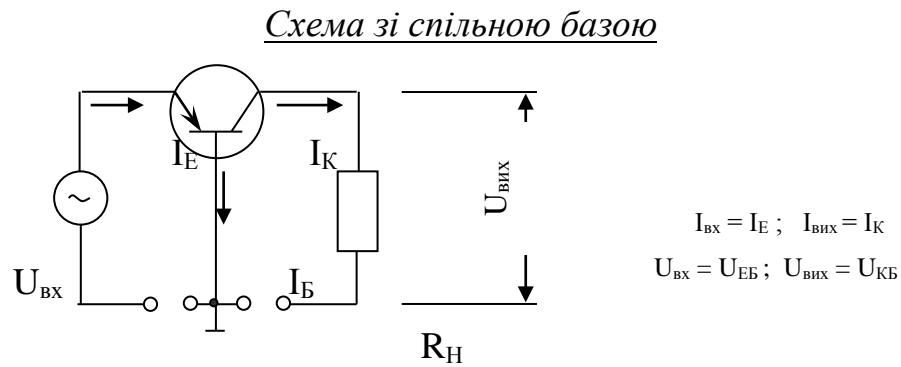
Максимально допустимий струм колектора $I_{K,max}$ обмежується максимально допустимою потужністю, яка розсіюється колектором. Перевищення граничного значення струму колектора призводить до теплового пробую колекторного переходу і виходу транзистора з ладу.

Максимально допустима напруга між колектором і загальним електродом транзистора ($U_{KE,max}$ або $U_{KB,max}$). Ця напруга визначається величиною пробивної напруги переходу. Крім того, вона залежить від потужності, струму колектора і температури навколишнього середовища.

Гранична частота підсилення за струмом (f_α або f_β) – частота, при якій коефіцієнт підсилення за струмом α чи β зменшується до 0,7 свого значення на низьких частотах.

6.3 Схеми ввімкнення транзистора

Існує чотири схеми ввімкнення транзистора: із спільною базою (рис. 2.3.2), із спільним емітером (рис. 2.3.3, із спільним колектором (рис.2.3.4).



$$E_{ЕБ} \quad E_{КБ}$$

$$+ \quad - \quad + \quad -$$

Рис. 2.3.2. Схема ввімкнення транзистора зі спільною базою

$$I_E + \Delta I_E = I_K + \Delta I_K + I_B + \Delta I_B$$

(2.3.5)

Диференційний коефіцієнт прямої передачі струму

$$\alpha = \frac{\Delta I_{вих}}{\Delta I_{вх}} = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_E}$$

(2.3.6)

Вхідний опір

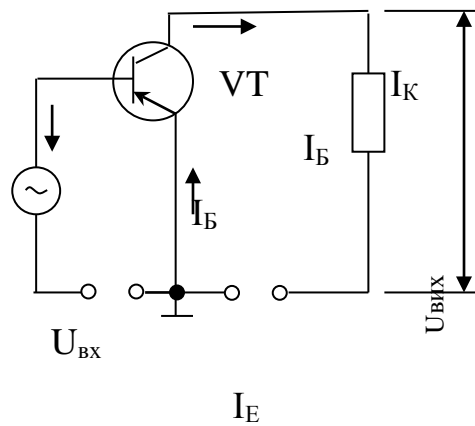
$$R_{вх} = \frac{\Delta U_{вх}}{\Delta I_{вх}} = \frac{\Delta U_{ЕБ}}{\Delta I_E} \approx r_E$$

(2.3.7)

Відмінна особливість схеми зі спільною базою:

- ❖ малий вхідний опір
- ❖ великий вихідний опір (найбільший із всіх схем ввімкнення)
- ❖ відсутність посилення за струмом

Схема зі спільним емітером



$$I_{вх} = I_{Б}; \quad I_{вих} = I_{К};$$

$$U_{вх} = U_{БЕ}; \quad U_{вих} = U_{КЕ}$$

Рис. 2.3.3. Схема ввімкнення транзистора із спільним емітером

$$E_{БЕ} \quad E_{КЕ}$$

$$- \quad + \quad + \quad -$$

Диференційний коефіцієнт прямої передачі струму

$$\beta = \frac{\Delta I_{вих}}{\Delta I_{вх}} = \frac{\Delta I_{К}}{\Delta I_{Б}} \tag{2.3.8}$$

Так як $\Delta I_{Б} = \Delta I_{Е} - \Delta I_{К}$,

то
$$\beta = \frac{\Delta I_{К}}{\Delta I_{Б}} = \frac{\Delta I_{К}}{\Delta I_{Е} - \Delta I_{К}} = \frac{1}{\frac{\Delta I_{Е}}{\Delta I_{К}} - 1}$$

Виходячи із формули 2.3.6

$$\frac{\Delta I_{Е}}{\Delta I_{К}} = \frac{1}{\alpha}, \quad \boxed{\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}}$$

отримаємо

$$\tag{2.3.9}$$

Відмінна особливість схеми зі спільним емітером:

- ❖ *В схемі із спільним емітером можна отримати коефіцієнт прямої передачі струму декілька десятків*
- ❖ *Вхідний опір набагато більший ніж в схемі із спільною базою*
- ❖ *Дана схема може живитися від одного джерела напруги*
- ❖ *Температурна стабільність гірша ніж у схемі із спільною базою*
- ❖ *Схема із спільним емітером є найбільш поширеною, тому що має найбільше підсилення за потужністю*

Схема зі спільним колектором

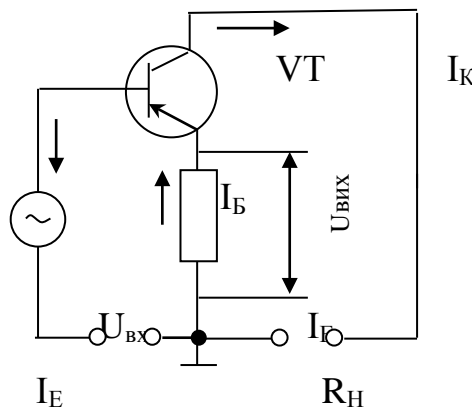


Рис. 2.3.4. Схема ввімкнення з спільним колектором

$$I_{вх} = I_B; \quad I_{вих} = I_E;$$

$$U_{вх} = U_{БК}; \quad U_{вих} = U_{КЕ}$$

	E _{BE}		E _{KE}
	-	+	+
			-

$$\gamma = \frac{\Delta I_{вих}}{\Delta I_{вх}} = \frac{\Delta I_E}{\Delta I_B}$$

Проведемо перетворення

$$\Delta I_E = \Delta I_B + \Delta I_K$$

$$\gamma = \frac{\Delta I_A + \Delta I_E}{\Delta I_A} = 1 + \frac{\Delta I_E}{\Delta I_A} = 1 + \beta$$

$$\gamma = 1 + \beta = \frac{1}{1 - \alpha}$$

6.4 Еквівалентна схема заміщення, h – параметри транзистора

Для аналізу транзисторів і транзисторних схем в різних умовах їх експлуатації користуються еквівалентною Т-подібною схемою, яка заміняє транзистор.

При побудові еквівалентної схеми транзистора виходять із того, що емітерний і колекторний переходи, як і шар бази, мають визначені опори r_E , r_K , r_B . Тому найпростішою еквівалентною схемою транзистора повинно бути коло, яке складається із опорів r_E , r_K , r_B , з'єднаних між собою.

Схема із спільною базою

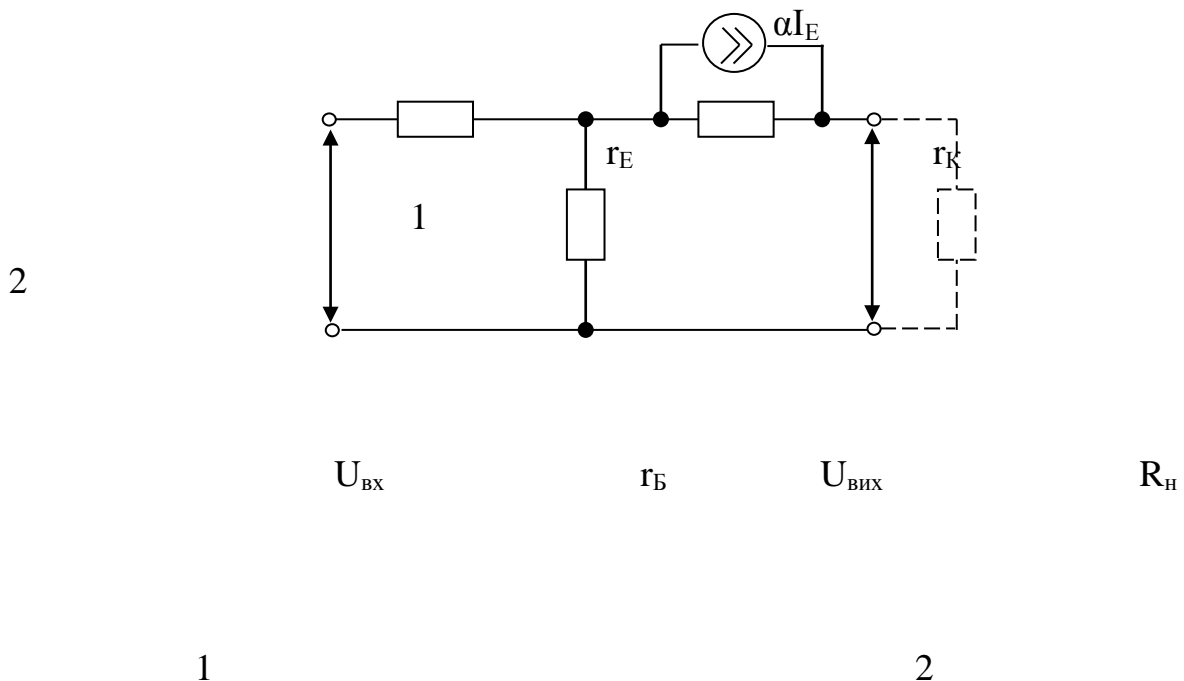


Рис. 2.3.5. Еквівалентна Т-подібна схема транзистора для схеми зі спільною базою

Для даної схеми $I_K \approx \alpha I_E$, так як паралельно r_K в еквівалентній схемі ввімкнено додатковий генератор, який виробляє струм αI_E .

Вхідна напруга визначається за формулою

$$U_{вх} = I_E r_E + I_B r_B = I_E r_E + I_E (1 - \alpha) r_B = I_E (r_E + (1 - \alpha) r_B) \quad (2.3.11)$$

Виходячи з формули 2.3.11, отримаємо значення для вхідного опору

$$R_{вхБ} = \frac{U_{вх}}{I_E} = r_E + (1 - \alpha) r_B$$

(2.3.12)

Так як r_E і r_B - невеликі, то $R_{вхБ}$ становить одиниці (десятки) Ом.

Схема із спільним емітером

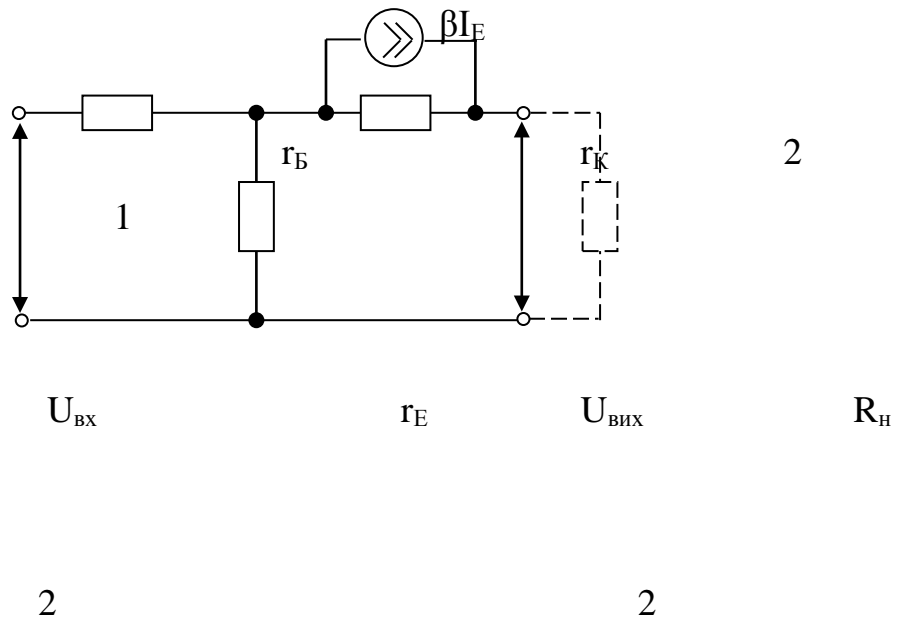


Рис. 2.3.6. Еквівалентна Т-подібна схема транзистора для схеми зі спільним емітером

В даній схемі для відображення реального підсилювального режиму роботи транзистора в вихідне коло ввімкнений додатковий генератор струму βI_B . Виходячи із вищевикладеного, отримуємо

$$U_{\text{вих}} = I_E r_E + I_B r_B$$

Тоді

$$R_{\text{вхЕ}} = \frac{I_E r_E + I_B r_B}{I_B} = (\beta + 1)r_E + r_B$$

2.3.13)

Зрозуміло, що

$$R_{\text{вхЕ}} \gg R_{\text{вхБ}}$$

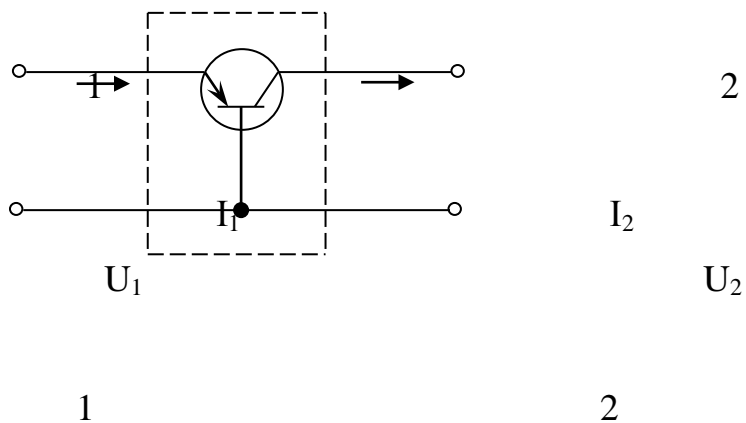


Рис. 2.3.6. Схема для визначення h - параметрів транзистора

U_1, U_2, I_1, I_2 – всі ці величини взаємопов’язані. За двома заданими з них можна визначити дві інші за статичними характеристиками (суть статичних характеристик буде розглянуто в наступному параграфі).

Нехай I_1 і U_2 - задані, то

$$\begin{cases} U_1 = f_1(I_1, U_2) \\ I_2 = f_2(I_1, U_2) \end{cases} \quad (2.3.15)$$

Продиференціювавши дану систему рівнянь, отримаємо

$$\begin{aligned} dU_1 &= \frac{\partial U_1}{\partial I_1} dI_1 + \frac{\partial U_1}{\partial U_2} dU_2 \\ dI_2 &= \frac{\partial I_2}{\partial I_1} dI_1 + \frac{\partial I_2}{\partial U_2} dU_2 \end{aligned}$$

Позначимо

$$\begin{aligned} h_{11} &= \frac{\partial U_1}{\partial I_1} & h_{12} &= \frac{\partial U_1}{\partial U_2} \\ h_{21} &= \frac{\partial I_2}{\partial I_1} & h_{22} &= \frac{\partial I_2}{\partial U_2} \end{aligned}$$

і проінтегруємо систему. Тоді вона прийме вигляд

$$\begin{cases} U_1 = h_{11} I_1 + h_{12} U_2 \end{cases}$$

$$I_2 = h_{21} I_1 + h_{22} U_2$$

де h_{11} , h_{12} , h_{21} , h_{22} - h-параметри транзистора.

Кожен h-параметр транзистора має свою фізичну суть:

$$h_{11} = \frac{\partial U_1}{\partial I_1}, \text{ при } U_2 = 0 \quad - \text{ величина вхідного опору}$$

$$h_{12} = \frac{\partial U_1}{\partial U_2}, \text{ при } I_1 = 0 \quad - \text{ коефіцієнт зворотнього зв'язку}$$

(характеризує степінь впливу вихідної напруги на вхідну)

$$h_{22} = \frac{\partial I_2}{\partial U_2}, \text{ при } U_2 = 0 \quad - \text{ коефіцієнт підсилення за струмом}$$

$$h_{21} = \frac{\partial I_2}{\partial I_1}, \text{ при } I_1 = 0 \quad - \text{ вихідна провідність}$$

Статичні характеристики транзистора

та визначення за ними h - параметрів

Статичні характеристики транзистора відображають співвідношення між струмами і напругами його виводів в статичному і квазістатичному (коли напруга мало змінюється) режимах.

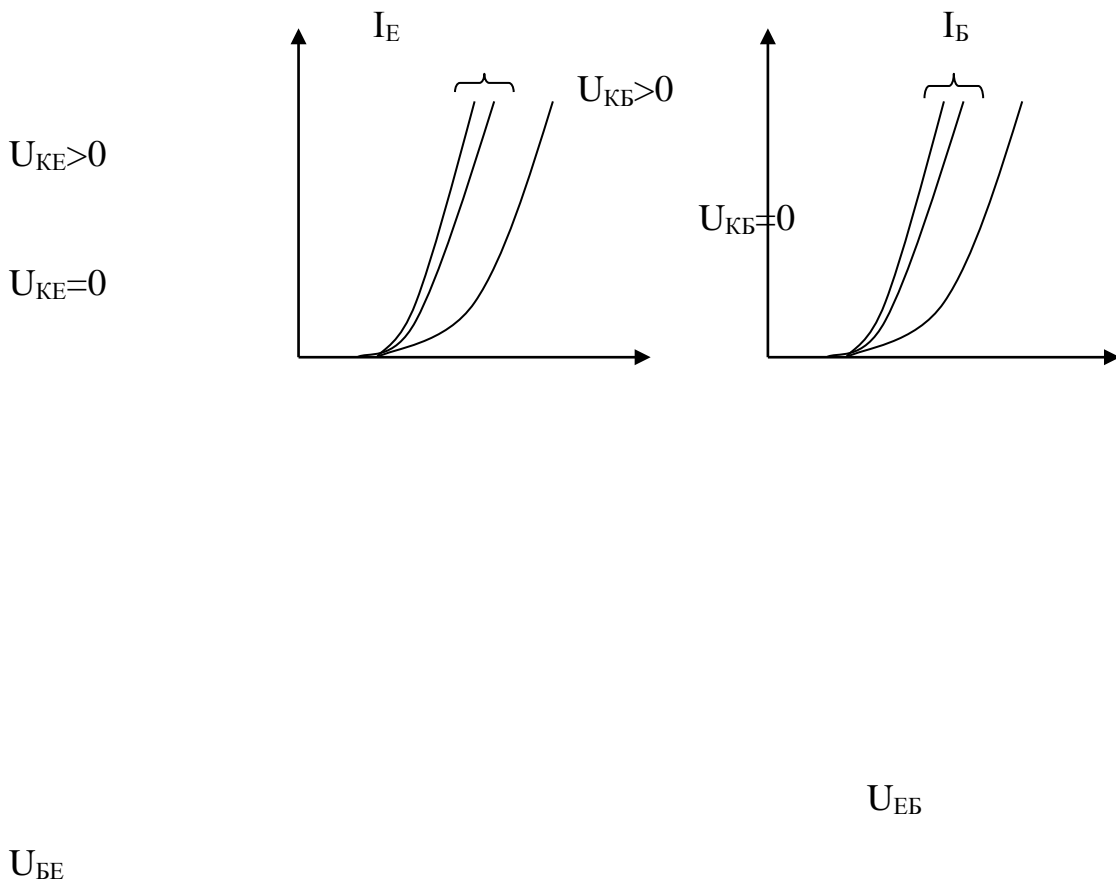
У біполярного транзистора за незалежну змінну приймають струм, як параметр, який легко піддається регулюванню і вимірюванню.

Вольт-амперні характеристики містять інформацію про властивості транзистора у всіх режимах роботи при великих і малих сигналах, в тому числі і про зв'язки між параметрами. За вольт-амперними характеристиками можна визначити ряд параметрів, які не наводяться в довідниковій літературі, а також розрахувати кола зміщення, стабілізації режиму, оцінити

роботу транзистора в широкому діапазоні імпульсних та постійних струмів, потужностей та напруг.

Найбільше розповсюдження отримали *вхідні* та *вихідні* статичні вольт-амперні характеристики для двох основних схем ввімкнення – з спільною базою та спільним емітером. *Вхідні характеристики* встановлюють залежність вхідного струму (струм бази або емітера) від напруги між базою і емітером при визначеній нарузі на колекторі. Вхідні характеристики транзистора (рис. 2.3.7) аналогічні характеристикам діода в прямому напрямі з експоненціальним зростанням струму при збільшенні напруги. При $U_K > 0$ вхідні характеристики мало залежать від напруги на колекторі. Для схеми з спільною базою вхідна характеристика являє собою залежність струму емітера від напруги між емітером і базою при постійній величині напруги між колектором і базою

$$I_E = f(U_{EB}) \text{ при } U_{KB} = \text{const} \quad (2.3.16)$$



а

б

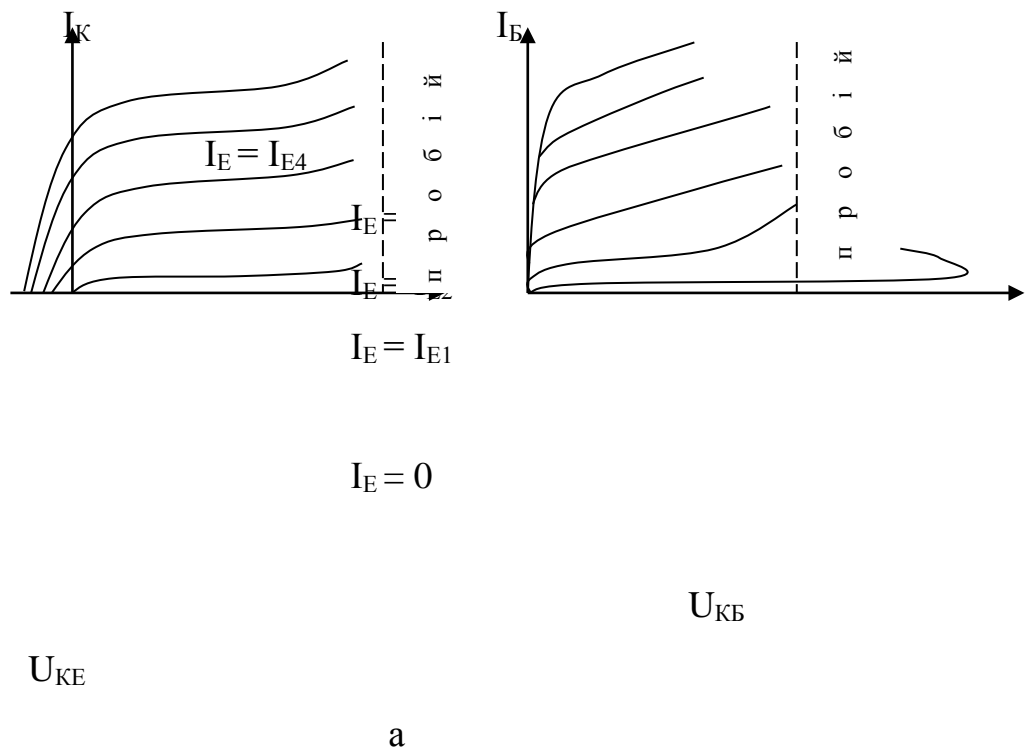
Рис. 2.3.6. Вхідні характеристики транзистора при ввімкненні: а) з СБ; б) з СЕ

Вихідні характеристики встановлюють залежність струму колектора від напруги на ньому при визначеному струмі бази або емітера (рис. 2.3.8) (в залежності від способу ввімкнення транзистора). Для схеми з спільною базою вони відображають

$$I_K = f(U_{KB}) \text{ при } I_E = \text{const} \quad (2.3.17)$$

Статичні характеристики транзистора будують за точками або отримують за допомогою спеціальних характериографів, які дозволяють уникнути сильного нагріву транзисторів. На даний час існує можливість досліджувати транзистора за допомогою комп'ютерів.

Визначення h – параметрів транзисторів відбувається за допомогою побудови характеристичних трикутників.



б

Рис. 2.3.8. Вихідні характеристики транзистора при ввімкненні: а) зі СБ; б) з СЕ

Розглянемо на прикладі транзистора, ввімкненого за схемою зі спільною базою. На входних характеристиках (рис. 2.3.9, а) будують характеристичний трикутник abc , із якого знаходимо

$$\text{при } U_{KB} = 0$$

$$\text{де } \Delta U_{EB} = bc \approx 0,06 \text{ В}; \quad \Delta I_E = ab \approx 15 \text{ мА.}$$

Отже,

$$h_{11B} \approx \frac{6 \cdot 10^{-2}}{15 \cdot 10^{-3}} \approx 40 \text{ м.}$$

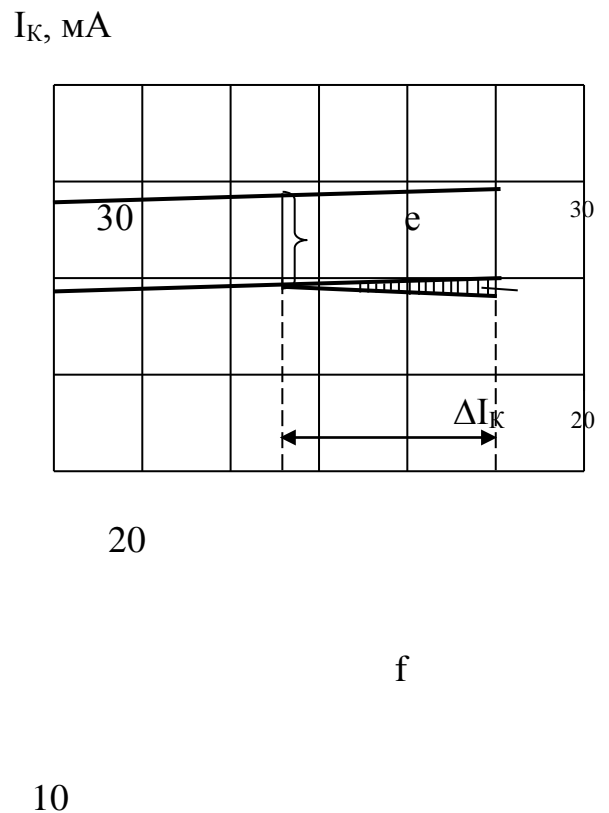
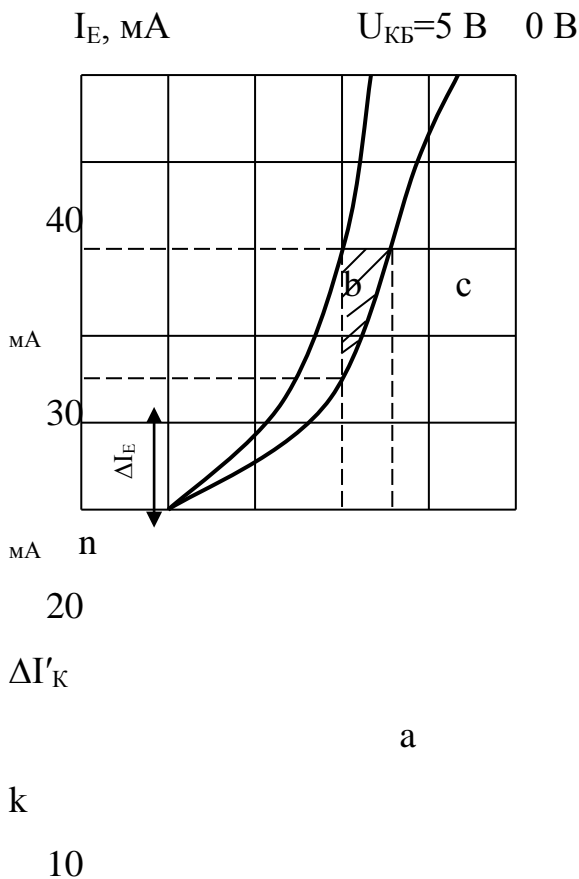
Із цього ж трикутника визначаємо

$$h_{12B} = \frac{\Delta U_{EB}}{\Delta U_{KB}} \quad \text{при } \Delta I_E = 0$$

$$\text{де } \Delta U_{EB} = bc \approx 0,06 \text{ В}; \quad \Delta U_{KB} = 5 - 0 = 5 \text{ В.}$$

Отже,

$$h_{12B} \approx \frac{0,06}{5} \approx 0,012.$$



ΔU_{EB}

ΔU_{KB}

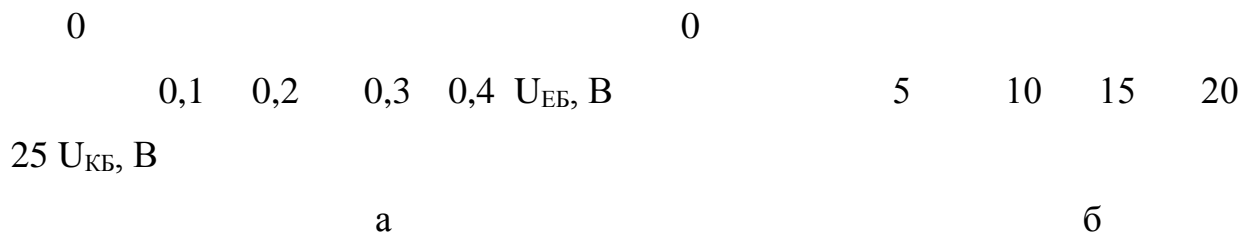


Рис. 2.3.9. Визначення h_B – параметрів транзистора за вхідними (а) та вихідними (б) характеристиками

Параметри h_{21B} і h_{22B} визначають за вихідними характеристиками (рис. 2.3.9, б). Побудувавши характеристичний трикутник fnk , знайдемо

$$h_{21B} = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_E} \quad \text{при} \quad U_{CB} = 0;$$

$$\Delta I_K = ef \approx 29 - 19,5 = 9,5 \text{ мА}; \quad \Delta I_E = 30 - 20 = 10 \text{ мА};$$

$$h_{21B} = \frac{9,5}{10} = 0,95;$$

$$h_{22B} = \frac{\Delta I'_K}{\Delta U_{CB}} \quad \text{при} \quad \Delta I_E = 0;$$

$$\Delta I'_K = nk = 1 \text{ мА}; \quad \Delta U_{CB} \approx fk \approx 12,5 \text{ В};$$

$$h_{22B} = \frac{10^{-3}}{12,5} = 8 \cdot 10^{-5} \text{ См.}$$

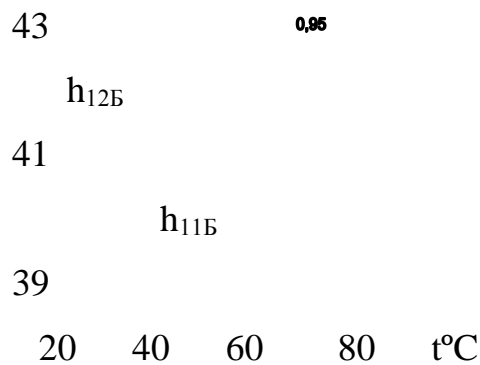
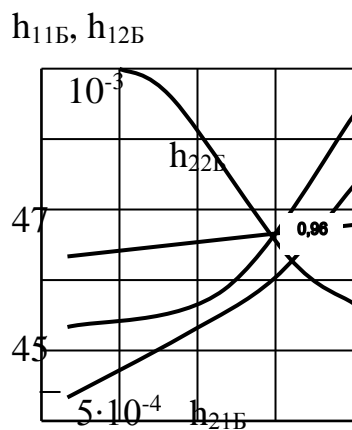
6.5 Температурні і частотні властивості транзистора

Діапазон робочих температур транзисторів, який визначається властивостями р-п переходів, такий самий, як і у напівпровідникових діодів. Особливо сильно на роботу транзисторів впливає нагрівання і менш суттєво – охолодження (до -60°C). Дослідження показують, що при нагріванні від 20 до 60°C параметри площинних транзисторів змінюються наступним чином: r_K падає приблизно у два рази, r_B – на 15-20 %, а r_E зростає на 15-20 %. Уяву про вплив нагріву на h – параметри дають графіки (рис. 2.3.10, а), побудовані для

малопотужного площинного транзистора, ввімкненого за схемою зі спільною базою. Крім зміни значення основних параметрів транзистора, нагрівання викликає зміщення вихідних характеристик і зміну їх нахилу (рис. 2.3.10, б), що також порушує нормальну роботу приладу.

Найбільш часто для роботи при підвищених температурах застосовують кремнієві транзистори. Гранична робоча температура у цих приладів складає 125 „, 150°C. З цією ж метою використовується і ряд нових напівпровідникових матеріалів, із яких найбільший інтерес являє карбід кремнію. Прилади, виготовлені на карбіді кремнію, можуть працювати до температур 500„,600°C.

На частотні властивості транзисторів дуже впливають ємності р-п переходів. Із збільшенням частоти ємнісний опір зменшується і шунтуюча дія ємностей зростає. Тому Е-подібна еквівалентна схема транзистора на високих частотах, крім чисто активних опорів r_E , r_B і r_K , містить ємності C_E і C_K , які шунтують емітерний і колекторний переходи.



U_{KE}

а

б

Рис. 2.3.10. Вплив температури на h - параметри малопотужного площинного транзистора (а) і форму його вихідних характеристик (б)

Другою причиною погіршення роботи транзистора на високих частотах є відставання по фазі змінного струму колектора від змінного струму емітера. Це обумовлено інерційністю процесу проходження носіїв заряду через базу від емітерного переходу до колекторного, а також процесів накопичення і розсмоктування зарядів в базі.

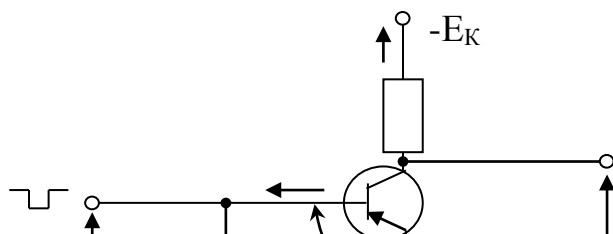
Оцінюючи частотні властивості транзистора, слід враховувати, що дифузія – процес хаотичний. Неосновні носії зарядів, інжектвані емітером в базу, пересуваються в ній різними шляхами. Тому носії, які одночасно ввійшли в область бази, досягають колекторного переходу в різний час. Таким чином, закон зміни струму колектора може не відповідати закону зміни струму емітера, що призводить до спотворення сигналу, що підсилюється.

Слід відмітити, що із збільшенням частоти коефіцієнт β зменшується значно сильніше ніж α .

6.6 Транзистор у режимі ключа

Найважливішими елементами сучасних схем автоматики і електронних обчислювальних машин є пристрої релейного типу. Їх головна особливість в тому, що під дією вхідного сигналу режим роботи таких пристроїв різко (скачкоподібно) змінюється. Це дозволяє здійснювати перемикання, або комутацію, різних електричних кіл схеми.

Перемикаючі пристрої релейного типу мають два стійкі положення, які можуть розглядатись як положення „ввімкнено” і „вимкнено”.



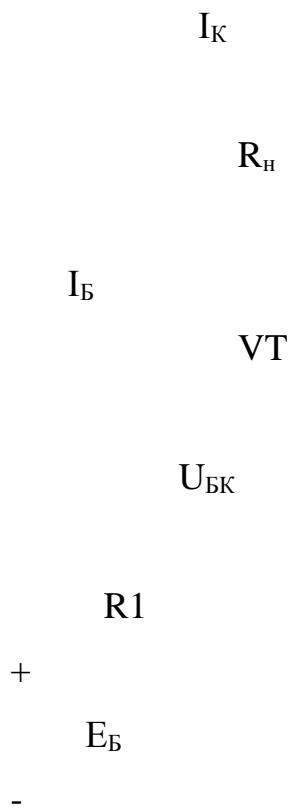


Рис. 2.3.11. Ключова схема транзистора

Транзистор є одним із найбільш розповсюджених елементів безконтактних перемикаючих пристроїв. Режим роботи транзистора в перемикаючому пристрої зазвичай називають *ключовим*. Цей режим характерний тим, що транзистор в процесі роботи періодично переходить із відкритого стану (режим насичення) в закритий (режим відсічки) і навпаки, що відповідає двом стійким станам перемикаючого пристрою.

На рис. 2.3.11 показана найпростіша схема ключа на транзисторі рпр, ввімкненого за схемою зі спільним емітером.

Закривання транзистора (режим відсічки) спостерігається в тому випадку, коли обидва р-п переходи (емітерний і колекторний) закриті. Для цього достатньо, щоб зворотні напруги на цих переходах були наближені до нуля (біля 0,05,,0,1 В). Із схеми (рис. 2.3.11) видно, що для закривання транзисторів типу рпр потрібно подати на його вхід таку напругу, щоб потенціал бази був вищим потенціалу емітера, тобто, щоб напруга U_{BE} між

базою і емітером задовольняла нерівність $U_{BE} > 0$ (для транзисторів типу ррп ця нерівність буде зворотною).

Напруга U_{KE3} на колекторі закритого транзистора дорівнює

$$U_{KE3} = E_K - I_{KBВ} R_H$$

де $I_{KBВ}$ – зворотний струм колектора. Зазвичай $I_{KBВ} \cdot R_H \ll E_K$. Тому можна прийняти $U_{KE3} \approx E_K$.

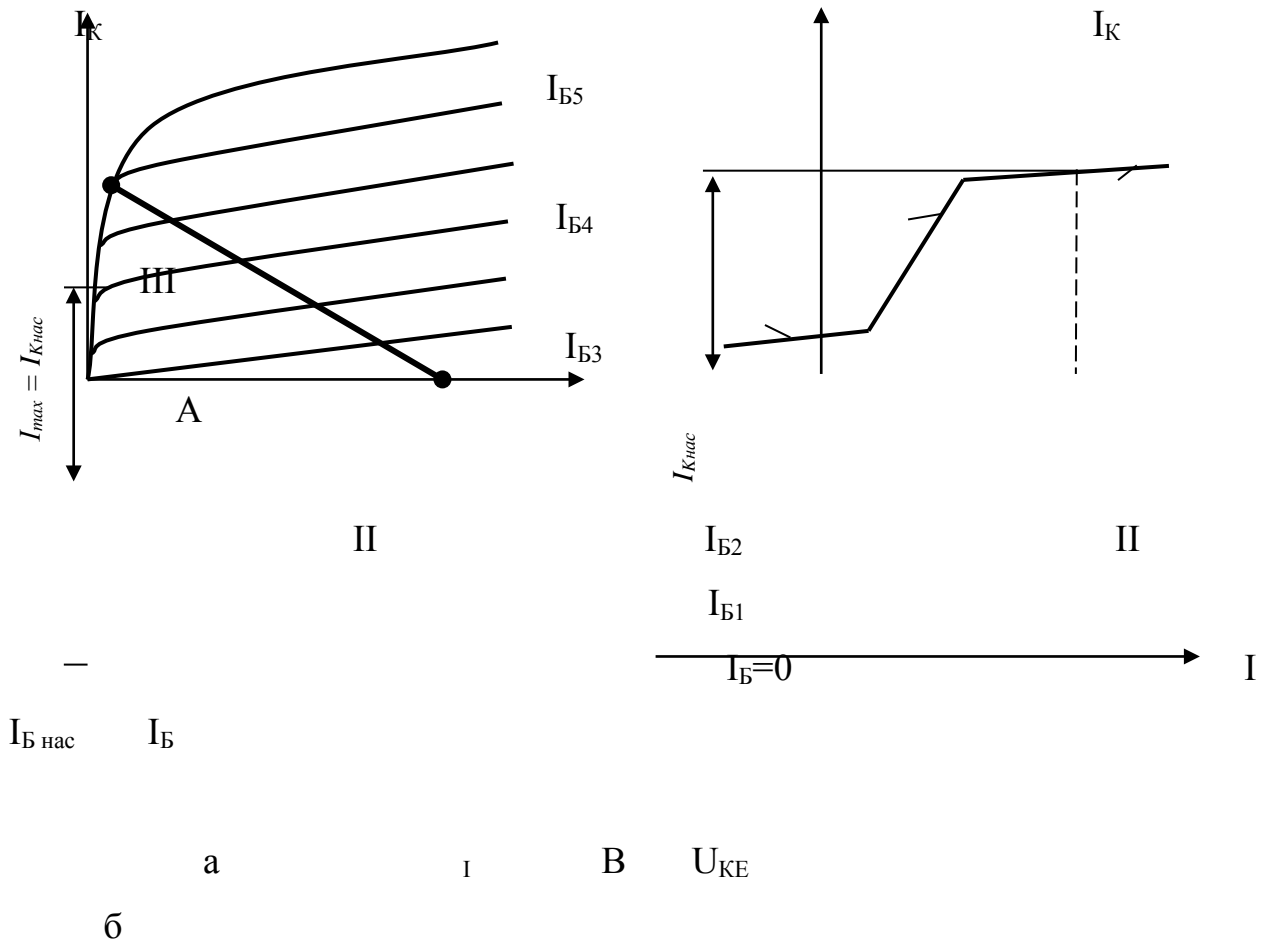


Рис. 2.3.12. Графічне пояснення роботи транзистора в ключовому режимі:

I – режим відсічки; II – активний режим; III – режим насичення

В закритому стані транзистор може знаходитись необмежено довго. Вивести його із цього стійкого стану можна лише за рахунок зовнішніх дій, наприклад шляхом подання на вхід транзистора типу ррп запуская чого імпульсу від'ємної полярності.

Другим стійким станом є режим насичення відкритого транзистора. Насичення наступає в тому випадку, коли обидва р-п переходи транзистора відкриті.

На рис. 2.3.12, а приведені вихідні статичні характеристики транзистора зі спільним емітером. В сімействі цих характеристик проведена навантажувальна пряма АВ, яка показує залежність струму колектора від напруги на колекторі при визначених значеннях E_K і R_n . Величина струму колектора визначається головним чином величиною струму бази: чим більший струм бази (вхідний струм), тим більший струм колектора. При деякому значенні струму бази $I_{B_{нас}} = \frac{E_K}{R_n} = I_{B4}$ колекторний струм досягає максимальної величини $I_{K_{макс}}$. Така величина колекторного струму відповідає робочій точці А на рис. 2.3.12,а. При подальшому збільшенні струму бази струм колектора практично залишається незмінним. Тому $I_{K_{макс}}$ отримав назву *струму насичення* і позначається $I_{K_{нас}}$. Величина струму насичення відкритого транзистора може бути знайдена за формулою

$$(2.3.18)$$

Із рис. 2.3.12, а видно, що в області насичення (поблизу точки А) напруга між колектором і емітером, як і напруги між будь-якими іншими виводами транзистора, наближені до нуля.

На рис. 2.3.12, б показана залежність струму колектора I_K від струму бази I_B . Із цього рисунка видно, що характеристика $I_K = f(I_B)$ має злами на межах області закривання (відсічки) і насичення. Це допомагає більш чіткій роботі перемикаючого пристрою. Слід, однак, мати на увазі, що при переході транзистора із одного стійкого стану в інший можливі перехідні процеси, які спотворюють форму імпульсних струмів і напруг в колах транзистора.

6.7 Польові транзистори

Польовий транзистор – прилад, підсилюючі властивості якого обумовлені потоком основних носіїв, які протікають через провідний канал, і який керується електричним полем.

|| ❖ *Польові транзистори, порівняно з біполярними, мають великі вхідний і вихідний опори (R_{ex} практично безмежно великий).*

Принцип дії польових транзисторів теоретично був описаний в 1952 році (Шоклі), але із-за складності технології виготовлення вони з'явилися значно пізніше.

Від способу виготовлення і електричних характеристик польові транзистори діляться на дві групи:

- з р-п переходами;
- з ізолюваним затвором.
-

Польові транзистори з р-п переходами

Основним елементом таких транзисторів є пластина напівпровідника п-типу, на яку з обох сторін нанесені шари напівпровідника р-типу. На торці напівпровідникової пластини п-типу і на дві області р-типу нанесені металеві плівки, до яких припаяні омичні контакти, а два шари р-типу з'єднані між собою (рис. 2.3.13).

Тонкий шар напівпровідника типу п (або р), обмежений з двох сторін електронно-дірковими переходами – *канал*.

Ввімкнення каналу в електричне коло забезпечується за допомогою двох омичних електродів : *витік (В)*, *стік (С)*. Вивід, що під'єднаний до областей р-типу – *затвор (З)*.

Виводи витік, стік, затвор відповідають в перерахованому порядку емітеру, колектору, базі біполярного транзистора.

На рис. 2.3.14 представлені умовні графічні зображення польових транзисторів з р-п переходами.

В основі роботи польового транзистора лежить зміна площі поперечного перерізу провідного каналу. Коли напруга на р-п переходах дорівнює нулю, площа поперечного перерізу провідного каналу максимальна, а електричний опір між витіком і стоком мінімальний.

Величина струму в каналі залежить від напруги U_C , прикладеної між стоком і виток, опору навантаження і опору напівпровідникової пластинки між стоком і виток.

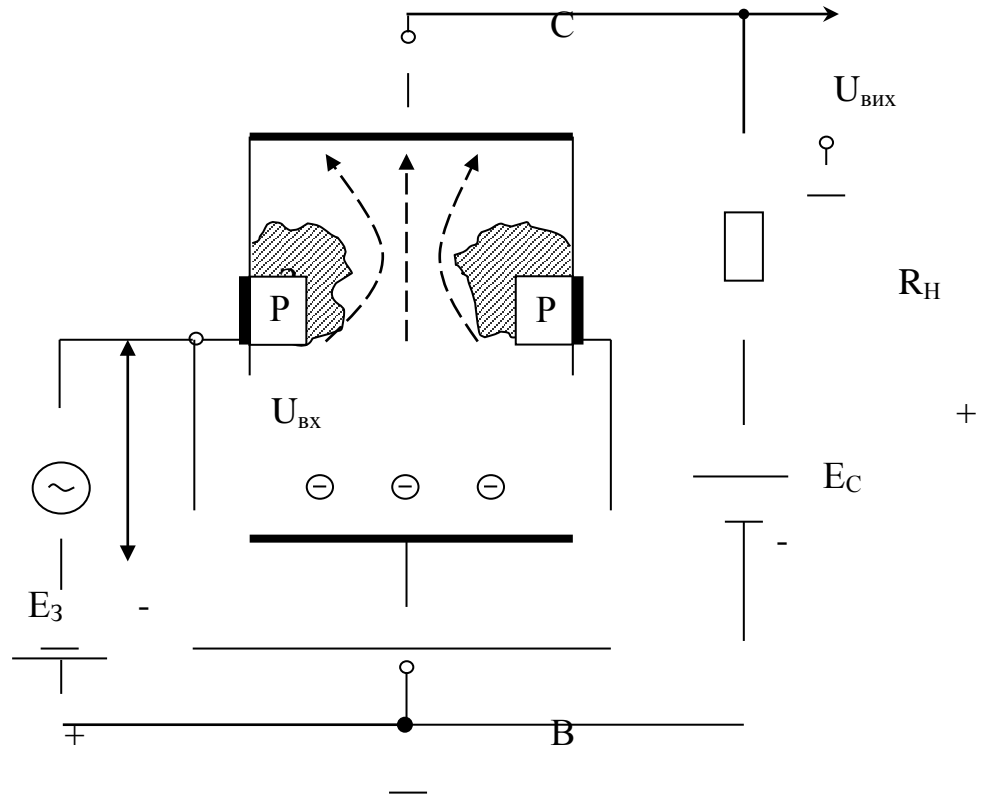


Рис. 2.3.13. Структура польового транзистора з р-п переходами

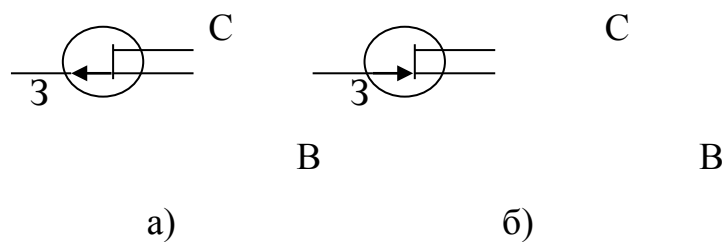


Рис. 2.3.14. Умовні графічні зображення польових транзисторів з р-п переходами:

а) р-каналом; б) п-каналом

При постійних U_C і R_H струм I_C залежить лише від площі поперечного перерізу каналу. E_3 утворює від'ємну напругу на затворі, що призводить до збільшення товщини р-п переходів і зменшенню перерізу струмопровідного каналу. Із зменшенням перерізу каналу підвищується опір між виток і

знижується величина I_C . Підімкнувши послідовно з E_3 джерело змінної напруги $U_{вх}$, можна змінювати струм через канал за законом зміни $U_{вх}$. R_H допомагає підсилити вихідний сигнал.

На рис. 2.3.15,а показано приблизний вигляд сімейства вихідних (стокових) вольт-амперних характеристик польового транзистора з р-п переходами $I_C = f(U_C)$ при $U_{ЗВ} = \text{const}$.

Залежність $I_C = f(U_{ЗВ})$ при $U_C = \text{const}$ отримала назву стокозатворної характеристики (рис. 2.3.15,б).

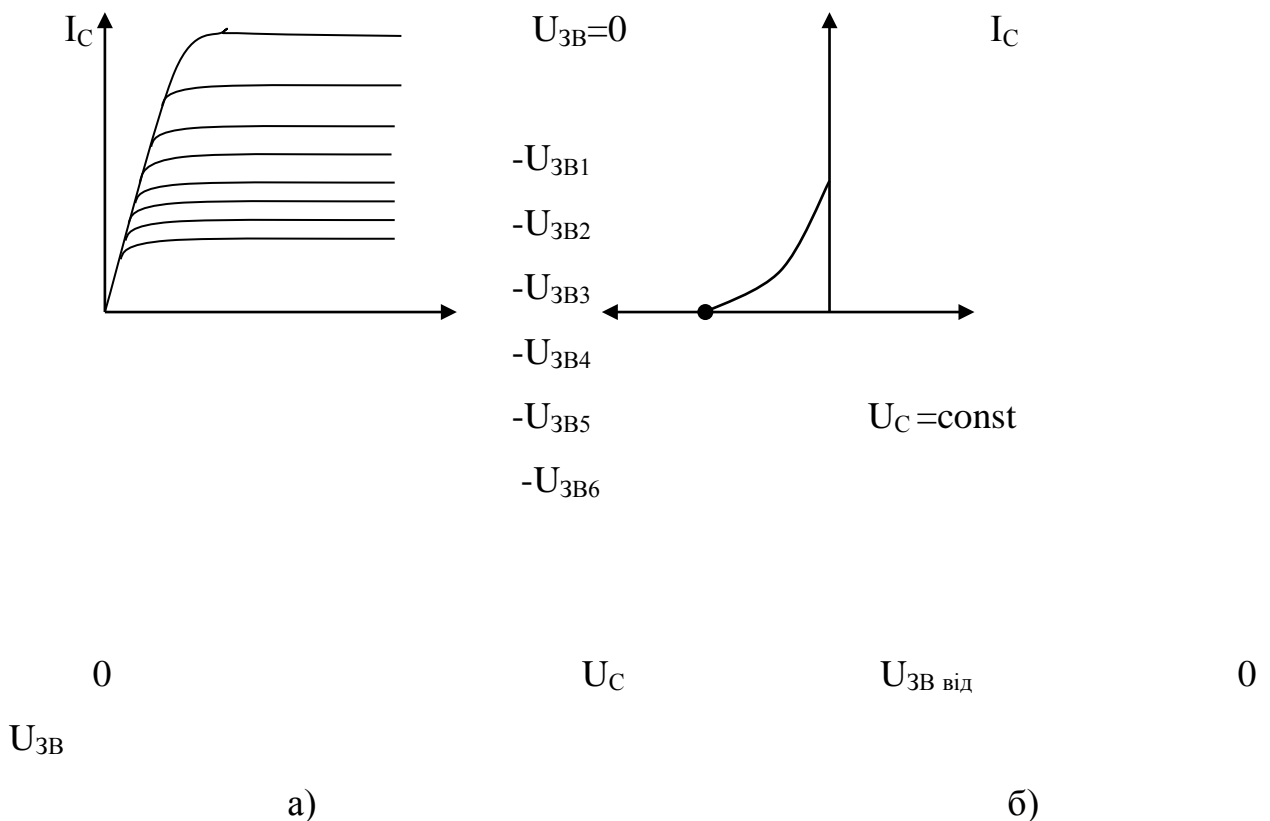


Рис. 2.3.15. Характеристики польового транзистора з р-п переходами:
а) вихідні (стокові характеристики; б) стокозатворна характеристика

Польові транзистори з ізолюваним затвором

Польові транзистори з ізолюваним затвором мають структуру *метал – діелектрик (окисел) – напівпровідник*. Тому їх часто називають МДП- або МОП-транзисторами. Принцип роботи цих приладів базується на ефекті поля в поверхневому шарі напівпровідника. На рис. 2.3.16. схематично показана конструкція такого транзистора. Основою приладу служить пластинка (під

ложка) монокристалічного кремнію р-типу. Области витоку і стоку являють собою ділянки кремнію, сильно леговані домішкою n-типу. Відстань між витоком і стоком приблизно 1 мкм. На цій ділянці розміщена вузька слабо легована смужка кремнію n-типу (канал). Затвором служить металева пластика, ізольована від каналу шаром діелектрика товщиною приблизно 0,1 мкм. В якості діелектрика може використовуватися вирощена при високій температурі плівка двоокису кремнію.

В залежності від полярності напруги, прикладеної до затвору (відносно стоку), канал може збіднюватись або збагачуватись носіями заряду (електронами). В залежності від цього існує 2 типи каналів: вбудований та індукований. При від'ємній напрузі на затворі електрони провідності виштовхуються із області каналу в об'єм напівпровідника підложки. При цьому канал збіднюється носіями заряду, що призводить до зменшення струму в каналі. Позитивна напруга на затворі допомагає втягуванню електронів провідності із підложки в канал. В цьому режимі, який отримав назву режиму збагачення, струм каналу зростає.

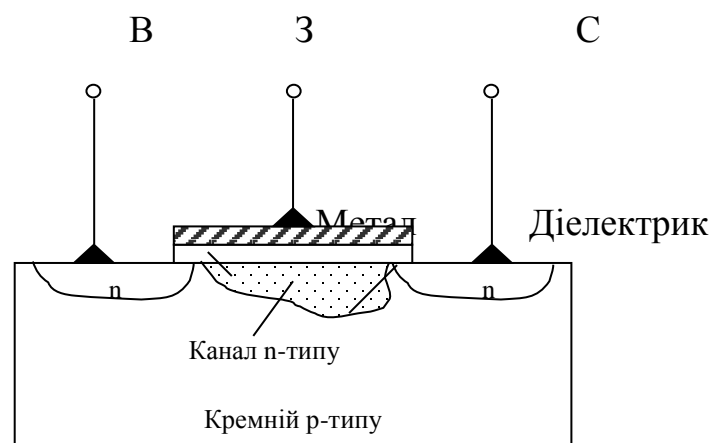
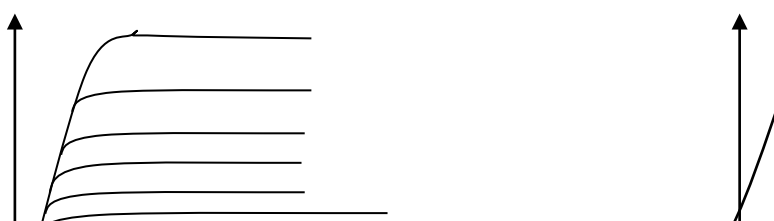


Рис. 2.3.16. Польовий транзистор з ізольованим затвором



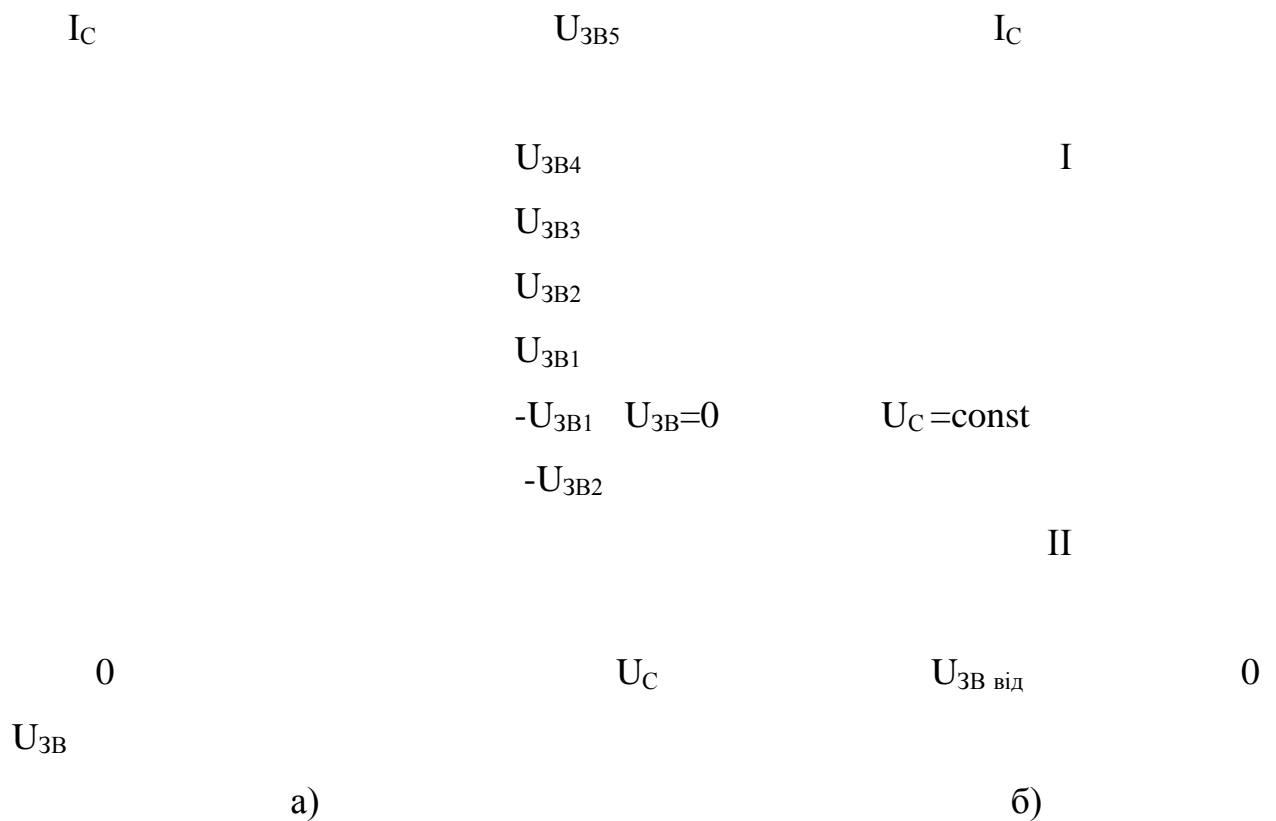


Рис. 2.3.16. Стокові (а) і стокозатворна (б) характеристики польового транзистора з ізольованим затвором: I – режим збагачення; II – режим збіднення

Таким чином, на відміну від польового транзистора з р-п переходами, транзистор з ізольованим затвором може працювати з нульовою, від’ємною або додатною напругою на затворі.

Вихідні характеристики польового транзистора з ізольованим затвором (рис. 2.3.17,а) мають такий же вигляд, як і характеристики транзистора з р-п переходами. Різниця лише в тому, що транзистори з р-п переходами можуть працювати лише в режимі збіднення (звуження) каналу, а транзистори типу МДП (або МОП) працюють як в режимі збіднення (при від’ємних напругах на затворі), так і в режимі збагачення (при додатних напругах на затворі). З цієї ж причини стокозатворна характеристика транзистора з ізольованим затвором може захоплювати область позитивних напруг між затвором і витоком.

Основні параметри польових транзисторів.

Крутизна характеристики

$$S = \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{ЗВ}} \quad \text{при} \quad U_C = \text{const} \quad (2.3.19)$$

Напруга відсічки $U_{ЗВ \text{ від}}$ - зворотна напруга на затворі, при якій струмопровідний канал стане закритим.

Вхідний опір $R_{\text{вх}}$ між затвором і стоком

$$R_{\text{вх}} = \frac{\Delta U_{ЗВ \text{ max}}}{\Delta I_{З \text{ max}}} \quad (2.3.20)$$

Вихідний опір $R_{\text{вих}}$ (визначається в режимі насичення)

$$R_{\text{вих}} = \frac{\Delta U_C}{\Delta I_C} \quad \text{при} \quad U_{ЗВ} = \text{const} \quad (2.3.21)$$

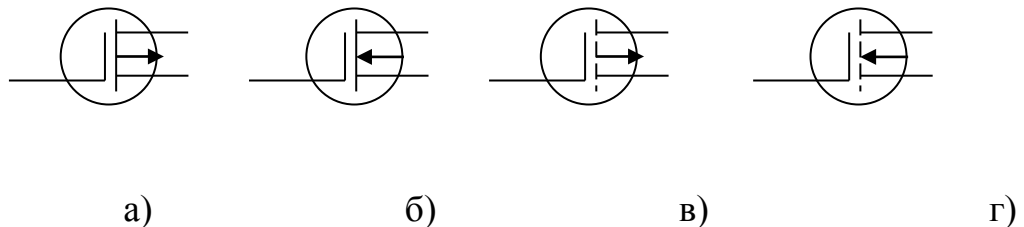


Рис. 2.3.18. Умовні графічні зображення польових транзисторів з ізольованим затвором:

- а) із встроєним р-каналом збідненого типу; б) із встроєним п-каналом збідненого типу;
в) із індукованим р-каналом збагаченого типу; г) із індукованим п-каналом збагаченого типу

Переваги польових транзисторів:

- ❖ високий вхідний опір, який досягає в каналних транзисторах з р-п переходами величини 10^6 - 10^9 Ом, а в транзисторах з ізольованим затвором 10^{13} - 10^{15} Ом;
- ❖ малий рівень власних шумів, так як в польових транзисторів, на відміну від біполярних, в переносі струму беруть участь заряди

лише одного знаку, що виключає появу рекомбінаційного шуму;

- ❖ *висока стійкість проти температурних і радіоактивних дій;*
- ❖ *висока щільність розміщення елементів при використанні приладів в інтегральних схемах.*

Характерні особливості польових транзисторів:

- ❖ *струм створюють основні носії зарядів;*
- ❖ *рух носіїв зарядів відбувається вздовж р-п переходів, а не через них, як у біполярних транзисторів.*

6.8 Одноперехідні (двобазові) транзистори

Одноперехідний транзистор (рис.2.3.19,а) являє собою монокристалічну пластинку кремнію n-типу з високим значенням питомого опору, на кінцях якої розміщені омичні контакти баз Б1 і Б2, а на боковій стороні – один емітерний р-п перехід.

Ділянки кристалу довжиною l_1 і l_2 (зазвичай $l_1 \ll l_2$) виконують функції баз приладу. Емітерний контакт зв'язку з зовнішнім виводом емітера Е.

Схема ввімкнення одноперехідного транзистора показана на рис. 2.3.19, б. До виводів баз Б1 і Б2 підводять напругу живлення $U_{Б1Б2}$, причому база Б2 має позитивний потенціал відносно бази Б1, яку зазвичай заземлюють. Під дією цієї напруги в кремнієвій пластинці виникає струм $I_{Б1Б2}$. Ділянка між базами Б1 і Б2 одноперехідного транзистора являє собою омичний опір в декілька кОм з лінійною вольт-амперною характеристикою. Тому напруга $U_{Б1Б2}$ розподіляється по базам пропорційно їх опорам, які залежать від довжин l_1 і l_2 . Ці напруги відповідно рівні $U_{ЕБ1}$ і $U_{ЕБ2}$. Полярність напруги $U_{ЕБ1}$ така, що в вихідному стані емітерний р-п перехід буде зміщений в зворотному напрямі і через нього пройде лише невеликий струм втрат $I_{ЕБ0}$ (рис. 2.3.20).

Цей же стан збережеться при подачі на емітер від'ємної напруги U_E або позитивної але, яка не перевищує величини напруги U_{EB1} .

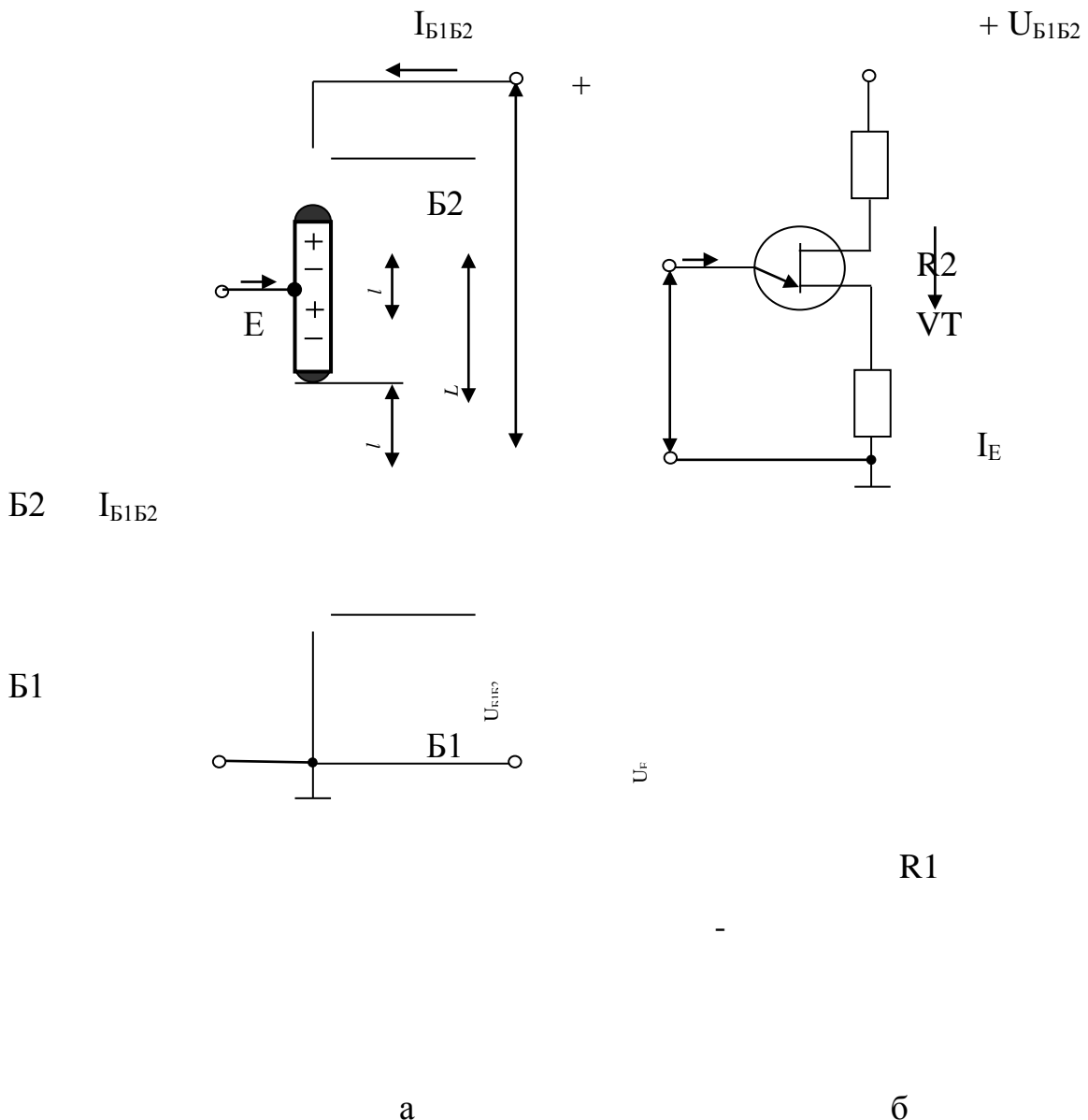


Рис. 2.3.19. Будова (а), схема ввімкнення (б) одноперехідного транзистора

Якщо ж напруга U_E перевищить напругу U_{EB1} на величину, достатню для відкриття емітерного р-п переходу (точка А на рис.2.3.20), то в кремнієву пластинку із емітера будуть інжектуватися дірки. Під дією електричного поля джерела U_{B1B2} ці дірки будуть рухатися в напрямі до виводу бази Б1, утворюючи емітерний струм, що призведе до збільшення провідності на ділянці довжиною l_1 , або зменшенню до незначної величини опору на цій ділянці. В результаті внутрішнє падіння напруги U_{EB1}

зменшиться, що допоможе подальшому відкриванню емітерного р-п переходу і збільшення струму емітера і т.д. Таким чином, процес зростання емітерного струму буде розвиватись лавиноподібно. З ростом емітерного струму опір емітерного переходу знижується, а напруга U_E зменшується. Це відповідає появі у вольт-амперній характеристиці ділянки від'ємного опору приладу (ділянка АВ на рис.2.3.20).

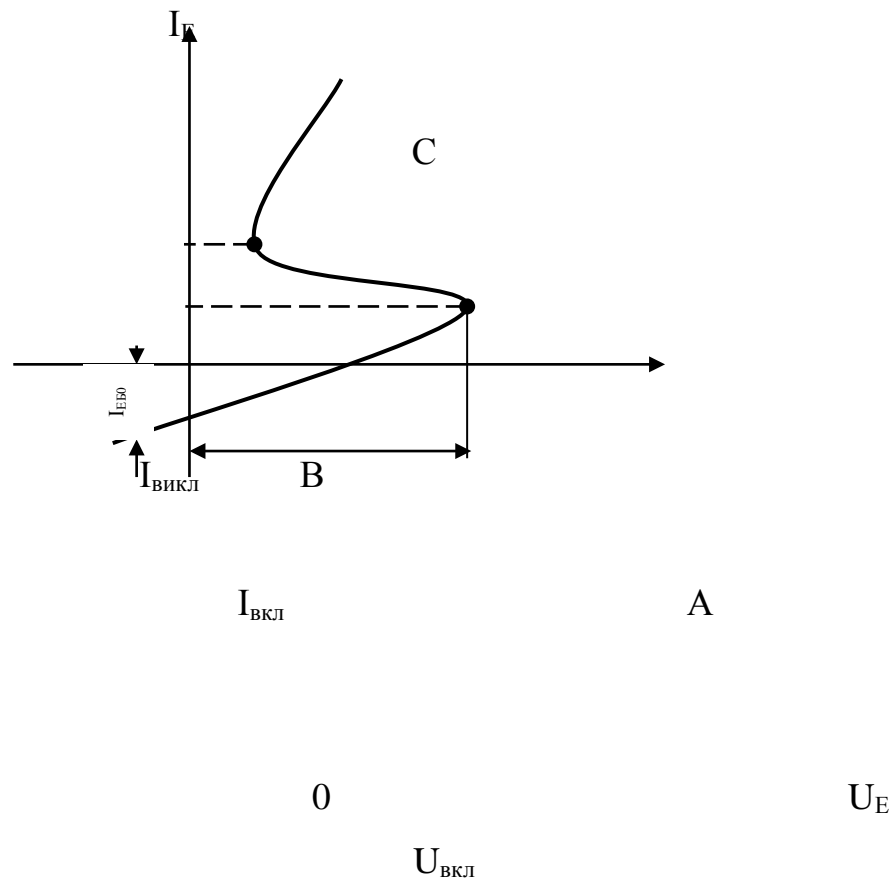


Рис. 2.3.20. Вольт-амперна характеристика одноперехідного транзистора

Подальше збільшення емітерного струму (ділянка ВС) пов'язано з підвищенням зовнішньої емітерної напруги.

Таким чином, вольт-амперна характеристика одноперехідного транзистора нагадує вольт-амперні характеристики тунельних діодів, що

дозволяє використовувати даний прилад для побудови різних перемикаючих схем.

Переваги одноперехідних транзисторів:

- ❖ простота конструкції;
 - ❖ стабільна напруга спрацювання;
 - ❖ мале споживання струму в колі керування;
 - ❖ можливості передачі порівняно потужних імпульсів
- і т.п.*

Фототранзистори

Фото транзистор – фотогальванічний приймач випромінювання, фото чуттєвий елемент якого містить структуру транзистора, яка забезпечує внутрішнє підсилення.

Конструктивне оформлення одного із типових фототранзисторів (типу ФТ-1). Прилад складається із германієвої пластини, в яку із двох сторін співвісно впаяно навіски індію, які утворюють колектор і емітер. Пластинка германію припаяна олов'яним кільцем до кристалотримача, який в свою чергу приварений до ніжки. Колектор і емітер за допомогою тонких виводів з'єднані з провідниками, ізольованими від ніжки скляними ізоляторами. Базовий вивід приварений до ніжки. Весь фототранзистор поміщений в герметичний корпус, в якому є круглий отвір, закритий склом.

Двополюсна схема ввімкнення фототранзистора показана на рис.2.3.21,б. При такому ввімкненні вивід бази фототранзистора залишається вільним, тобто струм бази $I_B = 0$. при освітленні бази в ній з'являються вільні електрони і дірки. Для бази фото транзистора типу ррр дірки є неосновними носіями зарядів, тому вони втягуються полем колекторного переходу в колектор, збільшуючи струм в його колі. Основні носії зарядів (електрони), які залишилися в базі, створюють просторовий заряд, який понижує висоту потенціального бар'єру емітерного переходу. При цьому полегшується

перехід дірок із емітера в базу, а потім, а потім в колектор, що приводить до ще більшого росту колекторного струму, який проходить через навантажувальний опір. Таким чином, навіть при невеликому світловому потокові, який падає на базу, струм колектора стає достатньо великим, що свідчить про високу чуттєвість фототранзистора.

Спочатку фототранзистори застосовувались виключно в розглянутій вище двополюсній схемі ввімкнення. Тому в деяких конструкціях фото транзисторів базовий вивід відсутній. Такий фото транзистор за своїми параметрами відрізняється від фото діода лише більшою інтегральною чуттєвістю. Фото транзистор, який має три виводи, являє додаткові можливості його використання, які базуються на тому, що, крім світлового сигналу, на його вхід можна подати сигнал електричний.

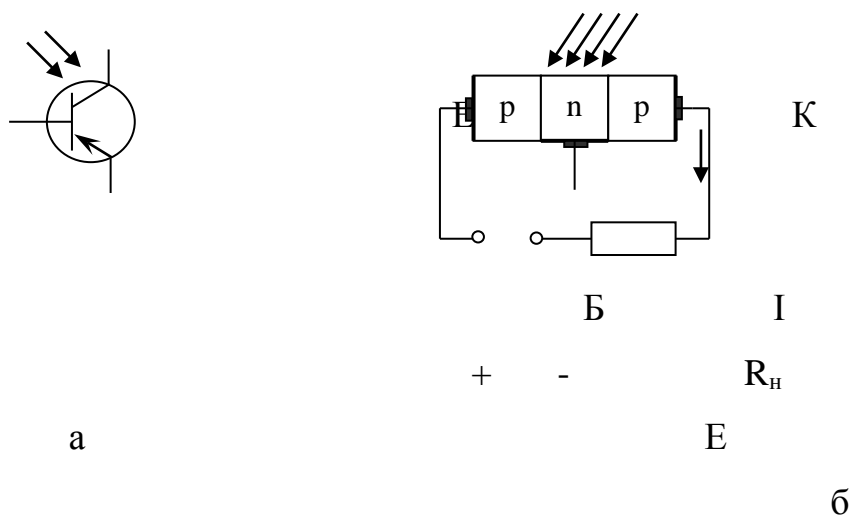


Рис. 2.3.21. Умовне графічне зображення (а), двополюсна схема ввімкнення (б) фототранзистора типу рпр

Оскільки конструкція фото транзистора в основному не відрізняється від конструкції звичайного біполярного транзистора, характеристики цих двох приладів також однакові, якщо на вхід фото транзистора подається лише електричний сигнал.

Основні параметри фототранзисторів:

темновий струм I_T – струм через затемнений фототранзистор при прикладеній робочій напрузі;

струм при освітленні I_C – струм через освітлений фототранзистор при прикладеній робочій напрузі;

інтегральна чуттєвість S_{int} – відношення струму через фототранзистор при прикладеній робочій напрузі до падаючого на нього світлового потоку;

найбільша потужність розсіювання $P_{роз.мах}$ – допустима потужність, яка виділяється на приладі і допускає його експлуатацію протягом тривалого часу.

Фототранзистори використовуються в якості чутливих елементів в різних автоматичних пристроях, кіно фотоапаратурі, в пристроях введення і виведення інформації в обчислювальній техніці, для реєстрації ультрафіолетового і інфрачервоного випромінювання і т.п. Крім того вони з успіхом використовуються в оптоелектроніці.

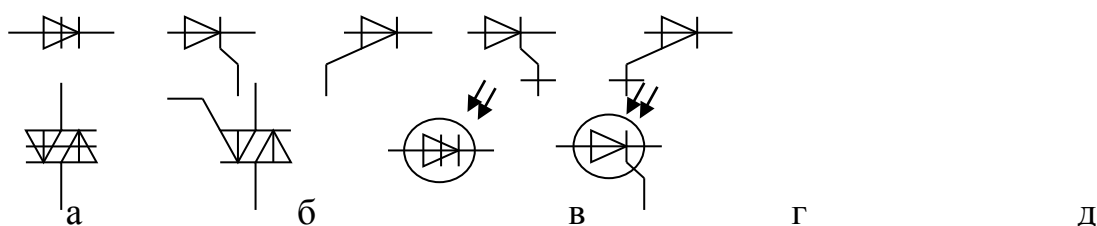
6.10 Тиристори

Тиристор – напівпровідниковий прилад, який має чотирьохшарову структуру з трьома послідовними р-п переходами, характеризується двома стійкими станами в прямому напрямі і запираючими властивостями в зворотному напрямі.

Основні види тиристорів:

- динистор (діодний тиристор);
- тринистор (тріодний тиристор).

На рисунку 2.3.22 представлені умовні графічні зображення тиристорів.



е ж з ж к

Рис. 2.3.22. Умовні графічні зображення тиристорів:

а – динистор; б – незапираємий тринистор з керуванням по катоду; в – незапираємий тринистор з керуванням по аноду; г – запираємий тринистор з керуванням по катоду; д – запираємий тринистор з керуванням по аноду; е – симетричний динистор; ж – симетричний тринистор; з – фотодинистор; д – фототринистор

|| Динистор має виводи від двох крайніх шарів.

❖ Тринистор має виводи від двох крайніх шарів і від однієї внутрішньої (базової) області.

Схематичне зображення чотирьохшарових структур динистора та тринистора показано на рис. 2.3.23. В цих структурах крайні області структури – відповідно р- і n- емітери, а області, які прилягають до середнього переходу – відповідно р- і n- бази. Емітерні електроди є силовими і називаються катодом і анодом. Перехід П1 є емітерним або катодним, перехід П2 – колекторним; а перехід П3 – емітерним або анодним.

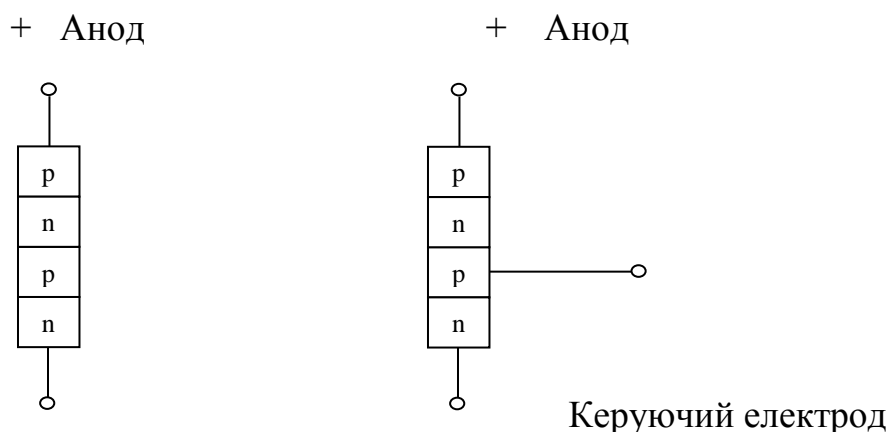


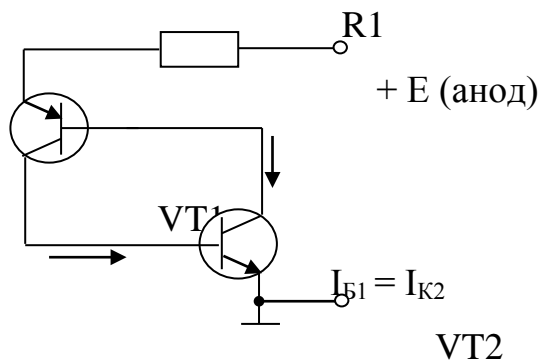
Рис. 2.3.23. Шарові структури тиристорів: а) динистора; б) тринистора

- Катод
а

- Катод
б

Для аналізу роботи тиристора чотирьохшарову структуру доцільно представити у вигляді двох транзисторів типів рпн і нпн (рис. 2.3.24), причому колекторний струм транзистора рпн (VT1) одночасно є базовим струмом транзистора нпн (VT2), колекторний струм транзистора VT2 – базовим струмом транзистора VT1. Таким чином

$$I_{B2} = I_{K1} \text{ і } I_{B1} = I_{K2}.$$



$$I_{B2} = I_{K1}$$

-E (катод)

Рис. 2.3.24. Двотранзисторна схема заміщення тиристора

При збільшенні ЕРС джерела основні носії зарядів із емітера пересікають шар, де вони є неосновними, частково рекомбінуються в ньому. Не рекомбіновані носії проходять через колекторний перехід і з'являються в області, де вони є основними (в шарі бази VT2), знижують висоту потенціального бар'єра, допомагають переходу зарядів із другого емітера, що веде до збільшення (загального) струму приладу.

Невеликий приріст ΔI_{E1} викликає деякий приріст ΔI_{K1} , який, при поступанні в базу VT2, викликає збільшення $\Delta I_{K1} \beta_2$

(2.3.22)

де β_2 – коефіцієнт підсилення за струмом VT2, який ввімкнений за схемою зі спільним емітером.

В свою чергу I_{K1} збільшується в транзисторі VT1

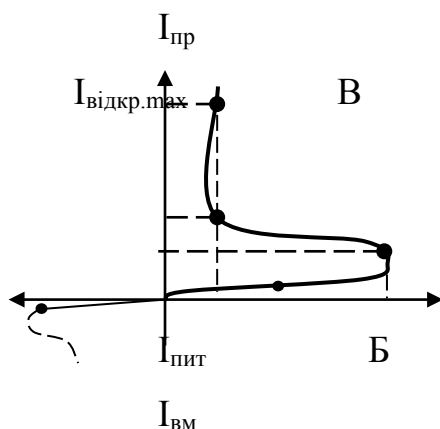
$$\Delta I_{K1} = \Delta I_{K2} \beta_1 = \Delta I_{K1} \beta_1 \beta_2 \quad (2.3.23)$$

де β_1 – коефіцієнт підсилення за струмом VT1, який ввімкнений за схемою зі спільним емітером.

Далі процес продовжується і струм в контурі лавиноподібно зростає.

Перехід структури p-n-p-n із непровідного стану в провідний можна викликати не лише підвищенням напруги зовнішнього джерела, але й збільшенням струму в одному із еквівалентних транзисторів. Для цього в тиристорі від однієї бази роблять вихід (керуючий електрод). Змінюючи струм керуючого електроду можна регулювати напругу перемикачання, а отже, керувати роботою приладу.

Типова вольт-амперна характеристика динистора приведена на рис.2.3.25. Вона може бути розбита на наступні області: *ВВ* – область малого додатнього опору, яка відповідає відкритому стану приладу; *БА* – область високого від'ємного опору; *А* – область поверненого пробую середнього p-n переходу; *АО* – непровідний стан (середній p-n перехід закритий зовнішнім джерелом напруги; *ОС* – область високого опору; від *С* і нижче – область лавинного неповерненого пробую.



Наявність у вольт-амперній характеристиці приладу ділянки з від'ємним опором дозволяє використовувати динистор в різних електронних схемах.

Динистор може знаходитись у двох стійких станах:

- ❖ перший стан характеризується малим струмом, що протікає через прилад, і великим падінням напруги на ньому (ділянка АО);
- ❖ другий стан характеризується великим струмом і малим падінням напруги (ділянка ВВ).

А

С О $U_{\text{відкр}}$ $U_{\text{вм}}$ $U_{\text{пр}}$

Рис. 2.3.25. Вольт-амперна характеристика динистора

Наявність у вольт-амперній характеристиці приладу ділянки з від'ємним опором дозволяє використовувати динистор в різних електронних схемах.

- Динистор може знаходитись у двох стійких станах:
- ❖ перший стан характеризується малим струмом, що протікає через прилад, і великим падінням напруги на ньому (ділянка АО);
 - ❖ другий стан характеризується великим струмом і малим падінням напруги (ділянка ВБ).

Тринистори можна вмикати при напругах, менших напруги ввімкнення динистора. Для цього достатньо на одну із баз подати додаткову напругу таким чином, щоб створюване ним поле співпадало за напрямком з полем аноду на колекторному переході. Можна подати струм керування на другу базу, але для цього на керуючий електрод необхідно подавати напругу від'ємної полярності відносно аноду, тому й розрізняють тринистори з керуванням по катоду і з керуванням по аноду.

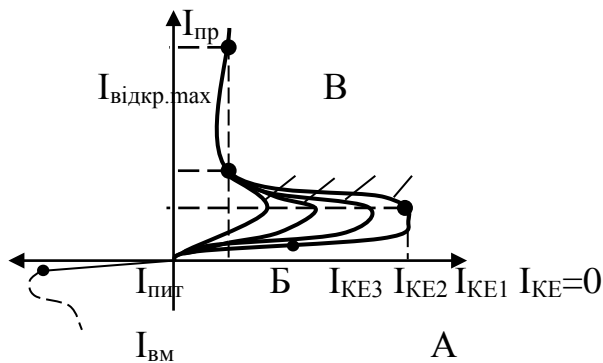


Рис. 2.3.26. Вольт-амперна характеристика динистора

$$I_{\text{ке3}} > I_{\text{ке2}} > I_{\text{ке1}} > I_{\text{ке}}=0$$

С О $U_{\text{відкр}}$ $U_{\text{вм}}$ $U_{\text{пр}}$

Вольт-амперна характеристика тринистора (рис.2.3.26) при $I_{\text{КЕ}}=0$ (струм керуючого електроду) подібна до вольт-амперної характеристики динистора.

Ріст $I_{\text{КЕ}}$ призводить до зміщення вольт-амперної характеристики в сторону меншої напруги ввімкнення. При достатньо великому струмі керуючого електроду вольт-амперна характеристика тринистора вироджується у вольт-амперну характеристику звичайного опору.

Для вимкнення тринистора необхідно зменшувати струм через нього до значення, меншого ніж $I_{\text{пит}}$.

Маркування тиристорів

❖ Для маркування тиристорів використовуються шість символів без будь-яких розділових знаків.

Перший елемент характеризує вихідний матеріал, з якого виготовлено прилад, позначається буквою:

К - кремній, або його з'єднання; **Г** – германій, або його з'єднання;
А – з'єднання галію.

Для приладів, які використовуються в пристроях спеціального призначення, встановлені наступні позначення, де буквам відповідають цифри: **К** – 1, **Г** – 2, **А** – 3.

Другий елемент характеризує підклас приладу, позначається буквою:

Н – динистори;
У – тринистори.

Третій елемент характеризує призначення приладу, позначається цифрою.

Четвертий і п'ятий елементи позначають порядковий номер розробки технологічного типу приладу, позначаються цифрами від 01 до 99.

Шостий елемент позначає ділення технологічного типу на параметричні групи, позначається буквою від А до Я.

Основні параметри тиристорів:

напруга ввімкнення $U_{вм}$ – напруга, при якій струм через прилад починає різко зростати;

струм ввімкнення $I_{вм}$ – струм, який протікає через прилад при прикладеній до нього напрузі ввімкнення;

струм утримання $I_{утр}$ – мінімальний основний струм, який необхідний для підтримання тиристора у відкритому стані при визначеному режимі в колі керуючого електроду;

напруга у відкритому стані $U_{відкр}$ – основна напруга при визначеному струмі в відкритому стані тиристора;

струм у закритому стані $I_{закр}$ – основний струм при визначеній напрузі у закритому стані тиристора;

зворотний струм $I_{зв}$ – анодний струм при визначеній зворотній напрузі;

загальна ємність $C_{заг}$ – ємність між основними електродами тиристора при визначеній напрузі в закритому стані;

постійний відкриваючий струм керуючого електроду $I_{KE.відкр.}$, *імпульсний відкриваючий струм керуючого електроду* $I_{KE.відкр.і}$, *постійна відкриваюча напруга на керуючому електроді* $U_{KE.відкр.}$, *імпульсна відкриваюча напруга на керуючому електроді* $U_{KE.відкр.і}$, *час ввімкнення* $t_{вм}$, *час вимкнення* $t_{вимкн}$ та ін.

Контрольні питання і вправи

1. Користуючись довідником, розшифруйте маркування і проведіть класифікацію наступних приладів (за типом, потужністю, частотою): 2У101А, ФТ-1, 1Т702А, 2П350Б, ГТ305А, ГТ806А, КТ911Т, 2Н102И, ФТГ-2, 1Т311Л, КП101Д.

2. Біполярний транзистор, який увімкнений за схемою зі спільним емітером має $K=49$. яке значення матиме коефіцієнт підсилення за струмом цього ж транзистора, якщо його увімкнути за схемою зі спільним колектором?

3. Визначити струм бази біполярного транзистора КТ815А, увімкненого за схемою зі спільним емітером, якщо у відкритому стані струм колектора 1,2 А, передаточний коефіцієнт за струмом 50.

4. Коефіцієнт передачі струму $\beta = 96$. Знайти величину коефіцієнта передачі струму α .

5. Як пояснити назву транзистора „біполярний”?

6. Розкажіть про переваги схеми ввімкнення транзистора із спільним емітером.

6. Поясніть побудову еквівалентних схем транзистора.

8. Знайдіть коефіцієнт передачі струму β , якщо $h_{21B} = 0,95$.

9. В якій схемі ввімкнення коефіцієнт прямої передачі струму емітера сильніше залежить від частоти?

10. Яка схема відрізняється більшою температурною стабільністю?

11. Вкажіть основні переваги польових транзисторів над біполярними.

12. Чим відрізняються польові транзистори з р-п переходом від транзисторів з ізольованим затвором?

13. Поясніть принцип роботи і можливості практичного застосування одноперехідного транзистора.

14. Поясніть фізичну суть вольт-амперної характеристики тиристора.

15. Приведіть основні параметри приладів 2Н102А і 2У203А і поясніть їх.

Лекція 7

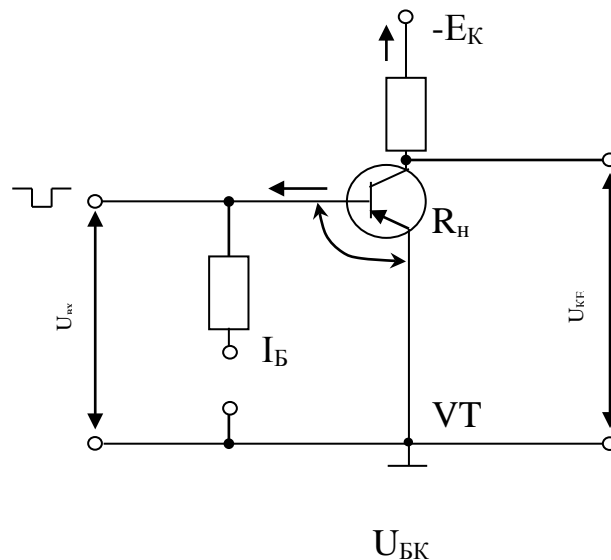
Тема ТРАНЗИСТОРИ. ТИРИСТОРИ (2 ЧАСТИНА)

- 7.1. Транзистор у режимі ключа
- 7.2. Польові транзистори
- 7.3. Одно перехідні (дворазові) транзистори
- 7.5. Фото транзистори
- 7.6. Тиристори

7.1 Транзистор у режимі ключа

Найважливішими елементами сучасних схем автоматики і електронних обчислювальних машин є пристрої релейного типу. Їх головна особливість в тому, що під дією вхідного сигналу режим роботи таких пристроїв різко (скачкоподібно) змінюється. Це дозволяє здійснювати перемикання, або комутацію, різних електричних кіл схеми.

Перемикаючі пристрої релейного типу мають два стійкі положення, які можуть розглядатись як положення „ввімкнено” і „вимкнено”.



R1

+

E_Б

-

Рис. 2.3.11. Ключова схема транзистора

Транзистор є одним із найбільш розповсюджених елементів безконтактних перемикаючих пристроїв. Режим роботи транзистора в перемикаючому пристрої зазвичай називають *ключовим*. Цей режим характерний тим, що транзистор в процесі роботи періодично переходить із відкритого стану (режим насичення) в закритий (режим відсічки) і навпаки, що відповідає двом стійким станам перемикаючого пристрою.

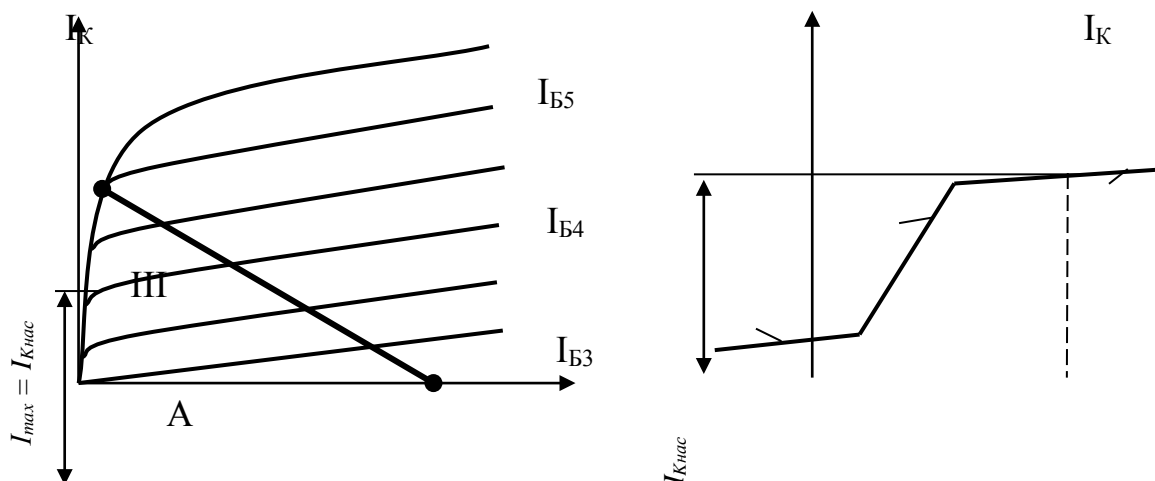
На рис. 2.3.11 показана найпростіша схема ключа на транзисторі ррр, ввімкненого за схемою зі спільним емітером.

Закривання транзистора (режим відсічки) спостерігається в тому випадку, коли обидва р-п переходи (емітерний і колекторний) закриті. Для цього достатньо, щоб зворотні напруги на цих переходах були наближені до нуля (біля 0,05...0,1 В). Із схеми (рис. 2.3.11) видно, що для закриття транзисторів типу ррр потрібно подати на його вхід таку напругу, щоб потенціал бази був вищим потенціалу емітера, тобто, щоб напруга U_{BE} між базою і емітером задовольняла нерівність $U_{BE} > 0$ (для транзисторів типу рпн ця нерівність буде зворотною).

Напруга U_{KE3} на колекторі закритого транзистора дорівнює

$$U_{KE3} = E_K - I_{KBВ} R_n$$

де $I_{KBВ}$ – зворотний струм колектора. Зазвичай $I_{KBВ} \cdot R_n \ll E_K$. Тому можна прийняти $U_{KE3} \approx E_K$.



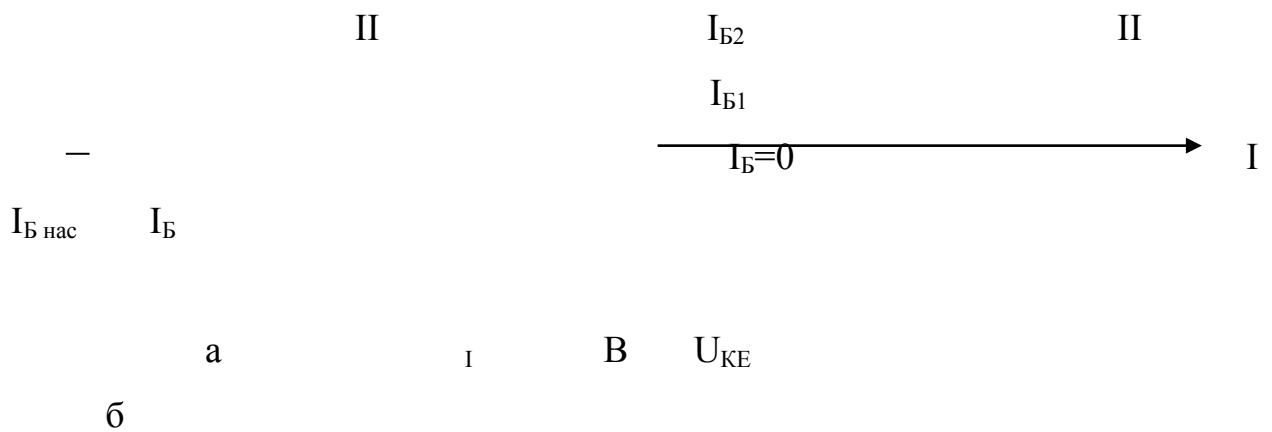


Рис. 2.3.12. Графічне пояснення роботи транзистора в ключовому режимі:

I – режим відсічки; II – активний режим; III – режим насичення

В закритому стані транзистор може знаходитись необмежено довго. Вивести його із цього стійкого стану можна лише за рахунок зовнішніх дій, наприклад шляхом подання на вхід транзистора типу ррр запускою чого імпульсу від'ємної полярності.

Другим стійким станом є режим насичення відкритого транзистора. Насичення настає в тому випадку, коли обидва р-п переходи транзистора відкриті.

На рис. 2.3.12, а приведені вихідні статичні характеристики транзистора зі спільним емітером. В сімействі цих характеристик проведена навантажувальна пряма АВ, яка показує залежність струму колектора від напруги на колекторі при визначених значеннях E_K і R_n . Величина струму колектора визначається головним чином величиною струму бази: чим більший струм бази (вхідний струм), тим більший струм колектора. При деякому значенні струму бази $I_{B_{нас}} = \frac{E_K}{R_n} = I_{B4}$ колекторний струм досягає максимальної величини $I_{K_{макс}}$. Така величина колекторного струму відповідає робочій точці А на рис. 2.3.12,а. При подальшому збільшенні струму бази струм колектора практично залишається незмінним. Тому $I_{K_{макс}}$ отримав назву *струму насичення* і позначається $I_{K_{нас}}$. Величина струму насичення відкритого транзистора може бути знайдена за формулою

$$(2.3.18)$$

Із рис. 2.3.12, а видно, що в області насичення (поблизу точки А) напруга між колектором і емітером, як і напруги між будь-якими іншими виводами транзистора, наближені до нуля.

На рис. 2.3.12, б показана залежність струму колектора I_K від струму бази I_B . Із цього рисунка видно, що характеристика $I_K = f(I_B)$ має злами на межах області закривання (відсічки) і насичення. Це допомагає більш чіткій роботі перемикаючого пристрою. Слід, однак, мати на увазі, що при переході транзистора із одного стійкого стану в інший можливі перехідні процеси, які спотворюють форму імпульсних струмів і напруг в колах транзистора.

7.2 Польові транзистори

Польовий транзистор – прилад, підсилюючі властивості якого обумовлені потоком основних носіїв, які протікають через провідний канал, і який керується електричним полем.

|| ❖ *Польові транзистори, порівняно з біполярними, мають великі вхідний і вихідний опори ($R_{вх}$ практично безмежно великий).*

Принцип дії польових транзисторів теоретично був описаний в 1952 році (Шокли), але із-за складності технології виготовлення вони з'явилися значно пізніше.

Від способу виготовлення і електричних характеристик польові транзистори діляться на дві групи:

- з р-п переходами;
- з ізолюваним затвором.
-

Польові транзистори з р-п переходами

Основним елементом таких транзисторів є пластина напівпровідника n-типу, на яку з обох сторін нанесені шари напівпровідника р-типу. На торці напівпровідникової пластини n-типу і на дві області р-типу нанесені

металеві плівки, до яких припаяні омичні контакти, а два шари р-типу з'єднані між собою (рис. 2.3.13).

Тонкий шар напівпровідника типу n (або p), обмежений з двох сторін електронно-дірковими переходами – канал.

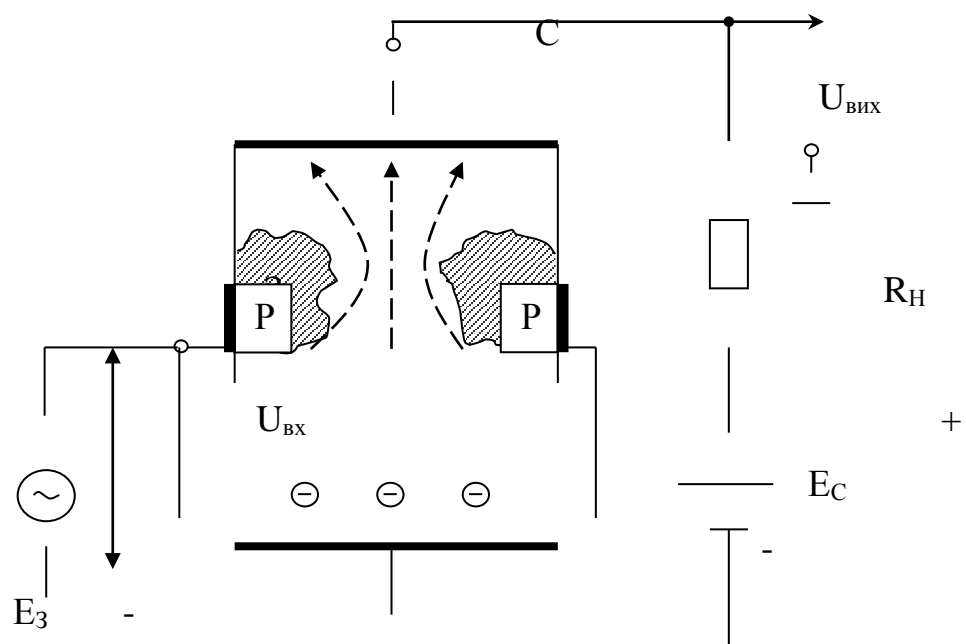
Ввімкнення каналу в електричне коло забезпечується за допомогою двох омичних електродів : витік (B), стік (C). Вивід, що під'єднаний до областей р-типу – затвор (З).

Виводи витік, стік, затвор відповідають в перерахованому порядку емітеру, колектору, базі біполярного транзистора.

На рис. 2.3.14 представлені умовні графічні зображення польових транзисторів з p-n переходами.

В основі роботи польового транзистора лежить зміна площі поперечного перерізу провідного каналу. Коли напруга на p-n переходах дорівнює нулю, площа поперечного перерізу провідного каналу максимальна, а електричний опір між витоком і стоком мінімальний.

Величина струму в каналі залежить від напруги U_C , прикладеної між стоком і витоком, опору навантаження і опору напівпровідникової пластинки між стоком і витоком.



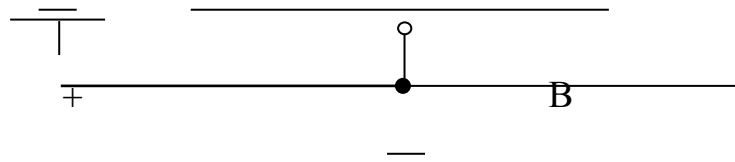


Рис. 2.3.13. Структура польового транзистора з р-п переходами

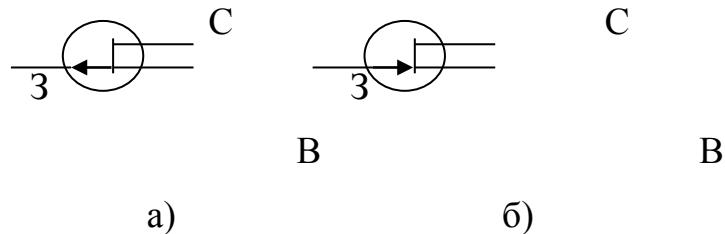


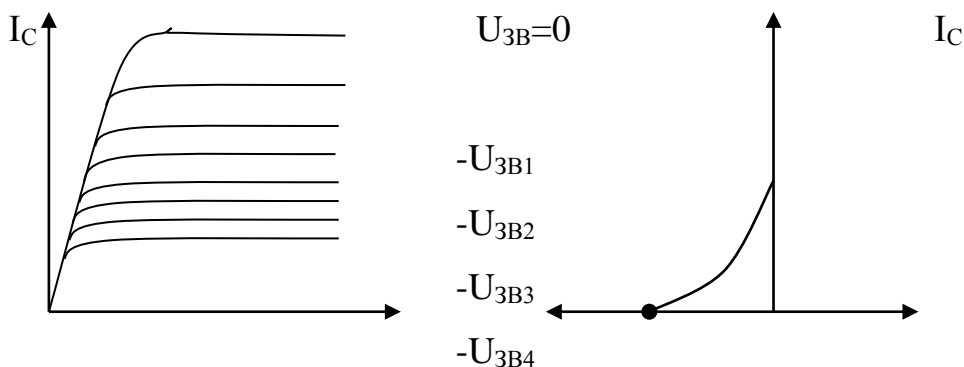
Рис. 2.3.14. Умовні графічні зображення польових транзисторів з р-п переходами:

а) р-каналом; б) п-каналом

При постійних U_C і R_H струм I_C залежить лише від площі поперечного перерізу каналу. E_3 утворює від'ємну напругу на затворі, що призводить до збільшення товщини р-п переходів і зменшенню перерізу струмопровідного каналу. Із зменшенням перерізу каналу підвищується опір між витокom і знижується величина I_C . Підімкнувши послідовно з E_3 джерело змінної напруги $U_{вх}$, можна змінювати струм через канал за законом зміни $U_{вх}$. R_H допомагає підсилити вихідний сигнал.

На рис. 2.3.15,а показано приблизний вигляд сімейства вихідних (стокових) вольт-амперних характеристик польового транзистора з р-п переходами $I_C = f(U_C)$ при $U_{ЗВ} = \text{const}$.

Залежність $I_C = f(U_{ЗВ})$ при $U_C = \text{const}$ отримала назву стокозатворної характеристики (рис. 2.3.15,б).



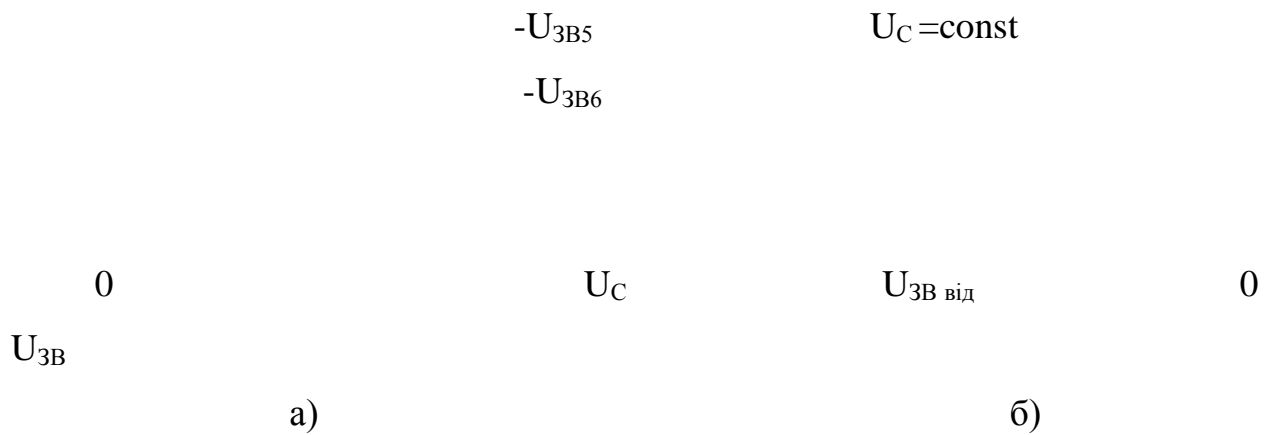


Рис. 2.3.15. Характеристики польового транзистора з р-п переходами:
 а) вихідні (стокові характеристики; б) стокотворна характеристика

7.3 Польові транзистори з ізольованим затвором

Польові транзистори з ізольованим затвором мають структуру *метал – діелектрик (окисел) – напівпровідник*. Тому їх часто називають МДП- або МОП-транзисторами. Принцип роботи цих приладів базується на ефекті поля в поверхневому шарі напівпровідника. На рис. 2.3.16. схематично показана конструкція такого транзистора. Основою приладу служить пластинка (підложка) монокристалічного кремнію р-типу. Области витоку і стоку являють собою ділянки кремнію, сильно леговані домішкою п-типу. Відстань між витоком і стоком приблизно 1 мкм. На цій ділянці розміщена вузька слабо легована смужка кремнію п-типу (канал). Затвором служить металева пластика, ізольована від каналу шаром діелектрика товщиною приблизно 0,1 мкм. В якості діелектрика може використовуватися вирощена при високій температурі плівка двоокису кремнію.

В залежності від полярності напруги, прикладеної до затвору (відносно стоку), канал може *збіднюватись* або *збагачуватись* носіями заряду (електронами). В залежності від цього існує 2 типи каналів: вбудований та індукований. При від'ємній напрузі на затворі електрони провідності виштовхуються із області каналу в об'єм напівпровідника підложки. При цьому канал збіднюється носіями заряду, що призводить до зменшення струму в каналі. Позитивна напруга на затворі допомагає

втягуванню електронів провідності із підложки в канал. В цьому режимі, який отримав назву режиму збагачення, струм каналу зростає.

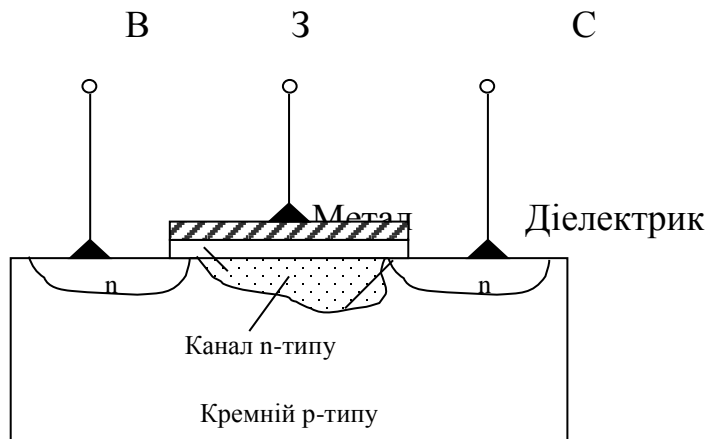


Рис. 2.3.16. Польовий транзистор з ізольованим затвором

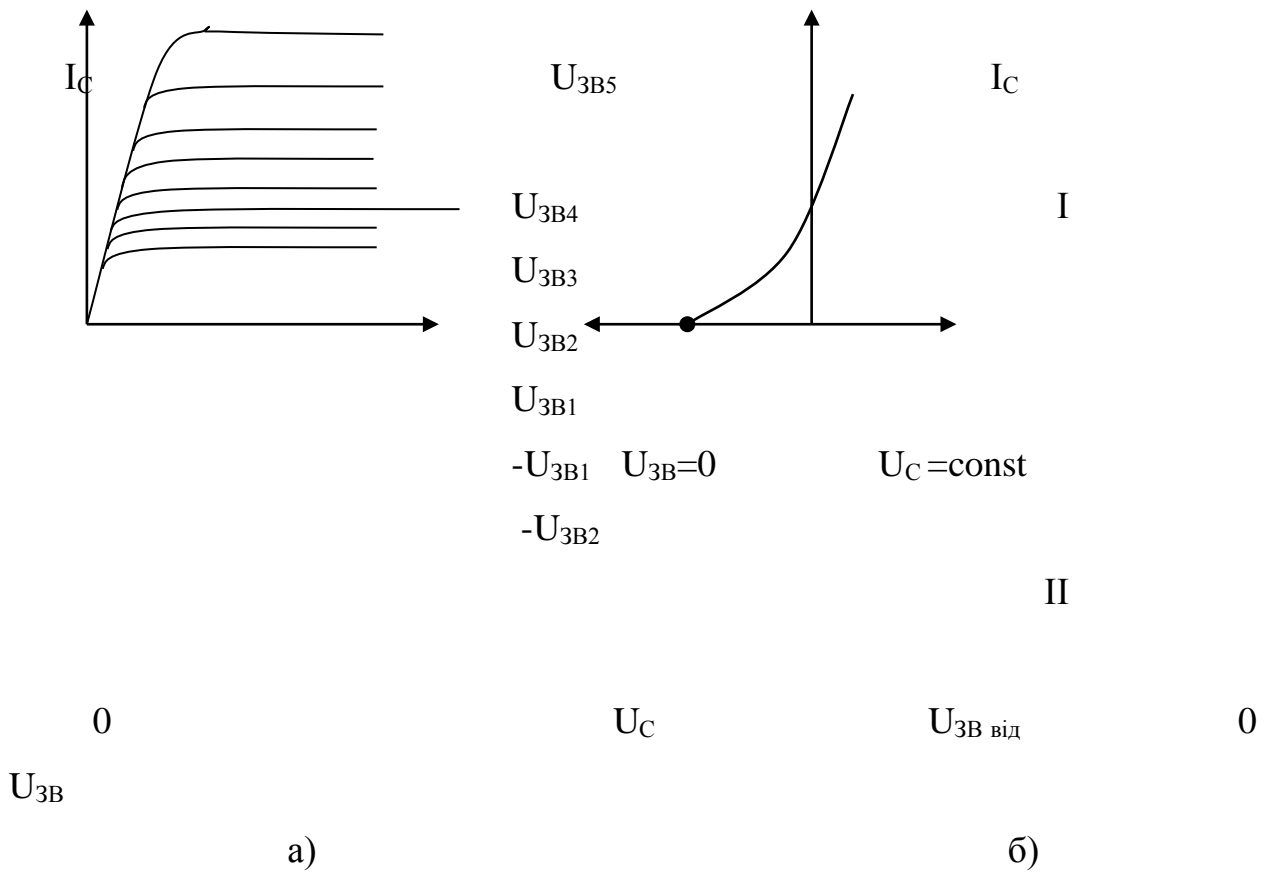


Рис. 2.3.16. Стокові (а) і стокозатворна (б) характеристики

польового транзистора з ізольованим затвором: I – режим збагачення; II – режим збіднення

Таким чином, на відміну від польового транзистора з р-n переходами, транзистор з ізольованим затвором може працювати з нульовою, від'ємною або додатною напругою на затворі.

Вихідні характеристики польового транзистора з ізольованим затвором (рис. 2.3.17,а) мають такий же вигляд, як і характеристики транзистора з р-n переходами. Різниця лише в тому, що транзистори з р-n переходами можуть працювати лише в режимі збіднення (звуження) каналу, а транзистори типу МДП (або МОП) працюють як в режимі збіднення (при від'ємних напругах на затворі), так і в режимі збагачення (при додатних напругах на затворі). З цієї ж причини стокозатворна характеристика транзистора з ізольованим затвором може захоплювати область позитивних напруг між затвором і витоком.

Основні параметри польових транзисторів.

Крутизна характеристики

$$S = \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{ЗВ}} \quad \text{при} \quad U_C = \text{const} \quad (2.3.19)$$

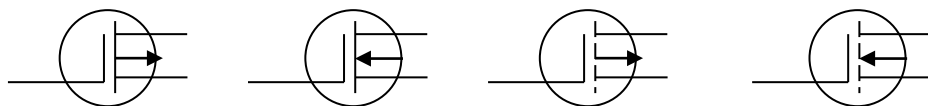
Напруга відсічки $U_{ЗВ \text{ від}}$ - зворотна напруга на затворі, при якій струмопровідний канал стане закритим.

Вхідний опір $R_{\text{вх}}$ між затвором і стоком

$$R_{\text{вх}} = \frac{\Delta U_{ЗВ \text{ max}}}{\Delta I_{З \text{ max}}} \quad (2.3.20)$$

Вихідний опір $R_{\text{вих}}$ (визначається в режимі насичення)

$$R_{\text{вих}} = \frac{\Delta U_C}{\Delta I_C} \quad \text{при} \quad U_{ЗВ} = \text{const} \quad (2.3.21)$$

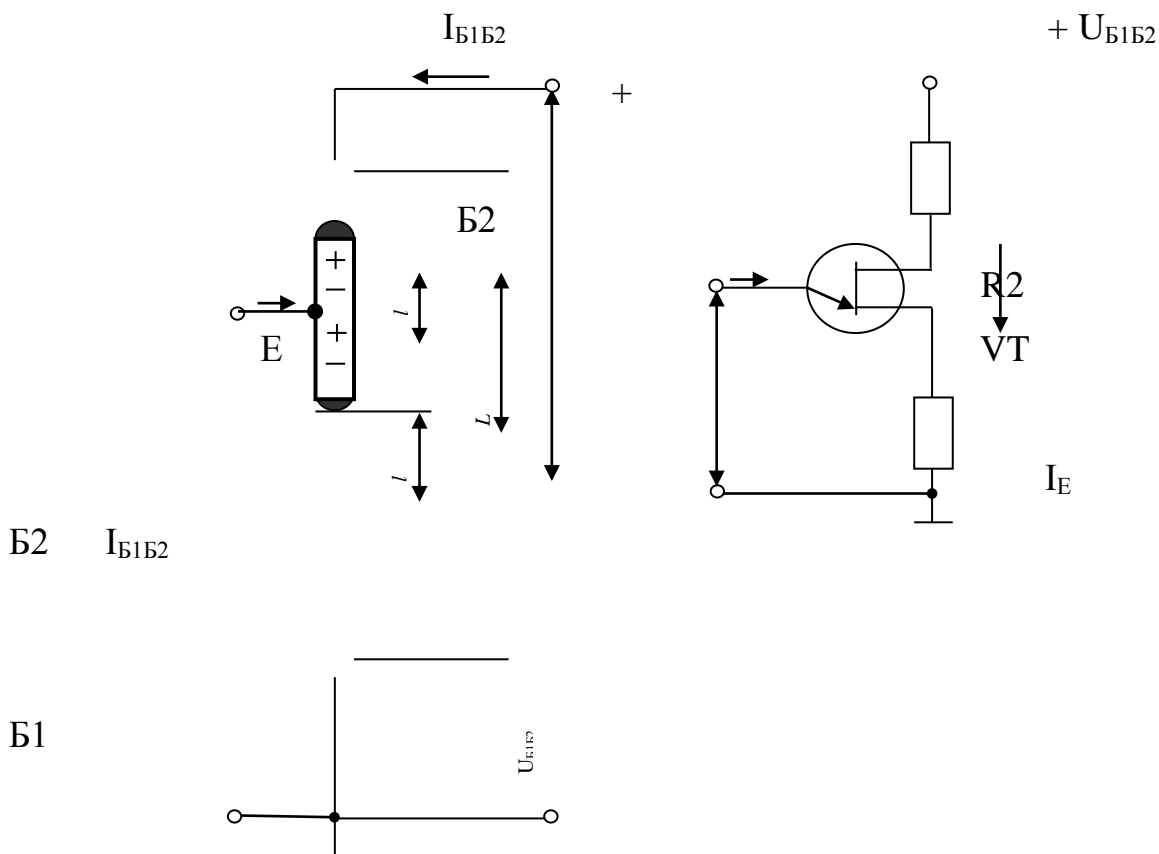


опору, на кінцях якої розміщені омичні контакти баз Б1 і Б2, а на боковій стороні – один емітерний р-n перехід.

Ділянки кристалу довжиною l_1 і l_2 (зазвичай $l_1 \ll l_2$) виконують функції баз приладу. Емітерний контакт зв'язку з зовнішнім виводом емітера Е.

Схема ввімкнення одноперехідного транзистора показана на рис. 2.3.19, б. До виводів баз Б1 і Б2 підводять напругу живлення $U_{Б1Б2}$, причому база Б2 має позитивний потенціал відносно бази Б1, яку зазвичай заземлюють. Під дією цієї напруги в кремнієвій пластинці виникає струм $I_{Б1Б2}$. Ділянка між базами Б1 і Б2 одноперехідного транзистора являє собою омичний опір в декілька кОм з лінійною вольт-амперною характеристикою. Тому напруга $U_{Б1Б2}$ розподіляється по базам пропорційно їх опорам, які залежать від довжин l_1 і l_2 . Ці напруги відповідно рівні $U_{ЕБ1}$ і $U_{ЕБ2}$. Полярність напруги $U_{ЕБ1}$ така, що в вихідному стані емітерний р-n перехід буде зміщений в зворотному напрямі і через нього пройде лише невеликий струм втрат $I_{ЕБ0}$ (рис. 2.3.20).

Цей же стан збережеться при подачі на емітер від'ємної напруги U_E або позитивної але, яка не перевищує величини напруги $U_{ЕБ1}$.



Б1

U_E

Р1

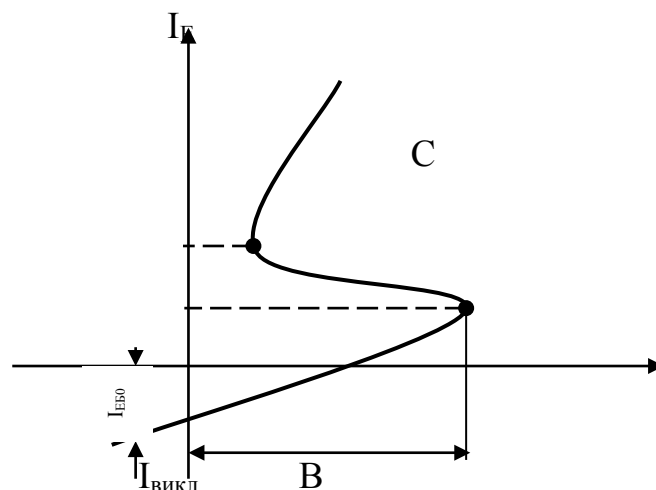
а

б

Рис. 2.3.19. Будова (а), схема ввімкнення (б)

одноперехідного транзистора

Якщо ж напруга U_E перевищить напругу U_{EB1} на величину, достатню для відкриття емітерного р-п переходу (точка А на рис.2.3.20), то в кремнієву пластинку із емітера будуть інжектуватися дірки. Під дією електричного поля джерела U_{B1B2} ці дірки будуть рухатися в напрямі до виводу бази Б1, утворюючи емітерний струм, що призведе до збільшення провідності на ділянці довжиною l_1 , або зменшенню до незначної величини опору на цій ділянці. В результаті внутрішнє падіння напруги U_{EB1} зменшиться, що допоможе подальшому відкриттю емітерного р-п переходу і збільшенню струму емітера і т.д. Т таким чином, процес зростання емітерного струму буде розвиватись лавиноподібно. З ростом емітерного струму опір емітерного переходу знижується, а напруга U_E зменшується. Це відповідає появі у вольт-амперній характеристиці ділянки від'ємного опору приладу (ділянка АВ на рис.2.3.20).



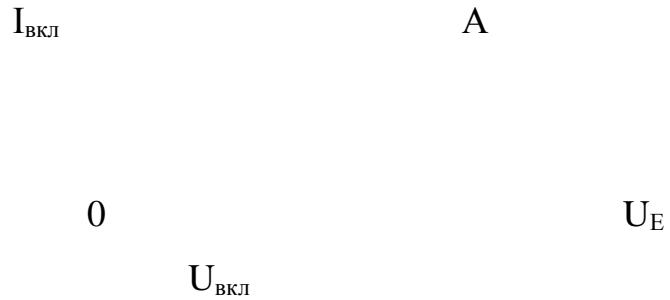


Рис. 2.3.20. Вольт-амперна характеристика одноперехідного транзистора

Подальше збільшення емітерного струму (ділянка BC) пов'язано з підвищенням зовнішньої емітерної напруги.

Таким чином, вольт-амперна характеристика одноперехідного транзистора нагадує вольт-амперні характеристики тунельних діодів, що дозволяє використовувати даний прилад для побудови різних перемикаючих схем.

Переваги одноперехідних транзисторів:

- ❖ простота конструкції;
 - ❖ стабільна напруга спрацювання;
 - ❖ мале споживання струму в колі керування;
 - ❖ можливості передачі порівняно потужних імпульсів
- і т.п.*

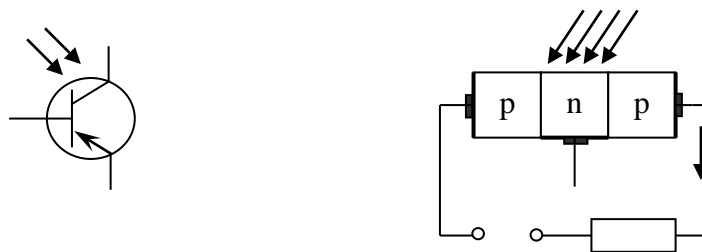
7.5 Фототранзистори

Фото транзистор – фотогальванічний приймач випромінювання, фото чуттєвий елемент якого містить структуру транзистора, яка забезпечує внутрішнє підсилення.

Конструктивне оформлення одного із типових фототранзисторів (типу ФТ-1). Прилад складається із германієвої пластини, в яку із двох сторін співвісно впаяно навіски індію, які утворюють колектор і емітер. Пластина германію припаяна олов'яним кільцем до кристалотримача, який в свою чергу приварений до ніжки. Колектор і емітер за допомогою тонких виводів з'єднані з провідниками, ізольованими від ніжки скляними ізоляторами. Базовий вивід приварений до ніжки. Весь фототранзистор поміщений в герметичний корпус, в якому є круглий отвір, закритий склом.

Двополюсна схема ввімкнення фототранзистора показана на рис.2.3.21,б. При такому ввімкненні вивід бази фототранзистора залишається вільним, тобто струм бази $I_B = 0$. при освітленні бази в ній з'являються вільні електрони і дірки. Для бази фото транзистора типу рпр дірки є неосновними носіями зарядів, тому вони втягуються полем колекторного переходу в колектор, збільшуючи струм в його колі. Основні носії зарядів (електрони), які залишилися в базі, створюють просторовий заряд, який понижує висоту потенціального бар'єру емітерного переходу. При цьому полегшується перехід дірок із емітера в базу, а потім, а потім в колектор, що приводить до ще більшого росту колекторного струму, який проходить через навантажувальний опір. Таким чином, навіть при невеликому світловому потокові, який падає на базу, струм колектора стає достатньо великим, що свідчить про високу чуттєвість фототранзистора.

Спочатку фототранзистори застосовувались виключно в розглянутій вище двополюсній схемі ввімкнення. Тому в деяких конструкціях фото транзисторів базовий вивід відсутній. Такий фото транзистор за своїми параметрами відрізняється від фото діода лише більшою інтегральною чуттєвістю. Фото транзистор, який має три виводи, являє додаткові можливості його використання, які базуються на тому, що, крім світлового сигналу, на його вхід можна подати сигнал електричний.



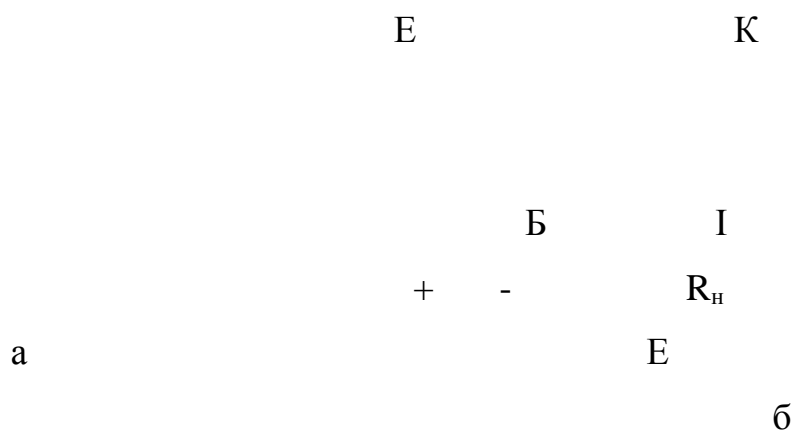


Рис. 2.3.21. Умовне графічне зображення (а), двополюсна схема ввімкнення (б) фототранзистора типу pnp

Оскільки конструкція фото транзистора в основному не відрізняється від конструкції звичайного біполярного транзистора, характеристики цих двох приладів також однакові, якщо на вхід фото транзистора подається лише електричний сигнал.

Основні параметри фототранзисторів:

темновий струм I_T – струм через затемнений фототранзистор при прикладеній робочій напрузі;

струм при освітленні I_C – струм через освітлений фототранзистор при прикладеній робочій напрузі;

інтегральна чуттєвість S_{int} – відношення струму через фототранзистор при прикладеній робочій напрузі до падаючого на нього світлового потоку;

найбільша потужність розсіювання $P_{роз.мах}$ – допустима потужність, яка виділяється на приладі і допускає його експлуатацію протягом тривалого часу.

Фототранзистори використовуються в якості чутливих елементів в різних автоматичних пристроях, кіно фотоапаратурі, в пристроях введення і виведення інформації в обчислювальній техніці, для реєстрації ультрафіолетового і інфрачервоного випромінювання і т.п. Крім того вони з успіхом використовуються в оптоелектроніці.

7.6 Тиристри

Тиристор – напівпровідниковий прилад, який має чотирьохшарову структуру з трьома послідовними р-п переходами, характеризується двома стійкими станами в прямому напрямі і запираючими властивостями в зворотному напрямі.

Основні види тиристорів:

- динистор (діодний тиристор);
- тринистор (тріодний тиристор).

На рисунку 2.3.22 представлені умовні графічні зображення тиристорів.

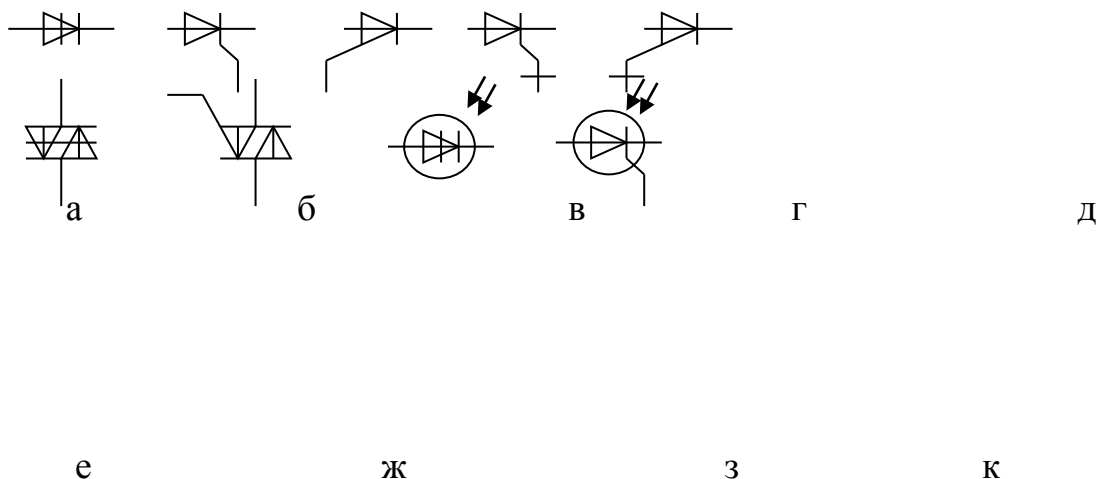


Рис. 2.3.22. Умовні графічні зображення тиристорів:

а – динистор; б – незапираємий тринистор з керуванням по катоду; в – незапираємий тринистор з керуванням по аноду; г – запираємий тринистор з керуванням по катоду; д – запираємий тринистор з керуванням по аноду; е – симетричний динистор; ж – симетричний тринистор; з – фотодинистор; д – фототринистор

|| Динистор має виводи від двох крайніх шарів.

❖ Тринистор має виводи від двох крайніх шарів і від однієї внутрішньої (базової) області.

Схематичне зображення чотирьохшарових структур динистора та тринистора показано на рис. 2.3.23. В цих структурах крайні області структури – відповідно р- і n- емітери, а області, які прилягають до середнього переходу – відповідно р- і n- бази. Емітерні електроди є силовими і називаються катодом і анодом. Перехід П1 є емітерним або катодним, перехід П2 – колекторним; а перехід П3 – емітерним або анодним.

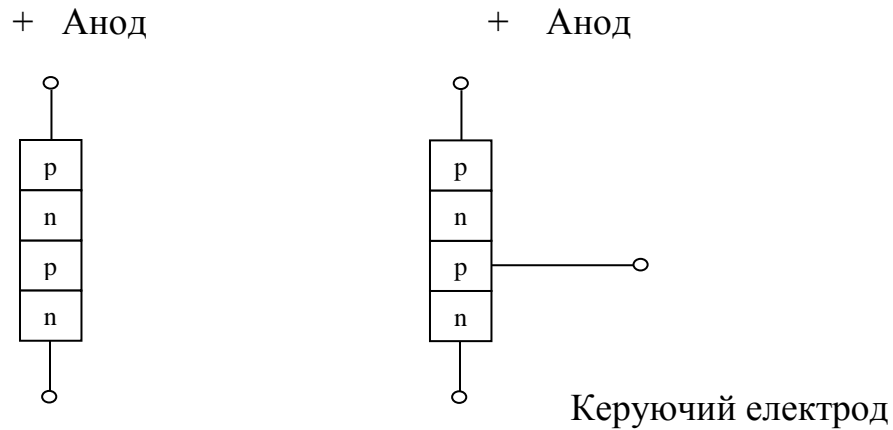


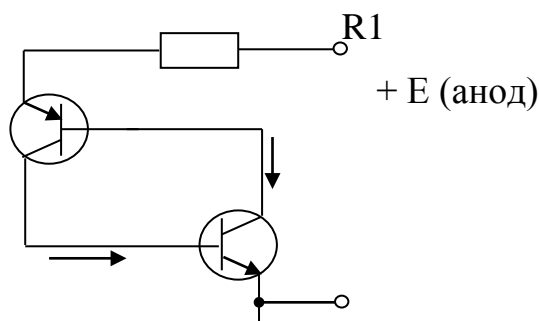
Рис. 2.3.23. Шарові структури тиристорів: а) динистора; б) тринистора

- Катод
а

- Катод
б

Для аналізу роботи тиристора чотирьохшарову структуру доцільно представити у вигляді двох транзисторів типів рnp і npn (рис. 2.3.24), причому колекторний струм транзистора рnp (VT1) одночасно є базовим струмом транзистора npn (VT2), колекторний струм транзистора VT2 – базовим струмом транзистора VT1. Таким чином

$$I_{B2} = I_{K1} \text{ і } I_{B1} = I_{K2}.$$



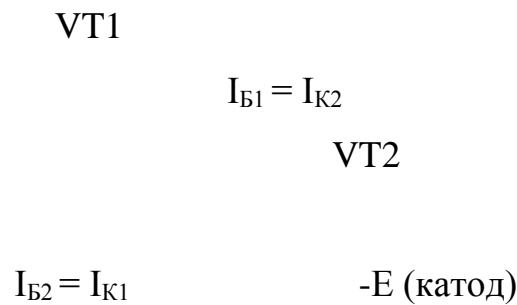


Рис. 2.3.24. Двотранзисторна схема заміщення тиристора

При збільшенні ЕРС джерела основні носії зарядів із емітера пересікають шар, де вони є неосновними, частково рекомбінуються в ньому. Не рекомбіновані носії проходять через колекторний перехід і з'являються в області, де вони є основними (в шарі бази VT2), знижують висоту потенціального бар'єра, допомагають переходу зарядів із другого емітера, що веде до збільшення (загального) струму приладу.

Невеликий приріст ΔI_{E1} викликає деякий приріст ΔI_{K1} , який, при поступанні в базу VT2, викликає приріст $\Delta I_{K1} \beta_2$

$$(2.3.22)$$

де β_2 – коефіцієнт підсилення за струмом VT2, який ввімкнений за схемою зі спільним емітером.

В свою чергу I_{K1} збільшується в транзисторі VT1

$$\Delta I_{K1} = \Delta I_{K2} \beta_1 = \Delta I_{K1} \beta_1 \beta_2 \quad (2.3.23)$$

де β_1 – коефіцієнт підсилення за струмом VT1, який ввімкнений за схемою зі спільним емітером.

Далі процес продовжується і струм в контурі лавиноподібно зростає.

Перехід структури p-n-p-n із непровідного стану в провідний можна викликати не лише підвищенням напруги зовнішнього джерела, але й збільшенням струму в одному із еквівалентних транзисторів. Для цього в тиристорі від однієї бази роблять вихід (керуючий електрод). Змінюючи

струм керуючого електроду можна регулювати напругу перемикачання, а отже, керувати роботою приладу.

Типова вольт-амперна характеристика динистора приведена на рис.2.3.25. Вона може бути розбита на наступні області: *ВБ* – область малого додатнього опору, яка відповідає відкритому стану приладу; *БА* – область високого від'ємного опору; *А* – область поверненого пробою середнього *p-n* переходу; *АО* – непровідний стан (середній *p-n* перехід закритий зовнішнім джерелом напруги); *ОС* – область високого опору; від *С* і нижче – область лавинного неповерненого пробою.

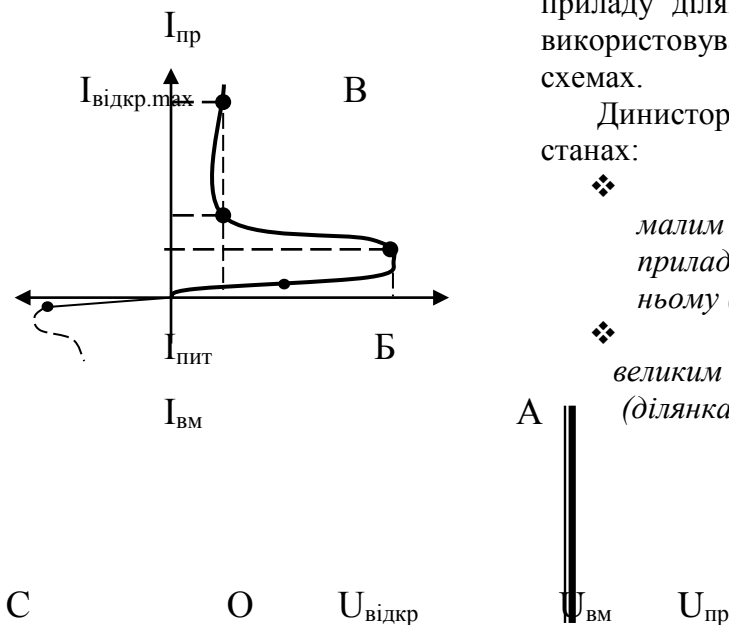


Рис. 2.3.25. Вольт-амперна характеристика динистора

Наявність у вольт-амперній характеристиці приладу ділянки з від'ємним опором дозволяє використовувати динистор в різних електронних схемах.

Динистор може знаходитись у двох стійких станах:

- ❖ перший стан характеризується малим струмом, що протікає через прилад, і великим падінням напруги на ньому (ділянка *АО*);
- ❖ другий стан характеризується великим струмом і малим падінням напруги (ділянка *ВБ*).

Наявність у вольт-амперній характеристиці приладу ділянки з від'ємним опором дозволяє використовувати динистор в різних електронних схемах.

|| Динистор може знаходитись у двох стійких станах:

- ❖ перший стан характеризується малим струмом, що протікає через прилад, і великим падінням напруги на ньому (ділянка АО);
- ❖ другий стан характеризується великим струмом і малим падінням напруги (ділянка ВБ).

Триністори можна вмикати при напругах, менших напруги ввімкнення диністора. Для цього достатньо на одну із баз подати додаткову напругу таким чином, щоб створюване ним поле співпадало за напрямком з полем аноду на колекторному переході. Можна подати струм керування на другу базу, але для цього на керуючий електрод необхідно подавати напругу від'ємної полярності відносно аноду, тому й розрізняють триністори з керуванням по катоду і з керуванням по аноду.

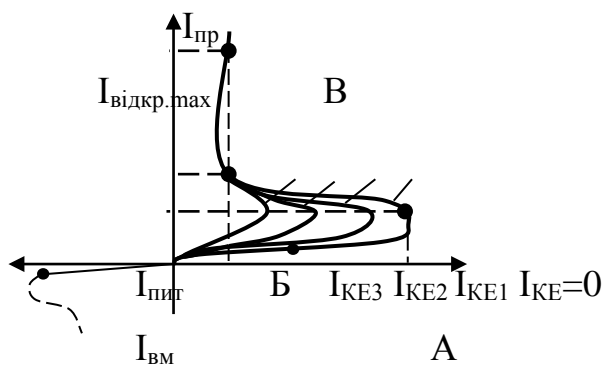


Рис. 2.3.26. Вольт-амперна характеристика диністора

$$I_{KE3} > I_{KE2} > I_{KE1} > I_{KE=0}$$

С О $U_{відкр}$ $U_{вм}$ $U_{пр}$

Вольт-амперна характеристика триністора (рис.2.3.26) при $I_{KE}=0$ (струм керуючого електроду) подібна до вольт-амперної характеристики диністора.

Ріст I_{KE} призводить до зміщення вольт-амперної характеристики в сторону меншої напруги ввімкнення. При достатньо великому струмі керуючого електроду вольт-амперна характеристика триністора вироджується у вольт-амперну характеристику звичайного опору.

Для вимкнення тринистора необхідно зменшувати струм через нього до значення, меншого ніж $I_{\text{пит}}$.

Маркування тиристорів

❖ Для маркування тиристорів використовуються шість символів без будь-яких розділових знаків.

Перший елемент характеризує вихідний матеріал, з якого виготовлено прилад, позначається буквою:

К - кремній, або його з'єднання; **Г** – германій, або його з'єднання;
А – з'єднання галію.

Для приладів, які використовуються в пристроях спеціального призначення, встановлені наступні позначення, де буквам відповідають цифри: К – 1, Г – 2, А – 3.

Другий елемент характеризує підклас приладу, позначається буквою:

Н – динистори;
У – тринистори.

Третій елемент характеризує призначення приладу, позначається цифрою.

Четвертий і п'ятий елементи позначають порядковий номер розробки технологічного типу приладу, позначаються цифрами від 01 до 99.

Шостий елемент позначає ділення технологічного типу на параметричні групи, позначається буквою від А до Я.

Основні параметри тиристорів:

напруга ввімкнення $U_{\text{вм}}$ – напруга, при якій струм через прилад починає різко зростати;

струм ввімкнення $I_{\text{вм}}$ – струм, який протікає через прилад при прикладеній до нього напрузі ввімкнення;

струм утримання $I_{\text{упр}}$ – мінімальний основний струм, який необхідний для підтримання тиристора у відритому стані при визначеному режимі в колі керуючого електроду;

напруга у відкритому стані $U_{відкр}$ – основна напруга при визначеному струмі в відкритому стані тиристора;

струм у закритому стані $I_{закр}$ – основний струм при визначеній напрузі у закритому стані тиристора;

зворотний струм $I_{зв}$ – анодний струм при визначеній зворотній напрузі;

загальна ємність $C_{заг}$ – ємність між основними електродами тиристора при визначеній напрузі в закритому стані;

постійний відкриваючий струм керуючого електроду $I_{KE.відкр.}$, імпульсний відкриваючий струм керуючого електроду $I_{KE.відкр.і}$, постійна відкриваюча напруга на керуючому електроді $U_{KE.відкр.}$, імпульсна відкриваюча напруга на керуючому електроді $U_{KE.відкр.і}$, час увімкнення $t_{вм}$, час вимкнення $t_{вимкн}$ та ін.

Контрольні питання і вправи

1. Користуючись довідником, розшифруйте маркування і проведіть класифікацію наступних приладів (за типом, потужністю, частотою): 2У101А, ФТ-1, 1Т702А, 2П350Б, ГТ305А, ГТ806А, КТ911Т, 2Н102И, ФТГ-2, 1Т311Л, КП101Д.

2. Біполярний транзистор, який увімкнений за схемою зі спільним емітером має $K=49$. яке значення матиме коефіцієнт підсилення за струмом цього ж транзистора, якщо його увімкнути за схемою зі спільним колектором?

3. Визначити струм бази біполярного транзистора КТ815А, увімкненого за схемою зі спільним емітером, якщо у відкритому стані струм колектора 1,2 А, передаточний коефіцієнт за струмом 50.

4. Коефіцієнт передачі струму $\beta = 96$. Знайти величину коефіцієнта передачі струму α .

5. Як пояснити назву транзистора „біполярний“?

6. Розкажіть про переваги схеми ввімкнення транзистора із спільним емітером.

6. Поясніть побудову еквівалентних схем транзистора.

8. Знайдіть коефіцієнт передачі струму β , якщо $h_{21B} = 0,95$.

9. В якій схемі ввімкнення коефіцієнт прямої передачі струму емітера сильніше залежить від частоти?

10. Яка схема відрізняється більшою температурною стабільністю?

11. Вкажіть основні переваги польових транзисторів над біполярними.

12. Чим відрізняються польові транзистори з р-n переходом від транзисторів з ізольованим затвором?

13. Поясніть принцип роботи і можливості практичного застосування одноперехідного транзистора.

14. Поясніть фізичну суть вольт-амперної характеристики тиристора.

15. Приведіть основні параметри приладів 2Н102А і 2У203А і поясніть їх.

ЛЕКЦІЯ 8

ЕЛЕКТРОВАКУУМНІ ТА ІОННІ ПРИЛАДИ

8.1. Електронні лампи

8.2. Іонні прилади тліючого розряду

Електровакуумний прилад – прилад, в якому провідність здійснюється електронами або іонами, які рухаються через вакуум або газ.

Електровакуумні прилади діляться на: електронно-керовані (діод, триод, тетрод, пентод); газорозрядні (тиратрон, стабілітрон, індикатор тліючого розряду, неонова лампа); електронно-променеві (осцилографічна трубка, кінескоп, трубки спеціального призначення); на зовнішньому фотоефекті (фотоелемент, фотоелектронний помножувач).

Ще не так давно електровакуумні електронно-керовані і газорозрядні прилади були основними приладами, які використовувалися в різних приладах автоматики, промислової електроніки, радіоелектроніки. Інтенсивний розвиток напівпровідникової електроніки, особливо мікроелектроніки, значно зменшив обсяги їх використання.

В даний час електронно-керовані і газорозрядні прилади використовують в розроблених раніше схемах і схемах електронних приладів, які знаходяться в експлуатації. У апаратурі, яка розробляється, їх використовують для підсилення, генерування і других перетворень сигналів значно більшої робочої частоти і потужності, ніж це можливо за допомогою напівпровідникових приладів.

7.1 Електронні лампи

Електронна лампа – електровакуумний прилад, який складається із металевого, металокерамічного або пластмасового балону, з якого викачане повітря, та розміщених в ньому електродів.

В залежності від призначення і типу лампи електродів може бути декілька, але в будь-якій лампі є два основних електроди: *катод* – джерело електронів і *анод* – приймач електронів. Рух електронів в вакуумі від одного електроду до іншого і зумовлює електричний струм в лампі.

Катоди є прямого і непрямого розжарення. Катоди непрямого розжарення зазвичай виконуються у вигляді трубки, всередині якої розміщена спіраль, яка називається ниткою розжарення. На неї подається напруга розжарення, вона розігріває катод для отримання термоелектронної емісії. Катоди прямого розжарення – це катоди, в яких напруга розжарення подається безпосередньо на катод. Аноди можуть бути різноманітної форми: у вигляді дисків, прямокутних пластин, циліндрів і т.п. під дією електронного бомбардування вони нагріваються до високих температур, тому для уникнення плавлення їх виготовляють із тугоплавких металів.

Електровакуумний діод

Електровакуумний діод є найпростішою електронною лампою (прототип напівпровідникового діода).

❖ *Основна властивість – пропускати струм в одному напрямі.*

Діоди бувають (рис.2.4.1) з катодом прямого і непрямого розжарення.

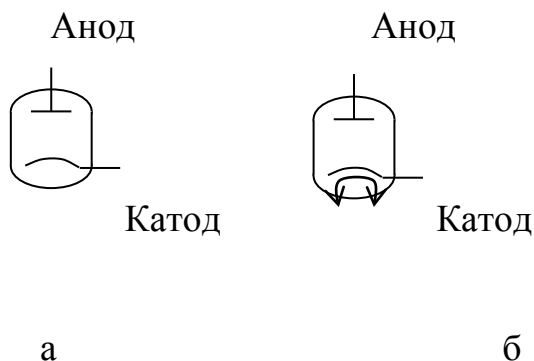


Рис. 2.4.1. Умовні графічні зображення електровакуумного діода:

а – з прямим розжаренням; б – з непрямым розжаренням

Діод пропускає струм лише тоді, коли на аноді діє додатна напруга (рис. 2.4.2). Якщо на анод лампи подана від'ємна напруга. То електричне поле перешкоджає руху електронів, які випромінюються катодом. Струм не проходить (лампа закрита). Відмінність електровакуумних діодів від напівпровідникових заключається в тому, що зворотній струм в них повністю відсутній.

Вольт-амперна характеристика електровакуумного діода характеризує залежність анодного струму від напруги на аноді при постійному значенні напруги розжарення (рис. 2.4.3)

$$I_a = f(U_a) \text{ при } U_p = \text{const.}$$

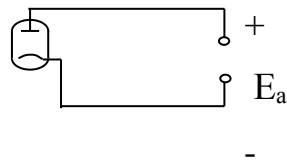
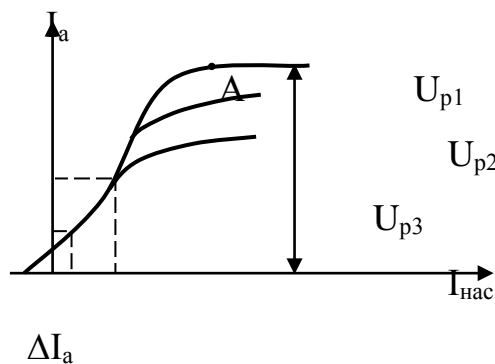


Рис. 2.4.2. Схема ввімкнення діода



Точка А дає початок режиму насичення (катод вже не може виділити більше електронів, як би не збільшувалася напруга на аноді).

За вольт-амперною характеристикою можна визначити основні параметри діода:

$$\Delta U_a$$

$$U_a$$

Рис. 2.4.3. Вольт-амперна характеристика діода

$$\text{крутизна характеристики } S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_a} \quad (2.4.1)$$

$$\text{внутрішній опір } R = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} = \frac{1}{S} \quad (2.4.2)$$

допустима потужність розсіювання (показує, при якій потужності діод вийде з ладу із-за перегріву аноду)

(2.4.3)

зворотна пробивна напруга $U_{зв}$ – зворотна напруга, при якій діод вийде з ладу в результаті пробою простору між катодом і анодом.

❖ Діоди, призначені для випрямлення струмів промислової частоти, називаються **кенотронами**.

Маркування електровакуумних приладів

Маркування електровакуумних діодів містить букву Ц і складається із 5 елементів:

1 елемент - позначається цифрою і характеризує значення U_p ;

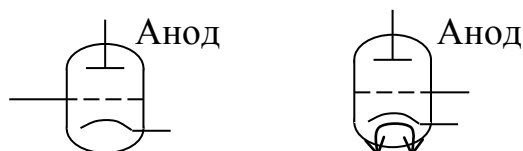
2 елемент – тип електровакуумного приладу. Для діодів: Д – одинарний діод; Х – подвійний діод (тобто, який містить два діоди в одному корпусі із спільним розжаренням); С – високовольтний діод або кенотрон;

3, 4 елементи – порядковий номер розробки (позначається цифрами);

5 елемент – позначається буквою і характеризує особливості конструкції: С – в скляній колбі з пластмасовим цоколем (дуже старе виконання, не менш 24 мм – діаметр колби); П – пальчикові; Ж – типу „жолудь”; А – мініатюрні з гнучкими виводами і діаметром корпусу менше 6 мм; Б - мініатюрні з гнучкими виводами і діаметром корпусу менше 10 мм; К – в керамічному корпусі; відсутність 5-го елементу – це говорить про відсутність металевого корпусу.

Тріод

Тріод – трьохелектродний електровакуумний прилад, в якого крім аноду і катоду є ще один електрод, який називаються *керуюча сітка*.



Керуюча

Керуюча сітка

сітка

Катод

Катод

а

б

Рис. 2.4.4. Умовні графічні зображення електривакуумного тріода:

а – з прямим розжаренням; б – з непрямим розжаренням

Коли напруга на сітці дорівнює нулю $U_c = 0$, то сітка практично не впливає на роботу лампи, тоді тріод діє як діод. При від'ємній напрузі на сітці між сіткою і катодом виникає електричне поле, яке перешкоджає руху електронів і обмежує анодний струм (лампа закрита). При додатній напрузі на сітці між катодом і сіткою створюється прискорююче електричне поле, яке допомагає рухові електронів, в результаті чого анодний струм збільшується.

❖ Оскільки сітка розміщена до катоду ближче ніж анод, то порівняно малі зміни на сітці впливають на анодний струм сильніше, ніж в десятки разів більші зміни на аноді.

Основними характеристиками тріода є:

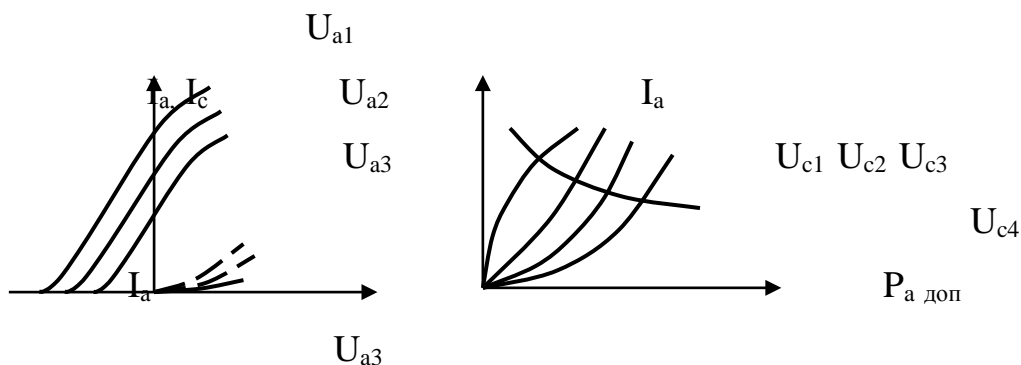
сітково-анодна (рис.2.4.5), яка показує залежність анодного струму від напруги на керуючій сітці при сталих значеннях напруги на аноді

$$I_a = f(U_c) \text{ при } U_a = \text{const};$$

сіткова (рис.2.4.5), яка показує залежність сіткового струму від напруги на керуючій сітці при сталих значеннях напруги на аноді;

анодна (рис.2.4.6), яка характеризує залежність анодного струму від напруги на аноді при сталих значеннях напруги на сітці

$$I_a = f(U_a) \text{ при } U_c = \text{const}.$$



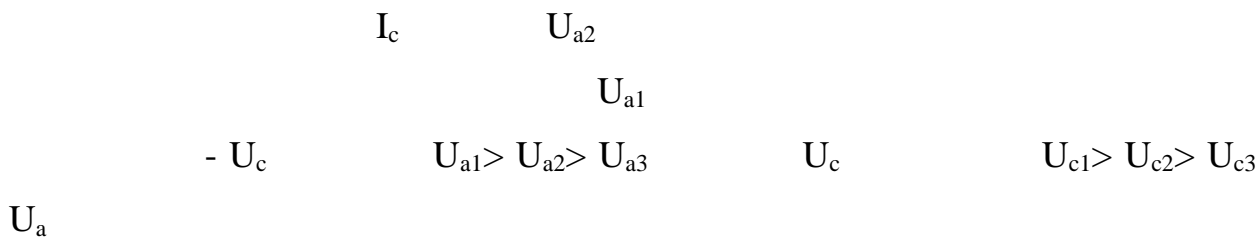


Рис. 2.3.5. Анодно-сіткова та сіткова характеристика триода

Рис. 2.3.5. Анодна характеристика триода

Основні параметри триода:

крутизна характеристики

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_c}$$

(2.4.4)

внутрішній опір

$$R = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} \quad \text{при } U_c = const$$

(2.4.5)

$$\mu = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_c}$$

коефіцієнт підсилення

$$\mu = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_c} \quad \text{при } I_a = const$$

(2.4.6)

Тетрод

Тетрод – чотирьохелектродний електровакуумний прилад, в якого крім аноду, катоду і керуючої сітки є ще один електрод, який розміщений між керуючою сіткою і анодом і називається *екрануюча сітка*.



а

б

Рис. 2.4.5. Умовні графічні зображення електровакуумного тетрода:

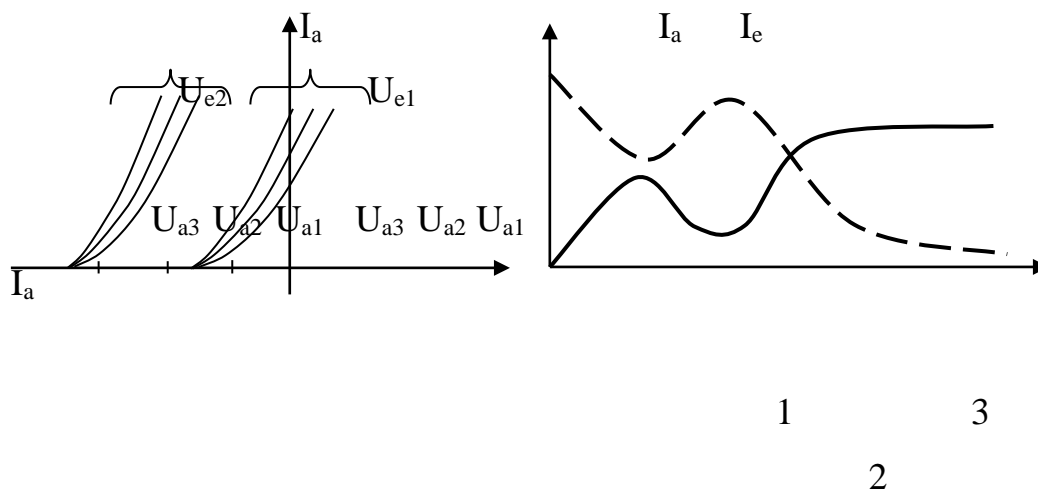
а – з прямим розжаренням; б – з непрямим розжаренням

Екрануюча сітка виконується у вигляді дротяної спіралі з малим кроком витків, тобто її густота значно більша ніж в керуючій сітці і призначена для екранування, тобто захисту керуючої сітки і катода від впливу електричного поля аноду. Являючись електростатичним екраном, цей четвертий електрод повинен бути не суцільним, а у вигляді сітки, щоб електрони з катода попадали на анод.

Екрануюча сітка повинна прискорювати рух електронів до аноду, тому на неї подається постійна пряма напруга. Для підсилення екрануючої дії даної сітки зменшують крок її витків і ставлять верхній і нижній металеві екрани, з'єднані з нею, які захищають керуючу сітку і катод від проникнення анодного поля зверху і знизу.

Для зменшення ємності між выводами анода і керуючої сітки один з них роблять в нижньому цоколі лампи, а інший – вверху балона.

На рисунку 2.4.6 представлені характеристики тетрода: анодно-сіткова (а) - $I_a = f(U_c)$ при $U_a = \text{const}$ і $U_e = \text{const}$; анодна (б) - $I_a = f(U_a)$ при $U_c = \text{const}$ і $U_e = \text{const}$.



4

 I_e

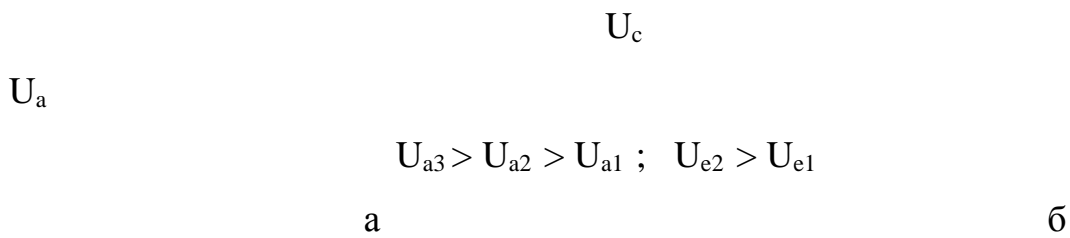


Рис. 2.4.6. Основні характеристики тетрода: анодно-сіткова (а) та анодна (б)

Якщо одночасно із анодною характеристикою знімати залежність струму екрануючої сітки I_e від анодної напруги U_a , то можна встановити наступне: при $U_a = 0$ всі електрони, які пройшли крізь керуючу сітку, попадають на екрануючу, яка має додатній потенціал, тому струм екрануючої сітки має максимальне значення, а $I_a = 0$. При збільшенні U_a струм аноду різко збільшується, а I_e зменшується, т.я. відбувається перерозподіл електронів між анодом і екрануючою сіткою (діл.1). При подальшому збільшенні U_a енергія електронів, які попадають на анод, стає достатньою, щоб викликати вторинну емісію з аноду. Вторинні електрони з аноду йдуть на екрануючу сітку (т.я. її потенціал вищий), і тому, струм аноду зменшується, а струм екрануючої сітки збільшується (діл.2). з наближенням U_a до U_c різниця потенціалів між екрануючою сіткою і анодом зменшується, послаблюється прискорююче поле для вторинних електронів, і все більше їх число повертається назад на анод. Анодний струм знову починає збільшуватися, а струм екрануючої сітки – зменшуватися (діл.3). При $U_a > U_c$, поле між екрануючою сіткою і анодом стає гальмуючим для вторинних електронів, вони повертаються на анод (діл.4).

Основні параметри тетрода:

крутизна характеристики

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_c} \quad \text{при} \quad U_a = \text{const} \quad \text{і} \quad U_e = \text{const}$$

(2.4.7)

внутрішній опір

$$R = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a}$$

тетроді частина вторинних електронів попадає на екрануючу сітку (в неї додатній потенціал), що викликає збільшення струму в колі сітки за рахунок послаблення анодного струму. В сигналі, що підсилюється, з'являються спотворення, а часто процес підсилення зовсім зривається.

На рисунку 2.4.8 представлені основні характеристики пентода: анодно-сіткова (а) - $I_a = f(U_c)$ при $U_a = \text{const}$ і $U_e = \text{const}$; анодна (б) - $I_a = f(U_a)$ при $U_c = \text{const}$ і $U_e = \text{const}$.

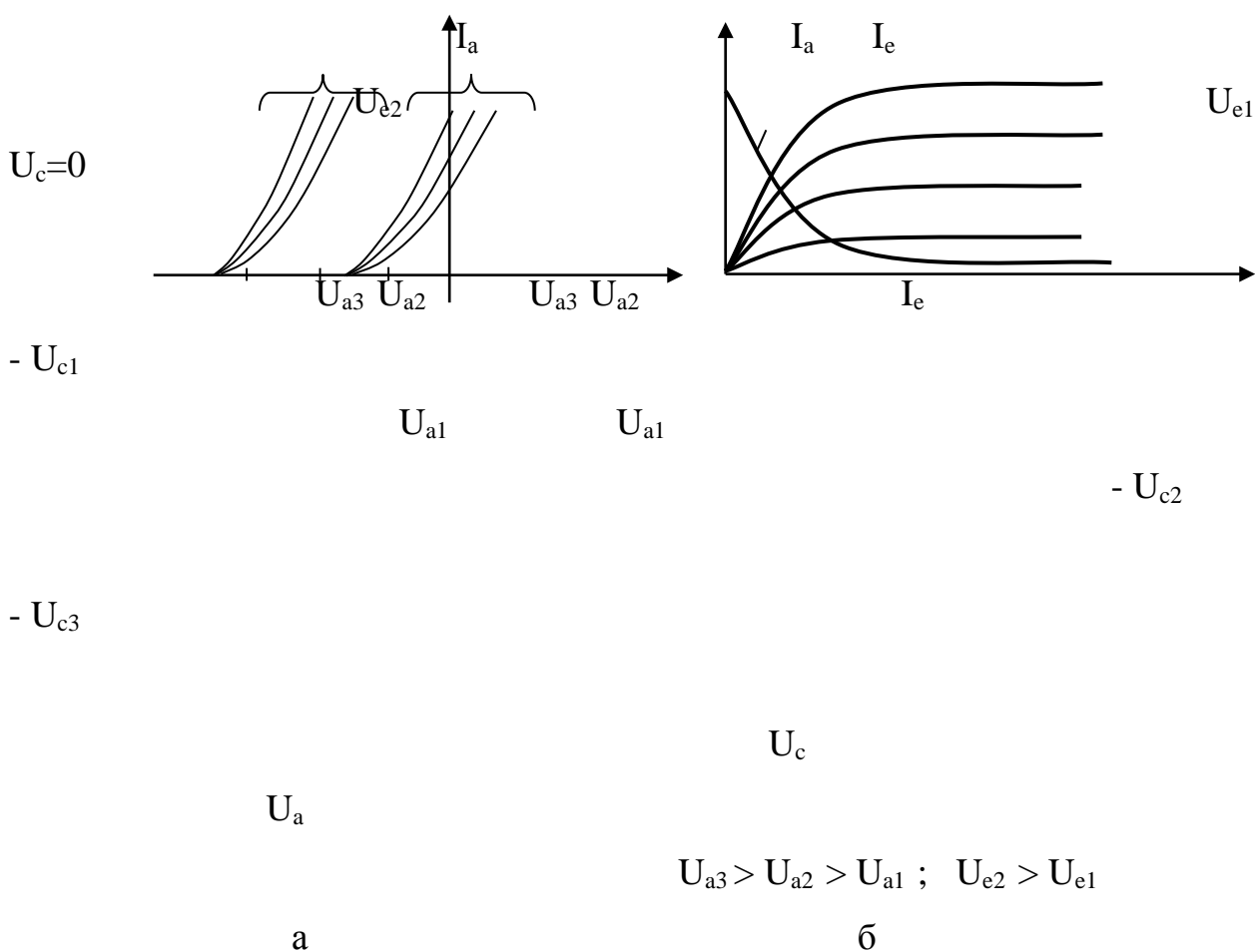


Рис. 2.4.6. Основні характеристики пентода: анодно-сіткова (а) та анодна (б)

Основні параметри пентода такі ж, як у тетрода. Коефіцієнт підсилення і внутрішній опір дуже великі, а крутизна характеристики майже така ж, як у тріодів.

7.2 Іонні прилади тліючого розряду

Іонні прилади виконують у вигляді герметичних балонів, всередині яких розміщені електроди. Балони заповнюються розрідженим інертним газом або парами ртуті.

На рис. 2.4.7 показана вольт-амперна характеристика електричного розряду в газі.

❖ *Особливість тліючого розряду – автоматичне підтримання практично постійної напруги на електродах при зміні струму через прилад в досить широких межах.*

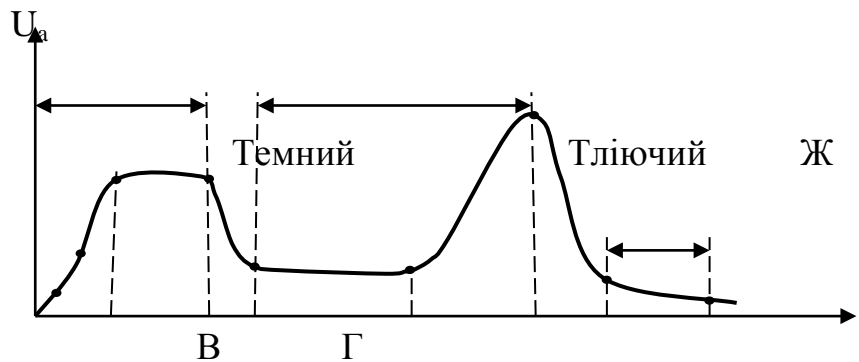


Рис. 2.4.6.
ВАХ електричного розряду в газі

Дуговий

А

З

Неонова лампа

Неонова лампа – найпростіший іонний прилад, який складається з балону, заповненого розрідженим інертним газом (неоном), і закріплених всередині балону двох дискових або циліндричних електродів.

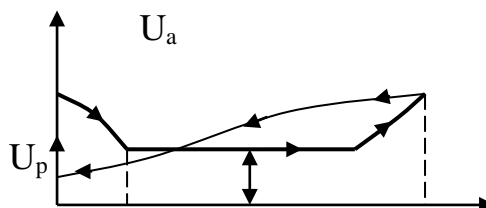
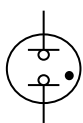


Рис. 2.4.8. Умовне графічне зображення неонові лампи

I_a

U_p

$U_{ст}$

$I_{a \min}$

$I_{a \max}$

Рис. 2.4.9. ВАХ неонові лампи

Неонова лампа не має розжарювального катоду. Умовне графічне зображення неонові лампи представлено на рис.2.4.8, а її вольт-амперна характеристика – на рис.2.4.9.

❖ *Якщо напруга, прикладена до лампи, менша напруги запалення, то в лампі розряд проходить, але він дуже слабкий і не має практичного значення. Якщо прикладена напруга більша або рівна нарузі запалення, в лампі виникає тліючий розряд, який супроводжується оранжево-червоним свіченням неону.*

При збільшенні напруги живлення U_a швидко зростає при дуже малому струмові (рис.2.4.9). При $U_a = U_p$ виникає нормальний тліючий розряд у відповідності з вибраним баластним опором. В цей момент в колі з'являється струм, а напруга на лампі падає; на частині поверхні катоду з'являється п'ятно, що світиться. З подальшим збільшенням напруги живлення струм I_a зростає, а напруга $U_a = U_{ст}$ залишається постійною. Коли розряд переходить в аномальний, ріст струму супроводжується підвищенням напруги на лампі. При зменшенні напруги живлення струм і напруга на лампі зменшуються. Ця вітка не співпадає із зростаючою із-за інерційності процесів де іонізації.

Нормальний тліючий розряд застосовують в неонових лампах, які використовують для стабілізації або обмеження напруги, а аномальний – в лампах для індикації ввімкнення режиму або перевантаження апаратури, в цифрових і знакових індикаторах і індикаторних панелях, а також в газорозрядних джерелах світла.

- ❖ *В полях високої частоти неонові лампи світяться без приєднання електродів до джерел живлення, т.я. ЕРС, необхідна для виникнення розряду в газі, утворюється електромагнітним полем високої частоти.*

Тиратрон

Тиратрон – трьохелектродний іонний прилад тліючого розряду.

Назва тиратрон походить від грецького слова *thyra* (двері), що підкреслює можливість «відкривання» тиратрона за допомогою сітки, і слова «електрон». Сітка грає роль пускового пристрою. На неї подається додатна напруга, значно менша ніж на анод, і між нею і катодом встановлюється режим тихого розряду, за рахунок чого поблизу катода утворюється область іонізованого газу.

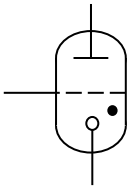


Рис. 2.4.10. Умовне графічне зображення тиратрона

До аноду прикладена висока напруга, але недостатня для того, щоб тиратрон відкрився. Тиратрон знаходиться на межі ввімкнення. Достатньо тепер подати на сітку запускаючий імпульс і між сіткою і катодом виникає тліючий розряд. Сітка в тиратроні має більш обмежену дію, ніж електронних електровакуумних тріодах. В останніх, змінюючи напругу сітки, можна повністю керувати анодним струмом, тобто регулювати його від нуля до максимального значення. А в тиратроні за допомогою сітки можна лише відкрити тиратрон, але не можна змінювати анодний струм. Після виникнення розряду сітка втрачає керуючу дію.

Ряд тиратронів тліючого розряду випущено з двома сітками. В таких тиратронах керуючою сіткою є друга сітка, більш віддалена від катода. На першу сітку подається постійна додатна напруга, і в колі цієї сітки весь час існує дуже невеликий струм «підготовчого» розряду (одиниці або десятки мікроампер). На іншій сітці постійна позитивна напруга нижча, ніж на першій. Тому гальмуюче поле між сітками не допускає електрони до аноду. При подачі імпульсу додаткової позитивної напруги на другу сітку тиратрон

відкривається, тобто електрони проникають через другу сітку, і вколі аноду виникає тліючий розряд.

Вітчизняні тиратрони тліючого розряду, як правило, мають зверх мініатюрне оформлення і наповнені неоном, або аргоном, або неонаргоною сумішшю. Вони можуть працювати при температурах навколишнього середовища від -60 до $+100^{\circ}\text{C}$.

Лекція 9

ГІБРИДНІ ІНТЕГРАЛЬНІ МІКРОСХЕМИ

9.1. Конструктивні елементи гібридних інтегральних мікросхем

9.2. Пасивні елементи

9.3. Активні елементи – без корпусні напівпровідникові прилади

Швидкі темпи розвитку електроніки привели до створення **інтегральних схем** (ІС чи мікросхем). Така ІС може містити до 10000 елементів в 1 см^3 , що дає змогу реалізувати складні функціональні схеми. У мікросхемах реалізують усі напівпровідникові елементи, а також резистори та конденсатори (використовується ємність р-п-переходів). Технологічно не можна реалізувати тільки індуктивність, тому усі ІС виготовляють без індуктивності й відповідно без трансформаторів.

❖ **Мікросхема** – це мікроелектронний виріб, що має густину монтажу не менш п'яти елементів в одному кубічному сантиметрі об'єму, який займає схема, і розглядається як єдине ціле.

❖ **Інтегральна мікросхема** – мікросхема, всі або частина елементів якої нероздільно пов'язані і електрично з'єднані між собою так, що пристрій розглядається як єдине ціле.

За технологією виготовлення вони поділяються на напівпровідникові та гібридні.

❖ **Напівпровідникова ІМС** – це інтегральна мікросхема, елементи якої виконані в об'ємі і (або) на поверхні напівпровідникового матеріалу.

❖ **Гібридна ІМС** – це інтегральна мікросхема, частина елементів якої має самостійне конструктивне оформлення.

Функціональна можливість ІС визначається кількістю активних елементів (насамперед транзисторів). Для прикладу, на рис. 2.5.1 зображено електричну схему простої мікросхеми ОП 140УД1.

Тому ІС поділяють відповідно до кількості інтегрованих елементів (табл. 7).

Таблиця 2.5.1 Класифікація інтегральних схем

ІС	Кількість	Літерне
Проста	<10	ІС
Середня	$10 < 100$	СІС
Велика	$100 < 1000$	ВІС
Надвелик	>1000	НВІС

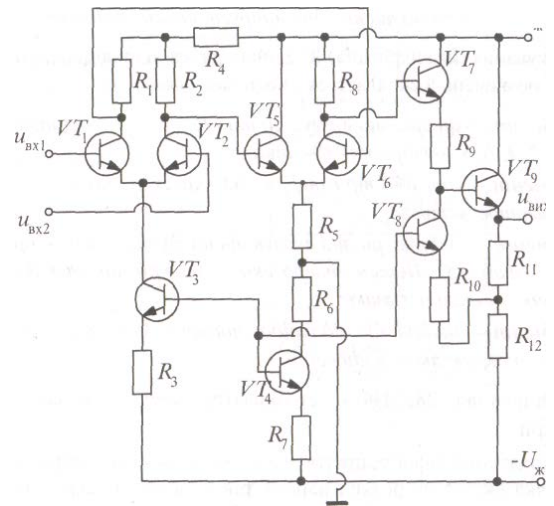


Рис. 2.5.1 . Електрична схема мікросхеми ОП 140УД1

ІС характеризуються механічною стійкістю, діапазоном робочих температур, надійністю (108 годин безперебійної роботи), малою споживаною потужністю (до 200 мВт). Крім того, залежно від функціонального призначення ІС, подаються такі параметри:

- **лінійно-імпульсні ІС** — коефіцієнт підсилення за напругою, вхідний і вихідний опори, максимальне значення вихідної напруги, межі частотного діапазону;

- **логічні ІС** — вхідна та вихідна напруги, швидкодія.

Маркування (класифікація) ІС здійснюється відповідно до прийнятої системи позначень й складається з чотирьох елементів:

1-й елемент — цифра, що вказує на тип ІС (1, 5, 7) — напівпровідникові; 2, 4, 6, 8 — гібридні; 3 — інші);

2-й елемент — дві або три цифри, які вказують на номер серії ІС, що виготовляється;

3-й елемент — дві літери, які вказують на функціональне призначення ІС (табл.2.5.2). Перша літера вказує на призначення ІС, а друга уточнює її спеціалізацію;

4-й елемент — цифра, що відповідає порядковому номеру ІС, з функціональною ознакою у цій серії.

Наприклад: 283ЕН4 - - стабілізатор напруги на базі гібридної ІС 83 серії.

Як додаткова інформація п'ятим елементом позначення може бути літера, яка вказує на розкид параметрів ІС в межах серії, наприклад: 123НД6А — напівпровідникова ІС набір діодів серії 23, типу А. Для безкорпусних ІС через дефіс подається цифра, яка вказує на конструктивні особливості мікросхеми (1 — з гнучкими виводами; 2 — з павукоподібними; 3 — з жорсткими виводами; 4 — з нерозділеними; 5 - виводами, наклеєними на плівці; 6 — без виводів). Наприклад: 140МФ8-3 - напівпровідникова ІС, фазовий модулятор, серії 40 з жорсткими виводами.

Для ІС широкого вжитку на початку умовного позначення ставиться літера К. Після неї може йти друга літера, яка вказує на тип корпусу мікросхеми (П — пластмасовий; К — керамічний; Б — без корпусу). Наприклад: КП140УД7 - напівпровідникова ІС у пластмасовому корпусі, операційний підсилювач, серії 40.

Таблиця 2.5.2 Функціональні ознаки інтегральних схем

<i>Назва мікросхеми</i>	<i>Літерне позначення</i>	<i>Функціональне призначення</i>	<i>Літерне позначення</i>
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
	А	<i>Імпульси прямокутної форми</i>	<i>Г</i>
		<i>Імпульси спеціальної форми</i>	<i>Ф</i>
<i>Схема затримки</i>	Б	<i>Пасивна</i>	<i>М</i>
		<i>Активна</i>	<i>Р</i>
<i>Генератор сигналу</i>	Г	<i>Гармонійного сигналу</i>	<i>С</i>
		<i>Прямокутного сигналу</i>	<i>Г</i>
		<i>Лінійно-змінного сигналу</i>	<i>Л</i>
		<i>Сигналів спеціальної форми</i>	<i>Ф</i>
<i>Детектор</i>	Д	<i>Амплітудний</i>	<i>А</i>
		<i>Частотний</i>	<i>С</i>
		<i>Фазовий</i>	<i>Ф</i>

Джерело живлення	Е	Випростувальне	Б
		Стабілізатор напруги	Н
		Стабілізатор струму	Т
Дискретний пристрій	І	Регістр	Р
		Суматор	М
		Лічильник	Е
		Шифратор	В
		Дешифратор	Д
Комутатор	К	Напруги	Н
		Струму	Т
Логічний елемент	Л	Елемент І-НЕ	А
		Елемент АБО-НЕ	Е
		Елемент І	І
		Елемент АБО	Л
		Елемент НЕ	Н
Модулятор	М	Елемент І-АБО	С
		Амплітудний	А
		Частотний	С
		Фазовий	Ф
		Імпульсний	І
Набір елементів	Н	Ліоди	Д
		Транзистори	Т
		Резистори	Р
		Конденсатори	Е
Перетворювач інформації	П	Частоти	С
		Напруги	Н
		Код-аналог	А
		Аналог-код	В
Елемент запам'ятову-	Р	Матриця	М
		ПЗП	В
Схема керування	С	Амплітуди	А
		Часу	В
		Частоти	С
		Фази	Ф
Тригер	Т	Типу Ж	В
		RS	Р
		D	М
		T	Т
<i>Продовження таблиці 2.5.2</i>			
Підсилювач	У	Високої частоти	В
		Низької частоти	Н
		Постійного струму	Т
		Операційний	Д
Фільтр		Верхніх частот	В
		Нижніх частот	Н
		Смуговий	Е
Багатофункці-	Ч	Аналогові	А
		Цифрові	Л

9.1 Конструктивні елементи гібридних інтегральних мікросхем

Гібридні ІС характеризуються тим, що пасивні елементи реалізують за допомогою плівок (золотих чи алюмінієвих), які наносяться на монолітну схему. При такій технології для ІС використовують МДН-транзистори, що дозволяє отримати їх швидкодію до 20 наносекунд.

В сучасних гібридних ІС пасивні елементи (резистори, конденсатори, контактні площадки і внутрішньосхемні з'єднання) виготовляють шляхом послідовного нанесення на основу плівок із різних матеріалів, а активні елементи (діоди, транзистори та ін.) виконують у вигляді окремих (дискретних) навісних деталей (в мініатюрному або без корпусному оформленні).

В залежності від товщини плівок розрізняють товсто плівкові (1...25 мкм) і тонко плівкові (до 1 мкм) гібридні мікросхеми. Суттєвим недоліком товсто плівкових мікросхем є нестабільність номінальних значень величин пасивних мікроелементів і відносно низька густина монтажу. Тонкі плівки забезпечують густину монтажу до 200 елементів/см³ і високу точність елементів.

Основними конструктивними елементами гібридної ІМС є:

- основа, на якій розміщуються пасивні та активні елементи;
- пасивна частина з планарним (в одній площині) розміщенням плівкових провідників, контактних площадок, резисторів і конденсаторів;
- навісні без корпусні напівпровідникові прилади з гнучкими дротяними виводами або жорстко фіксованою системою виводів;
- навісні мініатюрні пасивні елементи (конденсатори великих номіналів, трансформатори, дроселі), які застосовуються як виключення;
- корпус для герметизації мікросхеми і закріплення її виводів.

9.2 Пасивні елементи

Основа. В якості матеріалу основи найбільш часто використовують скло та кераміку. Вибір цей обумовлений малою питомою електропровідністю, хімічною стійкістю і високою діелектричною густиною. Для забезпечення гарного зчеплення плівок з основою останні полірують, травлять в кислотах та промивають. Крім того, перед нанесенням плівок основи очищують шляхом іонного бомбардування безпосередньо в установці для напилення. Основа для нанесення гібридної ІМС являє собою чотирикутну пластину довжиною l , шириною b і товщиною s . Встановлені наступні розміри основ:

l , мм ... 48 48 24 16 16 12 6 4

b , мм ... 60 30 30 20 10 10 5 2,5

Товщина основ 0,6; 1,0; 1,6 мм з відхиленням 0,06 мм.

Провідники і контактні площадки. Провідники служать для з'єднання окремих елементів мікросхеми один з одним, а контактні площадки - для з'єднання плівкових і навісних елементів з провідниками, а також для зв'язку з зовнішніми виводами мікросхеми.

Основними вимогами до плівкових провідників і контактних площадок є: виска електрична провідність; гарна адгезія до основи і гарна здатність до пайки або зварки; малий перехідний опір між провідним шаром та іншими елементами мікросхеми; хімічна інертність по відношенню до інших шарів.

Для напилення провідників і контактних площадок рекомендуються золото, срібло, мідь, алюміній і нікель. Для покращення адгезії струмопровідних матеріалів до основи напилюють підшар хрому, титану, молібдену, заліза та ін.

В конструкції плівкової мікросхеми часто виникає необхідність перетину одного провідника іншим. Перетин являє собою, по суті, мікро конденсатор, так як між провідниками виникає паразитний ємнісний зв'язок. Для ізоляції між провідниками застосовується в більшості випадків моно

окисел кремнію і халькогенідне скло. Кожен перетин повинен мати опір провідників не більше 0,8 Ом/см, а ємність не більше 2 пФ.

Контактним площадкам рекомендується надавати найбільш просту форму, наприклад Г-, Т- і П-подібну.

Резистори. Плівкові резистори виготовляють із матеріалів, що мають високий електричний опір і низький температурний коефіцієнт опору (ТКО): хрому, ніхрому, танталу, металокераміки, спеціальних провідних фарб на основі вуглецю та ін.

Зазвичай плівкові резистори мають прямокутну форму.

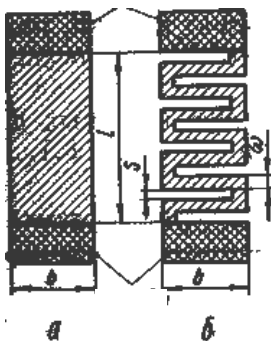


Рис. 2.5.2. Основні конфігурації плівкових резисторів

На рис. 2.5.2. показані дві основні конфігурації плівкових резисторів. Для отримання стабільних плівкових опорів товщина плівки береться 0,01 ... 1 мкм. Дуже тонкі плівки (0,005 мкм) значно змінюють свої параметри в процесі виготовлення і експлуатації схеми.

Крім того, наступна дія повітря викликає поверхневе їх окислення, яке приводить до зменшення опору. В більш товстих плівках це окислення менше. Однак плівки товщиною більш 1 мкм не забезпечують достатньо міцного зчеплення з основою.

Діапазон номіналів плівкових резисторів ледить в межах 50 Ом ... 10 МОм.

В процесі наладки мікросхем в деяких випадках необхідно змінити номінал резистора. Для цього на резистивну плівку напилюють перемички, число і розміщення яких залежить від умов наладки.

Плівкові резистори можуть працювати при напругах до декількох сотень вольт на частотах до декількох сотень мегагерц.

Конденсатори. Плівкові конденсатори зазвичай складаються з трьох шарів: двох металевих обкладинок (електродів) та діелектричного шару між ними (рис.2.5.3).

В якості матеріалів для обкладинок частіше всього використовують алюміній, а також золото, срібло, тантал, мідь та ін. діелектриками служать моно окисел кремнію, германію, п'ятиокисел танталу, боросилікатне і алюмосилікатне скло і т.д.

Сучасні тонко плівкові конденсатори дозволяють отримувати ємність від одиниць пікофарад до мікрофарад на робочі напруги до 20 В. підганяти величину ємності можна механічно, використовуючи специфічний для плівкових схем процес – випалювання. За необхідності отримання великих ємностей використовують дискретні конденсатори.

Індуктивності. В тонкоплівкових схемах застосовують плівкові індуктивності у вигляді одношарової спіралі. В якості матеріалу спіралі зазвичай використовують золото, так як воно має гарну електропровідність. Такі спіралі мають дуже малу індуктивність (одиниці $\text{мкГн}/\text{см}^3$). При виготовленні більших індуктивностей важко одночасно задовольнити дві протилежні вимоги – зменшити габарити і отримати високу добротність. Найбільш нормальна форма індуктивності – квадратна. Подібна індуктивність містить, наприклад, на 10 мкГн , містить 46 витків шириною 0,05 мм кожний при відстані між витками 0,1 мм; розмір котушки 15x15 мм. Оскільки виготовлення тонко плівкових індуктивностей пов'язано з великими труднощами, в тонко плівкових схемах застосовують головним чином дискретні мікро котушки індуктивності з осердям із порошкового заліза або із спеціальних феритів.

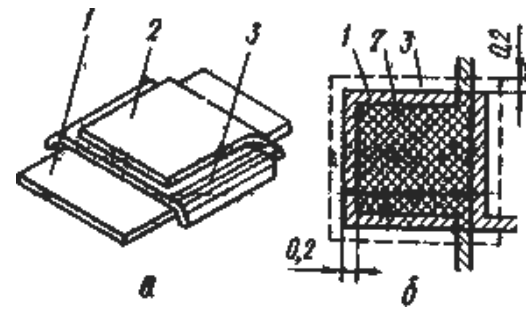


Рис.2.5.3. Плівковий конденсатор: а – загальний вигляд; б – креслення (1 – нижня обкладинка; 2 – верхні обкладинка; 3 – діелектрику)

9.3 Активні елементи – безкорпусні напівпровідникові прилади

В активних інтегральних мікросхемах в якості активних елементів застосовують дискретні напівпровідникові прилади. За способом герметизації вони діляться на без корпусні та корпусні. Так як без корпусні

прилади мають малі габарити і масу, застосування їх в гібридних інтегральних схемах слід рахувати найбільш цілісним і перспективним.

За способом монтажу в мікросхемі без корпусні напівпровідникові прилади можна розділити на дві групи: прилади з гнучкими виводами і прилади з жорсткими об'ємними виводами.

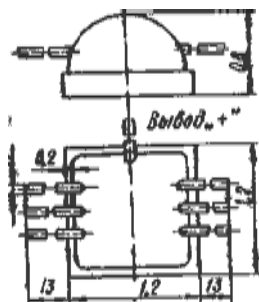


Рис. 2.5.4. Діодна матриця з гнучкими виводами

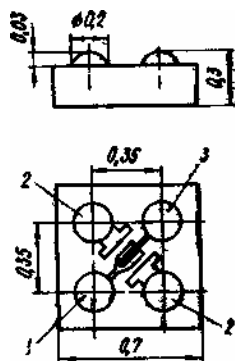


Рис. 2.5.5. Схема установки транзистора з жорсткими сферичними виводами:
1 – вивід бази;
2 – вивід колектора;
3 – вивід емітера

На рис. 2.5.4 показана одна із типових конструкцій без корпусного приладу (діодної матриці) з гнучкими виводами. Діаметр дрітчастих виводів складає зазвичай 30-40 мкм.

Виводи з контактними площадками під'єднуються різними методами, головними з яких є термокомпресійний і

ультразвуковий. Метод термокомпресії базується на одночасній дії тепла і тиску на область контакту. Метод ультразвукового зварювання базується на одночасній дії коливань ультразвукової частоти, які збуджуються в деталях, що зварюються, і тиску в області зварювання. Вібращі високої частоти, руйнуючи плівку окиселу на поверхні розділу металів в області зварювання, сприяють підвищенню якості зварного з'єднання.

Недолік конструкції без корпусних приладів є в важкості автоматизації процесів установки приладів в мікросхемі. Тому при зборці активних елементів широко використовуються прилади з жорсткими виводами. Для них характерна відсутність з'єднувальних провідників, що дозволяє автоматизувати процес зварювання мікросхем і підвищити надійність виробів. На рис.2.5.5. схематично показана структура установки транзистора з жорсткими сферичними виводами. В якості матеріалу виводів застосовують мідь і срібло. Для уникнення дії зовнішніх факторів кристали

напівпровідника в без корпусних приладах покривають спеціальним захисним покриттям (лаки, емалі, смоли, компаунди та ін.).

Контрольні питання і вправи

1. Чим відрізняються один від іншого визначення понять «мікросхема», «інтегральна мікросхема», «гібридна інтегральна мікросхема», «напівпровідникова інтегральна мікросхема», «велика інтегральна мікросхема»?
2. Назвіть основні конструктивні елементи гібридної ІМС.
3. Вкажіть вимоги до основ гібридних інтегральних мікросхем.
4. Які матеріали використовуються для створення провідників та контактних площадок гібридних інтегральних мікросхем?
5. Як виконуються резистори гібридних інтегральних мікросхем?

Як виготовляються котушки, дроселі і трансформатори в гібридних інтегральних мікросхемах?

Лекція №15.

ТЕМА: АРХІТЕКТУРА ТРАНСП'ЮТЕРІВ І ТРАНСП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ

План.

15.1 Основні визначення

15.2 Технічні засоби створення трансп'ютерних систем

15.3 Мультипроцесорні трансп'ютери системи

15.4 Програмне забезпечення

15.1 ОСНОВНІ ВИЗНАЧЕННЯ

Поряд з традиційними мікропроцесорами, що мають основоположне значення для архітектури для персональних комп'ютерів, міні - і суперміні - ЕОМ, все більш важливого вивчення в області мікропроцесорної техніки набував так званий трансп'ютер - особливий тип мікропроцесора, який розроблений компанією

Трансп'ютер - це незалежний обчислювальний елемент (перший мікропроцесор), який має власний набір команд і орієнтований на архітектури систем паралельної обробки даних. **Головна ідея створення трансп'ютера** - надати в розпорядження розробників систем стандартний блок, який можна було б використовувати в великих кількостях як базовий елемент при побудові виключно високопродуктивних обчислювальних машин і систем. Його особливістю є те, що кожний окремий трансп'ютер має чотири елементи зв'язку, через котрі він може спрягатися з іншими трансп'ютерами. Таким чином можна з'єднати один з одним декілька трансп'ютерів у вигляді мережі. Використовуючи такий вид зв'язку, можна об'єднати велику кількість трансп'ютерів в єдину системну архітектуру для проведення паралельних обчислень. При цьому продуктивність такої системи прирівнюється до продуктивності великих ЕОМ.

Особливості трансп'ютерних систем заключаються в можливості їх адаптації для рішення специфічних задач на основі оптимального вибору топології трансп'ютерних мереж. Завдяки цьому ще до етапу програмування може бути досягнута висока отупінь розпаралелювання задачі.

15.2 ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ СТВОРЕННЯ ТРАНСП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ

Перший 32-розрядний трансп'ютер T414 характеризується часом циклу 50 нс і швидкодією біля 10 млн.операцій/с. Він вміщує мікропроцесор з RISC- архітектурою (МП з скороченим набором команд), а також апаратні засоби, які забезпечують паралельні обчислення. За повідомленнями представників фірми Inmos трансп'ютер T414 виконує програми на мові високого рівня швидше, ніж МП 68020 компанії Motorola, 80286 фірми Intel і 32032 корпорації National Semiconductor відповідно в чотири, дев'ять і 12 разів. При виконанні операцій нормальної точності над числами з плаваючою крапкою швидкодія трансп'ютера T414 в 15 разів більша, ніж у МП 68020 і лише на 20% нижча, ніж у МП 68020 і сопроцесора при їх спільній роботі.

Радикальною відмінністю трансп'ютера від усіх інших МП є наявність у нього в середині кристалу пам'яті ємністю 2 або 4 Кбайт, причому 8 спеціальний інтерфейс, який дозволяє підключити додатковий зовнішній ОЗП. Обмін даними між трансп'ютером і зовнішнім ОЗП може проводитися з швидкістю до 26 Мбайт/с. Оснащення кожного МП - трансп'ютера власною локальною пам'яттю виключає вузьке місце "процесор-пам'ять" , яке властиве для традиційних централізованих систем. Крім того в оклад трансп'ютера входить чотири високошвидкісних асинхронних канали зв'язку, які використовуються для обміну повідомленнями з іншими трансп'ютерами. Ці канали працюють паралельно з процесорами, забезпечуючи при цьому сумарну швидкість передачі даних більше 5 Мбайт/с. За повідомленнями представників фірми Inmos, така мережа каналів передачі даних, яка замінює

шину колективного користування , підвищує швидкодію системи до 1 млрд. Операцій за секунду.

15.3 МУЛЬТИПРОЦЕСОРНІ ТРАНСП'ЮТЕРИ СИСТЕМИ.

В системі мінімальної конфігурації всі процеси можуть виконуватися на одному трансп'ютері. Однак для підвищення продуктивності можна використати декілька трансп'ютерів, виконуючи кожний процес, на окремому трансп'ютері. Розробники фірми Meiko перетворили цю загальну архітектурну, концепцію в обчислювальну систему Computing Surface, яка будується із набору, що включає чотири базові стандартні плати (рисунок 15.1):

Плату комп'ютера;

Плату пам'яті;

Графічну плату;

Плату вводу-виводу і розкрути (плата ВВО).

На платі комп'ютера розміщені чотири трансп'ютери разом з ОЗП (пам'ять з довільною вибіркою) ємністю 48 Кбайт. На платі пам'яті розміщені 120-не ДОЗИ ємністю 2 Мбайт і один трансп'ютер - контролер. На графічній платі знаходиться два трансп'ютери кожний із своїм ОЗП ємністю 16 Кбайт, чотири графічних контролери 7220 фірми NEC s і кристал процесора кольору G170 компанії Immos, який може безпосередньо керувати растровою відеосистемою. На платі вводу-виводу і розкрутки (ВВ) знаходиться з ОЗП ємністю 16 Кбайт і ППЗП ємністю 32 Кбайт. На даній платі знаходиться і два порти RS-232-C і один інтерфейс IEEE-488. Передбачається вводити в систему і інші плати, наприклад МП з плаваючою крапкою. Подвійне шасі-каркас стандарту Eurocard дозволяє встановлювати до 40 схемних плат.

В постійній пам'яті плати ВВ знаходиться програма початкового завантаження, яка приводить процесор в робочий стан, а також засоби контролю його роботи. В процесі розкрутки проводиться завантаження коду

із системи проектування програм і передача цього коду по мережі трансп'ютерних каналів на відповідні процесори. Плата ВВ обслуговує також контрольну шину, перевіряючи який тип плати знаходиться в кожному гнізді, а також збирає статистичні дані про помилки в апаратурі. Вона забезпечує локалізацію помилок з точністю до плати, процесора і навіть конкретної адреси.

В ході реалізації одного з перших в Європі супер-комп'ютерних проектів фірма Parsytek gmbh (ФРН) створила комп'ютер Megaframe Superoluster на базі 32-розрядних трансп'ютерів Т800 компанії Imnos Ltd, які об'єднані в групи (кластери) і взаємодіють через виділені їм канали зв'язку.

В комп'ютері Superoluster внутрішні процесорні лінії зв'язку використовуються для розділення обчислювальної задачі на множину паралельних підзадач обміну даними і управління інформаційними потоками по багатьох каналах в порівнянні з шинною архітектурою даний підхід відрізняється суттєво більшою пропускною здатністю. Компанія Parsytek представила на ринок дві моделі комп'ютера - 64- процесорну модель 64 і 256-про-цесорну модель 256.

Комп'ютер Supercluster виконаний на базі трансп'ютера Т800 з чотирма каналами зв'язку. Група із 16 трансп'ютерів об'єднується в кластер, який обмінюється даними через пристрій управління конфігурацією мережі (ПУКМ) (див,грио.2). Кожен кластер має дві 16-канальні лінії зв'язку. В базовому 64-про-цеорному комп'ютері кожні чотири кластери в свою чергу об'єднуються в блоки двома ПУКМ. Кожен блок має інтерфейси АРМ і кластер системного обслуговування, що вміщує дискову файлову систему засоби головного процесора і деякі спеціалізовані модулі. Більш великі комп'ютери цього типу можна одержати, з'єднуючи два або декілька базових блоків каналами зв'язку, які утворюються двома ПУКМ кожного кластера.

Система із 64 процесорів базового комп'ютера Superoluster функціонує з швидкістю 640 млн. Команд/с, а при виконанні скалярних обчислень швидкодія досягає 96 млн. Операцій з плаваючою крапкою за секунду.

Модель 256, яка об'єднує чотири блоки, має продуктивність 2560 млн. Команд/с або 386 млн. Операцій з плаваючою крапкою за секунду.

Попри практично необмежені можливості розширення комп'ютер Superolusber відрізняється вбудованими засобами головного процесора, які забезпечують йому незалежність від вхідних буферних ЕОМ. Крім того, через високошвидкісні канали до комп'ютера Supercluoter можуть підключатися стандартні АРМ, прикладні програми яких одержують доступ до заданих користувачем областей системи.

Віденською фірмою IMPULS розроблена мультитрансп'ютерна система (МТС) IMPULS 2400. Вона складається із 64+2 трансп'ютерів Т800 з тактовою частотою 17 мгц і 06П ємністю до 2 Мбайт. Трансп'ютери підключені не послідовно один за одним, а через три так звані комутатори каналів зв'язку (Link-Switches), причому через ці комутатори можуть бути встановлені програмно-керовані зв'язки. Для зберігання даних система IMPULS 2400 має в своєму окладі два дискових накопичувачі ємністю 640, Мбайт кожний і накопичувачем на магнітній стрічці ємністю 2,3 Гбайт.

Керування МТС відбувається при допомозі двох зовнішніх комп'ютерів: ATARI, який підтримує з допомогою двох додаткових трансп'ютерів файлову систему, через яку можна звернутися до двох жорстких дисків, і IBM PC/XT, з диском ємністю 80 Мбайт і трансп'ютерною платою для ініціалізації системи. Для підключення в мережу передбачений мережний адаптер ETHERNET.

Трансп'ютер був спроектований як блок для побудови паралельних систем. Це дозволяє (проектувальникам систем - системним проектувальникам) створювати мережі процесорів які задовольняють вимоги по продуктивності в деяких областях застосування засобів ОТ. Трансп'ютерна мережа представляє собою набір трансп'ютерів, кожний з яких в процесором з локальною пам'яттю і зв'язаний один з одним за допомогою ліній зв'язку трансп'ютера. Як правило в такій мережі немає

спільної пам'яті у процесорів; дані передаються між процесорами тільки через лінії зв'язку.

Завдяки наявності чотирьох ліній зв'язку трансп'ютери можуть з'єднуватися один з одним різним способом (рис.).

Багато із існуючих алгоритмів легко реалізуються в конвеєрах чи декількох конвеєрах, і, так як програмісти знайомі з такою організацією обчислювального процесу, то це та мережа, яка найбільш часто використовується. N-кроковий конвеєр має $2 \times n$ вільних ліній зв'язку, і тому в ньому неоптимально використовуються засоби зв'язку трансп'ютера. При цьому конвеєру властиві всі недоліки машин класу МКОД. Деревовидна топологія підходить для ієрархічних процесів, таких як редукція даних з передачею даних вгору по дереву і сортування даних з передачею даних вниз по дереву.

Двохвимірний масив використовується для даних, що мають структуру масиву, як наприклад, образи чи матриці, і застосовуються для обробки зображень на низькому рівні. Топологія двохвимірного масиву еквівалентна топології матричних процесорів в машинах класу ОКМД і в них повністю використовуються чотири лінії зв'язку трансп'ютера.

Мережа може бути неоднорідною, тобто в неї можуть входити різні елементи сімейства трансп'ютерів, як, наприклад, наступні процесори:

IMS T222 - 16- бітовий процесор;

IMS M212 - 16- бітовий процесор з дисковим інтерфейсом;

IMS T414 - 32- бітовий процесор;

IMS T800 - 32- бітовий процесор з вбудованим в мікросхему модулем , що працює в числах з плаваючою крапкою.

Лінії зв'язку в трансп'ютерній мережі можуть бути фіксованими або в переключеннях. Крім того, топологію мережі можна змінювати за допомогою схем комутації ліній зв'язку, які настроюються на рівні програмного забезпечення до запуску програми в мережі. Фірма INMOS розробила чіп переключення ліній зв'язку, IMS C004, який представляє

собою матричний перемикач між 32 вхідними і 32 вихідними лініями зв'язку і є основним компонентом для побудови трансп'ютерних плат з лініями зв'язку, які переключаються.

15.4 ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Для програмування трансп'ютерних машин і систем використовується пакет TDS (Transputer Development System), який використовується для підтримки зовнішніх ПК, а також для завантаження і перевірки всієї системи. Програмне забезпечення розглянемо на прикладі програмного забезпечення мультитрансп'ютерної системи IMPULS 2400. Із систем програмування дана МТС має три компілятори: OCCAM, Паралельний FORTRAN і Паралельний C. FORTRAN і C для програмістів середовище знайоме - новинка мова OCCAM. З її допомогою відбувається взаємодія з трансп'ютерною структурою системи і засобами комунікації. OCCAM робить можливим програмування на нижньому рівні, як наприклад, занесення змінних в спеціальні адреси пам'яті, доступ до таймерів або вставка машинного коду. Щоб запустити яку-небудь трансп'ютерну програму, необхідно розподілити окремі по відповідних трансп'ютерах. В OCCAM це розподілення проводиться за допомогою так званого опису конфігурацій. Опис відбувається одним єдиним конфігуратором. Конфігуратор видає необхідну інформацію про початкове завантаження, щоб запустити трансп'ютерну систему у відповідній мережі, а також записує цю інформацію разом з компільованим кодом в певну частину програми. Крім того є ряд пакетів підпрограм з прикладними математичними функціями, наприклад, підпрограми для керування комутаторами каналів. За допомогою цих комутаторів вся трансп'ютер-на мережа з моменту вводу програми може змінювати топологію. В залежності від задачі, для різних прикладних програм можуть бути програмне встановлені різні варіанти топології.

