

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

з дисципліни

«РАДІОЕЛЕКТРОНІКА»

*(для здобувачів вищої освіти спеціальностей 172 «Телекомунікації та
радіотехніка»)*
(електронне видання)

ЗАТВЕРДЖЕНО
на засіданні кафедри
електронних апаратів
Протокол №4 від 26.11.2020

Сєвєродонецьк, 2020р.

УДК 681.3

Конспект лекцій з дисципліни «Радіоелектроніка» (для здобувачів вищої освіти спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка») (електронне видання) /Уклад. Ж.Г.Самойлова.-Сєвєродонецьк: вид-во- СНУ ім.В. Даля, 2020. – 74 с.

В курсі лекцій з дисципліни «Радіоелектроніка» розглянуто склад і принцип дії основних елементів електронної техніки. Велика увага приділена розгляду і аналізу елементів і пристроїв оптоелектроніки и електронних підсилювачів сигналів. Конспект лекцій може бути використаний студентами при підготовке к заняттям.

Укладач:

Ж.Г. Самойлова, к.т.н., доц.

Рецензент:

М.Г. Лорія, д.т.н., доц.

ЗМІСТ

1 ЕЛЕКТРОННІ ЕЛЕМЕНТИ І ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ЇХ РОБОТИ	5
1.1 Фізичні основи явищ в напівпровідникових електронно-діркових переходах..	5
1.2 Електрофізичні властивості напівпровідників.....	7
1.3 Електронно-дірковий перехід.....	10
1.4 Вольтамперная характеристика р-n переходу.....	12
1.5 Тунельний ефект в р-п переходах.....	14
1.6 Гетер перехід і перехід Шотки.....	15
1.7. Класифікація і загальні характеристики електронних елементів.....	18
1.8. Напівпровідникові діоди загального призначення.....	19
1.9 Біполярні транзистори.....	24
1.10. Польові транзистори.....	33
1.11. Напівпровідникові прилади з негативним опором (негатрони).....	35
1.12 Тиристори.....	37
1.13 Одноперехідні транзистори.....	40
2. ЕЛЕМЕНТИ І ПРИСТРОЇ ОПТОЕЛЕКТРОНІКИ.....	43
2.1 Фотоелектричні напівпровідникові прилади.....	43
2.2 Джерела оптичного випромінювання.....	43
2.3. Фотодіоди.....	45
2.4 Фототранзистори.....	46
2.5 Оптикоелектричні прилади.....	47
2.6 Світоводи.....	49
3. ЕЛЕКТРОННІ ПІДСИЛЮВАЧІ СИГНАЛОВ.....	50
3.1 Класифікація і основні параметри.....	50
3.2 Однокаскадний підсилювач на біполярному транзисторі з загальним емітером.	54
3.3 Режим роботи каскадів.....	57
3.4 Живлення підсилювачів і подача зміщення на транзистор.....	59
3.5 Схеми стабілізації становища робочої точки.....	61
3.6 Схема підсилювача з загальним колектором.....	62

3.7 Зворотні зв'язки в підсилювачах.....	63
3.8 Однокаскадний підсилювач на польовому транзисторі.....	65
3.9 Багатокаскадні підсилювачі низької частоти.....	66
3.10 Підсилювачі потужності.....	67
3.11. Підсилювачі постійного струму.....	69
3.12 Паралельно-балансний (диференційний) підсилювач постійного струму...	70
3.13 Підсилювачі з перетворенням.....	72
3.14 Операційні підсилювачі.....	72

1 ЕЛЕКТРОННІ ЕЛЕМЕНТИ І ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ЇХ РОБОТИ

1.1 Фізичні основи явищ в напівпровідникових електронно-діркових переходах.

Згідно квантової теорії електрон може мати дискретні цілком певні рівні енергії і тому може перебувати тільки на певних орбітах обертання навколо ядра. Між цими орбітами є заборонені зони, на яких електрон не може перебувати. Сукупність рівнів утворює енергетичний спектр електронів в атомі.

У збудженому атомі електрон знаходиться на найближчій до ядра орбіті. При поглинанні атомом енергії електрон може перейти на більш високу орбіту або навіть покинути межі атома, і атом перетворюється в іон.

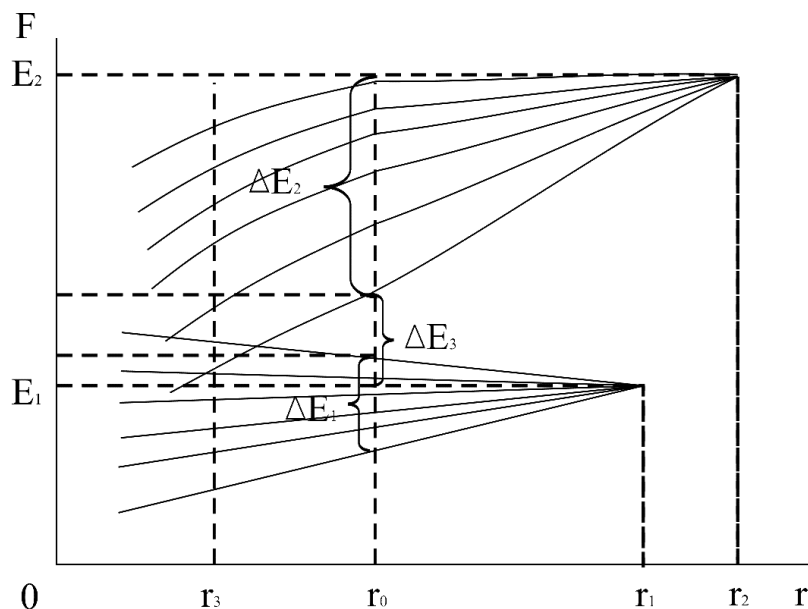


Рисунок 1.

Якщо атоми знаходяться на досить великій відстані, то вони не впливають один на одного і на енергетичні рівні їх електронів. Але якщо утворюється система з атомів, які близько лежать то вони впливають на енергетичні рівні електронів. На рисунку 1.1 зображені два енергетичних рівня електронів системи з шести атомів. На відстані, для енергетичного рівня E_1 і на для E_2 вплив атомів незначний і тому енергетичні рівні не розділяються. При $r < r_1$ для E_1 і при $r < r_2$ для E_2 починає позначатися вплив сусідніх атомів, і енергетичні рівні перетворюються в зони з шести рівнів. Однак на відстані вони ще не зливаються, і між ними є заборонена зона ΔE_3 . Самі енергетичні зони розширюються до ΔE_1 і

ΔE_2 . Після зменшення r до зони ΔE_1 і ΔE_2 розширюються так, що перериваються і заборонена зона ΔE_3 зникає.

Таким чином, в твердому тілі можливі наступні енергетичні зони:

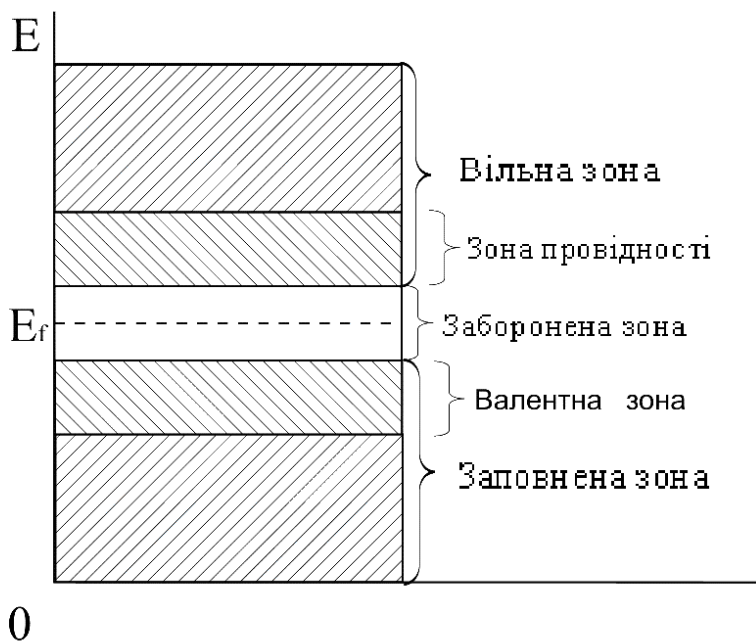


Рисунок 2.

При нормальній температурі навколишнього середовища і відсутності зовнішніх полів електрони всередині речовин можуть перебувати в двох зонах: валентної (1) і в зоні провідності (2). Між цими зонами знаходиться заборонена зона (3).

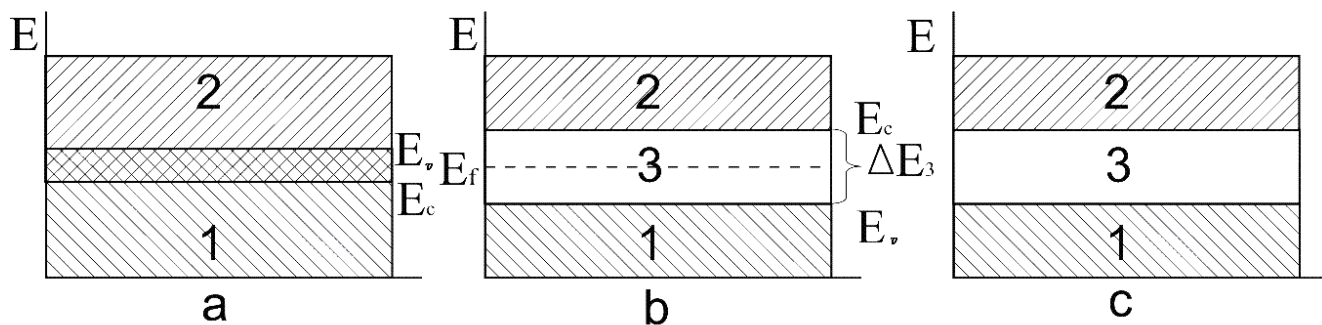


Рисунок 3.

Залежно від наявності та ширини забороненої зони ΔE_g матеріали діляться на:

- Провідники, у яких немає забороненої зони ΔE_g , і зони валентна і провідності перекриваються (рис.3.а.);
- Діелектрики, у яких заборонена зона дуже широка (рис.3.б.)
- Напівпровідники, у яких заборонена зона вузька (рис.3.с.).

Процес заняття електроном певного рівня є імовірнісним і описується розподілом Фермі. Імовірність того, що електрон займає визначений енергетичний рівень при даній температурі, дорівнює:

$$P_n(E) = \frac{1}{e^{\frac{E-E_F}{kT}} + 1} \quad (1.1)$$

Де: E - даний енергетичний рівень;

E_F - енергетичний рівень Фермі;

k - постійна Больцмана = Дж / град;

T - абсолютна температура.

Енергія рівня Фермі дорівнює:

$$E_F = E_v + \frac{\Delta E_g}{2} = E_c - \frac{\Delta E_g}{2} \quad (1.2)$$

Імовірність того, що на рівні E знаходиться дірка дорівнює:

$$P_p(E) = \frac{1}{e^{\frac{E_F-E}{kT}} + 1} \quad (1.3)$$

1.2 Електрофізичні властивості напівпровідників.

До напівпровідникових матеріалів відносяться

Ge - германій; GaAs - арсенід галію;

Si - кремній; GaP - фосфат галію;

Se - селен; SiC - карбід кремнію.

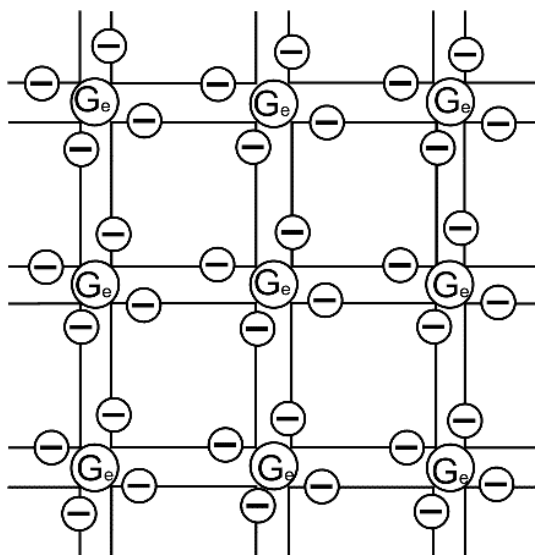


Рисунок 4.

За питомим опором напівпровідники займають проміжне місце між провідниками і діелектриками, тому при високих температурах вони поведуться як провідники, а при низьких - як діелектрики.

Напівпровідники сильно змінюють питому провідність під впливом електричного поля.

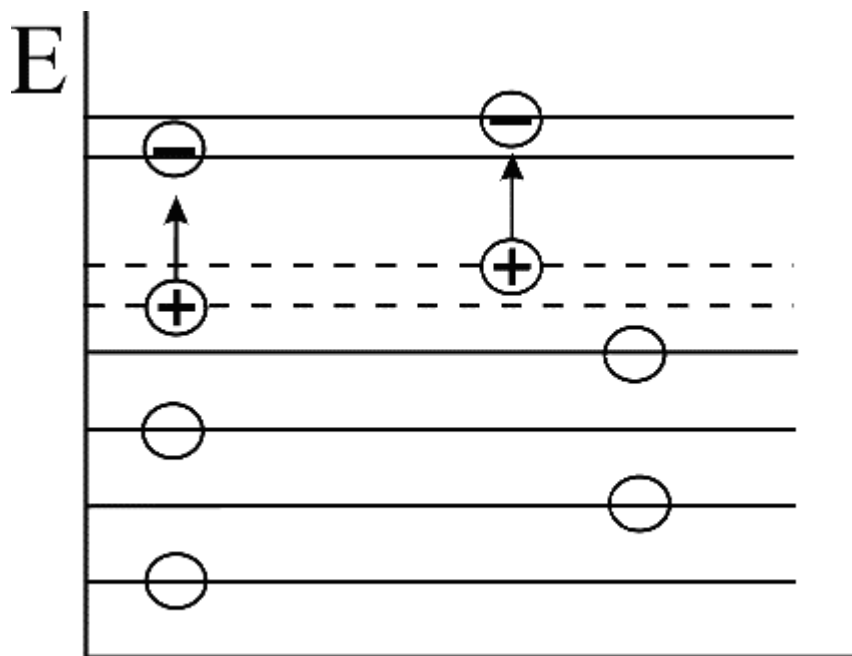


Рисунок 5.

На рисунку 4 зображена кристалічна решітка германію. У вузлах решітки розташовуються атоми Ge, вони мають зв'язок з іншими атомами за допомогою

чотирьох ковалентних електронів. При абсолютному нулі всі ковалентні зв'язки заповнені, і кожен атом має оболонку з 8 електронів.

Ширина забороненої зони для Ge = 0,72eV. При нагріванні енергія електронів може перевищити енергію забороненої зони, і деякі електрони перейдуть в зону провідності, а на їх місці залишаться дірки (дивись рисунок 5). В цьому випадку Ge матиме власну провідність за допомогою вільних електронів і дірок.

Якщо в кристал германію додати домішок елементів п'ятої (As) або третьої (In) груп таблиці Менделєєва, то можна отримати домішкову вищу провідність.

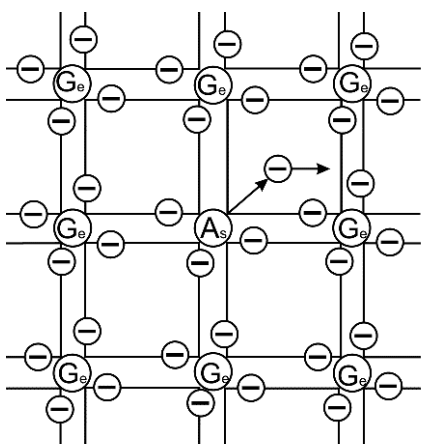


Рисунок 6.

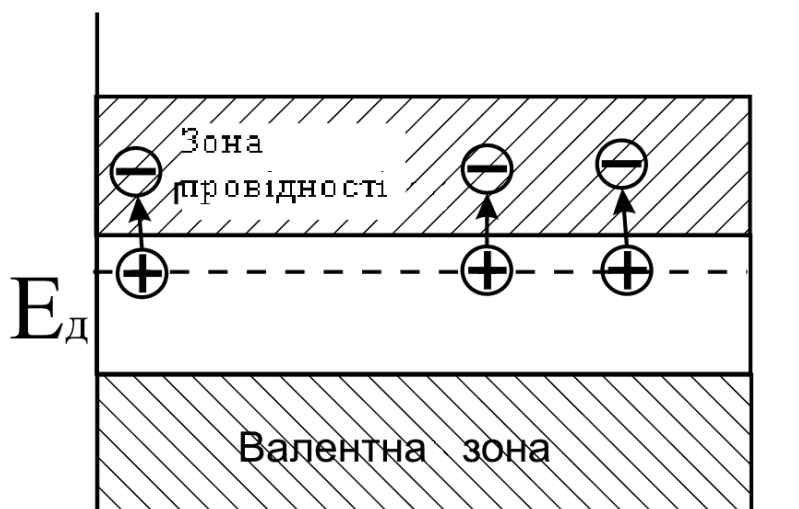


Рисунок 7.

Атом As займає місце в вузлі кристалічної решітки германію та чотири його електрона утворюють ковалентний зв'язок з сусідніми атомами германію, а п'ятий

електрон зв'язку не утворює і має енергетичний рівень E_d близький до рівня провідності і тому вже при кімнатній температурі переходить в зону провідності. Ці електрони дають домішкову провідність значно вище власної провідності германію (n-провідник). При додаванні домішки In його атоми заміщають атоми Ge в деяких вузлах, але оскільки вони мають по три електрона на своїх орбітах, то вони утворюють з атомами германію потрійний ковалентний зв'язок. Однак, оскільки їх енергетичний рівень лежить поблизу валентної зони, то вони відривають від найближчих атомів германію по одному електрону для утворення четвертої зв'язку, а на їх місці утворюються дірки. Така провідність називається дірочною або типу-P (p-напівпровідник).

1.3 Електронно-дірковий перехід.

P-n перехід може бути отриманий різними способами, сплавним, дифузійним і таке інше. Він утворюється на кордоні двох видів напівпровідників p і n типів. При отриманні p-n переходу концентрація дірок становить:

$$N_d = 10^{15} \text{ 1/см}^3,$$

а концентрація електронів:

$$N_s = 10^8 \text{ 1/см}^3.$$

Розглянемо поведінку носіїв зарядів на кордоні p-n переходу за умови:

1. На кордоні p-n переходу відсутні механічні дефекти і включення інших матеріалів.
2. При кімнатній температурі всі атоми домішки іонізовані.
3. На межі переходу тип домішки різко змінюється.

На рисунку 8.а. зображений p-n перехід, до якого не прикладена напруга. Під впливом дифузії частина електронів перейде в p-область, а частина дірок в n-область. Цей перехід буде тривати до тих пір, поки електричне поле, що виникло від цих зарядів, не припинить цей перехід. В результаті цього виникає

потенційний бар'єр р-n переходу. Він буде постійним при даних умовах. Частина дірок буде з'єднуватися з електронами (рекомбінуватимуться), а на їх місце буде надходити нові. Цей процес викликає внутрішній невеликий дифузний струм.

Чим швидше протікають в р-n переході процеси іонізації і рекомбінації, тим більше високочастотним можна побудувати напівпровідниковий прилад.

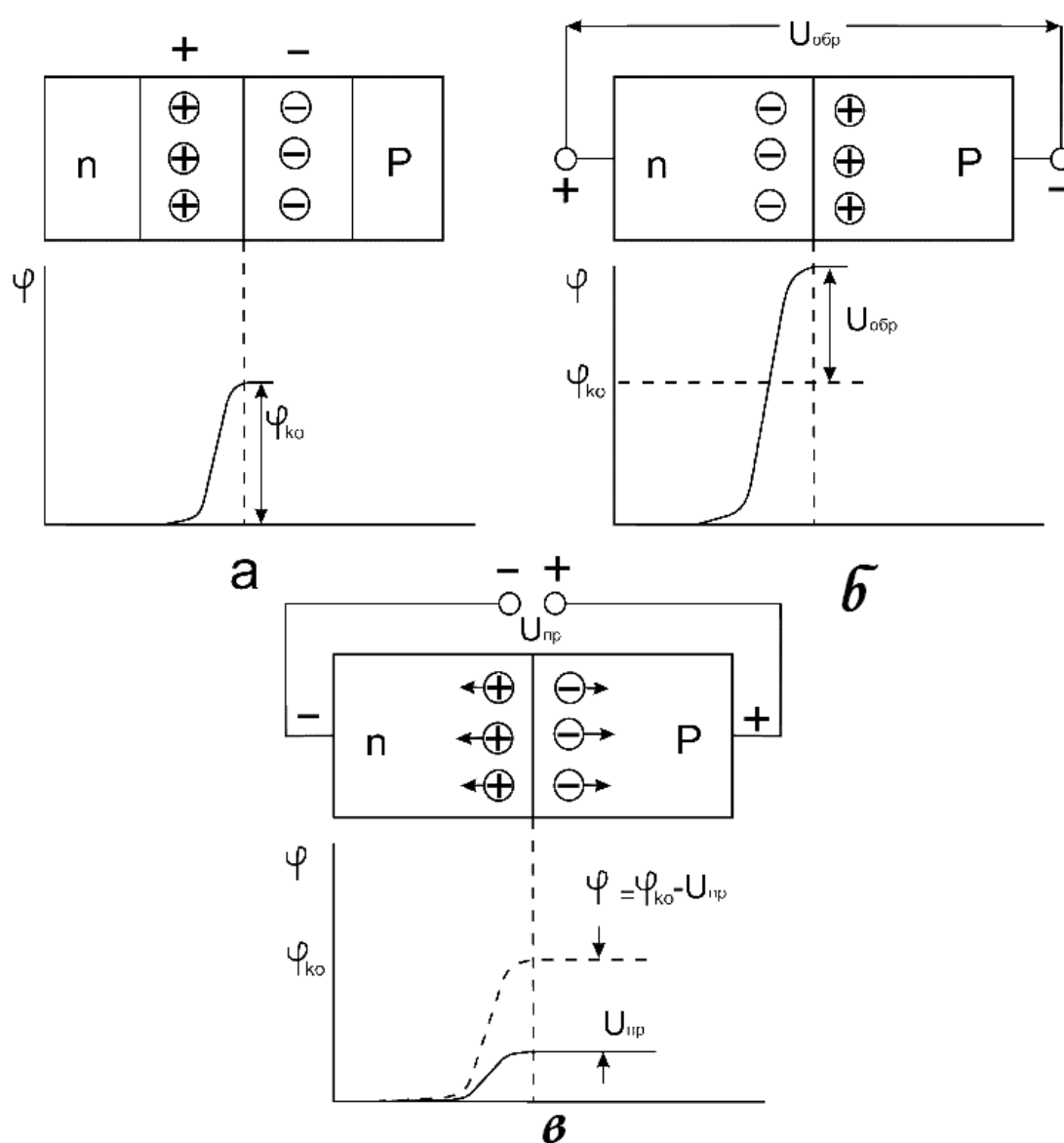


Рисунок 8.

Якщо до р-n переходу прикласти різницю потенціалів від джерела постійного струму, як показано на рисунку 8.б., то під впливом поля джерела дірки кинуться до негативного полюса батареї, а електрони - до позитивного. В результаті в р-n

переході заряди розійдуться і утворюється високий потенційний бар'єр рівний $\varphi_{0\kappa} + u_{ze}$. Р-n перехід буде замкнений, за винятком невеликого струму від електронів і дірок неосновних носіїв, який називається тепловим струмом і позначається I_{e0} .

Якщо до р-n переходу прикласти потенціал від джерела в напрямку, як показано на рисунку 8.в., то електрони n-області кинуться до позитивного полюса батареї, а дірки - до негативного. Вони будуть зустрічатися на кордоні р-n переходу і рекомбінувати при цьому n-область інжектуює електрони і називається емітером, а область р, яка постачає дірки, називається базою.

При цьому потенціал між цими областями знижується і дорівнює

$$\varphi = U_{i\delta} - \varphi_{0e} \quad (1.4)$$

Натомість рекомбінированим електронам і діркам джерело живлення поставляє нові. Таким чином, це призводить до появи постійного струму через р-n перехід. При цьому опір переходу стає низьким.

1.3 Вольтамперная характеристика р-n переходу.

Вольтамперная характеристика (ВАХ) р-n переходу - це залежність струму через р-n перехід від величини і полярності прикладеної напруги. ВАХ описується наступним виразом

$$I = I_0 (e^{\frac{qU}{kT}} - 1) \quad (1.5)$$

Де: U - напруга, прикладена до р-n переходу;

q - заряд електрона;

k - постійна Больцмана; 8, 16 eV / K,

T - абсолютна температура.

ВАХ має вигляд:

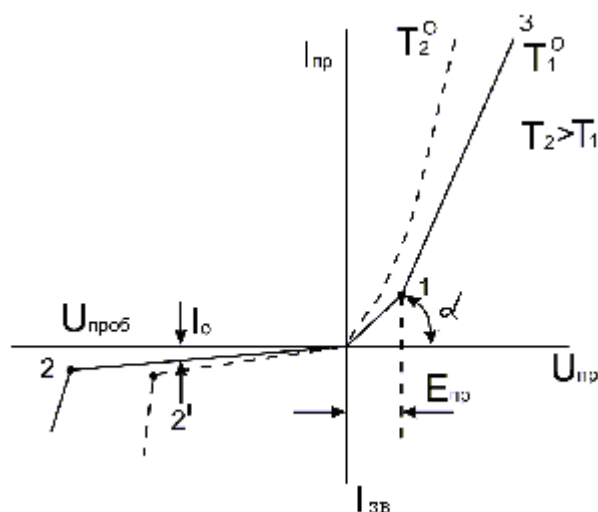


Рисунок 9.

При додатку прямої напруги до р-п переходу до точки 1 існує потенційний бар'єр. Після 1 він зникає і характеристика являє собою пряму лінію, яка показує, що струм через перехід майже прямо пропорційний прикладеній напрузі. Однак, ця характеристика має істотну нелінійність, особливо на початковій ділянці.

При додатку зворотної напруги р-п перехід являє собою високий опір, тому що через нього протікає тільки струм неосновних носіїв I_0 , а він дуже малий. При збільшенні зворотної напруги до точки 2 і далі відбувається електричний пробій. Він буває трьох видів: лавинний, тунельний і теплової.

Лавинний процес виникає в результаті внутрішньої емісії електронів під дією ударної іонізації атомів. Тунельний пробій виникає місцево, коли довжина вільного пробігу електрона стає більше ширини р-п переходу.

В обох випадках опір р-п переходу стає значно менше, струм істотно зростає, а р-п перехід втрачає напівпровідникові властивості. При електричному пробіі всі процеси зворотні і при знятті $U_{зв.проб.}$ р-п перехід відновлює свої властивості.

Якщо перехід знаходиться в стані тунельного або лавинного пробію і по ньому тривалий час протікає великий струм, то перехід нагрівається і починається термоемісія електронів, які збільшують струм через перехід і він ще більше

нагрівається цей процес розвивається некеровано і в результаті перехід проплавляється. Цей пробій не оборотний.

До настання пробою (до точки 2) в р-п переході заряди розходяться в різні боки утворюючи дві заряджені протилежно площині. Це являє собою ємність

$C_{\text{бар'єрне}}$.

На високих частотах $C_{\text{бар}}$ має малий опір, яке шунтує перехід

$$X_{C_{\text{бар}}} = \frac{1}{\omega C_{\text{бар}}} \quad (1.6)$$

При помірному нагріванні переходу ВАХ змінюється, як показано пунктирною лінією, при цьому прямий струм зростає, (опір переходу зменшується), зворотний теж збільшується і електричний пробій настає раніше, ніж без нагріву (точка 2).

1.5 Тунельний ефект в р-п переходах.

Явище тунельного ефекту було відкрито японським вченим Лео Есакі в 1958 р Цей ефект спостерігається в р-п переході вироджених напівпровідників. У звичайних напівпровідників концентрація домішок $10^{14} \div 10^{16} \text{ 1/см}^3$. При цьому рівень ферми перебувати в зоні провідності напівпровідника n-типу і в валентної зоні напівпровідника р-типу.

Оскільки ширина переходу обернено пропорційна кількості домішок, то у вироджених напівпровідників р-п перехід дуже вузький, і ряд електронів з малою енергією має цілком кінцеву ймовірність перетнути енергетичний бар'єр, не змінивши своєї енергії. В цьому випадку для вироджених напівпровідників ВАХ має вигляд (рис.10)

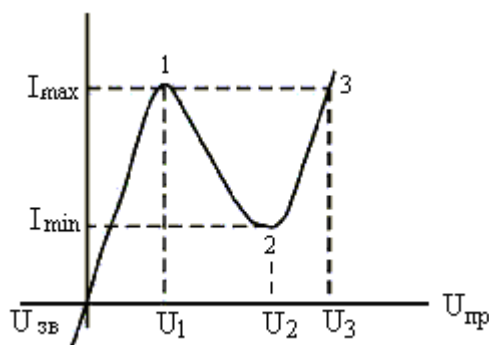


Рисунок 10

При $U_{пр.} = 0$ $I = 0$

З ростом напруги зростає тунельний струм через р-п перехід. Зростання струму відбувається до точки 1. Далі на ділянці 1-2 при зростанні $U_{пр}$ тунельний струм зменшується і досягає I_{min} в точці 2. Ділянка 1 ÷ 2 характеризується негативним диференціальним опором.

Починаючи з точки 2 при збільшенні $U_{пр}$ знову починає рости прямий струм, але вже не за рахунок тунельного ефекту, а за рахунок дифузійного струму. Цей струм досягає I_{max} в точці 3.

Ділянка 2÷3 називається другою висхідним ділянкою з позитивним диференціальним опором.

При додатку до р-п переходу виродженого напівпровідника $U_{зв.}$ спостерігається зворотний тунельний струм, який росте з ростом $U_{зв.}$

1.6 Гетерперехід і перехід Шотки.

Гетерперехід називається р-п перехід утворений напівпровідниками з різною шириною забороненої зони. Прикладами гетерпереходів є переходи германій - кремній, германій - арсенід галію.

Енергетична діаграма р-п гетерперехода зображена на рисунку 11.

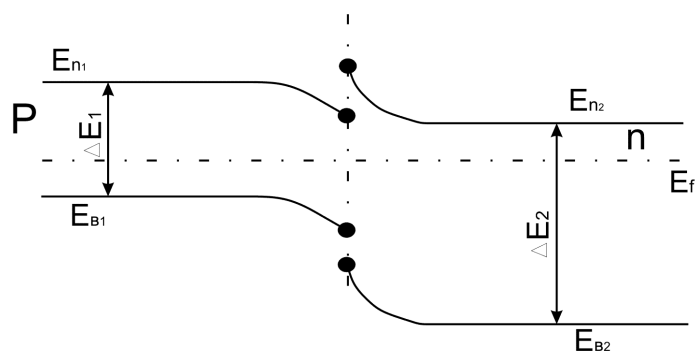


Рисунок 11.

Ці напівпровідники мають різні енергетичні рівні E_{B1} і E_{B2} .

Тому потенційні бар'єри для електронів і дірок будуть різними і потенційний бар'єр для електронів в зоні провідності менше, ніж для дірок. При подачі напруги в прямому напрямку потенційний бар'єр зміщується в бік зони провідності і стає менше як для p , так і для n напівпровідника.

Однак для n -напівпровідника він все ж значно менше і тому інжекція електронів йде з n -напівпровідника, а інжекції дірок з p -напівпровідника практично немає. Це явище використовується для більш якісної роботи напівпровідникових приладів.

Переходом Шотки називається будівник контакт метал - провідник p -типу. Основною особливістю цього переходу є відсутність інжекції неосновних носіїв зарядів. Ці переходи працюють тільки на основних носіях і тому не мають дифузійної ємності, яка пов'язана з допомогою неосновних носіїв. Тому цей перехід має істотно менший час перемикавання. Крім того, падіння напруги на переході Шотки значно менше, ніж на звичайному p - n переході (2). Це пояснюється наявністю додаткового струму від термоелектронної емісії, викликаної розігрівом від проходження струму, через контакт з великим опором.

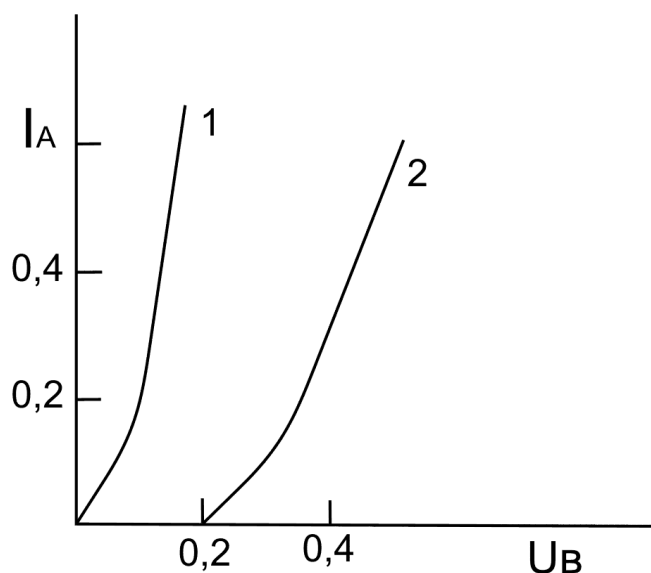


Рисунок 12.

Фізична картина цього явища така. Якщо робота виходу $-n_{\bar{y}}^a$ з напівпровідника менше, ніж з металу, то при їх контакті $n_{\bar{y}}^a$ переходять з напівпровідника в метал. В результаті напівпровідник збіднюється $n_{\bar{y}}^a$ і заражає позитивно, а метал негативно. Це буде тривати до тих пір поки поля не врівноважує один-одного. Утворюється потенційний бар'єр. При додатку напруги, яка збігається з внутрішнім полем бар'єр збільшується і опір зростає, а при незбіжних - бар'єр зменшується і опір падає. Це є основою односторонньої провідності. Якщо робота виходу з металу менше ніж і напівпровідника, то $n_{\bar{y}}^a$ переходить з металу в напівпровідник, полегшуючи його. При цьому опір його зменшується і порівнюється з металом. Односторонньої провідності в цьому випадку не утворюється. Це явище використовується в мікросхемах для отримання звичайних контактів і омичних переходів. Висока швидкодія і мале падіння напруги дозволяє використовувати переходи Шотки в ТТЛ-логіки. Цей перехід отримав назву по системі німецького вченого В. Шотки відкрив це явище в 1930 р

1.7. Класифікація і загальні характеристики електронних елементів.

Всі ці прилади можна розділити на два класи:

- 1) Електронні прилади, керовані електричними сигналами;
- 2) Електронні прилади, керовані оптичними сигналами.

Перші застосовуються більш широко, тому що виникли раніше і більш зручні в управлінні і передачі сигналів.

Існує ряд напівпровідникових приладів, фізичні явища яких використовуються для вимірювання різних величин, наприклад, температури, потужності, електричних і магнітних полів.

До них відносять датчики температури, тензометричні датчики, датчики Холла.

Залежно від можливості посилювати електричні сигнали напівпровідникові прилади можна розділити на активні та пасивні.

До пасивних відносяться всі види діодів, а до активних транзистори, тунельні діоди, тиристори.

Мікроелектроніка розвивається в трьох напрямках:

- гібридних мікросхем;
- інтегральних мікросхем;
- функціональних вузлів і пристроїв.

Мікросхема - це мікроелектронний виріб, що має щільність монтажу, не менш 5 елементів в см^2 і розглядається як єдине ціле (один конструктив).

Ступень інтеграції як $K = \lg N$

$K=1$ якщо $N=1 \div 10$ ел.; $K=2$ якщо $N=10 \div 100$ ел.; $K=3$ якщо $N=100 \div 1000$ ел.;

$K=4$ якщо $N=1000 \div 10^4$ ел.; $K=5$ якщо $N=10^4 \div 10^5$.

Функціональна електроніка дозволяє реалізувати різні спеціальні функції в мікроелектронному виконанні. Наприклад, підсилювачі, генератори, регулятори, ключові схеми і таке інше.

Оптоелектроніка заснована на оптоелектронному принципі, коли в отриманні, передачі, зберіганні, посиленні, комутації і таке інше беруть участь як електричні, так і оптичні сигнали. Це дозволяє підвищити швидкодію, стійкість, довговічність, отримати високу щільність зберігання інформації, односторонність передачі інформації і високий поділ каналів.

Акустoeлектроніка - це напрямок пов'язаний з використанням п'єзoeфекту в електроніці: лінії затримки, звукознімачі, електронне уприскування чорнила і палива і таке інше.

Магнітоелектроніка заснована на застосуванні тонких магнітних плівок і феритів і ефекту Холла.

Криoeлектроніка заснована на явищі надпровідності в провідниках, в яких дуже низький опір і відсутня магнітна індукція, а також на властивості напівпровідників охолоджується.

1.8 Напівпровідникові діоди загального призначення.

Напівпровідниковим діодом (НД) називають напівпровідниковий прилад з одним р-п переходом і двома виводами.

Вони класифікуються по виду на напівпровідникового матеріалу на селенові, германієві, кремнієві і з карбиду кремнію.

- За призначенням: випрямні, стабілітрони, імпульсні, високочастотні, варикапи.
- По конструкції переходу: на площинні і точкові.
- По конструкції корпусу: скляний корпус, металевий корпус, металокерамічний і пластмасовий.

Випрямні діоди (ВД).

Випрямні діоди призначені для перетворення змінного струму в постійний. Вони порівняно низькочастотні 50Гц - 100кГц. Як випрямні діоди широко

застосовуються площинні германієві і кремнієві діоди. Германієві діоди мають менший опір, але більший струм I_0 і нижчу робочу температуру (близько $+70^\circ\text{C}$).

Кремнієві діоди мають більш високий внутрішній опір, але менший I_0 і більш високу граничну робочу температуру ($+120 \div +150^\circ\text{C}$).

P-n перехід випрямних діодів має такі області: область p - містить великі домішки і звану емітером і область n - містить менше домішок і звану базою. Опір бази значно вище опору емітера $r_6 = 1 \div 10 \text{ Ом}$.

Тому реальна ВАХ зміщена в область менших струмів.

При зворотній напрузі через діод протікає струм рівний:

$$I_{зв} = I_0 + I_\tau + I_y \quad (1.7)$$

де I_0 - зворотний струм насичення переходу.

I_τ - ток термогенерации в обсяг напівпровідника.

I_y - струм витоку поверхні напівпровідника.

Робочим ділянкою випрямного діоду є ділянка 1-3 рисунку 9. Нахил характеристики визначається опором r_6 .

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{1}{r_6} \quad (1.8)$$

На прямій ділянці ВАХ апроксимується виразом:

$$I_{np} = \frac{U_{np} - E_{np}}{r_6} \quad \text{при } U_{np} > E_{np}$$

$$I_{np} = 0 \quad \text{при } U_{np} \leq E_{np}$$

Основні параметри випрямних діодів наступні:

$I_{np \text{ ср}}$ - середнє пряме значення випрямленого струму;

$U_{np \text{ ср}}$ - середнє значення прямого падіння напруги;

$I_{зв}$ - струм через діод у зворотному напрямку;

$U_{зв}$ - напруга на діоді в зворотному напрямку;

Δf - діапазон робочих частин;

$C_{дзв}$ - ємність діода при зворотному включенні.

Ці ж параметри наводяться в довідниках і технічних умовах (ТУ) гранично допустимі або максимальні.

Випрямні діоди діляться на:

- діоди малої потужності $I_{пр\text{ ср}} \leq 0,3\text{ А}$;
- діоди середньої потужності $I_{пр\text{ ср}}$ від 0,3 до 10 А;
- діоди великої місткості $I_{пр\text{ ср}} > 10\text{ А}$.

Для підвищення $U_{зв\text{ макс}}$ застосовуються діодні стовпи, в яких кілька високовольтних діодів з'єднані послідовно.

Стабілітрони.

Стабілітроном називається діод, у якого ділянка зворотного пробою є вельми стабільною по напрузі і може відтворюватися десятки тисяч годин. Значення напруги і струмів стабілізації залежить від матеріалу напівпровідника і технології його обробки. Для стабілітронів з $U_{СТ} = 3 \div 7\text{ В}$ виготовляються з більш високоомних матеріалів і в них для малих $U_{СТ}$ превалює тунельний, а для великих $U_{СТ}$ лавинний пробій.

Основні характеристики стабілітронів:

- $U_{СТ\text{ ном}}$ - номінальне значення стабілізації;
- $I_{СТ\text{ мін}}$ - мінімальний струм початку стабілізації;
- $I_{СТ\text{ макс}}$ - максимальний струм стабілізації;
- $P_{\text{макс}}$ - максимальнодопустима потужність розсіювання на стабілітроні;
- $I_{СТ\text{ ном}}$ - номінальний (середній) струм стабілізації;

$$I_{СТ} = \frac{I_{СТ.\text{MAX}} + I_{СТ.\text{MIN}}}{2} \quad (1.9)$$

- $R_{СТ}$ - диференційний опір стабілітрона

$$r_{СТ} = \frac{\Delta U_{СТ}}{\Delta I_{СТ}} \quad (1.10)$$

воно характеризує сталість $U_{СТ}$ при зміні струму, чим менше $R_{СТ}$, тим вище стабілізація.

$\alpha_{СТ}$ - середній температурний коефіцієнт зміни $U_{СТ}$

$$\alpha_{СТ} = \frac{dU_{СТ}}{U_{СТ}} * \frac{1}{dT} * 100\% \quad \text{при } I_{СТ} = \text{const} \quad (1.11)$$

При тунельному пробі α має позитивний знак, а при лавинному - негативний.

За потужністю, що розсіюється, стабілітрони діляться на:

- малої потужності $P_{ст} < 0,3 \text{ Вт}$
- середньої потужності $0,3 \leq P_{ст} \leq 5 \text{ Вт}$
- великої потужності $P_{ст} > 5 \text{ Вт}$

Високочастотні діоди

Високочастотні діоди - це прилади універсального призначення, що застосовуються для випрямлення, детектування та інших нелінійних перетворень електричних сигналів в діапазоні до 600 МГц.

Вони виготовляються з германію і кремнію і мають точкову конструкцію. Вони мають малу ємність р-п переходу (не більше 1 пФ), але потужність розсіювання мала, тому вони застосовуються тільки в малопотужних випрямлячах. У цих діодів I_0 мало залежить від температури і подвоєння його відбувається на $15 \div 20^\circ\text{C}$, в той час як в площинних діодах він змінюється в $2 \div 2,5$ рази на 10°C .

Високочастотні діоди, крім ВАХ, характеризуються

- C_d - загальна ємність, що включає виводи;
- $r_{диф}$ - диференціальний опір діода визначається так:

$$r_{диф} = \frac{\Delta U_{np}}{\Delta I_{np}} \quad (1.12)$$

- Δf - діапазон робочих частот.

У ТТЛ - логіки застосовуються діоди Шотки у яких

$$C_d = 0,01 \text{ пф}, = 5 \div 250 \text{ ГГц}$$

$$I_0 = 1 \div 2 \text{ мА}; U_{зв} = 10 \div 1000 \text{ В}.$$

τ - перемикання 0,1 нс.

Імпульсні діоди

Імпульсні діоди призначені для роботи в швидкодіючих імпульсних схемах з часом перемикання менш 1мкс. У них застосовуються заходи для зниження і бар'єрної ємності і часу розсмоктування нерівноважних носіїв.

На рисунку 14 зображена схема включення імпульсного діода.

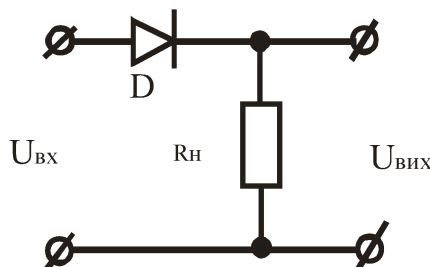


Рисунок 14

При подачі на вхід схеми $U_{пр}$ в R_n протікає імпульс струму $I_{пр}$. Після додатку $U_{зв}$ діод не відразу закривається: у нього є викид струму I_1 , а потім він повільно зменшується до $I_{зв}$. Це обумовлюється розсіюванням нерівноважних носіїв. Нерівноважні носії - це заряди яким немає парних зворотних зарядів (рис.15).

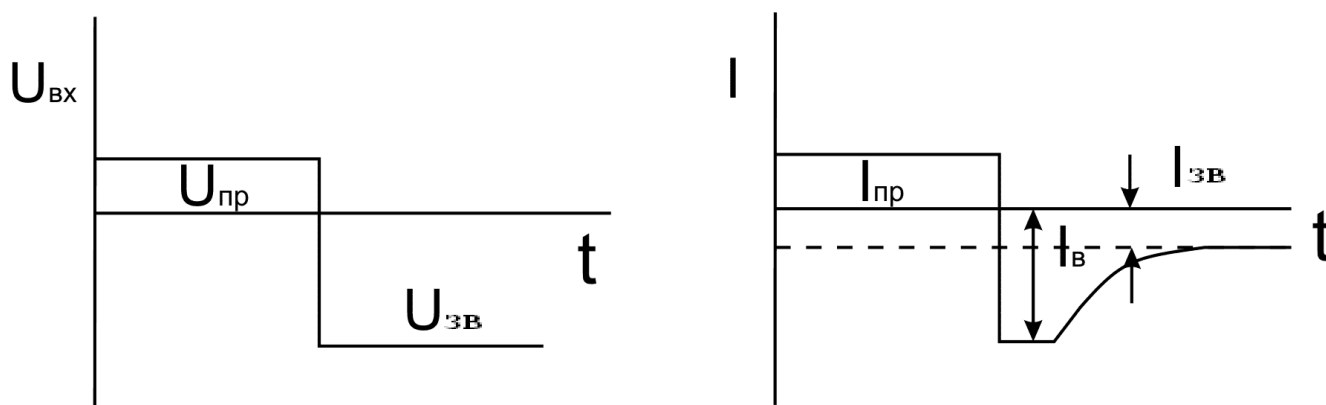


Рисунок 15

Основними характеристиками імпульсних діодів є:

t_v - час відновлення переходу;

Q_d - надлишковий заряд нерівноважних носіїв;

C_d - ємність між висновками;

$U_{пр i}$ - пряме імпульсна напруга;

I_{IC} - імпульсний струм.

Варикапи

Варикапи - це діоди, у яких бар'єрна ємність сильно залежить від зворотної напруги.

При збільшенні $U_{зв}$ заряджені шари в р-п переході розсуваються і бар'єрна зона збільшується це призводить до зміни ємності.

До параметрів варикапов відносяться:

- C_{max} і C_{min} - максимальна і мінімальна ємності;

- $K = \frac{C_{max}}{C_{min}}$ - коефіцієнт перекриття;

- Q - добротність; $Q = \frac{X_c}{R}$, де R - опір втрат (витоку)

- U_{max} - максимально допустиме напруга;

- P_{max} - макисмально допустима потужність;

- ТКЕ - зміна ємності на $1^\circ C$.

1.9 Біполярні транзистори.

Біполярним транзистором (напівпровідниковим тріодом) називається напівпровідниковий прилад, що має два р-п переходи і три виводи і призначений для посилення потужності. У цих приладах використовуються електрони і дірки, тому вони називаються біполярними.

Біполярний напівпровідниковий тріод являє собою систему р-п-р або n-р-n отриману в одному монокристалі напівпровідника.

Центральна частина монокристала, розділена р-n переходами, називається базою. Зовнішній шар призначений для інжектування носіїв в базу, називається емітером, а перехід, який примикає до емітера емітерний (Π_1).

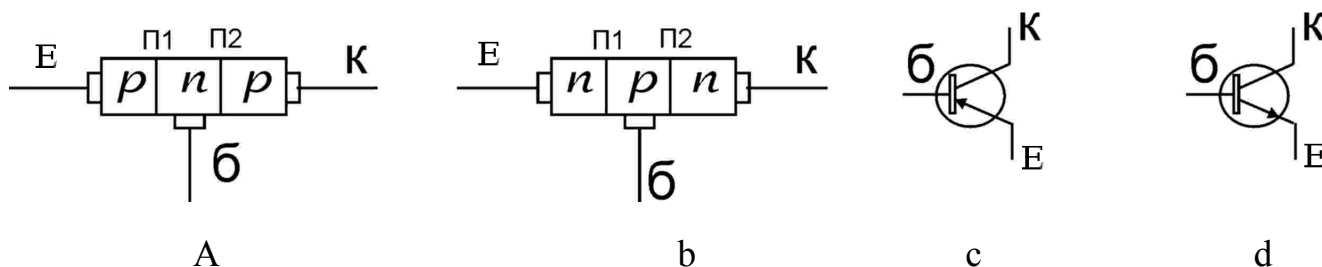


Рисунок 16

Другий зовнішній шар, який витягає носії з бази, називається колектором. До нього примикає другий перехід Π_2 .

Параметри транзистора визначаються напівпровідниковими матеріалами і технологією виготовлення. За технологією транзистори діляться на:

- сплавні, вирощені, дифузійні, епітаксіальні, планарні і таке інше.

База робиться дуже вузькою - кілька мікрон. Концентрація домішок в емітер значно вище, ніж в базі. Колекторний перехід робиться невеликим за площею для кращого перенесення носіїв.

Розглянемо роботу транзистора в підсилюючому режимі за наступною схемою рисунок 17.

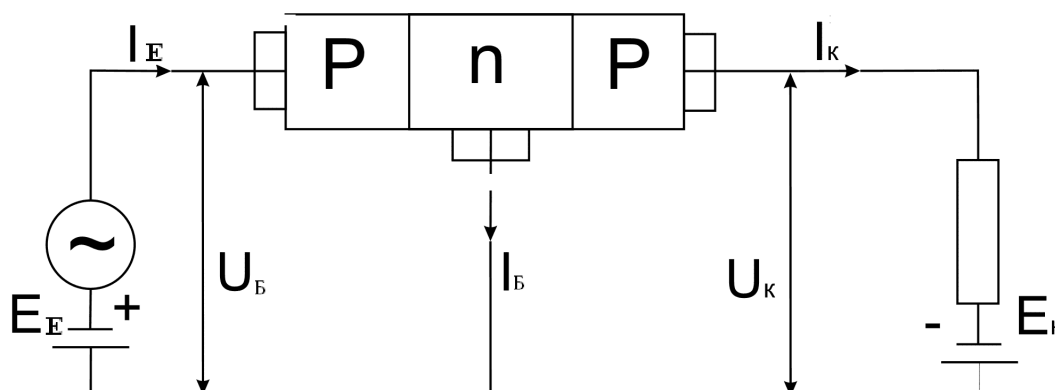


Рисунок 17

Якщо до виводів транзистора не додана напруга, то в р-п переходах існують потенційні бар'єри, і струму через транзистор немає. Якщо до транзистора прикласти напругу, як показано на рисунку 17, то перехід емітер - база буде зміщений в прямому напрямку, а колектор - база - в зворотному. В цьому випадку з емітера виникає інжекція дірок в базу і оскільки концентрація домішок в емітер велика, то вона перевищує потік електронів з бази і в колі емітер - база потече струм.

$$I_E = I_{EP} + I_{nEB} \quad (1.12)$$

I_{EP} - струм дірок емітера, I_{nEB} ток електронів бази.

В ідеальному транзисторі $I_{nEB} = 0$, а в реальному

$$\gamma = \frac{I_{EP}}{I_E} \approx 0,999; \quad (1.13)$$

Інжектвані в базу дірки частково рекомбінують з електронами, на місце яких проходять нові, які утворюють базовий струм. База дуже тонка тому велика частина дірок доходить до колекторного переходу. Співвідношення струмів I_{EP} і I_{BP} визначається коефіцієнтом:

$$\partial = \frac{I_{BP}}{I_{EP}}; \quad (1.14)$$

де:

I_{EP} - загальний дірковий струм емітера,

I_{BP} - дірковий струм бази, що пройшли до колекторного переходу.

Колекторний перехід широкий, тому ці дірки переходять в колектор і утворюють колекторний струм:

$$\alpha = \frac{I_K}{I_E} < 1 \quad (1.15)$$

де: $I_K = I_{KP} + I_{K0}$, I_{K0} - зворотний струм насичення назад включеного колектора.

Оскільки $I_{K0} \ll I_{KP}$, то $I_K = \alpha I_E$; $I_B = I_E - I_K$

Якщо напругу в колі емітера міняти за синусоїдальним законом, то струм I_E і I_K будуть теж змінюватися за цим законом і напруга на навантаженні R_K буде змінюватися за цим же законом.

$$U_{KE} = E_K - I_R R_K \sin \omega t = U_K \cos \omega t \quad (1.16)$$

Оскільки $R_K \gg R_{BX}$, то $U_K \gg U_{EB}$ і буде відбуватися посилення по напрузі. Транзистор використовується для посилення потужності. Це відбувається за рахунок джерела живлення.

Існує три схеми включення транзисторів рисунок 18 із загальною базою (а) із загальним емітером (б) і з загальним колектором (в).

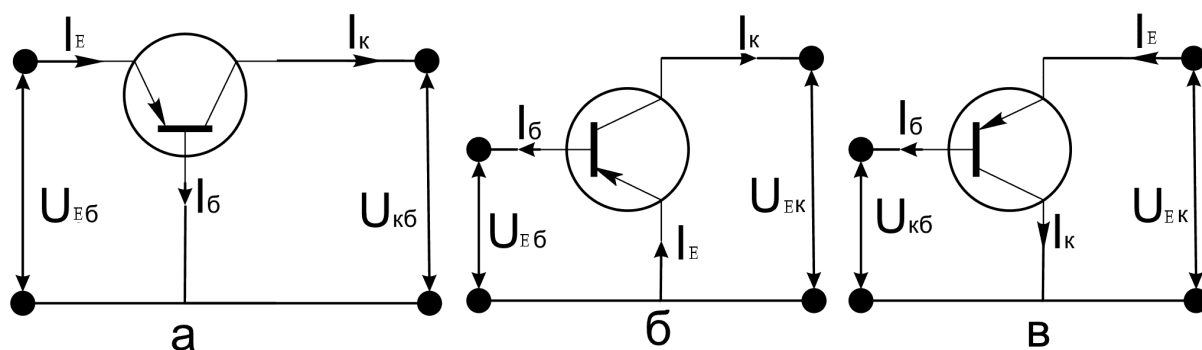


Рисунок 18

Найчастіше застосовується схема з загальним емітером, тому що вона має максимальне посилення по потужності. Схеми включення транзисторів характеризуються чотирма ВАХ: вхідними, вихідними, характеристиками передачі

по струму і характеристиками зворотного зв'язку по напрузі.

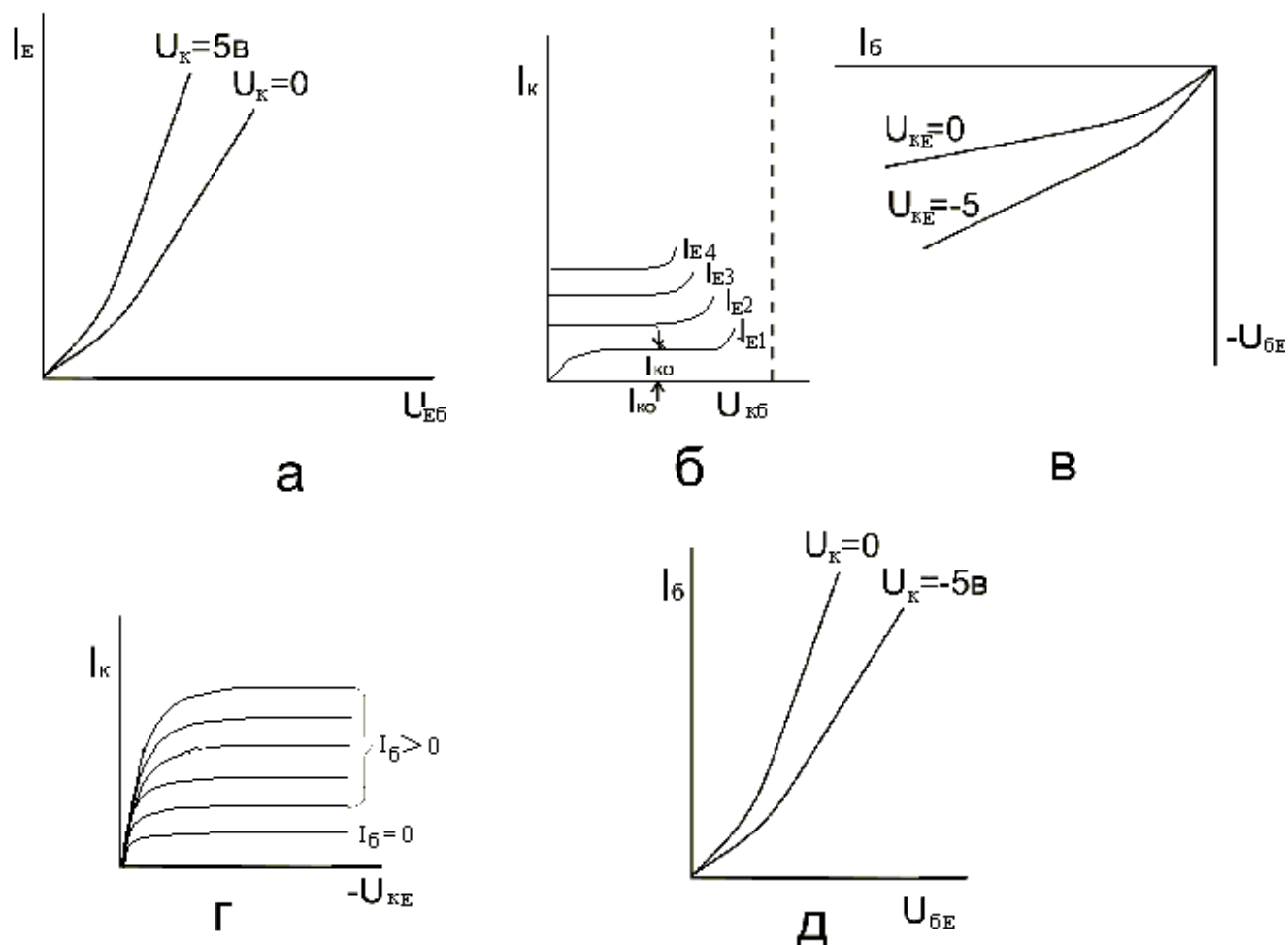


Рисунок 19

Ці характеристики статичні і зняті без R_H в вихідному колі.

Робота транзистора в схемі з загальним емітером.

При $E_K = \text{const}$ і $R_K = \text{const}$.

$$U_{KE} = E_K - I_K R_K \quad (1.17)$$

В цьому випадку I_K залежить від зміни U_{KE} . Такий режим називається динамічним і характеристики динамічними. Струм I_K описується рівнянням прямої лінії.

$$I_K = \frac{E_K}{R_K} - \frac{U_{KE}}{R_K}; \quad (1.18)$$

Будується ця навантажувальна пряма на статистичних характеристиках по двох точках А і В.

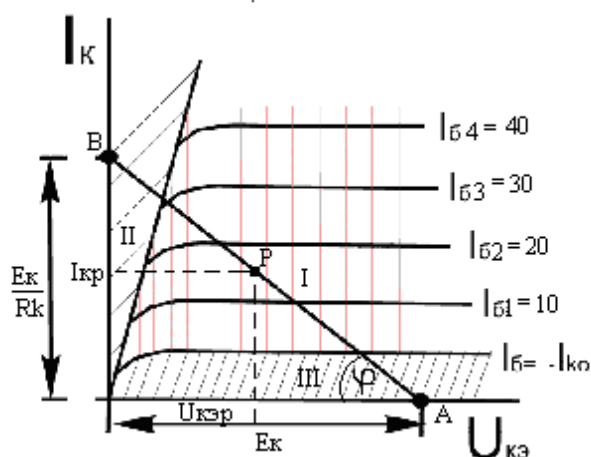


Рисунок 20.

У точці А $U_K = E_K$; $I_K = 0$. У точці В $U_K = 0$; $I_K = E_K / R_K$;

Існує три режими транзистора: активний (посилення), насичення і відсічення. Відповідно на вихідній характеристике є три області І-активна, ІІ-насичення, ІІІ-відсічення.

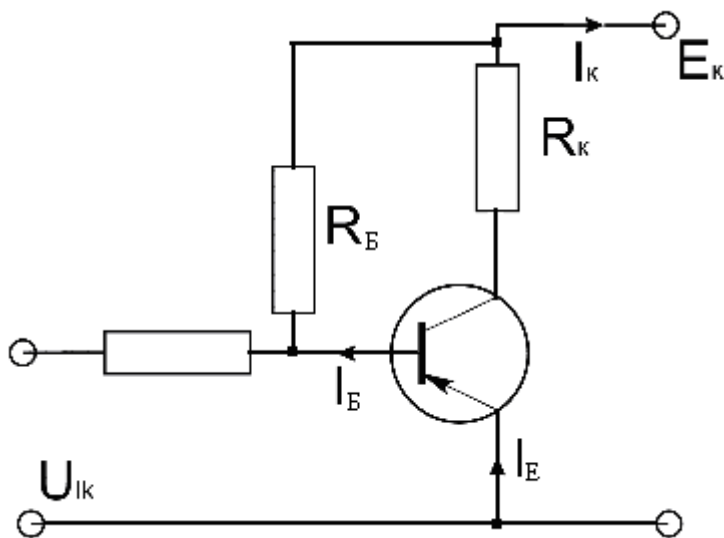


Рисунок 21.

В області відсічення транзистор закритий. Ця область лежить нижче характеристики

$$I_Б = -I_{К0}.$$

В активній області транзистор частково відкритий. Ця область між характеристикою $I_b = -I_{ко}$ і головною ВАХ.

В області насичення II транзистор повністю відкритий. Вона знаходиться вище головної ВАХ.

Мало сигнальні еквівалентні схеми:

При розрахунках транзисторних каскадів користуються малосигнальними еквівалентними схемами (МЕМ). МЕМ є лінійними схемами і бувають двох видів:

- фізичні еквівалентні схеми, що враховують фізичні властивості транзистора і його структуру і параметри;
- формальні еквівалентні схеми, в яких транзистор представляється як активний чотириполіусник.

Параметри транзистора визначимо, як параметри відкритого чотириполіусника.

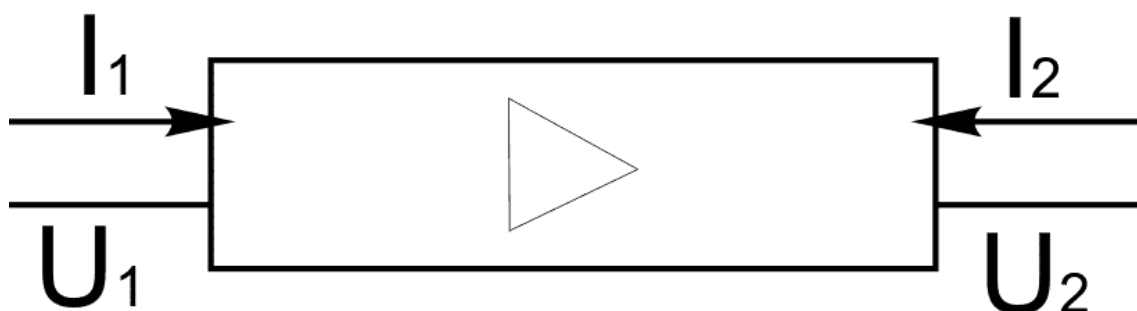


Рисунок 22

Цей чотириполіусник можна описати класичними рівняннями для U_1 і U_2 через Z параметри або для I_1 і I_2 через Y -параметри, але для їх знаходження необхідно виконувати виміри в режимах холостого ходу і короткого замикання по входу і виходу, а це для транзистора неможливо через малий вхідний опір і великий вихідний опір. Тому еквівалентну схему транзистора описують змішаними рівняннями через h -параметри.

$$U_1 = h_{11}I_1 + h_{12}U_2$$

$$I_2 = h_{21}I_1 + h_{22}U_2 \quad (1.19)$$

Параметри h_{11} і h_{21} вимірюються в режимі короткого замикання по виходу і рівні:

$$h_{11} = \left. \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} \right|_{\dot{U}_2 = 0}; \quad h_{21} = \left. \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1} \right|_{\dot{U}_2 = 0}; \quad (1.20)$$

Параметри h_{12} і h_{22} вимірюються в режимі холостого ходу по входу транзистора

$$h_{12} = \left. \frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2} \right|_{\dot{I}_1 = 0}; \quad h_{22} = \left. \frac{\dot{I}_2}{\dot{U}_2} \right|_{\dot{I}_1 = 0}; \quad (1.21)$$

При цьому схема заміщення транзистора буде мати вигляд:

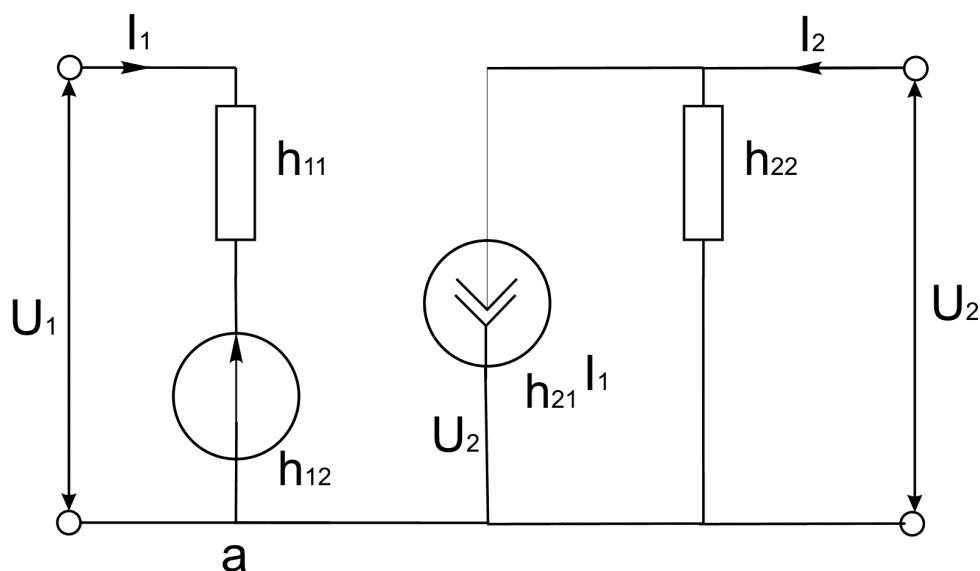


Рисунок 23

Таким чином:

$h_{11} = \frac{U_1}{I_1}$ - вхідний опір при короткому замиканні за змінним струмом на виході транзистора;

$h_{12} = \frac{U_1}{U_2}$ - коефіцієнт зворотного зв'язку по напрузі в режимі холостого ходу на вході.

$h_{21} = \frac{I_2}{I_1}$ - коефіцієнт передачі по току в режимі короткого замикання по змінному струмі на виході.

$h_{22} = \frac{I_2}{U_2}$ - вихідна провідність в режимі холостого ходу на вході.

Значення h-параметрів залежать від вибору робочої точки на вихідних характеристиках, схеми включення транзистора, температури і таке інше.

Практичні значення h параметрів можна знайти розрахунковим шляхом по статичним характеристикам. Для цього на вхідних характеристиках схеми з загальним емітером в робочій точці А будують трикутник.

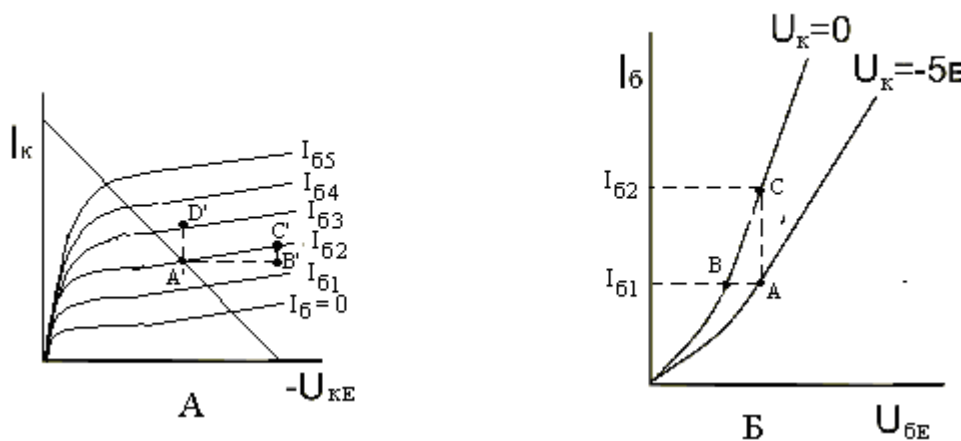


Рисунок 24

З нього можна отримати:

$$h_{119} = \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta I_B} = \frac{AB}{AC}; \quad h_{129} = \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta U_{КЭ}} = \frac{AB}{A'B'}; \quad (1.22)$$

$$h_{219} = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B} = \frac{A'D'}{I_{B2} - I_{B1}}; \quad h_{229} = \frac{\Delta I_K}{\Delta U_{КЭ}} = \frac{B'C'}{A'B'}; \quad (1.23)$$

Ці параметри визначаються за характеристиками рис. 24а, б.

Основні параметри транзисторів:

1. Коефіцієнт передачі струму для схеми з загальною базою:

$$\alpha = \left. \frac{dI_K}{dI_E} \right|_{U_{KB} = \text{Const}} \approx \frac{\Delta I_K}{\Delta I_E}; \quad (1.24)$$

2. Коефіцієнт передачі струму для схеми з загальним емітером:

$$\beta = \left. \frac{dI_K}{dI_B} \right|_{U_{KE} = \text{Const}} \approx \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B};$$

(1.25)

Ці коефіцієнти пов'язані між собою:

$$\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha}; \quad (1.26)$$

3. Потужність розсіювання на колекторі

$$P_K = I_K U_{KE} < P_{K\max} \quad (1.27)$$

Потрібно вибирати $U_{KE} < U_{KE\max}$ и $I_K < I_{K\max}$.

1.10. Польові транзистори.

Польовим транзистором називається трьох електродний напівпровідниковий прилад, в якому струм створюють основні носії заряду під дією поздовжнього електричного поля, а управління величиною струму здійснюється поперечним електричним полем, створюваним напругою, прикладеною до керуючого електрода. Польові транзистори діляться на дві групи:

- 1) польові транзистори з р-п переходами;
- 2) польові транзистори з ізольованим затвором.

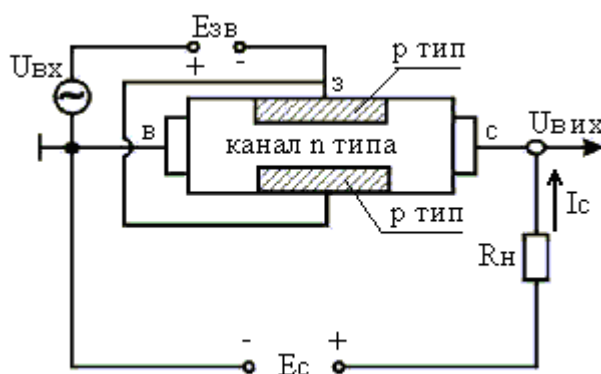


Рисунок 25

В - витік, С - стік, З - затвор, R_n - опір навантаження.

Між двома переходами р-п типу перебуває тонкий шар напівпровідника n-типу називається каналом. По ньому протікає струм під впливом поля джерела E_c . Чим більше E_c тим більше I_c . До затвору прикладається негативна напруга по відношенню до витоку.

Воно утворює замикаючий шар у р-п переходів і чим більше $E_{зв}$, тим товще замикаючий шар і тим менш товстий канал, який проводить, і вище його опір. Отже, зі збільшенням $E_{зв}$ зменшується I_c .

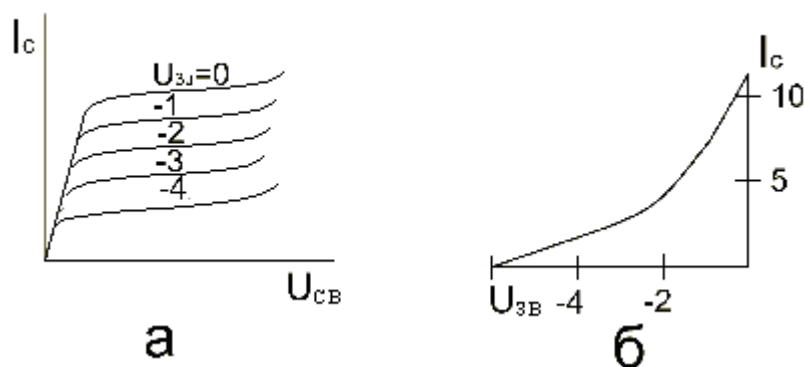


Рисунок 26

На рисунку 26 зображені а) вихідні (стокові характеристики) і б) передавальна характеристика. Ділянка насичення вихідної характеристики є робочою ділянкою. При додатку до затвору змінного $U_{вх}$ буде змінюватися I_c по його закону. Підбором R_n можна добиватися збільшення коефіцієнта посилення по напрузі.

Польові транзистори, у яких між затвором і каналом розташовується тонкий діелектричний шар, називаються з ізольованим затвором. Діелектриком служить оксид кремнію або полімерна плівка. Він застосовується для зменшення струму затвора. Позначаються ці транзистори МДН - метал - діелектрик - напівпровідник або МОН - метал - оксид - напівпровідник.

Характеристики МОН - транзисторів аналогічні характеристикам транзисторів з р-n переходами. Вище наведені умовні графічні позначення (УДП) польових транзисторів

УГО		МОП	
С <i>p-n</i> переходами			
с <i>n</i> -каналом	с <i>p</i> -каналом	с <i>n</i> -каналом	с <i>p</i> -каналом
каналом			
с <i>n</i> -каналом	с <i>p</i> -каналом	с <i>n</i> -каналом	с <i>p</i> -каналом
каналом			

Основні характеристики польових транзисторів:

- крутизна характеристики передачі;

$$S = \frac{dI_C}{dU_{ЗВ}} ; \text{ при } U_{ci} = \text{const.} \quad (1.28)$$

- диференціальний опір стоку;

$$R_C = \frac{dU_{CB}}{dI_C} ; \text{ при } U_{zi} = \text{const.} \quad (1.29)$$

1.11. Напівпровідникові прилади з негативним опором (негатрони).

Негатрони - це елементи електричного кола, що володіють негативним опором (НО) або негативною провідністю (НП). Негативним опором володіють, електронні системи з позитивним зворотним зв'язком (ПЗЗ). ПЗЗ може бути зовнішньою і внутрішньою. Негатрони володіють внутрішньою ПЗЗ. Якщо ПЗЗ має коефіцієнт передачі $K_{ПЗЗ} > 1$, то ВАХ має явно виражений релейний характер (рис. 27).

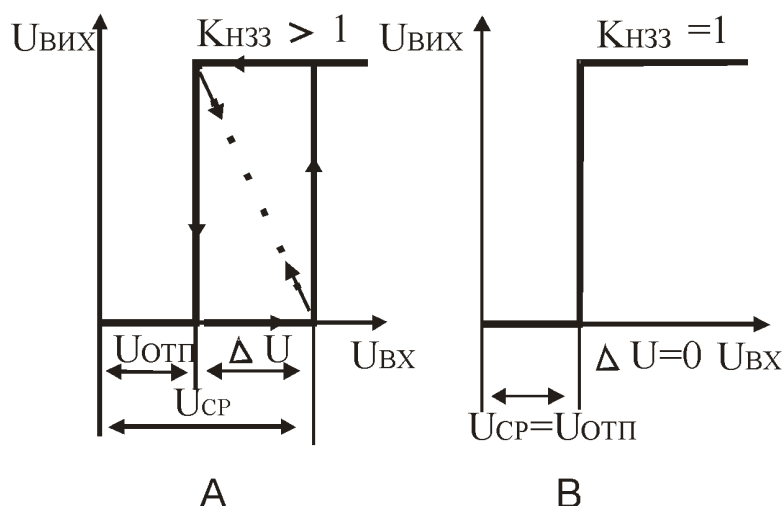


Рисунок 27.

На цій ВАХ є ділянка 1 на якому опір негативно і при зростанні $U_{\text{вх}}$ $U_{\text{вих}}$ падає і навпаки. ВАХ рис. 27а має виражений гістерезис і в граничних точках стрибком перемикається в крайні положення. Якщо $K_{\text{нзз}} = 1$, то ВАХ вироджується в безгістерезисну і $\Delta U = 0$, а при $K_{\text{нзз}} < 1$ вона стає звичайною підсилювальною характеристикою.

У приладів, які мають внутрішній ПЗЗ, збільшення струму і напруги обернено пропорційні. На цих ділянках ВАХ збільшення напруги призводить до зменшення струму і навпаки. На цих ділянках опір і провідність негативні.

$$R = -\frac{dU}{dI} \approx -\frac{\Delta U}{\Delta I}; \quad G = -\frac{dI}{dU} \approx -\frac{\Delta I}{\Delta U}; \quad (1.30)$$

Такі прилади здатні віддавати в зовнішнє коло потужність по змінному струмі.

Негатрони діляться на два класи:

- 1) прилади з негативним опором (НО) на характеристиці S - типу;
- 2) прилади з негативною провідністю (НП) на характеристиках N – типу.

Прилади з характеристикою S - типу - тиристори і одноперехідні транзистори, а N - типу - тунельні діоди і діоди Гана.

Схеми генераторів з приладами з внутрішнім ПЗЗ мають ряд переваг:

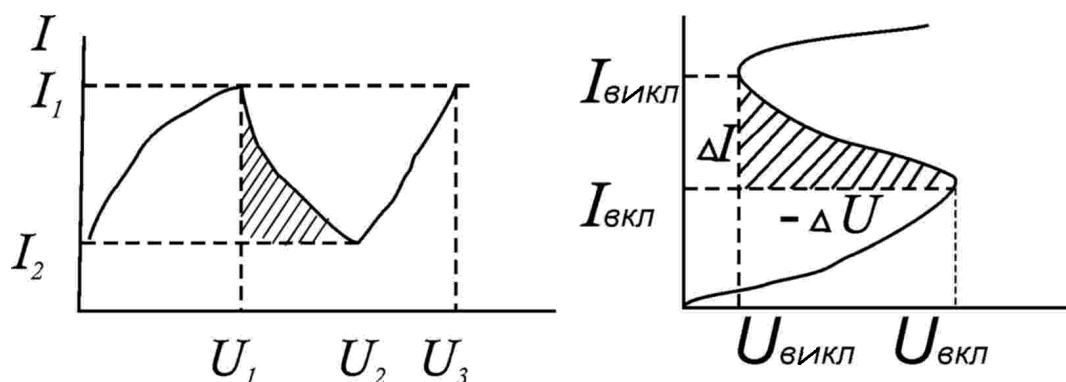
- а) спрощення схеми через відсутність зовнішнього ПЗЗ;

б) зменшення потужності на управління, так як ці прилади управляються короткими імпульсами;

в) зменшення потужності по силовому колу, так як в замкненому стані ці прилади нічого не вимагатимуть.

Додаткові переваги:

- тиристори можуть комутувати великі струми;
- одноперехідні транзистори мають високу стабільність порога спрацьовування.



N – тип НП (-G)

S – тип НО (-R)

Рисунок 28

1.12 Тиристори.

Тиристори - клас приладів з ВАХ S - типу. В основу тиристора покладено монокристал з р і n – областями, які чергуються.

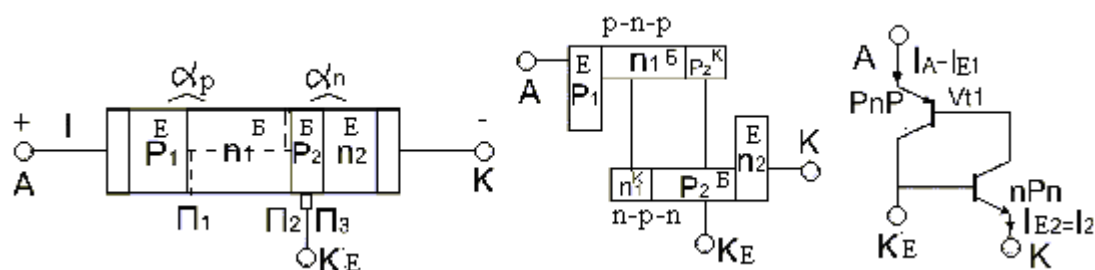


Рисунок 29

Крайні області p_1 і n_2 називають емітерами, середні n_1 і p_2 - базами.

Переходи Π_1 і Π_3 називають емітерними переходами, а перехід Π_2 - колекторним.

Тиристор має три контакти: А - анод, К-катод, КЕ - керуючий електрод.

Роботу тиристора можна представити двома транзисторами р-п-р і п-р-п типів при цьому колекторний струм транзистора р-п-р є емітерним струмом п-р-п транзистора.

Між базовими і колекторними струмами транзисторів буде позитивний зворотний зв'язок $K_{\text{пзз}} > 1$.

У вимкненому стані тиристора перехід Π_2 зміщений у зворотному напрямку і замкнений, а перехід Π_1 і Π_3 в прямому транзистори знаходяться в нормальному підсилювальному режимі. Якщо в базову область P_2 поданий керуючий струм I_k , то тиристор відкривається і струм через р-п-р-п структуру визначається тільки навантажувальним резистором. Коефіцієнти α_p і α_n є функціями струмів через відповідні переходи Π_1 і Π_3 і напруги на переході Π_2 .

У реальних тиристорах $\alpha_p \ll \alpha_n$ і тому вираз для сумарного струму через перехід р- п Π_2 матиме вигляд:

$$I \approx \frac{I_k \alpha_n}{1 - \alpha_n}; \quad (1.31)$$

Звідси коефіцієнт посилення струму управління буде:

$$K_k = \frac{\alpha_n}{1 - \alpha_n}; \quad (1.32)$$

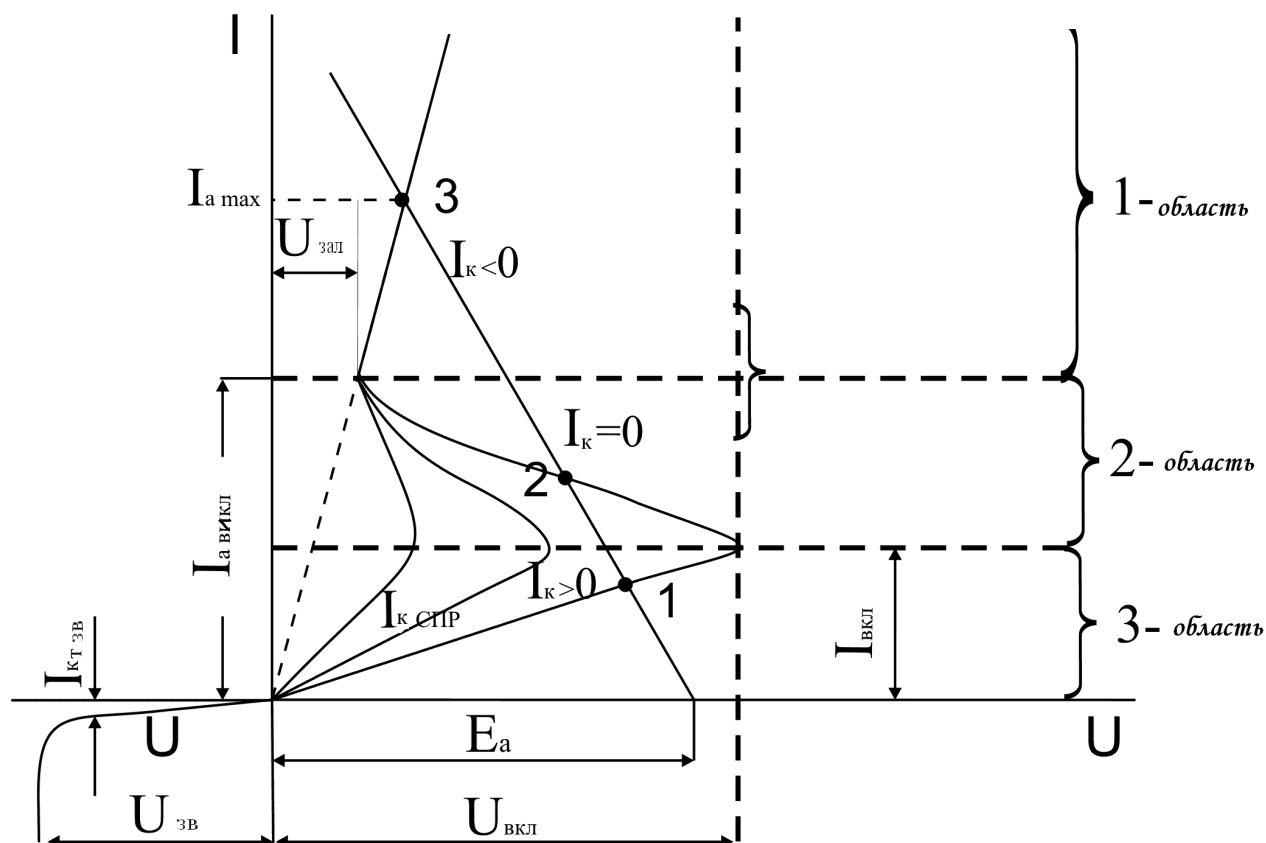


Рисунок 30

На ВАХ є 4 основні учасники:

- 1) ділянка замкненого стану, струм через тиристор визначається тільки струмом назад зміщеного переходу P_2 ;
- 2) ділянка негативного опору;
- 3) ділянка включеного (відкритого) стану, коли струм визначається тільки опором навантаження;
- 4) ділянка зворотної напруги.

Тиристри мають ряд переваг при порівнянні з транзисторами.

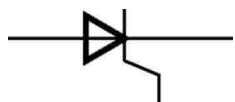
1. Тиристор має пам'ять. Його досить відкрити коротким імпульсом по керуючому електроду і далі він буде відкритий до тих пір поки не порушиться умова $K_{пзз} > 1$, коли струм через тиристор стане менше $I_{а вкл}$.
2. У тиристора форма вихідного струму практично не залежить від форми струму відкриття.

3. Тиристор дозволяє завдяки п.2 отримувати великі коефіцієнти посилення по току, круті фронти і великий ККД.

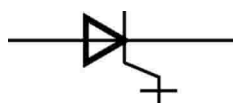
На базі р-п-р-п структур створено ряд приладів:



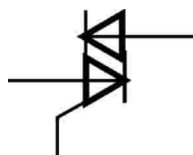
- діодний тиристор



- тріодний тиристор, що не замикається



- тріодний тиристор, що замикається



- симетричний тиристор

Діодний тиристор (ДТ) має тільки два електроди. Управління ними здійснюється імпульсами позитивної або негативної полярності, що подаються на анод або катод відповідно.

Тріодні тиристори, що не замикаються (ТТ). в залежності від того, з якої області зроблено вивод керуючого електрода вони управляються по катоду або аноду, тобто позитивним або негативним імпульсом.

Тріодні тиристори, що замикаються (ТЗ) застосовуються в колах постійного струму. Вони можуть замикатися по керуючому колу по аноду - позитивним імпульсом і по катоду - негативним.

Симетричні тиристори ТС призначені для кіл змінного струму. За своїм ВАХ сімістори дорівнюють двом паралельно включеним тріодним тиристорам тільки мають одне керуюче коло і одиночний конструктив.

Сімістори випускають таких видів:

- керовані струмом одного напрямку позитивної полярності;
- керовані в одному напрямку струмом однієї полярності, і в іншому - інший;

- керований в одному напрямку струмом певної полярності, а в іншому - будь-якої полярності;

Керовані в обох напрямках будь якою полярністю.

1.13 Одноперехідні транзистори.

Одноперехідні транзистори, як і тиристори мають S-образну ВАХ. Він має один і р-n перехід і три електрода. У нього два вивода від бази і тому він називається двухбазовим діодом. Структура являє собою кристал високоомного провідника n -типу, в яких шляхом введення акцепторної домішки створена емітерна область (емітер). Частина основного матеріалу над емітером називається база 1 (B_1) і під ним - база 2 (B_2).

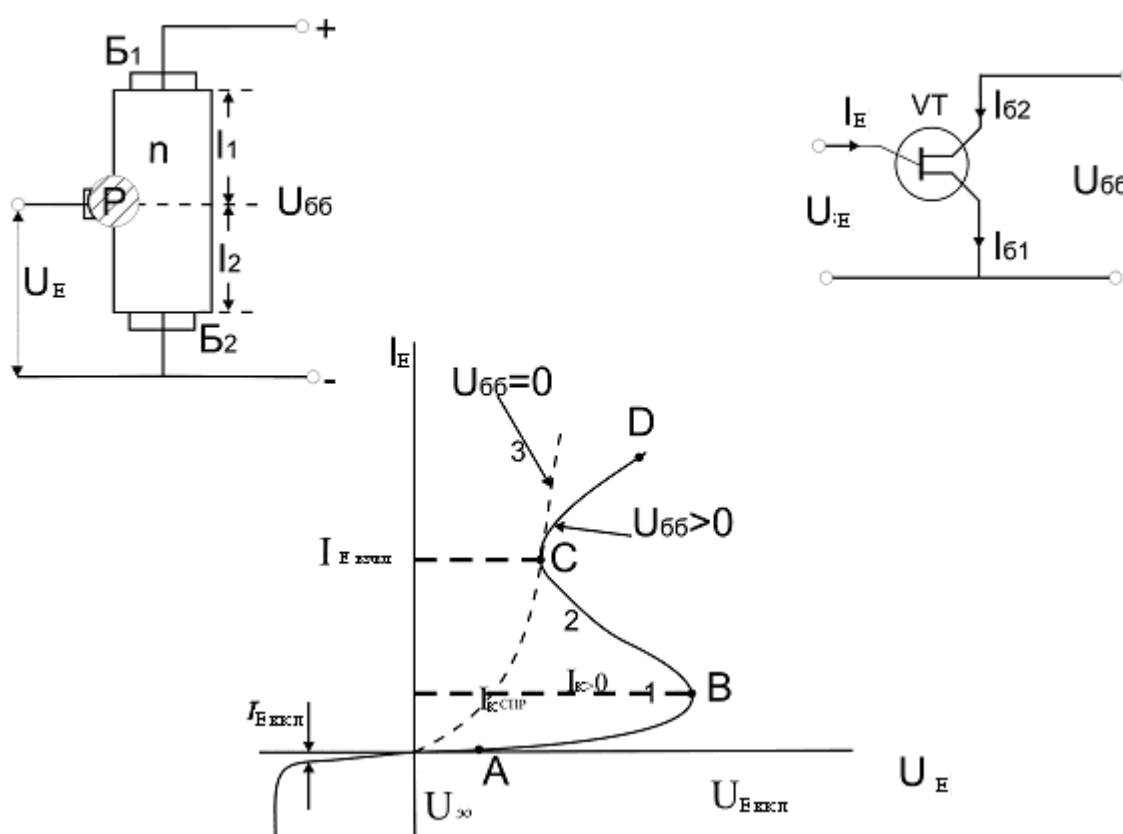


Рисунок 31

B_2 в поєднанні з емітером і р-n переходу виконує функцію діода, а B_1 є плечем в дільнику напруги U_{BB} .

У одноперехідних транзисторів (ОТ) внутрішній опір має таке співвідношення:

$$\frac{r_1}{r_1 + r_2} = 0,5 \div 0,8; \quad (1.33)$$

де:

r_1 - опір проміжку B_1

r_2 - опір проміжку B_2

Якщо $U_{BB} > 0$ то через бази протікає невеликий (бази високоомні) струм. Якщо до емітера докласти напруги будь полярності $U_E < U_{B1}$, то перехід залишиться зміщеним у зворотному напрямку. У колі емітера тече зворотний струм. Якщо до емітера докласти позитивну напругу і поступово його збільшувати, то зворотний струм емітера поступово зменшується і в точці А він стане рівним нулю. При $U_E > U_{E0}$ перехід зміщується в прямому напрямі і через нього починає текти прямий струм, який на ділянці АВ зростає з ростом U_0 . Наростання струму призводить до накопичення зарядів в B_1 , що призводить до зниження опору проміжку B_1 і рівноважно збільшенню U_e . Це призводить до ще більшого зростання струму і т.д. Настає лавиноподібне зростання струму - ділянка ВС - негативного опору. Коли ділянка B_1 насичується і його опір перестає зменшуватися, зростання струму відбувається за рахунок зростання U_e ділянки СД. При збільшенні U_{BB} ВАХ зсувається вправо.

Основні характеристики ВІД:

$I_{e \text{ вкл}}$ - струм включення,

$I_{e \text{ вимк}}$ - струм вимикання,

$U_{e \text{ вкл}}$ - напруга включення,

R_{BB} - міжбазовий опір.

Одно перехідні транзистори застосовуються, як ключові елементи в релаксаційних генераторах.

2. ЕЛЕМЕНТИ І ПРИСТРОЇ ОПТОЕЛЕКТРОНІКИ

2.1. Фотоелектричні напівпровідникові прилади.

Фотоелектричними називаються такі прилади, в яких промениста енергія перетворюється в електричну і навпаки.

Принцип дії всіх фотоелектричних приладів заснований на використанні електромагнітного випромінювання світлового діапазону. Довжина хвиль оптичного випромінювання знаходиться в діапазоні від 10^{-8} до 10^{-3} м, але тільки від $0,4 \cdot 10^{-6}$ до $0,7 \cdot 10^{-6}$ м сприймається оком, як видима частина.

В оптичних колах носієм сигналів є електрично нейтральні фотони. Вони не реагують один з одним, з електричними полями і не розсіюються. Тому їх зручно використовувати в колах, де необхідна ефективна гальванічна розв'язка.

Узагальнена схема оптикоелектричної системи включає в себе джерело оптичного випромінювання, світлодіод і приймач оптичного випромінювання. Провідниками оптичних сигналів є світловоди і світловодні лінії. Вони вибухо- і пожежобезпечні, так як по ним не протікає електричний струм.

2.2. Джерела оптичного випромінювання.

В основу роботи джерел оптичного випромінювання покладені такі фізичні ефекти: температурне світіння нагрітого тіла; випромінювання при газовому розряді, електролюмінесценція і вимушене випромінювання.

Світловипромінюючі діоди (СД).

Це один з найбільш вживаних випромінювачів в оптоелектроніці. СД є випромінювачами не когерентного світла. Основними матеріалами для виготовлення СД служать арсеніди і фосфіди галію, індію та алюмінію з n - типу і р - типу провідністю.

Схема включення СД має вигляд:

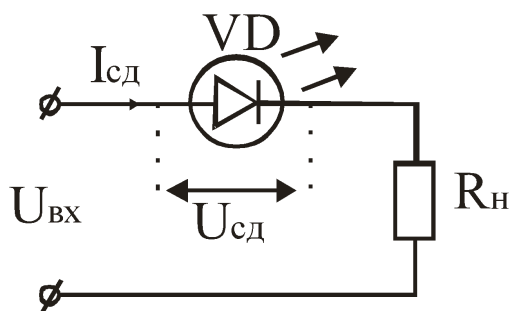


Рисунок 32

$$I_{сд} = \frac{U_{вх}}{R_{сд} + R_{н}} ; \quad (2.1)$$

$$U_{сд} = I_{сд} R_{сд} \quad (2.2)$$

При подачі на р-п перехід прямої напруги відбувається інтенсивна інжекція неосновних носіїв зарядів: електронів в р - область, а дірок в п - область.

Не основні носії рекомбінують з основними носіями даної області напівпровідника (нп) і їх концентрація швидко падає у міру віддалення від р-п переходу. При рекомбінації виділяються енергія. У напівпровідниках з SiC, Ga, As рекомбінація супроводжується виділенням фронтів, тому у таких напівпровідниках проходження струму в прямому напрямку супроводжується некогерентним оптичним випромінюванням. Це явище використовується в СД.

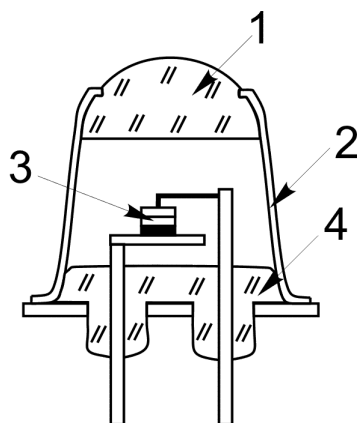


Рисунок 33

1 - лінза

2 - коваровий балон

3 - напівпровідникова пластина

4 - ізолятор виводів

5 - виводи.

параметри СД

$U_{пр}$ - постійна пряма напруга.

$I_{пр макс}$ - максимально допустимий прямий струм (А)

$P_{повн}$ - повна потужність випромінювання, колір світіння (Вт)

B - яскравість світіння в канделах (кд)

2.3. Фотодіоди

Фотодіод (ФД) - це напівпровідниковий прилад (діод) зворотний струм якого залежить від освітленості р-n переходу.

Конструкція фотодіодів аналогічна конструкції СД.

Схема включення ФД наступна:

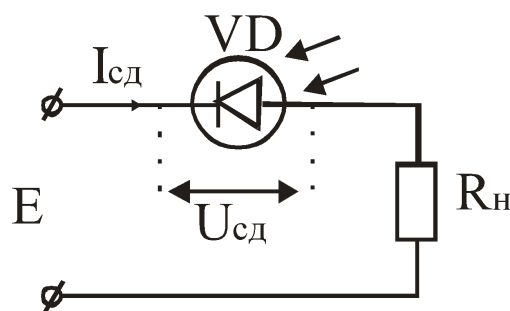


Рисунок 34

Напруга живлення прикладається до ФД в зворотному напрямку. При відсутності світла через перехід тече малий зворотний струм для германію 20мкА, а для кремнію 1-2 мкА. При потраплянні світла на напівпровідниковий перехід з'являється додатковий струм за рахунок електронів і дірок які вибиваються фотострумом з атомів. При правильно підібраних E і R_n , струм через ФД буде залежати тільки від освітленості.

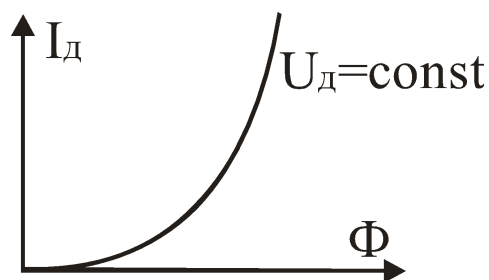


Рисунок 35

При повному затемненні, струм I_d дорівнює зворотному струму переходу плюс струм витоку ізоляції.

Параметри ФД:

K - інтегральна чутливість.

$$K = \frac{I_d}{\Phi}; \quad (2.3)$$

Вимірюється по лампі розжарювання з температурою нитки 2854 K°.

I_{tc} - темновой струм

U_p - робоча напруга, що прикладається до ФД.

2.4 Фототранзистори

Фототранзистори можна розглядати, як з'єднання фотодіода і транзистора. Це дозволяє одночасно з перетворенням світлової енергії в електричну здійснювати посилення фотоструму. Фототранзистори (ФТ) бувають р-п-р і n-р-п типу. На вхід ФТ можна подавати як електричні, так і оптичні сигнали. ФТ може працювати і з відключеною базою. Цей режим називається з відключеною базою і робота ведеться ближче до режиму відсічення.

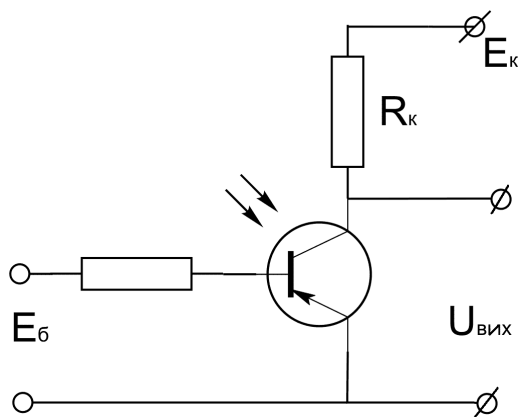


Рисунок 36

При $\Phi = 0$ струм через ФТ дуже малий і дорівнює темновому струму. Під дією світла в базовій області утворюються вільні носії зарядів, які створюють базовий струм.

В результаті збільшується число основних носіїв інжектуємих в базу з емітера. Відбувається посилення фотоструму. Транзистор відкривається. Розрахунок ФТ проводиться, як і звичайного транзисторного каскаду.

2.5. Оптоелектронні прилади.

Оптоелектронними називають прилади, що перетворюють електричні сигнали в оптичні і потім знову в електричні. Найбільш поширеними є оптрони, що складаються з джерела і приймача променевої енергії, розміщені в одному корпусі.

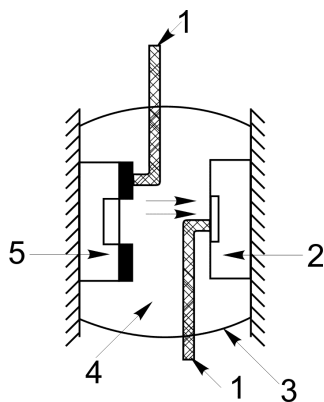


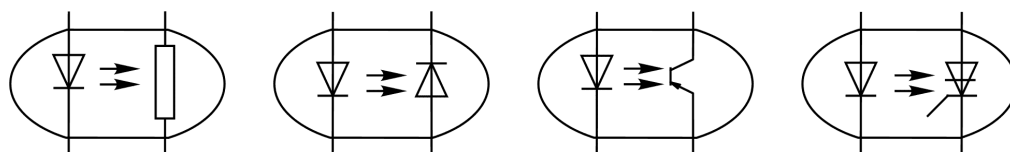
Рисунок 37

- 1 - виводи.
- 2 - фотоприймач
- 3 - корпус
- 4 - оптичне середовище
- 5 - світлодіод.

В електронних пристроях оптрони виконують функцію передачі сигналів з гальванічною розв'язкою вхідного кола від вихідного. Вперше оптрони з'явилися в 1955р.

При їх розробці максимально узгоджують спектральну чутливість фотоприймача з випромінювачем. Як оптичні середовища, застосовують оптичні клеї, лаки, силіконові мастила, які забезпечують хорошу передачу променевої енергії.

Оптрони виконуються наступних видів:



- Фоторезисторний - фотодіодний - Фототранзисторний - Фототерісторний

Рисунок 38

Передатна характеристика оптронов визначається для:

Фоторезисторних відношенням $\frac{R_T}{R_{CB}}$, де: R_T - темновий опір, R_{CB} - світловий опір.

Фотодіодних і фототранзисторних - коефіцієнтом передачі струму

$$K_i = \frac{I_{BIX}}{I_{BX}}; \quad (2.4)$$

Фототісторних - мінімальним струмом, що забезпечує випрямлення характеристики $I_{спр. вх}$.

Фоторезисторні оптрони мають лінійну залежність ВАХ і високе відношення $\frac{R_T}{R_{CB}}$.
 Фотодіодні оптрони мають невеликий коефіцієнт передачі по току, але високу швидкодію

$$t_{\text{вкл}}/t_{\text{викл}} = 10^{-8} \text{с} \quad (2.5)$$

Фототранзисторні Опт. Застосовуються для комутації високих напруг (до 1500 В) і великих струмів до 300 А.

2.6 Світловоди.

Світловоди служать для передачі оптичних сигналів від джерел до приймачів з мінімальними втратами і спотвореннями.

Світловоди бувають волоконні і планарні.

Волоконні світловоди виготовляють з тонких прозорих ниток з покриттям. Покриттям служать матеріали з меншим коефіцієнтом заломлення, ніж у основного волокна. Волоконна оптика служить для передачі сигналів на великі відстані, а планарні світлопроводи для передачі оптичних сигналів усередині електронних схем (мікросхем), в одному корпусі.

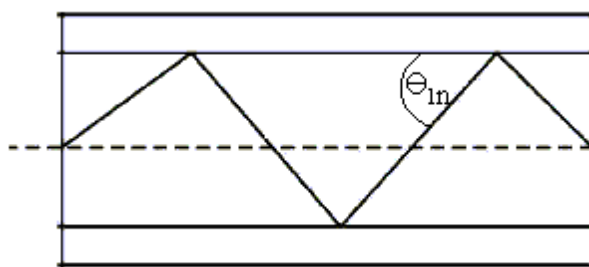


Рисунок 38.

Світло поширюється в світловодах завдяки повному внутрішньому віддзеркаленню від оболонки. Оболонкою може служити і повітря

Граничний кут відбиття дорівнює

$$\Theta_{1n} = \arcsin \frac{n_2}{n_1}; \quad (2.6)$$

де: n_1 - коефіцієнт заломлення оболонки

n_2 - коефіцієнт заломлення волокна.

У світловодах є втрати через поглинання, розсіювання і т.д. Світловоди виготовляють з кварцового скла або багатокомпонентних стекол. Застосовують також палітри, але вони менш прозорі і швидко старіють.

Окремі світлопроводи об'єднуються в кабелі з міцним захистом від зовнішніх факторів.

3. ЕЛЕКТРОННІ ПІДСИЛЮВАЧІ СИГНАЛОВ

3.1 Класифікація та основні параметри.

Підсилювачі електричних сигналів - це електронні пристрої, призначені для підвищення напруги або потужності вихідних сигналів за рахунок енергії джерела живлення.

Підсилювачі діляться на:

- Підсилювачі напруги;
- Підсилювачі струму;
- Підсилювачі потужності.

За характером сигналу, що підсилюється, підсилювачі бувають постійного струму (ППС) і змінної напруги низької частоти (ПНЧ) і високої частоти (ПВЧ).

По ширині смуги частот, що підсилюються, підсилювачі бувають:

- виборчими, що підсилюють тільки вузький діапазон частот;
- широкосмугові, що підсилюють широкий діапазон частот.

Окремий клас становлять підсилювачі імпульсів. ППС і підсилювачі імпульсів володіють широкою смугою пропускання.

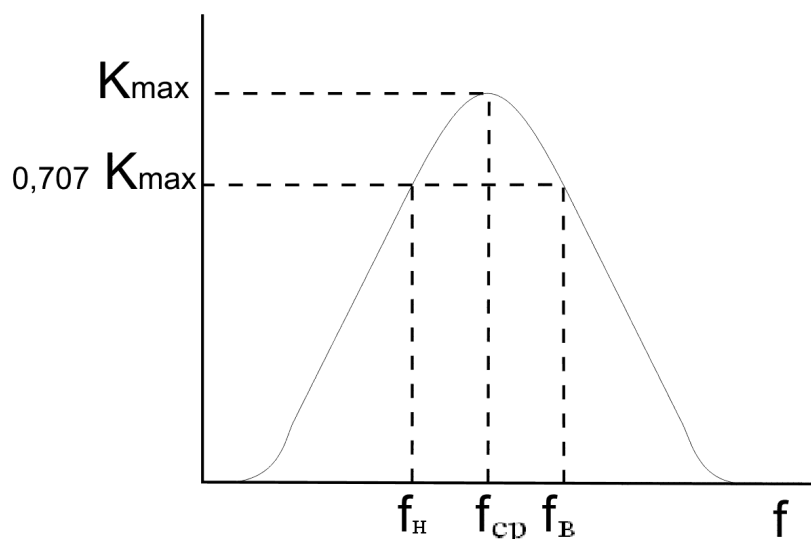


Рисунок 39

Під смугою пропускання підсилювача розуміють смугу частот в якій коефіцієнт підсилення не нижче $0,707K_{\text{макс}}$. На краях смуги пропускання знаходяться верхня частота f_B і нижня частота f_H .

Тоді смуга пропускання дорівнює:

$$\Delta f = f_B - f_H \quad (3.1)$$

До основних характеристик підсилювача відноситься коефіцієнт посилення, точність відтворення форми сигналу або коефіцієнт спотворення і ККД.

Коефіцієнт посилення показує у скільки разів приріст вихідної величини напруги, струму або потужності більше збільшення вхідної величини відповідних сигналів.

Коефіцієнт посилення:

По напрузі: $K_U = \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх}}};$

По струму: $K_I = \frac{I_{\text{вих}}}{I_{\text{вх}}};$

За потужністю: $K_P = \frac{P_{\text{вих}}}{P_{\text{вх}}};$

Так як слуховий апарат сприймає силу звуку за логарифмічному закону, то коефіцієнти посилення частина даються в децибелах.

$$K_u = 20 \lg K_u$$

$$K_i = 20 \lg K_i$$

$$K_p = 10 \lg K_p$$

Для отримання великих коефіцієнтів посилення застосовуються багатокаскадні підсилювачі. Тоді загальний коефіцієнт посилення буде дорівнювати для коефіцієнтів у відносних одиницях:

$$K_{\text{заг}} = K_1 * K_2 * K_3 * \dots * K_n = \prod_{i=1}^n K_i \quad (3.2)$$

А в децибелах:

$$K_{\text{заг}} (\text{дБ}) = K_1 + K_2 + K_3 + \dots + K_n = \sum_{i=1}^n K_i \quad (3.3)$$

Точність відтворення форми напруги, що підсилюється, залежить від величини лінійних і нелінійних спотворень. Нелінійні спотворення виникають внаслідок нелінійності вхідної характеристики. Для каскаду з загальним емітером маємо наступну вхідну характеристику. Спотворення виникають при виборі робочої точки на нелінійній ділянці.

Також нелінійні спотворення виникають через високий рівень вхідного сигналу це позначається найчастіше на кінцевих і предкінцевих каскадах, де вхідний сигнал вже досить великий. Лінійні спотворення виникають внаслідок залежності величини параметрів елементів каскадів від частоти

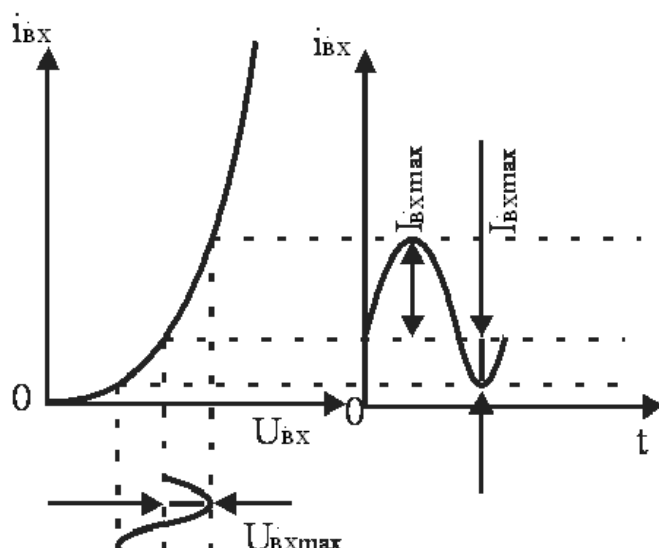


Рисунок 40

Від частоти залежать і величина всіх реактивних опорів. Тому коефіцієнт посилення теж залежить від частоти.

Залежність коефіцієнта посилення від частоти визначаються амплітудно - частотної характеристикою АЧХ. Типова АЧХ має вигляд.

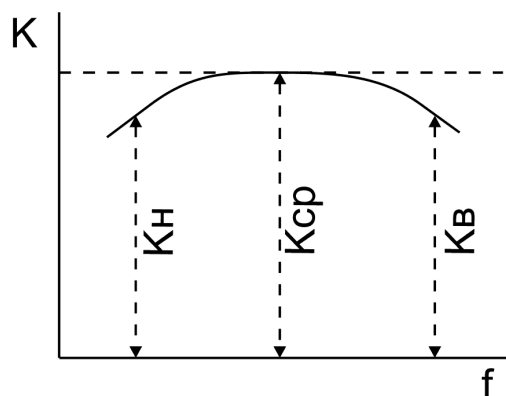


Рисунок 42

Коефіцієнт нелінійних спотворень визначається так:

$$\gamma = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} P_n}}{P_1} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}}{U_1} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1}; \quad (3.4)$$

Лінійні спотворення характеризуються коефіцієнтами частотних спотворень:

$$M_L = \frac{K_0}{K_L} \quad M_U = \frac{K_0}{K_U} \quad (3.5 \text{ і } 3.6)$$

де: K_0 - коефіцієнт посилення на середній частоті

K_n і K_v - коефіцієнти посилення на нижній і верхній частоті діапазону.

ККД - підсилювачів визначаються як

$$\eta = \frac{P}{P_{\text{заг}}} \quad (3.7)$$

де: P - потужність сигналу в навантаженні

$P_{\text{заг}}$ - потужність споживана підсилювальним каскадом від джерела живлення.

3.2. Однокаскадний підсилювач на біполярному транзисторі з загальним емітером.

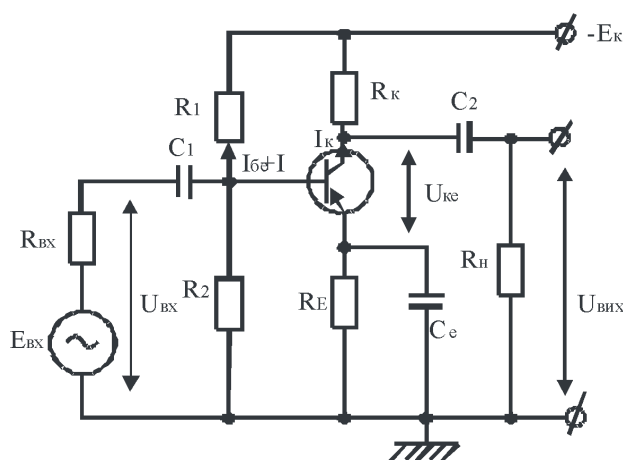


Рисунок 43

C_1 - розділовий конденсатор служить для перешкоди проходження постійної напруги в базове коло з попереднього каскаду.

C_2 - розділовий конденсатор, через який посилена змінна напруга передається на опір навантаження R_N . Він служить для поділу вихідного кола і вхідного кола по постійному струму.

Режим роботи каскаду залежить від вибору робочої точки на динамічній характеристиці (навантажувальної прямої). Робоча точка P знаходиться на перетині навантажувальної прямої з однієї з статичних ВАХ.

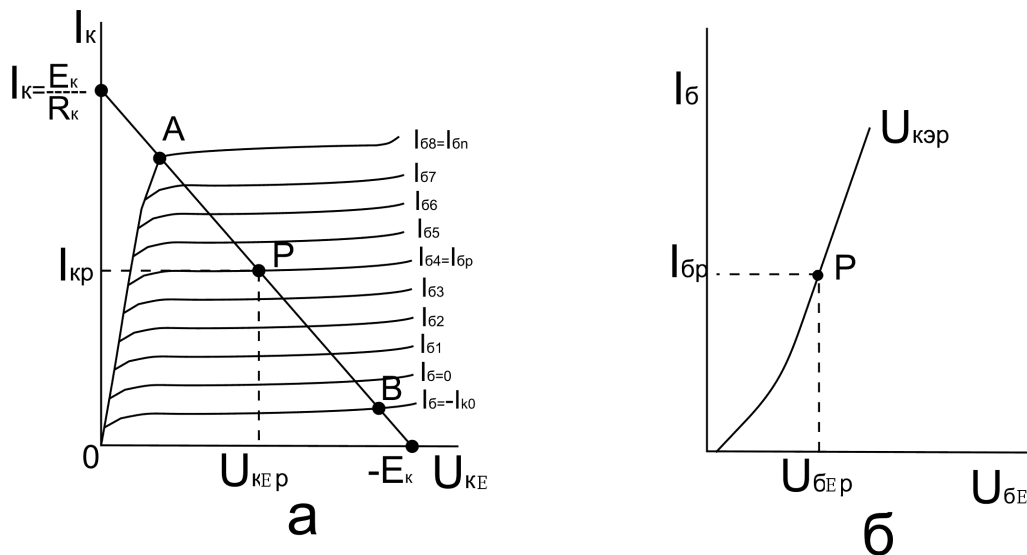


Рисунок 44

При роботі каскаду в підсилювальному режимі класу А робоча точка повинна знаходитися в центрі лінійної ділянки і не повинна виходити за межі точок АВ.

Початкове положення робочої точки задається подільником напруги $R_{д1}$ і $R_{д2}$, значення яких отримують з співвідношень

$$R_{д1} = \frac{E_k - U_{БЕР} - U_{RE}}{I_{д} - I_{БР}} \quad (3.8)$$

$$R_{д2} = \frac{U_{БЕР} + U_{RE}}{I_{д}} \quad (3.9.)$$

де: $I_{д} = (2-5) I_{БР}$ - струм дільника;

U_{RE} - напруга на резисторі R_E .

Опір навантаження дорівнює:

$$R_k = \frac{E_k}{I_k}; \quad (3.10)$$

Для температурної стабілізації робочої точки в колі емітера ставиться опір R_E , на якому виділяється постійна напруга U_{RE} . Ця напруга є негативним зворотним зв'язком НЗЗ. Для усунення його дії по змінному струмі він шунтується ємністю C_E .

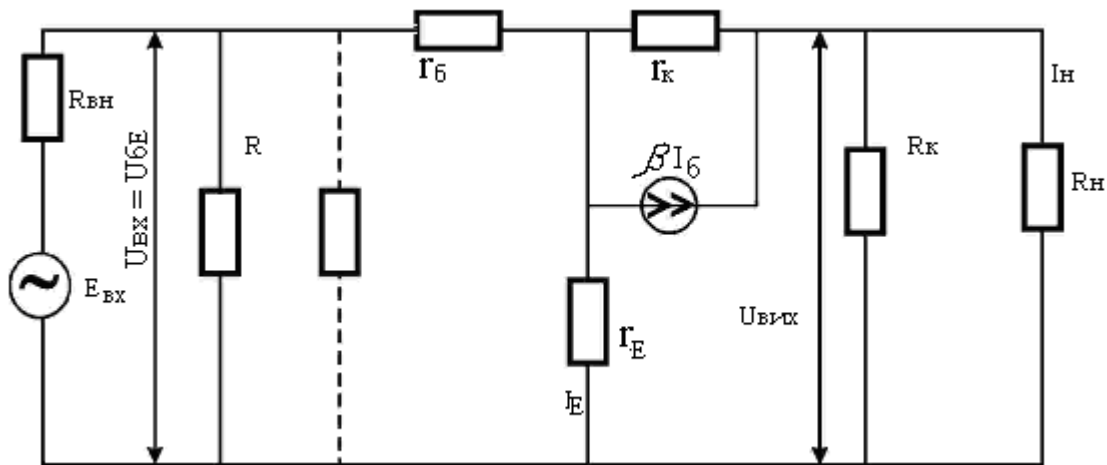


Рисунок 45.

Розрахунок каскаду ведеться для середніх частот за цією схемою заміщення.

Опори ємностей C_1 ; C_2 ; C_3 на середніх частотах дуже мало, тому в схемі заміщення їх немає.

$$r'_k = \frac{r_k}{1 + \beta}; \quad (3.11)$$

де r_k - опір колектора в схемі з загальною базою.

Еквівалентний генератор βI_b характеризує передачу струму з базового кола в колекторне коло з коефіцієнтом передачі β .

Опор R відповідає паралельному опору R_1 і R_2 діляника по змінному струму.

$$R = \frac{R_{\partial 1} R_{\partial 2}}{R_{\partial 1} + R_{\partial 2}}; \quad R_{вих} = \frac{R_k r'_k}{R_k + r'_k} - \text{вихідний опір каскаду}$$

$$R_{KH} = \frac{R_k R_H}{R_k + R_H} \quad (3.12)$$

І відповідно:

Повний вхідний опір підсилювача з урахуванням діляника R_1 і R_2 рівні:

$$R_{\text{ex}} = \frac{R_{\text{ex}} R}{R_{\text{ex}} + R} \quad (3.13)$$

$$R_{\text{ex}} = \frac{U_{\text{ex}}}{i_{\text{ex}}} = \frac{U_{\text{бэ}}}{I_{\text{б}}} - \frac{1}{\frac{1}{R_{\text{о2}}} + \frac{1}{R_{\text{о1}}} + \frac{1}{h_{11\text{э}}}} \quad (3.14)$$

де:

Низькоомний дільник $R_{\text{д1}}$ і $R_{\text{д2}}$ підвищує температурну стабільність каскаду, але знижує його вхідний опір. Збільшення негативного зворотного зв'язку підвищує вхідний опір.

Формули для розрахунків різних варіантів схем каскадів з загальним емітером наведені в «Збірнику завдань» Скаржепа В.А. і Саєнко В.М. таблиця 5.2.

Конденсатор $C_{\text{е}}$ і розділові конденсатори C_1 і C_2 розраховуються за формулами:

$$C_{\text{э}} = 10^6 / (2\pi f_n 0.1 R_{\text{э}}); \quad C_p = 10^6 / [2\pi f_n (R_{\text{к}} + R_{\text{н}})] \sqrt{M_n^2 - 1} \quad (3.15)$$

3.3.Режими роботи каскадів

Залежно від розташування робочої точки на динамічній характеристиці підсилювачами можуть працювати в різних режимах.

Режим класу А

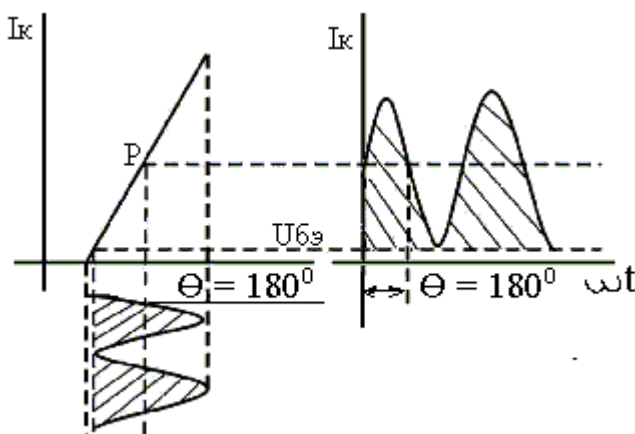


Рисунок 46

В цьому режимі робоча точка знаходиться в центрі лінійної ділянки динамічної характеристики, а амплітуда вхідного сигналу не виходить за межі

лінійної ділянки. В цьому режимі струм в транзисторі протікає протягом всього періоду вхідного сигналу. Вважається, що кут відсічення $\Theta = 180^\circ$. Транзистор працює в активному режимі. Лінійні і нелінійні спотворення в цьому режимі мінімальні, але ККД теж малий - менше 50%. Цей режим використовується в передпідсилюючому (першим каскадах), де вхідні та вихідні сигнали порівняно не великі, а також в підсилювачах потужності з вихідним трансформатором і потужністю близько 10 Вт.

Режим класу В

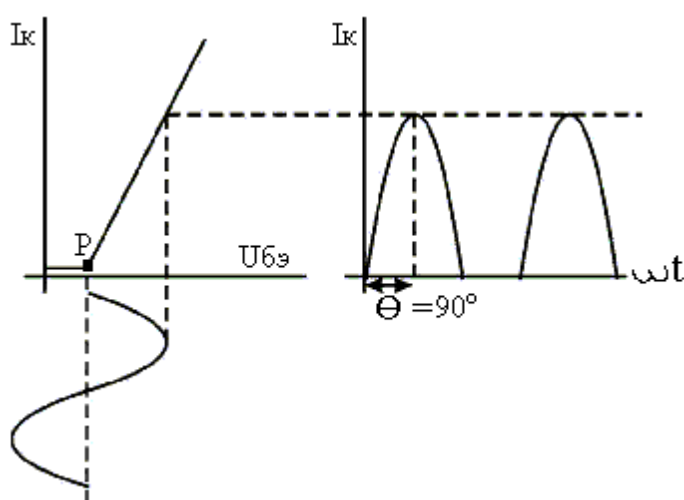


Рисунок 47

В цьому режимі робоча точка лежить на початку динамічної характеристики. Струм проходить через транзистор тільки в один напівперіод: негативний для транзисторів р-п-р і позитивний - для п -р- п. Робоча точка P лежить в області відсічення і тому кут відсічки $\Theta = 90^\circ$. У цьому режимі підсилювач має великий ККД до 80%, але посилюється тільки один напівперіод і є великі спотворення за рахунок нелінійності динамічної характеристики в області відсічення. Для посилення обох напівперіодів застосовуються двотактні каскади.

Режим класу С

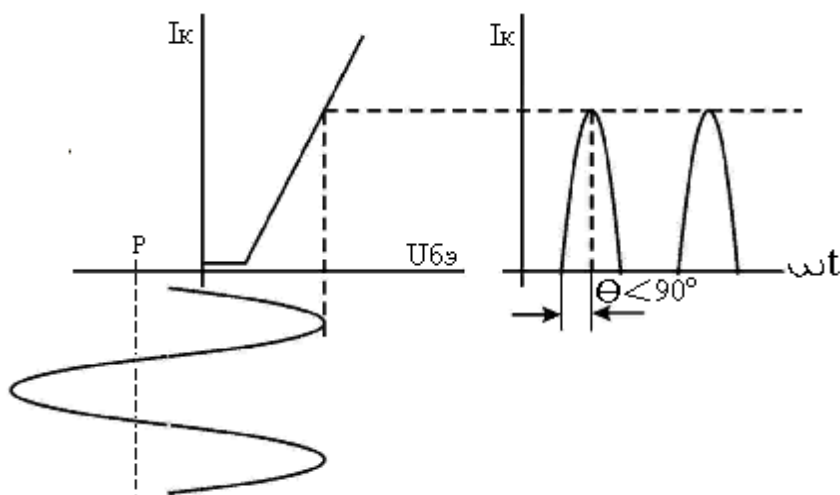


Рисунок 48

У режимі 3 робоча точка P лежить лівіше початку динамічної характеристики, тому кут відсічки $\Theta < 90^\circ$. Посилюється тільки частина однієї напівхвилі. Решту часу транзистор повністю замкнений. ККД в цьому режимі ще вище, ніж в клас В, так як відсутній навіть некерований струм. Цей режим застосовують тільки в резонансних каскадах, де йде відновлення синусоїди резонансними колами.

Режим класу Д

Режим класу Д називають ключовим режимом. Транзистор в цьому режимі буває в двох станах або в стані відсічення або - в насиченні.

У першому положенні струм через транзистор дорівнює нулю, а в другому максимуму. ККД в цьому режимі вище, ніж в режимі С і близький до одиниці. В цьому режимі виробляють посилення тільки прямокутних імпульсів.

3.4. Живлення підсилювачів і подача зміщення на транзистор

Положення робочої точки P на динамічній характеристиці визначається полярністю і значенням напруги зсуву на вході транзистора. Значення цієї напруги знаходиться в межах $0.1 \div 1$ в залежності від типу транзистора і роду (режиму) роботи.

Раніше умовно на схемі зображувалися два джерела E_K і E_B . Практично використовуються схеми, які подають напругу зміщення від одного джерела E_K . Цих схем дві: з фіксованим струмом і з фіксованою напругою.

Схема з фіксованою напругою має вигляд (рис.49).

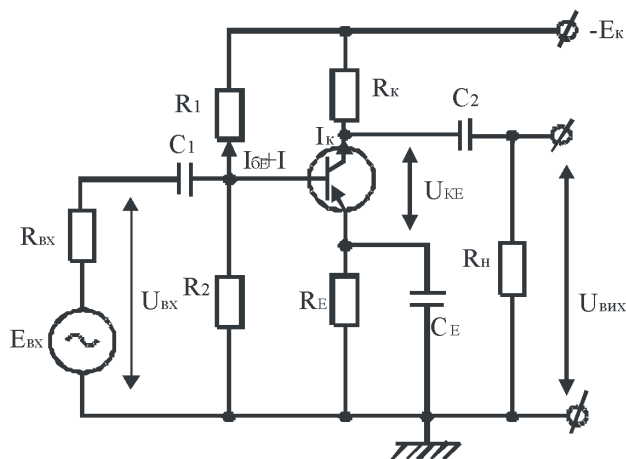


Рисунок 49.

Схема з фіксованим струмом має вигляд: (рис. 50)

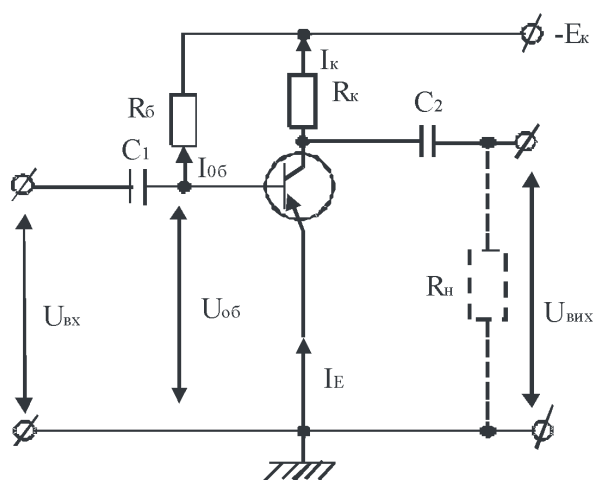


Рисунок 50

У цій схемі напруга зсуву подається на базу через резистор $R_Б$ і так само в режимі спокою:

$$U_{БЕ} = E_K - I_{БЕ} R_Б \quad (3.16)$$

де $I_{БЕ}$ – визначають по вхідній статичній характеристиці, виходячи з місця робочої точки.

Звідси:

$$R_{\bar{o}} = \frac{E_K - U_{\bar{z\bar{o}}}}{I_{\bar{z\bar{o}}}}; \quad (3.17)$$

оскільки $U_{\bar{z\bar{o}}} \ll E_K$, то:

$$R_B \approx \frac{E_K}{I_{\bar{z\bar{B}}}}; \quad I_{\bar{z\bar{B}}} \approx \frac{E_K}{R_B}; \quad (3.18)$$

Струм бази в цій схемі залишається постійним при зміні транзистора або зміні температури.

Аналогічно робиться зміщення і в схемі з загальною базою.

Зсув фіксованою напругою.

У схемі зображеною на рисунку 49 напруга зсуву подається розділовими резисторами $R_{\partial 1}$ і $R_{\partial 2}$, через які проходять струми $I_{\partial 1}$ і $I_{\partial 2}$ тоді:

$$E_K = I_{\partial 1} \cdot R_{\partial 1} + I_{\partial 2} \cdot R_{\partial 2}; \quad U_{\bar{z\bar{o}}} = I_{\partial 2} \cdot R_{\partial 2} \quad (3.19)$$

Звідси отримуємо:

$$R_{\partial 1} = \frac{E_K - U_{PB}}{I_{\partial 1}}; \quad R_{\partial 2} = \frac{U_{PB}}{I_{\partial 2}}; \quad (3.20)$$

При розрахунках вибираємо $I_{\partial 1}$ і $I_{\partial 2} \gg I_{\bar{z\bar{o}}}$ від 3 до 5 разів, тоді струм бази не впливає на напругу зсуву. Вхідний опір каскаду дорівнює:

$$R_{BX} = \frac{1}{\frac{1}{R_{\partial 1}} + \frac{1}{R_{\partial 2}} + \frac{1}{h_{11E}}}; \quad (3.21)$$

3.5 Схеми стабілізації становища робочої точки

При підвищенні температури робоча точка підсилювального каскаду змінює своє положення і тому змінюється струм колектора. Змінюється положення робочої точки і при зміні транзистора. Тому необхідно застосовувати способи і схеми стабілізації положення робочої точки. Є два методи стабілізації: емітерна стабілізація і колекторна стабілізація.

емітерна стабілізація

При цьому способі в емітерне коло включається резистор R_e , а також шунтується C_e (див. схему каскаду з загальним емітером). Тоді напруга зсуву на базі $U_{зб}$ дорівнює:

$$U_{зб} = R_{\partial 2} I_{\partial 2} - R_E I_{3E} \quad (3.22)$$

Якщо при зміні температури або транзистора зростає струм колектора, то збільшується падіння $R_e I_{3e}$. Що призводить до зменшення напруги зсуву і до зниження колекторного струму. Конденсатор C_e служить для шунтування R_e по змінному струмі. Напруга $R_e I_{3e}$ є напругою негативного зворотного зв'язку НЗЗ. Правильний підбір R_e призводить до повної компенсації змін.

$$R_E = \frac{(0,05 \div 0,3) E_K}{I_E}; \quad (3.23)$$

Колекторна стабілізація

Колекторна стабілізація виконується за вказаною схемою рисунок 51. Напруга стабілізації задається резистором $R_6 = R_{61} + R_{62}$; Напруга стабілізації дорівнює:

$$R_6 I_{зб} = E_K - R_K (I_{зк} + I_{зб}) \quad (3.24)$$

При збільшенні температури збільшується струм $I_{зк}$. Це призводить до збільшення падіння напруги на R_K і зменшення струму бази $I_{зб}$, а це в свою чергу знижує струм $I_{зк}$. Знову ж правильним добором R_6 можна домогтися повної стабілізації $I_{зк}$. Щоб усунути НЗЗ R_6 розбивають на два і шунтують конденсатором $C_{зр}$.

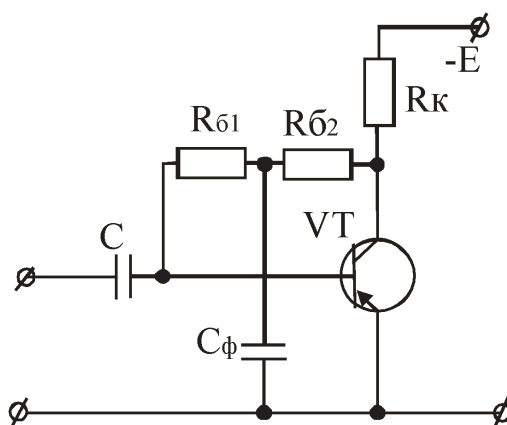


Рисунок 51.

Колекторна стабілізація простіше і економічніше еміторної, але має менший діапазон стабілізації.

3.6 Схема підсилювача з загальним колектором

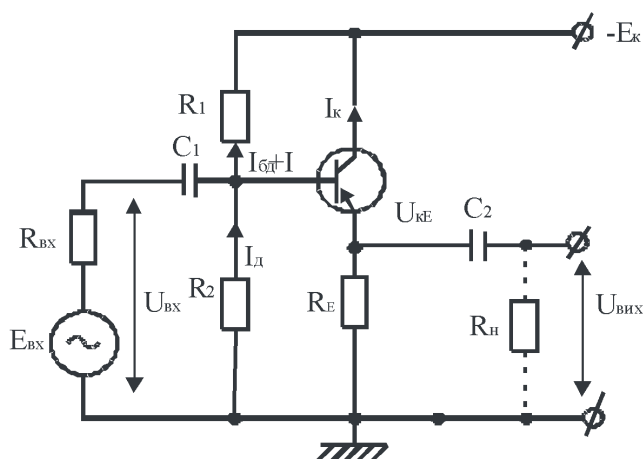


Рисунок 52.

У цій схемі колектор фактично заземлений за змінним струмом через малий внутрішній опір джерела E_K .

$$U_{\text{оЕ}} = U_{\text{єх}} - R_E I_E = U_{\text{єх}} - U_{\text{вух}} \quad (3.25)$$

тобто існує глибокий НЗЗ. У цих схемах коефіцієнт посилення дорівнює по току:

$$K_I = \frac{1}{1 - \alpha}; \quad (3.26)$$

і більше, ніж в схемі з загальним емітером, а по напрузі:

$$K_U = \frac{U_{\text{ВІХ}}}{U_{\text{ВХ}}} < 1 \approx 1; \quad (3.27)$$

Фаза вихідної напруги збігається з фазою вхідної, тому цей каскад називається емітерним повторювачем. Вихідний струм каскаду з загальним колектором (ЗК) буде дорівнюватиме:

$$i_{\text{ВІХ}} = (U_{\text{ВХ}} - U_{\text{ВІХ}}) / h_{11} \quad (3.28)$$

Вихідна напруга дорівнює:

$$U_{BHX} = \frac{U_{BX} \left(\frac{1}{h_{11}} + \frac{h_{21}}{h_{11}} \right)}{\frac{1}{h_{11}} + \frac{h_{21}}{h_{11}} + \frac{1}{R_E} + h_{22}} = \frac{U_{BX}}{1 + h_{11} \frac{1 + h_{22} R_E}{(1 + h_{21}) R_E}}; \quad (3.29)$$

Вхідний і вихідний опори рівні:

$$R_{\text{вх}} = \frac{h_{11}}{1 - K_u} \approx \beta R_{\text{с}}; \quad R_{\text{вих}} = h_{11} (1 + h_{21}); \quad R_{\text{вх}} \approx \beta R_E \quad (3.30)$$

Коефіцієнт посилення по струму:

$$K_I = K_u \frac{h_{11}}{R_{\text{с}} (1 - K_u)}; \quad (3.31)$$

3.7 Зворотні зв'язки в підсилювачах

У тих випадках, коли параметри підсилювача не задовольняють вимогам по коефіцієнту посилення, стабільності або лінійним і нелінійним спотворенням, застосовують зворотний зв'язок. Схема включення зворотного зв'язку має вигляд:

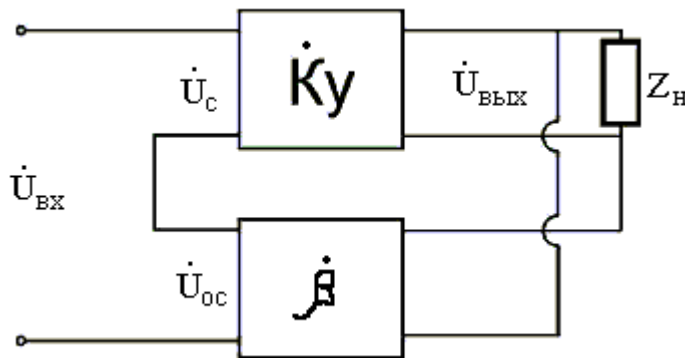


Рисунок 53

Зворотній зв'язок характеризується коефіцієнтом зворотного зв'язку β :

$$\beta = \frac{\dot{U}_{\text{зз}}}{\dot{U}_{\text{вих}}}; \quad (3.32)$$

При наявності зворотного зв'язку:

$$\dot{U}_c = \dot{U}_{33} + \dot{U}_{ex} = \dot{U}_{ex} + \beta \dot{U}_{ex}; \quad (3.33)$$

Коефіцієнт посилення з 33 буде дорівнюватиме:

$$K_{n33} = \frac{\dot{U}_{ex}}{\dot{U}_{ex}}; \quad (3.34)$$

тоді:

$$\dot{U}_{ex} = K_n \cdot \dot{U}_c = K_n \left(\dot{U}_{ex} + \beta \dot{U}_{ex} \right); \quad (3.35)$$

Розділимо ліву і праву частини на U_{ex} і отримаємо:

$$K_{n33} = K_n (1 + \beta K_{n33}) \quad (3.36)$$

І звідси:

$$K_{n33} = \frac{K_n}{1 - \beta K_n}; \quad (3.37)$$

У загальному вигляді:

$$K_{II} = K_{II} \cdot e^{i\varphi_K} \cdot \beta = \beta e^{i\varphi_K}; \quad (3.38)$$

де: φ_K і φ_β - кути повороту фаз підсилювачем і колом зворотного зв'язку.

Загальний кут повороту фази колом зворотного зв'язку дорівнює:

$$\Phi_{36} = \varphi_K + \varphi_\beta; \quad (3.39)$$

Якщо $\varphi_{36} = \pi$, то і зворотний зв'язок дійсний і негативний і:

$$K_{n33} = K_n / (1 + \beta K_n) \quad (3.40)$$

Якщо $\varphi_{36} = 2\pi n$, де $n = 0, 1^\circ$, то сигнал зворотного зв'язку надходить на вхід підсилювача в фазі з вихідним сигналом і зворотний зв'язок є позитивним.

тоді:

$$K_{n33} = K_n / (1 - \beta K_n) \quad (3.41)$$

При цьому коефіцієнт посилення значно зростає і при $\beta K_{\pi} \approx 1$ настає процес самозбудження підсилювача.

3.8 Однокаскадний підсилювач на польовому транзисторі

Польовий транзистор включається в схеми підсилювачів трьома способами: із загальним витоком 3В; загальним стоком 3С; загальним затвором 3З. Найчастіше застосовується схема із загальним витоком (3В). Вона має вигляд зображений на рисунку 54. Режим роботи транзистора задається джерелом E_c і напругою зміщення на затворі $U_{зр}$.

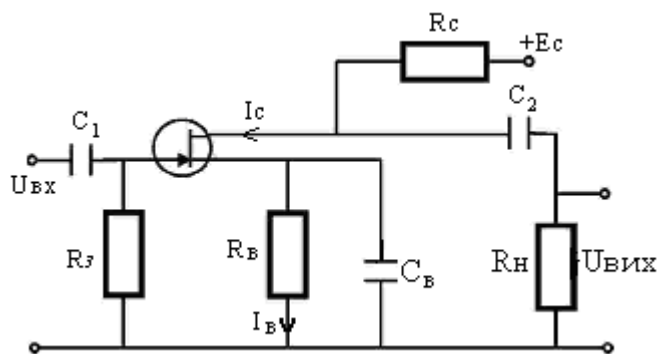


Рисунок 54.

Напруга зсуву $U_{зр}$ задається резистором $R_{и}$:

$$U_{зр} = I_c R_{и} \quad (3.42)$$

і подається на затвор через резистор $R_з$. Для виключення зворотного зв'язку по змінному струму $R_{и}$ він шунтується конденсатором $C_{и}$ великої місткості.

$$C_{и} \gg \frac{1}{\omega R_{и}}; \quad (3.43)$$

Коефіцієнт посилення каскаду дорівнює:

$$K_{и} = -S R'_c \quad (3.44)$$

де S - крутизна статичної характеристики, а мінус означає поворот фази на 180° . Каскади на польовому транзисторі мають високий вхідний опір (кілька мегом) і застосовуються для узгодження з високоомними колами.

3.9. Багатокаскадні підсилювачі низької частоти

Якщо коефіцієнта посилення одного каскаду недостатньо, то застосовують багатокаскадні підсилювачі. Схема багатокаскадного підсилювача включає в себе один або два каскади попереднього підсилення і вихідний каскад, як правило, підсилювач потужності. На рисунку 55 зображено двохкаскадний передпідсилювач.

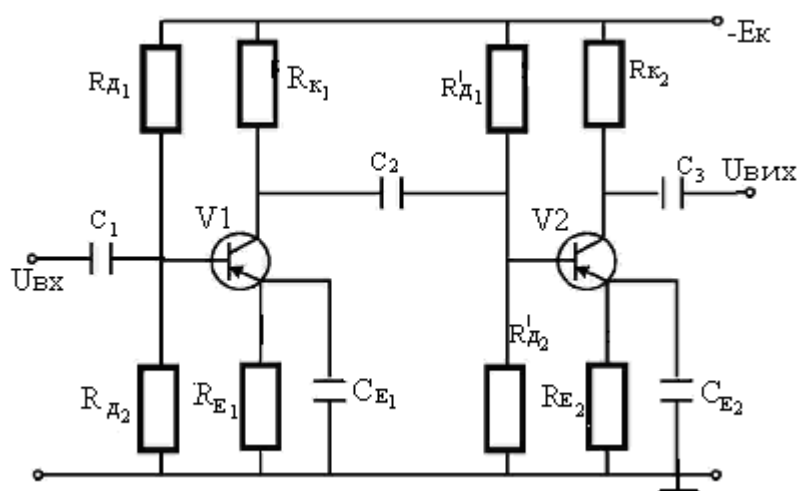


Рисунок 55.

Загальний коефіцієнт посилення багатокаскадного підсилювача дорівнює добутку коефіцієнтів посилення окремих каскадів. Між каскадами робиться узгодження рівня вхідних і вихідних сигналів так, щоб вихідний сигнал першого каскаду служив вхідним сигналом другого і при цьому не виходив за межі лінійної ділянки динамічної характеристики другого каскаду. Узгодження виконується

вибором робочої точки другого каскаду і при необхідності дільником напруги у вхідному колі.

Підсилювач потужності може працювати, як в класі А, так і в В і в С. Він може бути одноктактним і двотактним. Живиться багатокаскадний підсилювач від одного джерела живлення.

3.10 Підсилювачі потужності

Підсилювачем потужності називаються вихідні каскади багатокаскадних підсилювачів, призначені для передачі в навантаження вихідного сигналу заданої потужності.

У цих каскадах використовуються транзистори середньої або великої потужності. Для узгодження вихідного опору каскаду з опором навантаження застосовується трансформатор.

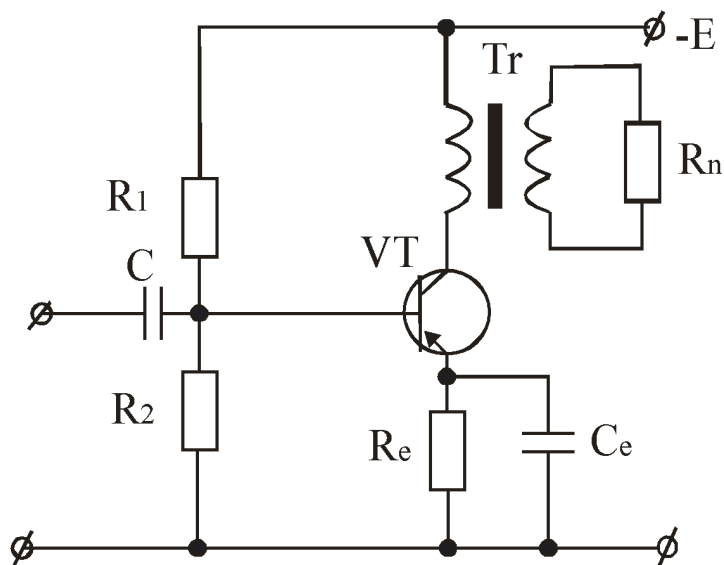


Рисунок 56.

Опори в колі колектора визначаються перерахунком опору R_H в первинне коло трансформатора через коефіцієнт трансформації:

$$R_K = R_H / K_{mp}^2 \cdot \eta_{mp} \quad (3.45)$$

За величиною R_H визначається динамічна характеристика каскаду. Вихідна потужність дорівнює:

$$P_{вих} = I_K U_K = \frac{1}{2} U_{km} \cdot I_{km}; \quad (3.46)$$

де U_K і I_K - діюче значення колекторного струму і напруги;

U_{km} і I_{km} - амплітудне значення тих же струмів і напруг.

3.11 Підсилювачі постійного струму

Підсилювачем постійного струму (ППС) називаються такі прилади, які можуть підсилювати не тільки напруга, яка повільно змінюється, а й постійну складову струму.

Нижня робоча частота ППС дорівнює $f_H = 0$. Верхня робоча частота може бути будь-який, аж до десятків МГц.

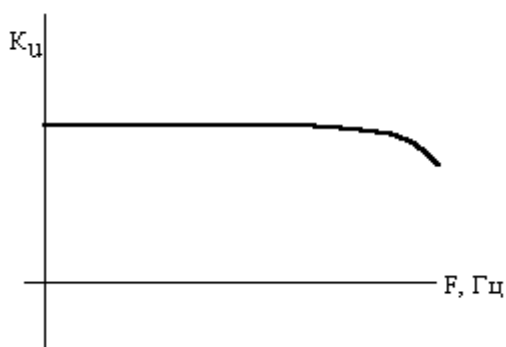


Рисунок 57.

ППС найбільш поширений тип підсилювача в обчислювальній техніці. Вони мають багато різновидів: підсилювачів з безпосереднім зв'язком диференціальні підсилювачі, операційні підсилювачі і підсилювачі з перетворенням сигналів.

У ППС зв'язок між каскадами повинен пропускати постійну складову сигналу, тому в ній не можна застосовувати конденсатори і трансформатори.

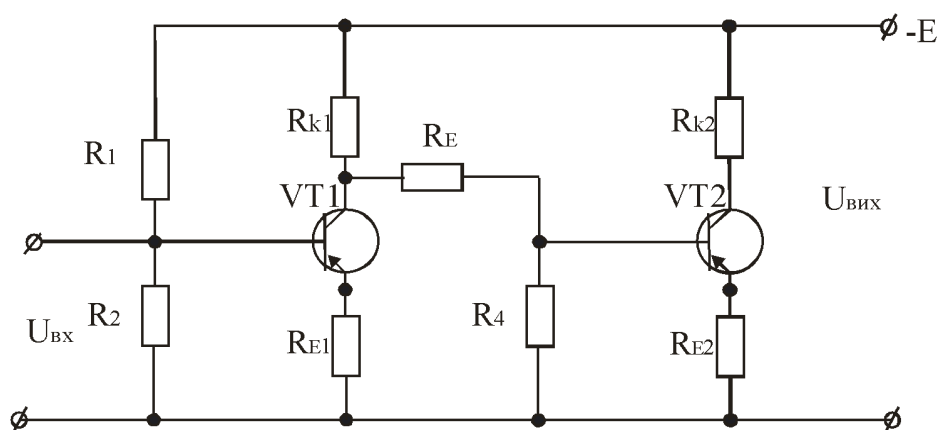


Рисунок 58.

У ППС на виході не повинно бути сигналу, коли його немає на вході, а також вихідний сигнал не повинен змінюватися на виході, якщо він постійний на вході.

Відхилення сигналу на виході від нульового рівня при відсутності сигналу на вході називається дрейфом нуля. Основними причинами дрейфу нуля є температурна і тимчасова нестабільність елементів схеми. Для усунення дрейфу нуля застосовують різні заходи:

- стабільні елементи;
- температурна компенсація;
- диференціальні каскади;
- ППС з перетворенням частоти сигналів МДМ.

Схема ППС з безпосередніми зв'язками приведена вище. Для дотримання режиму спокою транзистора V2 потенціал його емітера підвищується приблизно до $U_{к1}$ збільшенням R_{e2} , але це призводить до зменшення $R_{к2}$ і до зниження коефіцієнта посилення кожного наступного каскаду. Застосовують узгодження вихідних і вхідних сигналів за допомогою діляника R_3 , R_4 , але це теж знижує коефіцієнт посилення.

3.12 Паралельно-балансний (диференційний) ППС

У ППС з безпосереднім зв'язком широко застосовуються диференціальні підсилювачі, що володіють меншим дрейфом нуля.

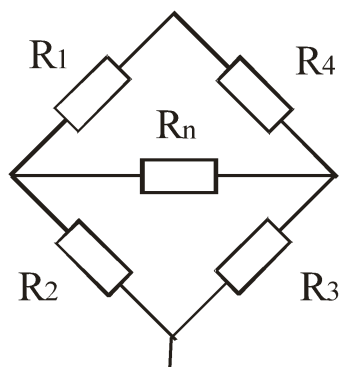


Рисунок 59.

Принцип роботи його можна пояснити на прикладі мостової схеми. Якщо виконується умова,

$$R_1 : R_2 = R_4 : R_3 \quad (3.47)$$

то міст буде збалансований і в навантаженні струм буде дорівнювати нулю. Баланс моста не порушується при зміні E і однаковій зміні опорів.

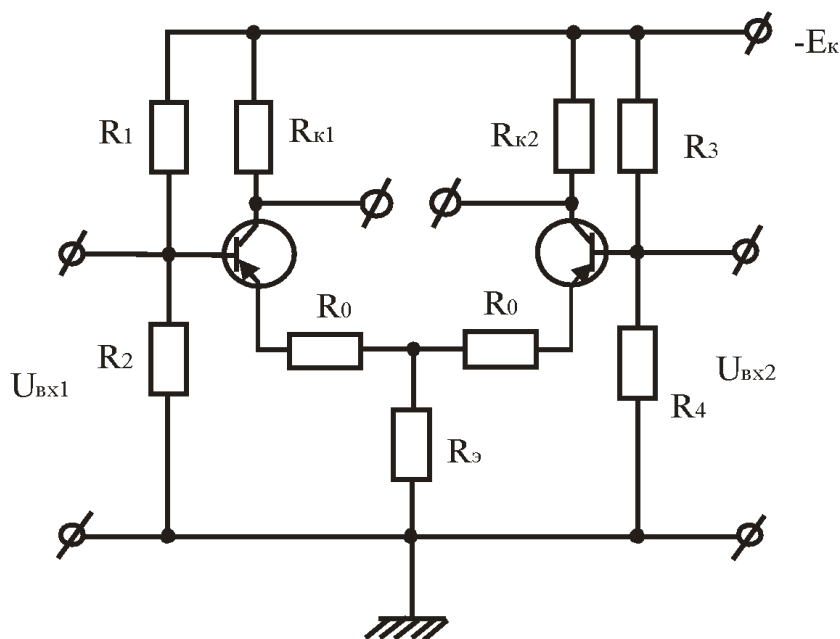


Рисунок 60.

Сигнали на схему паралельного балансного каскаду можна подавати як на дві бази, так і на одну базу, зафіксувавши потенціал другої.

При подачі U_{bx} на дві бази вони будуть протилежні за знаками і тому в $V1$ струм I_{k1} буде рости, а в $V2$ I_{k2} буде зменшуватися. В цьому випадку:

$$U_{вих} = \Delta U_{\kappa_1} - \Delta U_{\kappa_2} = 2\Delta U_{\kappa_1} \quad (3.48)$$

Сумарний струм емітера при цьому не змінюється, таким чином:

$$I_{RE} = I_{E1} + \Delta I_{E1} + I_{E2} - \Delta I_{E2} = const \quad (3.49)$$

В даній схемі відсутній негативний зворотний зв'язок.

За допомогою резистора R_o можна отримати повне балансування каскаду.

3.13 Підсилювачі з перетворенням

Основною проблемою ППС є усунення дрейфу нуля. Ця проблема особливо актуальна для посилення малих сигналів. Тому в таких підсилювачах застосовується перетворення малих постійних або сигналів, які повільно змінюються, в змінні, посилення їх в підсилювачах низької частоти і потім зворотне перетворення сигналів низької частоти в постійний струм або струм, який повільно змінюється.

Структурна схема ППС з перетворенням має вигляд:

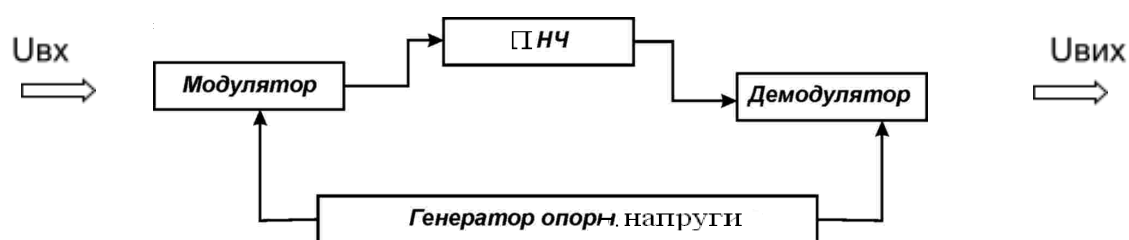


Рисунок 61.

Модулятор перетворює сигнал постійної або повільно мінливої напруги в змінну, частота якої дорівнює частоті генератора опірної напруги, а амплітуда дорівнює рівню вхідного сигналу.

Змінна напруга з модулятора подається на вхід підсилювача низької частоти і посилюється, як звичайна напруга змінного струму. У підсилювача низької частоти немає дрейфу нуля.

Демодулятор - це фагочувствительний випрямляч (детектор), який перетворює змінну напругу в постійну, при цьому знак вихідної напруги збігається зі знаком вхідної напруги.

3.14 Операційні підсилювачі

Операційним підсилювачем (ОП) називають підсилювач постійного струму з диференціальним вхідним каскадом з високим і стабільним коефіцієнтом посилення ($1000 \div 100000$) широкою смугою пропускання ($f_l = 10 \div 100 \text{ МГц}$) високим вхідним опором ($R_{вх} \geq 10 \text{ кОм}$) малим вихідним опором ($R_{вх} \leq 100 \text{ кОм}$) малим дрейфом і несиметричним виходом, тобто це фактично високоякісний підсилювач.

Умовно графічне зображення має вигляд:

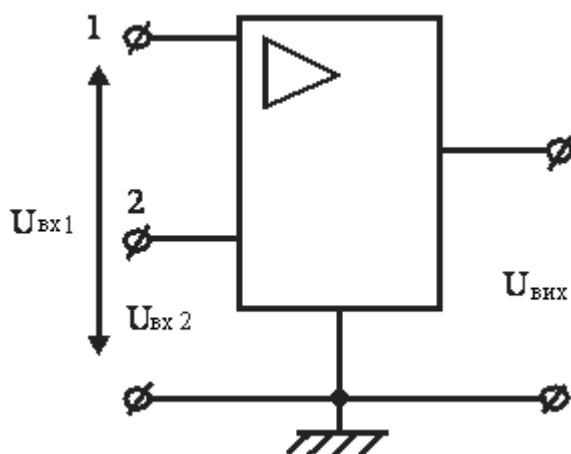


Рисунок 62.

Амплитудна характеристика:

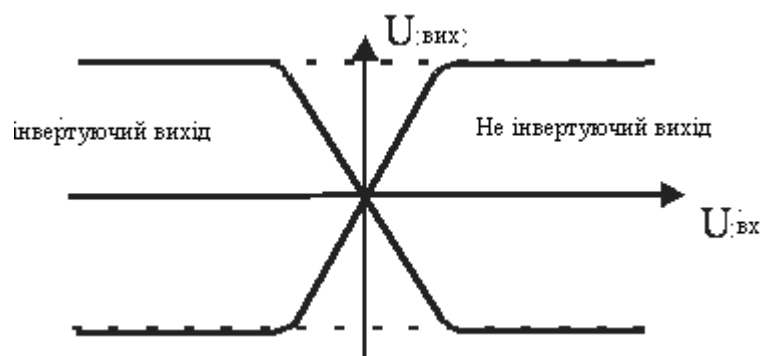


Рисунок 63.

Вхід 1 позначається знаком «+» і називається неінвертуючим, тому що сигнал на виході ОУ має ту ж полярність, що і на вході.

Вхід 2 позначається знаком «-» і називається інвертує, тому що сигнал на виході ОП має зворотну полярність по відношенню до вхідного сигналу.

Схема включення ОП має вигляд Рис 64.

Живлення ОП здійснюється від двох послідовно з'єднаних джерел E_1 і E_2 , заземлених в середній точці. Це забезпечує «0» на виході при відсутності сигналу на вході і різну полярність сигналів на виході.

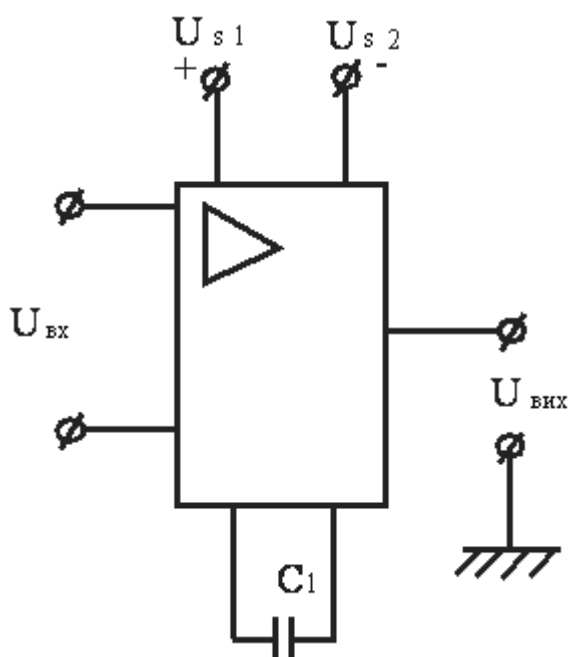


Рисунок 64.

Сигнал можна подавати від симетричного щодо землі джерела або від двох окремих джерел сигналів, один до прямого входу, інший до інверсного. Часто сигнал подають на вхід 1, а на вхід 2 організовують ПЗЗ.

В аналогових ЕОМ ОП застосовуються для виконання ряду математичних операцій: множення, інтегрування, диференціювання і порівняння. Звідси і їх назви «операційні підсилювачі».

Література:

1. Скаржепа В.А. Электроника и микросхемотехника, часть1/ В.А. Скаржепа, А.И. Луценко -К. «Вища школа», 1989г.- 430с.
2. Гершунский Б.С. Основы электроники/ Б.С. Гершунский -К., «Вища школа», 1987г. -348с.
3. Крылов В.В. Основы теории цепей для системотехников/ В.В. Крылов, С.Н. Корсаков -М., Высшая школа, 1990г.- 224 с.
4. Основы промышленной электроники/ под редакцией В.Г. Герасимова- М. «Высшая школа», 1986г.- 323 с.
5. Гершунский Б.С. Расчёт электронных схем/ Б.С. Гершунский -К., «Вища школа», 1977г.
6. Изьюрова Г.И. Расчёт электронных схем. Примеры и задачи/ Г.И. Изьюрова, Г.К. Королёв -М., «Высшая школа», 1987г.

Навчальне видання

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

з дисципліни

«РАДІОЕЛЕКТРОНІКА»

(для здобувачів вищої освіти спеціальностей 172 «Телекомунікації та
радіотехніка»)
(електронне видання)

Укладач:

Ж.Г. САМОЙЛОВА

Оригінал-макет

Ж.Г. Самойлова

Підписано до друку 10.03.2016.

Формат 60x84 $\frac{1}{16}$. Папір типогр. Гарнітура Times.

Друк офсетний. Умов. друк. арк. _____. Обл.-вид. арк. _____.
Тираж _____ екз. Вид. № _____. Замов. № _____. Ціна договірна.

**Видавництво Східноукраїнського національного університету
імені Володимира Даля**

Свідоцтво про реєстрацію: серія ДК № 1620 від 18.12.03 р.

Адреса університета: просп. Центральний, 59-А

м. Сєверодонецьк, 93400, Україна

e-mail: vidavnictvoSNU.ua@gmail.com.