

Міністерство освіти і науки України

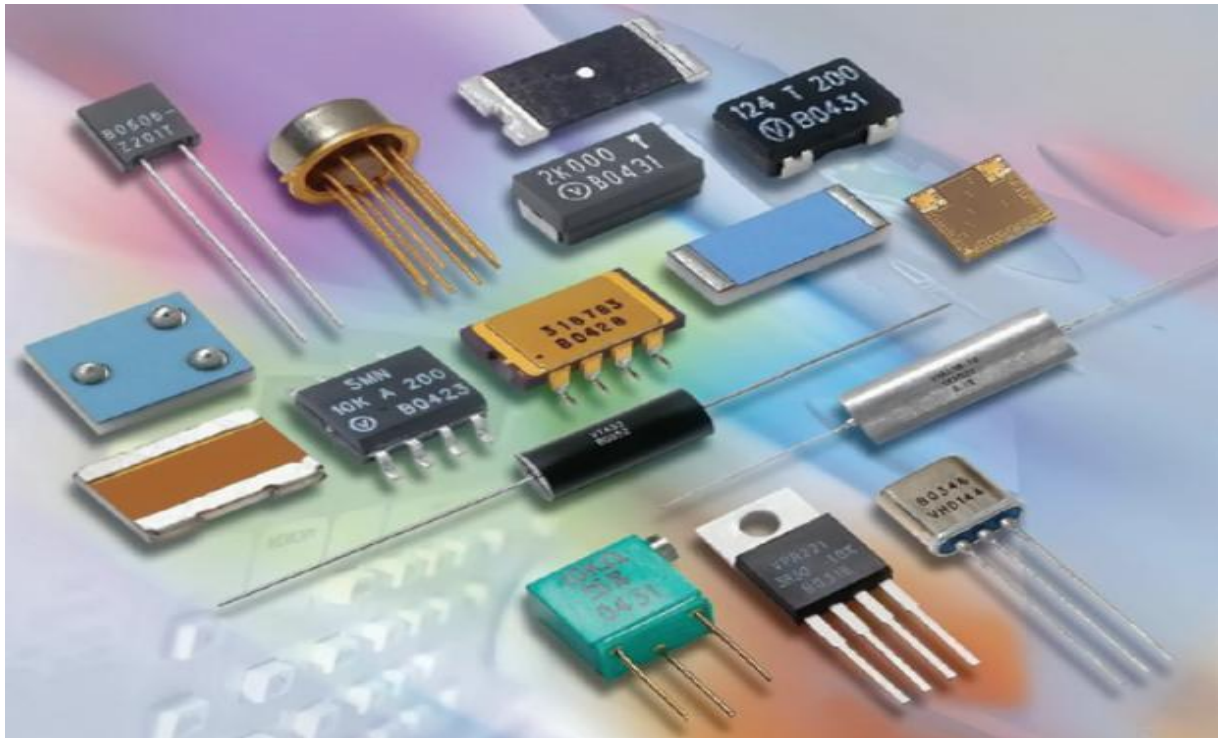
Тернопільський національний технічний університет
імені Івана Пулюя

Кафедра
електричної інженерії

ПРОМИСЛОВА ЕЛЕКТРОНІКА

НАПІВПРОВІДНИКОВІ ПРИЛАДИ

ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ



Тернопіль
2023

Міністерство освіти і науки України

**Тернопільський національний технічний університет
імені Івана Пулюя**

**Кафедра
електричної інженерії**

ПРОМИСЛОВА ЕЛЕКТРОНІКА

НАПІВПРОВІДНИКОВІ ПРИЛАДИ

ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

**Тернопіль
2023**

ПРОМИСЛОВА ЕЛЕКТРОНІКА. НАПІВПРОВІДНИКОВІ ПРИЛАДИ.
Лабораторний практикум / Укладачі: Лупенко А.М., Мовчан Л.Т.

Укладачі: д.т.н., доц. Лупенко А.М.
к.т.н., доц. Мовчан Л.Т.

Рецензент: к.т.н., доц. Медвідь В.Р.

Відповідальний за випуск: д.т.н., проф. Лупенко А.М.

Затверджено на засіданні кафедри електричної інженерії Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя. Протокол № 10 від 25.05.2023 р.

Схвалено й рекомендовано до друку на засіданні науково-методичної ради факультету прикладних інформаційних технологій та електроінженерії Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя. Протокол № 11 від 07.06.2023 р.

Посібник складено відповідно до навчальної програми курсів “Промислова електроніка“, а також матеріалів літературних джерел, наведених у переліку.

ВСТУП

Посібник призначений для підготовки до лабораторного практикуму з дисципліни “Промислова електроніка”, викладання якої забезпечує кафедра електричної інженерії Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя за спеціальністю 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Методичні вказівки можуть також бути використані при викладанні дисциплін “Електроніка”, „Комп’ютерна електроніка”, “Електроніка і схемотехніка”, які входять до загальноінженерного циклу дисциплін.

Детально описано лабораторні роботи з розділу «Напівпровідникові прилади», який входить до складу програм із вказаних дисциплін. Наведено теоретичні відомості про принцип дії електронних приладів, розглянуто їх параметри, характеристики та математичні співвідношення, які необхідні для виконання розрахункових завдань. Наявність теоретичного матеріалу зумовлена тим, що практично складно забезпечити фронтальний метод виконання лабораторних робіт, крім того, не завжди можливо синхронізувати в часі лекційні й лабораторні заняття. Наведено послідовність досліджень, які проводять під час лабораторної роботи, вимоги щодо опрацювання результатів експериментів, а також контрольні запитання, які орієнтують студента в конкретному напрямі досліджень. Вміщено також перелік рекомендованої літератури для підготовки лабораторної роботи.

Роботи розроблено з урахуванням технічних характеристик лабораторних стендів і вимірювальних приладів, які використовують у лабораторії електроніки й мікропроцесорної техніки.

Вимоги до змісту звіту. Звіт із лабораторної роботи повинен містити: 1) титульний лист; 2) мету роботи; 3) схему для проведення досліджень; 4) формули для розрахунків; 5) таблиці результатів експерименту; 6) графічні залежності експериментальних даних; 7) результати опрацювання експериментальних даних; 8) висновки за результатами роботи.

Лабораторна робота №1

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ДІОДІВ

Мета роботи: вивчення принципу дії та основних властивостей напівпровідникових діодів, дослідження їх вольт-амперних характеристик, ознайомлення з основними параметрами діодів.

Теоретичні відомості

Напівпровідниковим діодом називають напівпровідниковий прилад з одним електричним р-п переходом, який має два виводи. Електричний перехід у напівпровіднику це – приграничний шар між двома областями, фізичні характеристики яких суттєво відрізняються. Робота напівпровідникових діодів базується на використанні властивостей електричних (або електронно-діркових) переходів.

Нехай одна з областей напівпровідника має акцепторні домішки, які мають діркову електропровідність (область р-типу), а інша – донорні домішки, які мають електронну провідність (область n-типу), як показано на рис.1а.

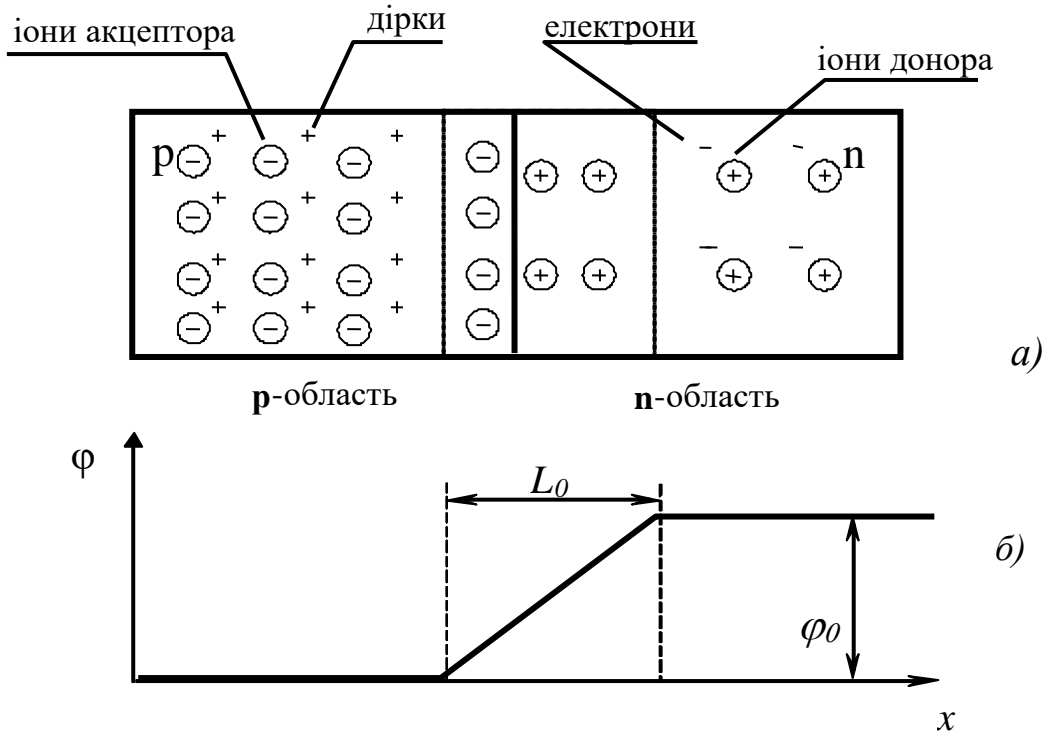


Рис.1. Структура р-п переходу

Між цими двома областями виникає тонкий приграничний шар, який має випрямну властивість, тобто добре проводить струм в одному напрямі й погано – в іншому. Концентрація дірок у р-області, де вони є основними носіями, значно вища від концентрації дірок у n-області, де

вони є неосновними носіями зарядів. Концентрація електронів у n -області (основних носіїв) відповідно набагато більша за концентрацію електронів у p -області (неосновних носіїв).

Під впливом різниці концентрацій дірки дифундують із p -області в n -область (проти градієнта концентрації). Дірки, що перейшли в n -область, рекомбінують з електронами n -області. Аналогічно, електрони, що перейшли з n -області в p -область, рекомбінують з дірками p -області. Внаслідок цього приграничний шар p -області збіднюється на дірки, а приграничний шар n -області – на електрони. У цілому, між двома областями утворюється шар, в якому немає носіїв зарядів (електронів і дірок). Такий шар має дуже високий опір, його називають *p - n переходом*.

У приграничному шарі p -області виникає від'ємний об'ємний заряд за рахунок іонів акцепторних домішок, некомпенсованих дірками. Відповідно, у приграничному шарі n -області утворюється додатний об'ємний заряд за рахунок іонів донорних домішок, некомпенсованих електронами. Між цими об'ємними зарядами виникає електричне поле (потенціальний бар'єр), яке протидіє дифузійному рухові основних носіїв у протилежні області напівпровідника. Для неосновних носіїв електричне поле є прискорюючим. Тому дірки з n -області (неосновні носії) дрейфують під дією цього електричного поля в p -область, а електрони p -області – в n -область.

У стані термодинамічної рівноваги через перехід рухаються два однакові зустрічні потоки носіїв зарядів із протилежними знаками, тому струм через перехід дорівнює нулю.

Розподіл потенціалу в p - n переході в стані рівноваги зображено на рис.1б, де φ_0 – висота потенціального бар'єра, або контактна різниця потенціалів.

У зв'язку з тим, що концентрація $p \gg n$, дірки області p проникають в область n на більшу відстань, ніж електрони області n – в область p .

Тому зона p - n переходу буде майже повністю розташована в області n -типу (у високоомній області), тобто p - n перехід є *несиметричним*.

Якщо до p - n переходу під'єднати джерело напруги $U_{пр}$ з полярністю, вказаною на рис. 2а, то висота потенціального бар'єра зменшиться і дорівнюватиме $\varphi_0 - U_{пр}$ (рис. 2б).

Таке під'єднання напруги називають *прямим зміщенням* p - n переходу. У цьому випадку дифузійний струм дірок зростає, оскільки кількість дірок, що можуть подолати менший бар'єр, збільшується. Те ж саме стосується й електронів. Область p - n переходу звужується. Через p - n перехід протікає прямий струм, який дорівнює сумі електронної та діркової складових. Таке “нагнітання” носіїв заряду через p - n перехід в область напівпровідника, де вони є неосновними носіями за рахунок зменшення потенціального бар'єра, називають *інжекцією* носіїв. Інжектуючу (низькоомну) область (у даному випадку p -область) називають

емітером, а високоомну область, в яку інжектуються не основні для неї носії – базою.

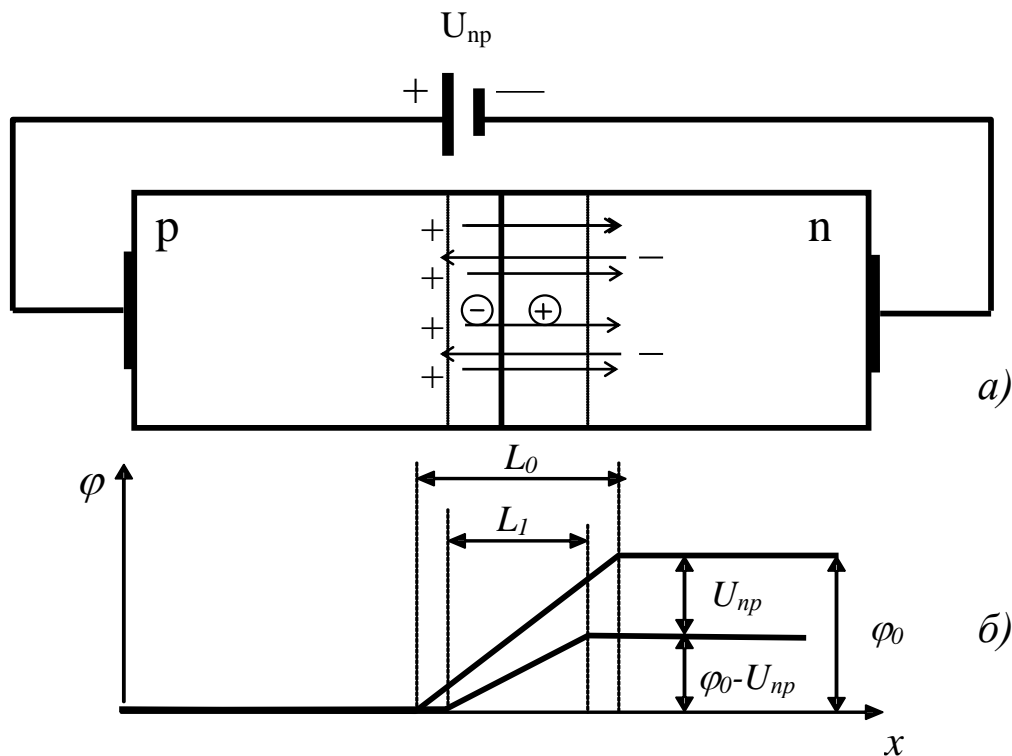


Рис. 2. Пряме зміщення-р переходу

Якщо до р-п переходу під'єднати джерело напруги $U_{зв}$ зворотної полярності, як зображено на рис. 3а, то висота потенціального бар'єра збільшиться і дорівнюватиме $\varphi_o + U_{зв}$ (рис. 3б). Дифузійний рух з однієї області в іншу припиняється. При цьому через р-п перехід протікає лише невеликий зворотний струм, зумовлений дрейфом неосновних носіїв зарядів. Таке ввімкнення р-п переходу під напругу називають зворотним зміщенням р-п переходу. Мала величина зворотного струму зумовлена набагато меншою концентрацією неосновних носіїв зарядів у порівнянні з концентрацією основних. Тому опір р-п переходу при зворотному зміщенні набагато більший, ніж при прямому.

Ширина р-п переходу L_o (рис. 1а) без зміщення зовнішньою напругою залежить від матеріалу напівпровідника, концентрацій акцепторних і донорних домішок.

При прямому зміщенні р-п переходу потенціальний бар'єр зменшується, отже, зменшується і заряд, яким спричинено цей бар'єр. Оскільки заряд в р-п переході зумовлений нерухомими іонами домішок, область, в якій розташований заряд, буде звужуватись (L_1 на рис. 2б).

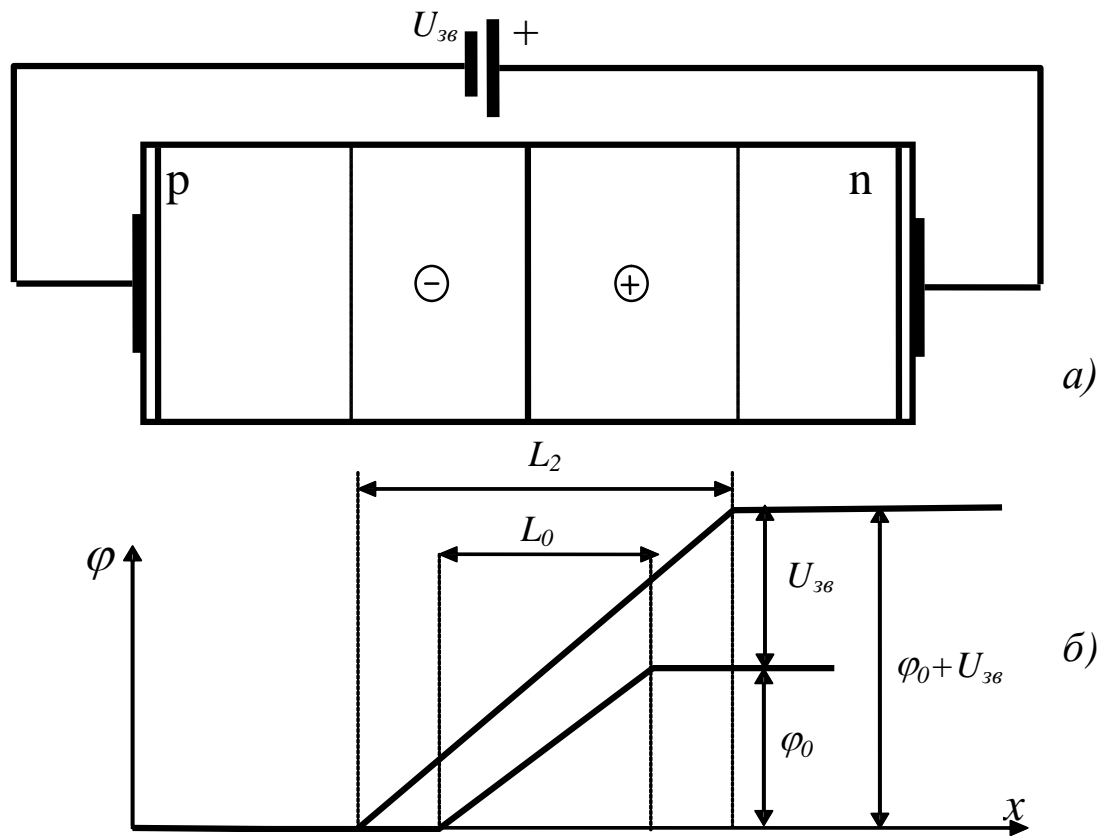


Рис. 3. Зворотнє зміщення р-п переходу

При зворотному зміщенні область просторового заряду збільшується (L_2 на рис. 3б). Таке розширення області р-п переходу відбувається переважно в бік напівпровідника з малою концентрацією домішок.

Оскільки зміна напруги на р-п переході викликає зміну заряду в ньому, то р-п перехід поводить себе подібно до ємності. Розрізняють два види ємності р-п переходу:

- 1) бар'єрна ємність;
- 2) дифузійна ємність.

Бар'єрна ємність проявляє себе при зворотному зміщенні р-п переходу. Вона зумовлена наявністю в р-п переході нерухомих зарядів протилежних знаків, які утворюють нібито дві заряджені обкладки конденсатора. При зміні зворотної напруги, наприклад, при збільшенні, ширина переходу збільшується, ємність конденсатора зменшується. Отже, бар'єрну ємність можна регулювати величиною зворотної напруги. Цю властивість р-п переходу використовують у варікапах – напівпровідникових ємностях, керованих напругою.

Дифузійна ємність зумовлена зміною заряду поблизу р-п переходу за рахунок зміни прямого струму в р-п переході, тобто дифузійна ємність проявляє себе переважно при прямому зміщенні р-п переходу.

Вольт-амперною характеристикою р-п переходу називають залежність струму I , що протікає через діод під дією прикладеної до нього напруги U . Цю залежність описують співвідношенням:

$$I = I_T (e^{\frac{U}{\varphi_T}} - 1), \quad (1)$$

де I_T – тепловий або зворотний струм насичення (залежить від температури і не залежить від прикладеної напруги); φ_T - температурний потенціал ($\varphi_T \approx 25 \text{ мВ}$ при $T = 300 \text{ К}$).

Якщо знехтувати одиницею в (1), то можна вважати, що прямий струм зростає по експоненті при збільшенні прямої напруги (при $U > 0$).

При зворотній напрузі на р-п переході при $|U| > (3 \div 5)\varphi_T$ можна вважати струм I незалежним від напруги, таким, що дорівнює струму насичення I_T (при $U > 0$).

Вольт-амперну характеристику (ВАХ) р-п переходу зображено на рис. 4.

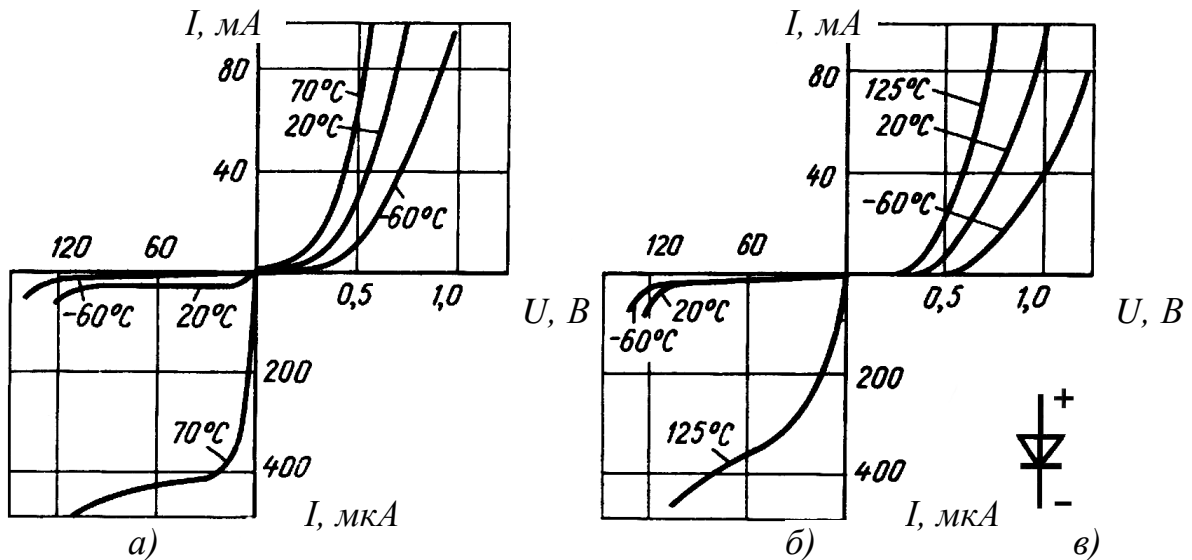


Рис. 4. Вольт-амперні характеристики германієвого (а) і кремнієвого (б) діодів; умовне позначення (в)

Пряма ділянка вольт-амперної характеристики діода відрізняється від характеристики р-п переходу за рахунок спаду напруги на областях р- і n-типу, розташованих поза межами р-п переходу. Цей спад враховано у виразі:

$$I = I_T (e^{\frac{U - I r_{np}}{\varphi_T}} - 1), \quad (2)$$

де r_{np} – омичний опір бази діода.

Рівняння (1) та (2) не віддзеркалюють усіх фізичних властивостей р-п переходу, однак на практиці їх необхідно враховувати. Для цього знімають

експериментальну вольт-амперну характеристику діода. Основна її відмінність від теоретичної виявляється при великих зворотних напругах.

Зворотний струм реального діода не є сталим, а збільшується при зростанні зворотної напруги, як зображено на рис. 4.

Це пояснюється такими чинниками:

- 1) термогенерацією носіїв заряду в області р-п переходу;
- 2) зростанням струму по поверхні р-п переходу.

При досить високих значеннях зворотної напруги зворотний струм зростає за рахунок збільшення концентрації неосновних носіїв зарядів під впливом ударної іонізації атомів кристалічної ґратки електронами, що набули високої швидкості в електричному полі р-п переходу. На ефект ударної іонізації накладається ефект термогенерації носіїв.

Збільшення зворотного струму понад максимально допустиме значення призводить до виходу діода з ладу (незворотний пробій).

При збільшенні температури діода збільшується концентрація неосновних носіїв, що спричинює зростання зворотного струму. На практиці вважають, що зворотний струм германієвих діодів зростає в 2 рази, а для кремнієвих – у 2,5 рази на кожні 10°C.

Залежність прямої напруги на діоді від температури оцінюють за допомогою температурного коефіцієнта напруги ε :

$$\varepsilon = \Delta U / \Delta T, \quad (3)$$

який показує величину зміни прямої напруги на діоді при зміні його температури на 1°C при $I = \text{const}$. Ця величина є від'ємною і приблизно дорівнює $\varepsilon \approx -2 \text{ мВ/}^\circ\text{С}$.

Основні параметри діодів:

1. Максимально допустима напруга діода - це значення зворотної напруги, яку діод може витримати протягом тривалого часу без виходу його з ладу.

2. Максимальний прямий струм діода.

3. Зворотний струм діода при заданій зворотній напрузі.

4. Максимальна потужність розсіювання на діоді.

5. Диференціальний опір діода $r_{\text{диф}}$ - відношення приросту напруги на діоді до приросту струму через діод, що викликає цей приріст напруги.

6. Параметри напівпровідникових діодів, їх вольт-амперні характеристики наведено в довідковій літературі.

Різні типи діодів мають зворотну напругу від десятків до тисяч вольт, а середнє значення прямого струму – до сотень ампер.

2. Підготовка до роботи

2.1. Користуючись навчальними посібниками [1-7], вивчити принцип дії, схеми ввімкнення, основні характеристики і параметри, властивості та області застосування напівпровідникових діодів.

2.2. Накреслити схему електричного кола для проведення експерименту (рис. 5). У даній схемі транзистор VT1 разом з резисторами R1, R2, R3 утворюють джерело регульованої напруги. Транзистор працює як повторювач напруги. Струм через діод та напруга на ньому вимірюються відповідно міліамперметром PA1 та вольтметром PV1. Діоди, які досліджують (ДЗ11А, КД510А, АЛ307Б, КС133А), під'єднують за допомогою перемикача S.

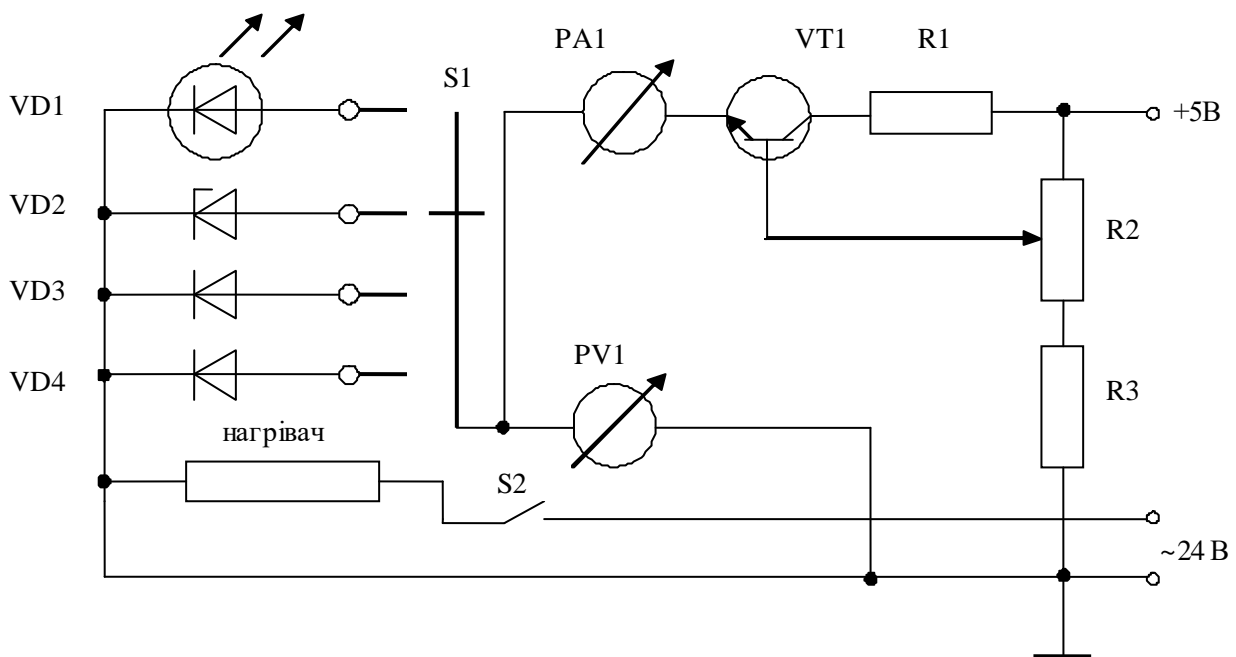


Рис. 5. Схема для дослідження напівпровідникових діодів

3. Проведення експерименту

3.1. За схемою (рис. 5) скласти електричне коло для проведення досліджень діодів.

3.2. Експериментально зняти вольт-амперні характеристики кремнієвого та германієвого діодів, кремнієвого стабілітрона, світлодіода. Записати типи досліджуваних діодів.

3.3. Змінюючи за допомогою потенціометра струм через діод у межах від 0 до 10мА, зняти залежності прямого струму діода від напруги $I_{np}=f(U_{np})$ для досліджуваних діодів.

3.3.1. Результати вимірювань для арсенід-галієвого АЛ307Б (VD1) і германієвого ДЗ11А (VD3) діодів записати в таблицю 1.

3.3.2. Результати вимірювань для стабілітрона КС133А (VD2) (прямої та зворотної ділянок ВАХ) записати в таблицю 2.

3.3.3. Результати вимірювань для кремнієвого діода КД510А (VD4) при кімнатній температурі і при температурі 55°C записати в таблицю 3. Нагрівання діода здійснити, помістивши його на 5 хвилин у нагрівач (дротяний резистор типу ПЕВ-7-330 Ом), подавши на резистор напругу від джерела живлення ~24В.

Таблиця 1

I _{ПР} , мА	0	0,05	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U _{ПР} (VD1), В												
U _{ПР} (VD3), В												

Таблиця 2

I _{ЗВ} , мА	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	-0,05	0
U _{ЗВ} (VD2), В												
I _{ПР} , мА	0	0,05	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U _{ПР} (VD2), В												

Таблиця 3

T=25°C	I _{ПР} , мА	0	0,05	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	U _{ПР} (VD4), В												
T=55°C	I _{ПР} , мА	0	0,05	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	U _{ПР} (VD4), В												

3.4. За результатами експерименту побудувати вольт-амперні характеристики в одній системі координат.

3.5. Визначити диференціальний опір та опір постійного струму на лінійній ділянці вольт-амперної характеристики кремнієвого діода та на зворотній ділянці стабілітрона.

3.6. Визначити температурний коефіцієнт прямої напруги для кремнієвого діода (VD4).

3.6. Порівняти експериментальні результати з теоретичними та зробити висновки.

4. Контрольні запитання

1. Опишіть процеси в *p-n* переході за відсутності зовнішньої напруги при його прямому і зворотному ввімкненнях.
2. Нарисуйте ВАХ ідеального діода.
3. Чим відрізняються характеристики ідеального діода та *p-n* переходу?
4. Охарактеризуйте температурні й частотні властивості *p-n* переходу.
5. Як позначають на схемах напівпровідникові діоди?
6. У чому полягає принцип дії напівпровідникових діодів?
7. Назвіть основні параметри і характеристики напівпровідникових діодів.
8. Як можна визначити основні параметри напівпровідникових діодів?

5. Рекомендована література

1. Колонтаєвський Ю.П., А.Г. Сосков. Електроніка та мікросхемотехніка. К.: Каравела, 2009.
2. Основи електроніки : навч. посіб. / А. С. Васюра, Г. Д. Дорощенко, В. П. Кожем'яко, Г. Л. Лисенко. – Вінниця : ВНТУ, 2018. – 197 с.
3. Бобало Ю.Я., Мандзій Б.А., Стахів П.Г, Писаренко Л.Д., Якименко Ю.І. Основи теорії електронних кіл. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2008. – 332с.
4. Матвієнко М.П. Основи електроніки. / Видавництво: Ліра К. – 2019.- 364 с.
5. Microelectronic Circuits 7th Edition, International Edition /Adel S. Sedra, Kenneth Carless Smith / Oxford University Press, 2015. – 1436 pp.
6. Промислова електроніка [Текст]: Методичні вказівки до лабораторних робіт і завдання для самостійної роботи / А.М. Лупенко. Тернопіль.: Видавництво ТНТУ, 2009. 129с.

Лабораторна робота № 2

ДОСЛІДЖЕННЯ БІПОЛЯРНИХ ТРАНЗИСТОРІВ У СХЕМАХ ЗІ СПІЛЬНОЮ БАЗОЮ ТА СПІЛЬНИМ ЕМІТЕРОМ

Мета роботи: вивчення принципу дії основних властивостей біполярних транзисторів; дослідження вольт-амперних характеристик біполярних транзисторів у схемі зі спільною базою та спільним емітером; визначення h -параметрів транзисторів за допомогою вольт-амперних характеристик.

1. Теоретичні відомості

1.1. Фізичні процеси в біполярних транзисторах (БТ)

Біполярні транзистори – це напівпровідникові прилади з двома взаємодіючими р-п-переходами і трьома виводами, призначеними для підсилення електричних сигналів. БТ – це монокристал напівпровідника, який складається з трьох областей, що чергуються (рис.1). Внутрішню область монокристала транзистора, розташовану між р-п-переходами, називають базою. Зовнішню область, призначену для інжектування носіїв у базу, називають емітером, р-п-перехід між емітером і базою – емітерним. Іншу зовнішню область, яка втягує носії з бази (екстракція носіїв), називають колектором, а перехід між базою і колектором – колекторним.

У процесі виготовлення транзистора базу виконують дуже тонкою. Концентрація основних носіїв в емітері значно більша за концентрацію основних носіїв у базі. Площа колекторного переходу більша, ніж емітерного, що підвищує коефіцієнт переносу носіїв із емітера в колектор.

Залежно від типу електропровідності областей напівпровідника, що чергуються, розрізняють транзистори р-п-р і п-р-п типів.

Розглянемо фізичні процеси в транзисторі р-п-р типу. В підсилювальному режимі роботи транзистора емітерний перехід зміщують у прямому напрямі, а колекторний – у зворотному (рис. 1).

В результаті зменшення потенціального бар'єра емітерного переходу дірки з емітера дифундують у базу (інжекція дірок), а електрони - з бази в емітер. Оскільки концентрація дірок в емітері значно перевищує концентрацію електронів у базі, то потік дірок у базу є значно інтенсивнішим від потоку електронів із бази в емітер, тобто інжекція має практично односторонній характер. У загальному через емітерний перехід протікає струм $I_e = I_{ep} + I_{en}$, де I_{ep} – діркова складова емітерного струму, I_{en} - його електронна складова. Чим менша складова I_{en} , тим ефективніша робота емітера.

Для кількісного оцінювання ефективності роботи емітера вводять коефіцієнт інжекції

$$\gamma = \frac{I_{ep}}{I_e} = \frac{I_{ep}}{I_{ep} + I_{en}} \approx 0,999. \quad (1)$$

Інжектвані дірки проникають у базу, де вони є неосновними носіями. У базі невелика частина дірок починає рекомбінувати з електронами. Цей процес викликає додатковий приплив електронів від зовнішнього джерела $E_{cб}$ в базову область, тобто з'являється базовий струм. Процес рекомбінації відбувається не миттєво і пов'язаний з часом життя неосновних носіїв. Оскільки товщина бази є дуже малою, то час проходження бази інжектваними дірками значно менший, ніж час їх життя. Тому більшість дірок, не встигнувши рекомбінувати, досягають області колекторного переходу, де вони потрапляють у прискорююче поле цього колекторного переходу і втягуються ним у колектор (процес екстракції дірок з бази). У колекторі починає протікати струм I_k .

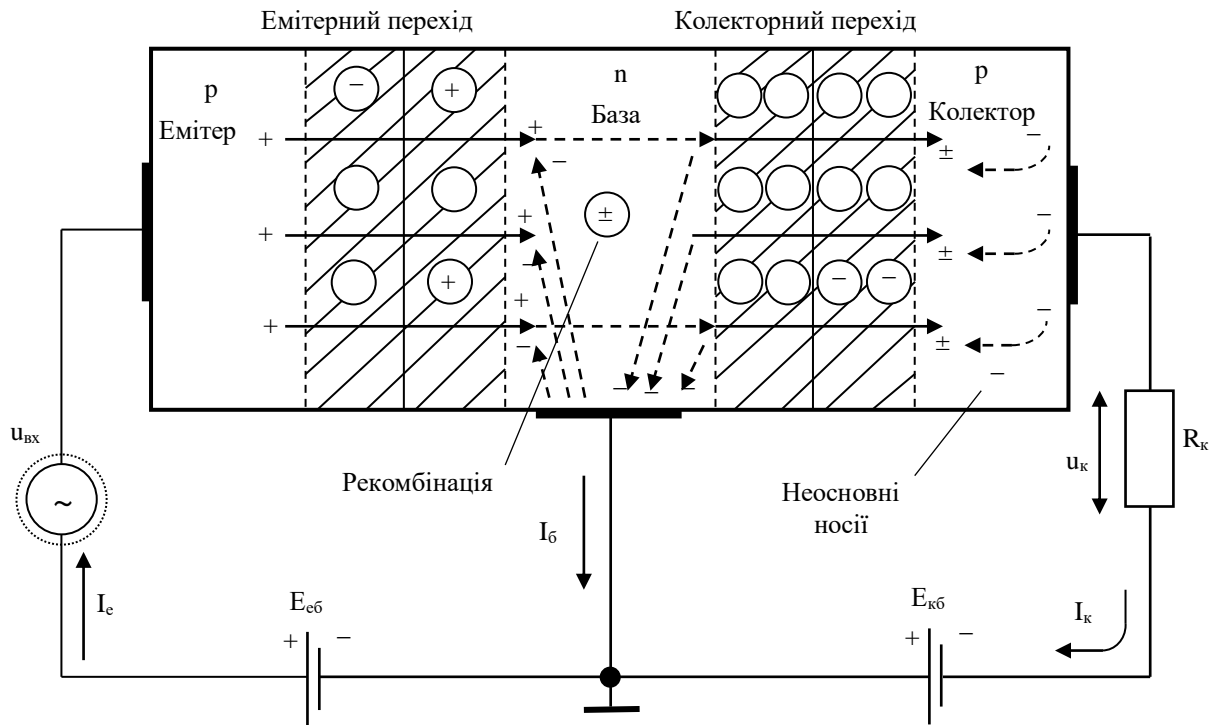


Рис. 1. Фізичні процеси у транзисторі

Відносне число дірок, які досягають колектора, характеризують коефіцієнтом переносу

$$\chi = \frac{p_k'}{p_e'}, \quad (2)$$

де p_k' і p_e' – концентрації дірок, що пройшли через колекторний та емітерний переходи.

Якби рекомбінація у базі була відсутня й існувала чисто одностороння інжекція, то всі дірки, інжектвані емітером, досягали б колекторного переходу, тоді струм колектора I_k дорівнював би струму емітера I_e . В дійсності ж тільки частину γ струму емітера складають дірки і

тільки частина χ їх доходить до колекторного переходу. Тому струм колектора складає лише частину емітерного струму, а саме:

$$I_k = \alpha I_e; \alpha = \gamma \cdot \chi. \quad (3)$$

Коефіцієнт α називають коефіцієнтом передавання емітерного струму. Він є одним із основних параметрів транзистора і показує, яку частину емітерного струму I_e складає колекторний струм I_k :

$$\alpha = \frac{I_k}{I_e} = 0,90 \div 0,995. \quad (4)$$

Через колекторний перехід, крім розглянутого струму, викликаного інжектіваними в базу дірками, протікає також некерований зворотний струм I_{ko} зворотно зміщеного колекторного переходу. Причини його виникнення ті ж, що і в окремому р-n переході. Тому результуючий струм колекторного кола дорівнює

$$I_K = \alpha I_e + I_{ko}. \quad (5)$$

Струм I_{ko} є дуже малий, тому з достатньою для практики точністю можна вважати, що $I_k = \alpha I_e$.

Крім струмів I_e і I_k , у транзисторі також необхідно враховувати струм бази I_b , зумовлений рекомбінацією дірок з електронами бази. Оскільки за рахунок рекомбінації порушується електронейтральність бази, для її відновлення від зовнішнього джерела E_{cb} у базу надходять електрони, створюючи базовий струм I_b .

Отже, емітерний струм I_e розгалужується на дві складові – колекторний струм I_k і базовий струм I_b , тобто

$$I_e = I_k + I_b \quad (6)$$

Із (4) і (6) випливає:

$$I_b = (1 - \alpha) I_e. \quad (7)$$

Враховуючи, що через базу протікає також і струм зворотно зміщеного колекторного переходу, можна записати:

$$I_b = (1 - \alpha) I_e - I_{ko}. \quad (8)$$

Вирази (5) і (6) свідчать, що струми в транзисторі пов'язані лінійними співвідношеннями.

Перетворимо ці вирази так, щоб встановити залежність між струмом колектора I_k та струмом бази I_b . Для цього підставимо (6) в (5). Отримаємо:

$$I_k = \alpha(I_k + I_b) + I_{ko},$$

звідки випливає

$$I_k = \frac{\alpha}{1 - \alpha} I_b + \frac{I_{ko}}{1 - \alpha}. \quad (9)$$

Позначимо коефіцієнт передавання базового струму β

$$\beta = \frac{I_k}{I_b} = \frac{\alpha}{1 - \alpha}. \quad (10)$$

Тоді з виразу (9) випливає

$$I_k = \beta I_{\delta} + (1 + \beta) I_{к\epsilon o} = \beta I_k + I_{к\epsilon o} , \quad (11)$$

де $I_{к\epsilon o} = (1 + \beta) I_{кo}$.

Враховуючи, що $I_{к\epsilon o}$ є малим порівняно з βI_{δ} , залежність струму колектора від струму бази можна записати у вигляді

$$I_k = \beta I_{\delta} .$$

Коефіцієнт $\beta = 10 \div 300$ і більше. Його називають коефіцієнтом підсилення транзистора.

Транзистор використовують для підсилення потужності електричного сигналу. Змінюючи невелику вхідну напругу $u_{вх}$ на емітерному переході, можна змінювати струм I_{ϵ} , а, отже, і струм I_k . Змінна складова колекторного струму створює змінну складову спаду напруги u_k на опорі R_k . При цьому енергія джерела живлення спрямовується в навантаження R_k . І хоч $I_k < I_{\epsilon}$ (відсутнє підсилення по струму), приріст напруги на колекторі $\Delta u_k \cdot R_k$ буде набагато більший за приріст напруги на емітері $\Delta u_{\epsilon} = u_{вх}$. Тому потужність змінної (підсиленої) складової в колі колектора буде набагато більша від потужності вхідного сигналу.



Рис. 2. Умовні позначення транзисторів на принципових схемах:

а) транзистор р-п-р типу; б) транзистор п-р-п типу

Принцип дії транзистора п-р-п типу аналогічний, лише напрями струмів, знаки носіїв зарядів та іонів домішок і полярність прикладених напруг будуть протилежними до тих, які мають місце в розглянутому р-п-р транзисторі. На принципових схемах транзистори зображують у вигляді умовних позначень (рис. 2), де стрілка вказує напрям протікання струму емітера.

1.2. Схеми увімкнення транзистора та його вольт-амперні характеристики

Транзистор є триполюсником, тому джерело сигналу й навантаження можна під'єднати до нього за трьома варіантами.

Залежно від того, який вивід транзистора є спільним для входного і вихідного сигналів, розрізняють три схеми увімкнення транзистора (рис. 3): а) схема зі спільною базою (СБ) (рис. 3 а); б) схема зі спільним емітером (СЕ) (рис. 3 б); в) схема зі спільним колектором (СК) (рис. 3 в).

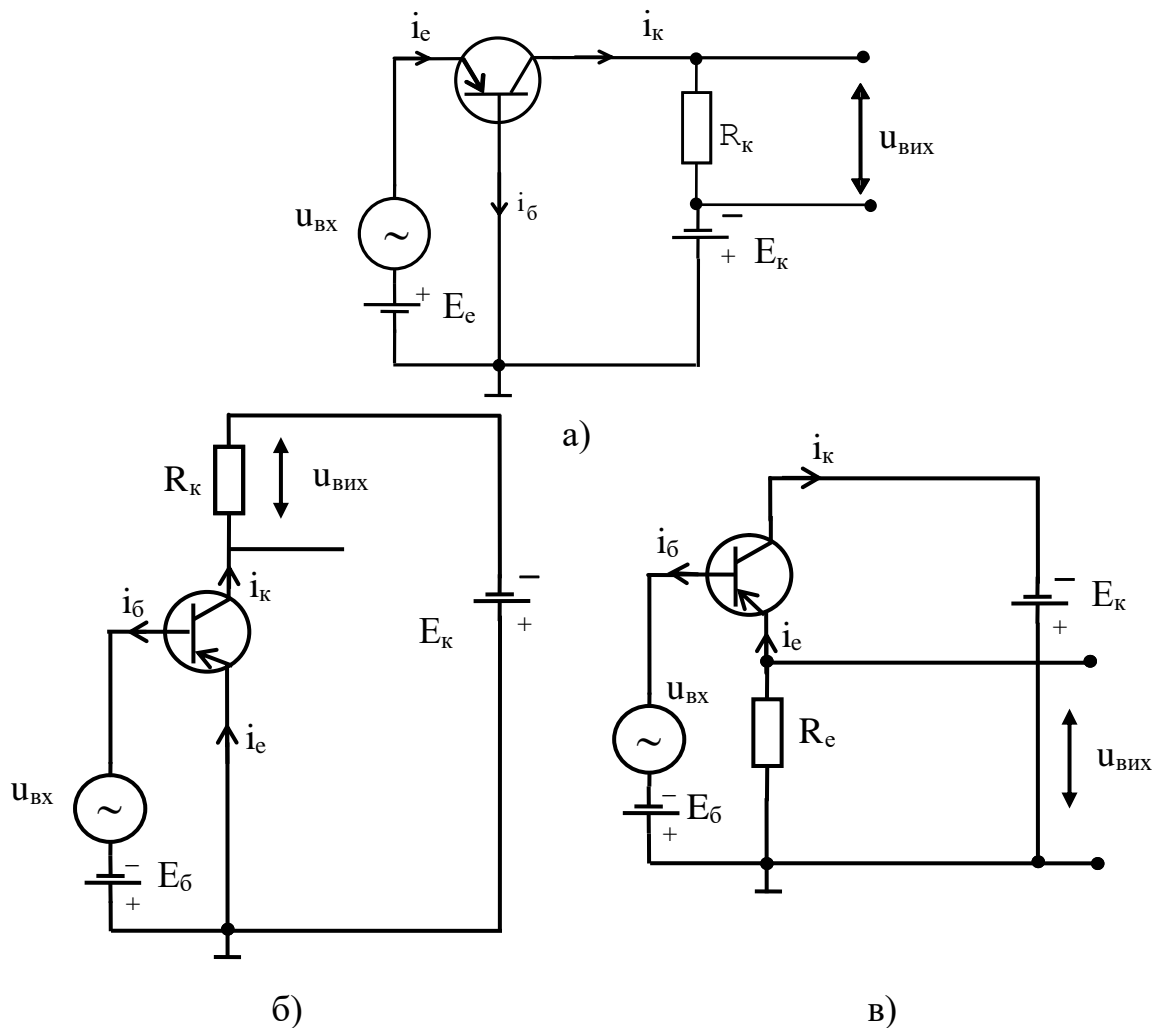


Рис. 3. Схеми увімкнення транзисторів: а) схема СБ; б) схема СЕ; в) схема СК

У цих схемах джерела постійної напруги і резистори забезпечують режими роботи транзисторів на постійному струмі, тобто необхідні значення початкових напруг і струмів. Вхідний змінний сигнал створюється джерелом $u_{вх}$. Він змінює струм емітера транзистора, отже, і струм колектора. Прирости струму колектора (рис. 3а, б) і струму емітера (рис. 3в) відповідно на резисторах R_k і R_e створюють прирости напруг, які є

вихідними сигналами $u_{\text{вих}}$. Параметри схем вибирають так, щоб $u_{\text{вих}}$ було набагато більшим за $u_{\text{вх}}$ (рис.3 а, б) або близьким до нього (рис.3 в).

Вольт-амперні характеристики транзистора у схемі СБ

Основними характеристиками транзистора є його вхідні та вихідні вольт-амперні характеристики (ВАХ). За ними можна визначити основні статичні параметри транзистора. Вигляд ВАХ транзистора залежить від схеми його увімкнення в електричне коло.

Вхідною або емітерною ВАХ транзистора у схемі СБ називають залежність емітерного струму від напруги між емітером і базою $I_e = f(U_{eб})$, зняту при незмінній напрузі між колектором і базою $U_{кб} = \text{const}$.

Сімейство вхідних характеристик для схеми СБ зображено на рис. 4а. Вхідна ВАХ при напрузі на колекторному переході, що дорівнює нулю, аналогічна до прямої вітки ВАХ діода.

При наданні від'ємної напруги колектору відносно бази струм емітера збільшується при незмінній напрузі $U_{eб}$ емітера відносно бази (перехід від точки 1 до точки 2 на рис. 4а).

Це пов'язано з тим, що при подаванні від'ємної колекторної напруги зростає екстракція дірок із бази, тому їх концентрація біля колекторного р-п переходу різко зменшується, тобто градієнт концентрації дірок в області бази зростає у напрямку емітера.

При подальшому збільшенні колекторної напруги струм емітера майже не змінюється, тому що градієнт концентрації майже незмінний. Незначне зростання струму I_e (від точки 2 до точки 3 на рис. 4 а) зумовлене зменшенням товщини бази за рахунок розширення колекторного переходу при збільшенні зворотної напруги на ньому, що звужує область бази і зменшує рекомбінацію в ній (ефект Ерлі).

Вихідною або колекторною ВАХ транзистора в схемі СБ називають залежність колекторного струму від напруги між колектором і базою $U_{кб}$ при підтриманні постійного струму емітера $I_e = \text{const}$ (рис. 4б).

Вихідна ВАХ при $I_e = 0$ подібна до зворотної ВАХ діода. Струм колектора при $I_e = 0$ є зворотним струмом $I_{к0}$ колекторного переходу.

Збільшення струму емітера від 0 до I_e означає перехід від точки 4 до точки 5 (рис. 4 б).

При зростанні колекторної напруги за постійним струмом емітера струм колектора майже не змінюється. Його незначне зростання (наприклад, перехід від точки 5 до точки 6 на рис. 4б) зумовлене за рахунок ефекту Ерлі. Зменшення ж рекомбінації викликає незначне збільшення коефіцієнта передавання α і збільшення колекторного струму.

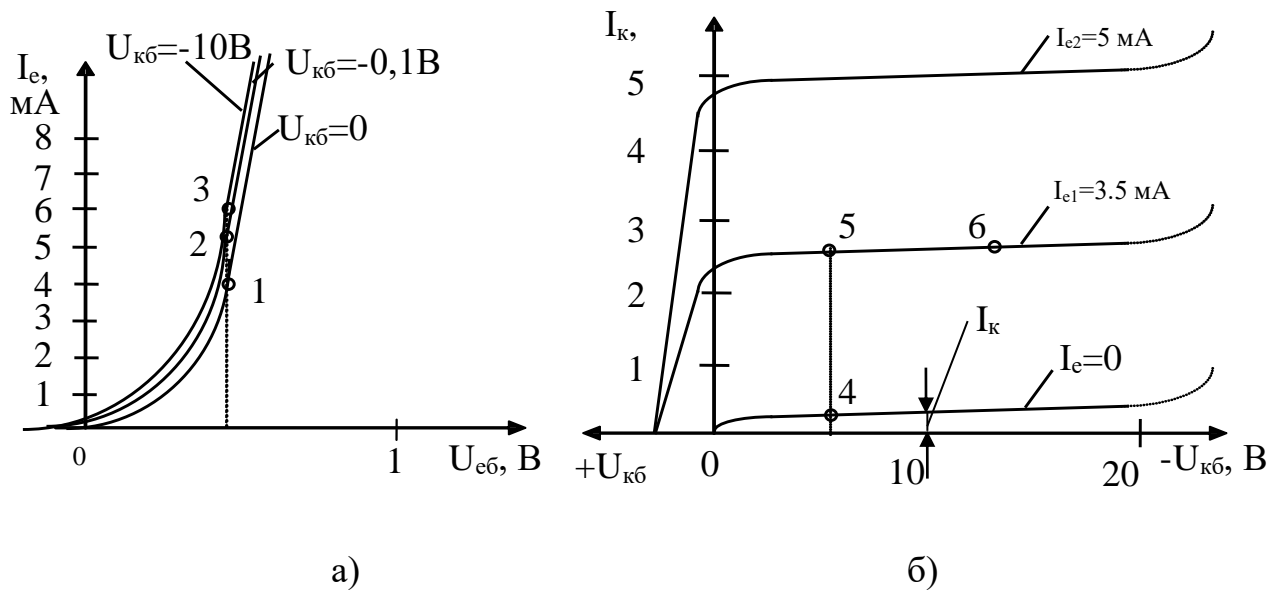


Рис. 4. Вольт-амперні характеристики транзистора в схемі СБ:
а) входні; б) вихідні

На пологій ділянці ВАХ (при $|U_{кб}| \geq 0$) транзистор можна розглядати як прилад, що має властивості керованого джерела струму, тобто джерела струму I_k , значення якого можна змінювати шляхом зміни струму I_e . Тому полого ділянка ВАХ використовується для підсилення електричних сигналів.

Вольт-амперні характеристики транзистора у схемі СЕ

Вхідні й вихідні вольт-амперні характеристики транзистора, увімкненого за схемою зі спільним емітером, наведені відповідно на рис. 5а та б.

Вхідна характеристика віддзеркалює зв'язок між струмом бази I_b і напругою між базою й емітером $U_{бe}$ при постійній напрузі на колекторі відносно емітера $U_{кe} = \text{const}$.

Розглянемо вхідну характеристику транзистора при $U_{кe} = 0$. По суті, транзистор у цьому випадку можна розглядати як два паралельно увімкнені діоди. Тому точки 1 ВАХ відповідає рівномірний розподіл концентрації дірок у базі. Емітер має додатний потенціал відносно бази. Потенціал колектора відносно бази також додатний, оскільки він дорівнює потенціалу емітера, тобто обидва "діоди" зміщені в прямому напрямі. Тому вхідна характеристика в цьому випадку є ВАХ двох р-п переходів, увімкнених паралельно.

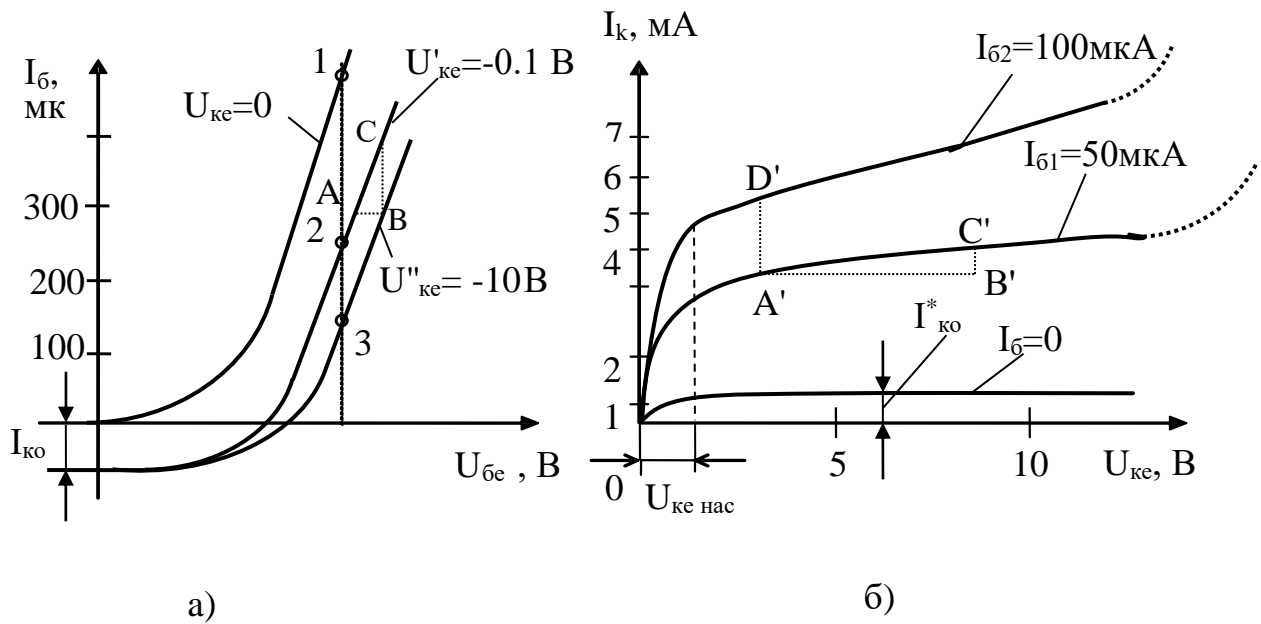


Рис. 5. ВАХ транзистора в схемі СЕ: а) входні; б) вихідні

При збільшенні колекторної напруги $U_{ке}$ на колекторному переході з'являється зворотна напруга, а на емітерному – зберігається пряма напруга. Струм бази в цьому режимі, зумовлений процесом рекомбінації неосновних носіїв у базі, дорівнює різниці емітерного й колекторного струмів.

Вихідною або колекторною ВАХ транзистора у схемі СЕ називають залежність колекторного струму I_k від напруги $U_{ке}$, яку знято при незмінному струмі бази $I_b = \text{const}$ (рис. 5 б).

На більшій частині вихідної ВАХ при $|U_{ке}| > |U_{ке \text{ нас}}|$ струм колектора незначно залежить від напруги $U_{ке}$ (полога ділянка ВАХ). Як і в схемі СБ на цій ділянці транзистор можна вважати керованим джерелом струму, тобто джерелом I_k , значення якого можна змінювати шляхом зміни I_b .

Невеликий нахил пологої ділянки ВАХ (але більший ніж для схеми СБ) зумовлений ефектом Ерлі.

На крутій ділянці ($|U_{ке}| < |U_{ке \text{ нас}}|$) між колектором і базою діє мала напруга і при $U_{ке} = U_{ке \text{ нас}} = U_{бе}$ напруга $U_{кб} = U_{ке} - U_{бе}$ змінює свій знак. При подальшому зменшенні $U_{ке}$ до нуля колекторний перехід буде під прямою напругою. Назустріч потоку дірок із емітера в базу рухається потік дірок із колектора в базу. У результаті колекторний струм різко падає. На цій ділянці ВАХ транзистор втрачає підсилювальні властивості. Цю частину ВАХ використовують в ключовому режимі роботи транзистора.

1.3. Визначення h-параметрів транзисторів за їх ВАХ

Для аналітичного розрахунку транзисторних каскадів з метою кількісного оцінювання їх параметрів користуються малосигнальними еквівалентними схемами (схемами заміщення) транзисторів, призначеними для змінних напруг і струмів, причому зміни напруг і струмів лежать у межах лінійних ділянок ВАХ. Тому такі схеми можна вважати лінійними колами. Їх поділяють на дві групи:

- еквівалентні схеми, побудовані з урахуванням фізичної структури транзистора (фізичні еквівалентні схеми);
- еквівалентні схеми транзистора як активного лінійного чотириполюсника.

Хоча транзистор є суттєво нелінійним елементом, малосигнальні еквівалентні схеми є лінійними, тому що прирости напруг і струмів у режимі малих змін сигналів є настільки незначними, що зв'язок між цими приростами вважається лінійним, тобто ці прирости не виходять за межі лінійних ділянок ВАХ.

Еквівалентні схеми транзистора та значення параметрів цих схем залежать від схеми увімкнення транзисторів (СБ, СЕ, СК).

У напівпровідниковій техніці широкого поширення набули h-параметри транзистора, які відповідають його еквівалентній схемі у вигляді чотириполюсника, причому зв'язок між вхідними і вихідними напругами й струмами чотириполюсника в системі h-параметрів можна виразити системою рівнянь

$$\begin{cases} u_1 = h_{11}i_1 + h_{12}u_2 \\ i_2 = h_{21}i_1 + h_{22}u_2. \end{cases} \quad (12)$$

У системі h-параметрів за незалежні змінні прийнято змінний струм на вході i_1 (i_e – для схеми СБ, i_b – для схеми СЕ) і напругу на виході транзистора ($u_{кб}$ – для схеми СБ, $u_{ке}$ – для схеми СЕ), а як залежні змінні прийнято вхідну напругу u_1 ($u_{еб}$ – для СБ, $u_{бе}$ – для СЕ) та вихідний струм i_2 (i_k для СБ та СЕ).

Широкого поширення h-параметри набули завдяки простоті їх визначення за ВАХ транзисторів за допомогою графоаналітичного методу.

З виразів (12) можна визначити:

$h_{11} = \left. \frac{u_1}{i_1} \right|_{u_2=0}$ - вхідний опір транзистора у режимі короткого замикання на його виході;

$h_{12} = \left. \frac{u_1}{u_2} \right|_{i_1=0}$ - коефіцієнт зворотного зв'язку транзистора по напрузі у режимі холостого ходу на вході;

$h_{21} = \left. \frac{i_2}{i_1} \right|_{u_2=0}$ - коефіцієнт передавання (підсилення) транзистора по струму у режимі короткого замикання на вході;

$h_{22} = \left. \frac{i_2}{u_2} \right|_{i_1=0}$ - вихідна провідність у режимі холостого ходу на вході.

Для визначення всіх h -параметрів необхідно мати два сімейства вхідних і вихідних характеристик. Параметри розраховують за скінченними приростами струмів і напруг поблизу робочої точки транзистора.

Розглянемо визначення h -параметрів для транзистора у схемі СЕ. Для цього в робочій точці А на вхідних характеристиках будують трикутник АВС (із А проводять прямі, паралельні осі абсцис і осі ординат до перетину з другою характеристикою в точках В і С (рис.5а), а на вихідних характеристиках – трикутник А'В'С' (рис. 5 б).

Із трикутника АВС отримують усі необхідні величини для визначення h_{11e} і h_{12e} :

$$h_{11e} = \frac{\Delta U_{\bar{b}e}}{\Delta I_{\bar{b}}} = \frac{AB}{AC}; \quad h_{12e} = \frac{\Delta U_{\bar{b}e}}{\Delta U_{\bar{k}e}} = \frac{AB}{U''_{\bar{k}e} - U'_{\bar{k}e}}.$$

У робочій точці А' вихідної ВАХ (рис. 5б) визначають параметри h_{21e} і h_{22e} :

$$h_{21e} = \frac{\Delta I_{\bar{k}}}{\Delta I_{\bar{b}}} = \frac{A'D'}{I_{\bar{b}2} - I_{\bar{b}1}}; \quad h_{22e} = \frac{\Delta I_{\bar{k}}}{\Delta U_{\bar{k}}} = \frac{B'C'}{A'B'}.$$

Аналогічно можна визначити h -параметри $h_{11\bar{b}}$, $h_{12\bar{b}}$, $h_{21\bar{b}}$, $h_{22\bar{b}}$ і для схеми СБ з відповідних ВАХ транзистора у схемі СБ:

$$h_{11\bar{b}} = \frac{\Delta U_{e\bar{b}}}{\Delta I_e}; \quad h_{12\bar{b}} = \frac{\Delta U_{e\bar{b}}}{\Delta U_{\bar{k}\bar{b}}};$$

$$h_{21\bar{b}} = \frac{\Delta I_{\bar{k}}}{\Delta I_e}; \quad h_{22\bar{b}} = \frac{\Delta I_{\bar{k}}}{\Delta U_{\bar{k}\bar{b}}}.$$

Значення h -параметрів залежать від вибору робочої точки, температури, частоти та схеми ввімкнення транзистора.

Знаючи h -параметри, можна перерахувати їх у параметри фізичних еквівалентних схем за формулами, наведеними в літературі.

2. Опис стендів для зняття вольт-амперних характеристик біполярних транзисторів

2.1. Схема стенда для зняття вольт-амперних характеристик транзистора у схемі з спільною базою зображена на рис. 6.

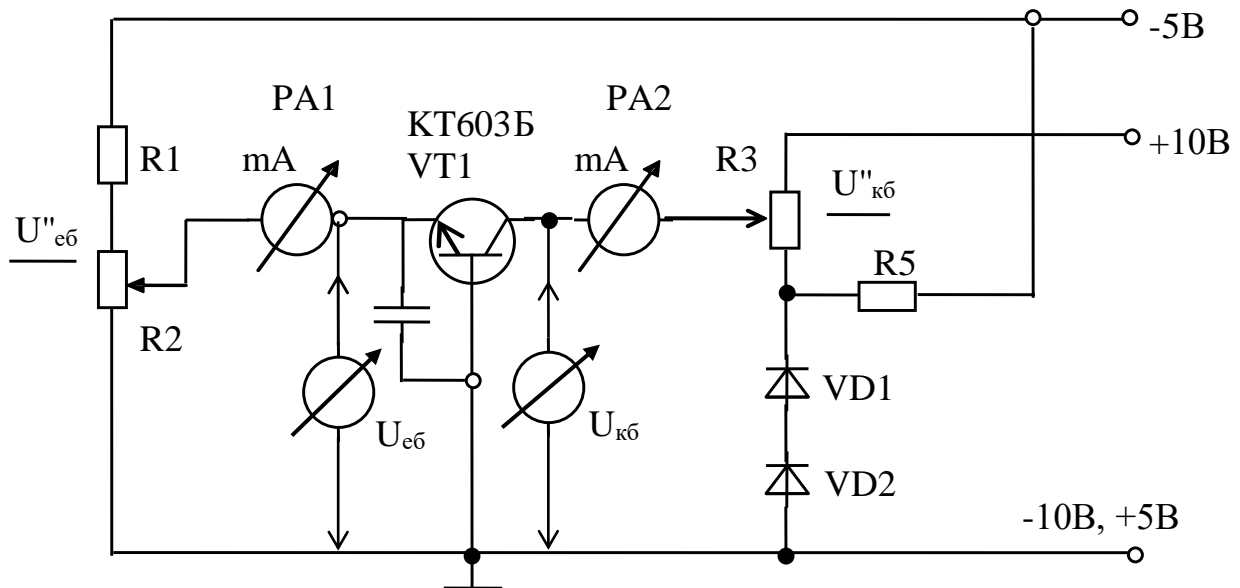


Рис. 6. Схема для зняття ВАХ транзистора у схемі СБ

Живлення стенда здійснюється від стабілізованих джерел живлення з напругами -5В і $+10\text{В}$.

Зміна напруги $U_{eб}$ між емітером і базою виконується за допомогою потенціометра $R2$ “ $U_{eб}$ ”, а напруга $U_{кб}$ між колектором і базою – за допомогою потенціометра $R3$ “ $U_{кб}$ ”. Резистор $R5$ і діоди $VD1$, $VD2$ утворюють джерело від’ємної напруги приблизно $-1,3\text{В}$, необхідної для регулювання колекторної напруги в межах від $+10\text{В}$ до $-1,5\text{В}$.

Для вимірювання струмів бази I_b та колектора I_k служать міліамперметри $PA1$ і $PA2$ відповідно.

Для вимірювання напруг U_{be} та U_{ek} призначений цифровий мультиметр типу Щ4300.

2.2. Схема стенда для зняття вольт-амперних характеристик транзистора в схемі зі спільним емітером зображена на рис. 7.

Живлення стенда здійснюється від стабілізованого джерела живлення $+10\text{В}$. Для зміни напруги U_{be} між базою і емітером досліджуваного транзистора $VT1$ служить потенціометр $R2$. Для зміни напруги $U_{ке}$ між колектором і емітером транзистора служить потенціометр $R4$. Транзистор $V2$ - це емітерний повторювач, призначений для зменшення вихідного опору регульованого джерела напруги $U_{кб}$. Для вимірювання струму бази I_b служить мікроамперметр $PA1$, а для

вимірювання струму колектора I_k – міліамперметр PA2. Для вимірювання напруг U_{be} і U_{ke} призначений цифровий мультиметр типу Ц4300.

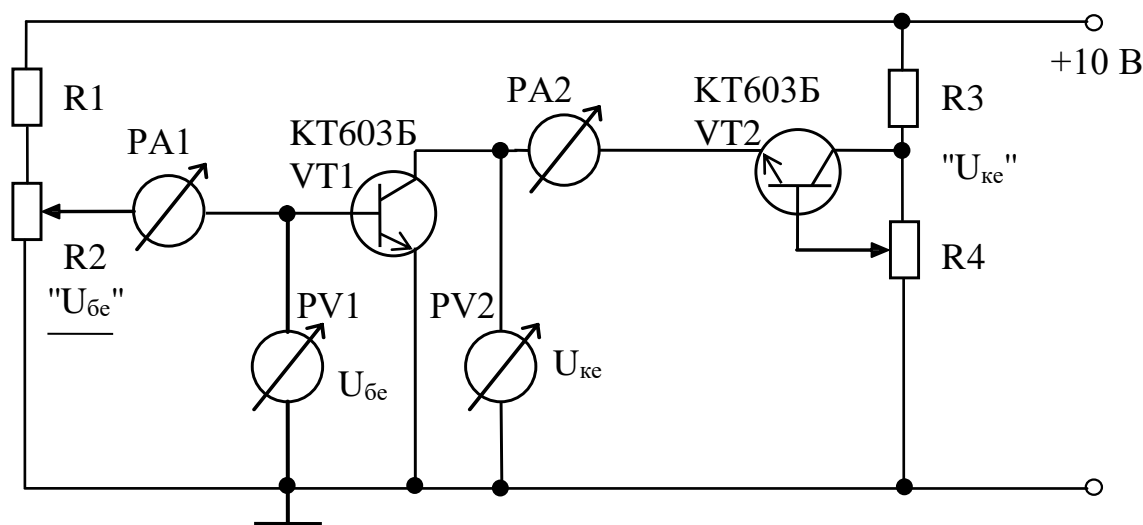


Рис. 7. Схема для зняття ВАХ транзистора у схемі СЕ

3. Підготовка до роботи

3.1. Користуючись навчальними посібниками [1÷5], вивчити принцип дії, основні властивості, характеристики та параметри біполярних транзисторів у схемах зі спільною базою та спільним емітером.

3.2. Накреслити схеми для зняття сімейств статичних вхідних і вихідних вольт-амперних характеристик транзисторів у схемі зі спільною базою (рис. 6) та у схемі зі спільним емітером (рис. 7).

4. Проведення досліджень

4.1. Зняття сімейств вхідних та вихідних ВАХ у схемі СБ.

4.1.1. Зняти залежності емітерного струму I_e від напруги між емітером і базою для двох значень напруги між колектором і базою $U_{кб}$, які дорівнюють 0В і 5В. Для цього змінювати струм емітера в межах від 0 до 5 мА за допомогою потенціометра “ $U_{eб}$ ”.

Результати вимірювань записати в таблицю 1.

Таблиця 1

$U_{кб}=0$ В	$I_e, \text{мА}$	0	0,05	0,1	0,5	1	2	3	4	5
	$U_{eб}, \text{В}$									
$U_{кб}=5$ В	$I_e, \text{мА}$	0	0,05	0,1	0,5	1	2	3	4	5
	$U_{eб}, \text{В}$									

4.1.2. Зняти залежності колекторного струму I_k від напруги між колектором і базою $U_{кб}$ для трьох значень струму I_e , які дорівнюють 2мА,

3 мА, 4 мА. Значення струму I_e підтримувати постійним за допомогою потенціометра “ $U_{eб}$ ”. Напругу на колекторі регулювати потенціометром “ $U_{кб}$ ” у межах від $-0,7$ до $+10$ В. Результати вимірювань записати в таблицю 2.

Таблиця 2

$I_e=2\text{мА}$	$U_{кб},\text{В}$	-0,65	-0,63	-0,62	-0,59	0	2	5	8
	$I_{к},\text{мА}$								
$I_e=3\text{мА}$	$U_{кб},\text{В}$	-0,67	-0,66	-0,61	-0,6	0	2	5	8
	$I_{к},\text{мА}$								
$I_e=4\text{мА}$	$U_{кб},\text{В}$	-0,68	-0,67	-0,65	-0,62	0	2	5	8
	$I_{к},\text{мА}$								

4.2 Зняття сімейств вхідних та вихідних ВАХ у схемі СЕ

4.2.1. Зняти залежності базового струму I_b від напруги між базою й емітером для двох значень напруг між колектором і емітером $U_{ке}$, які дорівнюють 0В і 5В. Для цього необхідно змінювати струм бази в межах від 0 до 250 мкА за допомогою потенціометра “ $U_{бe}$ ”.

Результати вимірювань записати в таблицю 3.

Таблиця 3

$U_{ке}=0,$ В	$I_b, \text{мкА}$	0	5	25	50	100	150	200	250
	$U_{бe}, \text{В}$	0							
$U_{ке}=5,$ В	$I_b, \text{мкА}$	0	5	25	50	100	150	200	250
	$U_{бe}, \text{В}$	0							

4.2.2. Зняти залежності колекторного струму I_k від напруги між колектором і емітером $U_{ке}$ для трьох значень струму I_b , які дорівнюють 50 мкА, 100 мкА, 150 мкА. Значення струму I_b підтримувати постійним за допомогою потенціометра “ $U_{бe}$ ”. Напругу на колекторі регулювати потенціометром “ $U_{ке}$ ” у межах від 0 до 10В. Результати вимірювань записати в таблицю 4.

Таблиця 4

$U_{ке}, \text{В}$		0	0,1	0,2	0,3	1	2	4	6	8
$I_k, \text{мА}$	$I_b=50\text{мкА}$									
	$I_b=100\text{мкА}$									
	$I_b=150\text{мкА}$									

5. Опрацювання експериментальних даних

5.1. Користуючись отриманими експериментальними даними, побудувати сімейства вихідних і вхідних вольт-амперних характеристик транзистора у схемах зі спільною базою та спільним емітером.

5.2. За допомогою ВАХ графоаналітичним методом визначити h -параметри транзистора у схемах СБ і СЕ та пояснити їх фізичний зміст.

5.3. Порівняти отримані значення h -параметрів для двох схем ввімкнення та зробити висновки.

5.4 Провести порівняльний аналіз h -параметрів транзисторів у схемах СБ і СЕ.

6. Контрольні запитання

1. Пояснити принцип дії біполярного транзистора.
2. Пояснити хід вольт-амперних характеристик у транзисторі, ввімкненому за схемою СБ і СЕ.
3. Записати вирази, якими описують залежності між струмами емітера, бази та колектора.
4. Показати напрями протікання струмів емітера, бази та колектора для транзисторів типу р-п-р та п-р-п.
5. Якими чинниками зумовлені інерційні та частотні властивості біполярних транзисторів?
6. Зобразити малосигнальні еквівалентні схеми біполярного транзистора у схемі з СБ та СЕ.
7. Пояснити фізичний зміст h -параметрів біполярного транзистора.
8. У колі транзистора з коефіцієнтом підсилення $\beta = 49$ протікає струм емітера $I_e = 100$ мА. Знайти величину струму бази I_b .

7. Рекомендована література

1. Колонтаєвський Ю.П., А.Г. Сосков. Електроніка та мікросхемотехніка. К.: Каравела, 2009.
2. Основи електроніки : навч. посіб. / А. С. Васюра, Г. Д. Дорощенко, В. П. Кожем'яко, Г. Л. Лисенко. – Вінниця : ВНТУ, 2018. – 197 с.
3. Бобало Ю.Я., Мандзій Б.А., Стахів П.Г, Писаренко Л.Д., Якименко Ю.І. Основи теорії електронних кіл. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2008. – 332с.
4. Матвієнко М.П. Основи електроніки. / Видавництво: Ліра К. – 2019.- 364 с.
5. Microelectronic Circuits 7th Edition, International Edition /Adel S. Sedra, Kenneth Carless Smith / Oxford University Press, 2015. – 1436 pp.
6. Промислова електроніка [Текст]: Методичні вказівки до лабораторних робіт і завдання для самостійної роботи / А.М. Лупенко. Тернопіль.: Видавництво ТНТУ, 2009. 129с.

Лабораторна робота №3

ДОСЛІДЖЕННЯ ВОЛЬТ-АМПЕРНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛЬОВОГО ТРАНЗИСТОРА

Мета роботи: зняття вольт-амперних характеристик і визначення деяких важливих параметрів польових транзисторів з ізолюючим p - n переходом.

1. Теоретичні відомості

Польовий транзистор (ПТ) – це транзистор, струм у якому створюють основні носії заряду під дією поздовжнього електричного поля, а керування струмом здійснюється поперечним полем, зумовленим напругою на керуючому електроді. ПТ – уніполярні напівпровідникові прилади, оскільки їх робота базується на дрейфі носіїв заряду одного знака у поздовжньому електричному полі через керований канал n чи p типу. Для виготовлення ПТ в основному використовують кремній, який забезпечує значно менший зворотний струм p - n переходу, ніж германій.

В електричних пристроях застосовують два види ПТ: із затвором у вигляді p - n переходу та з ізолюваним затвором.

Залежно від провідності каналу польові транзистори поділяють на ПТ з каналом p -типу і з каналом n -типу. Канал p -типу має діркову провідність, а канал n -типу – електронну.

На рис.1 зображено структуру ПТ із затвором у вигляді p - n переходу і каналу n -типу. На затвор подається напруга зворотної полярності відносно витоку. Ширина p - n переходів і, відповідно, ефективна площа поперечного перерізу каналу, його опір і струм у каналі залежать від цієї напруги.

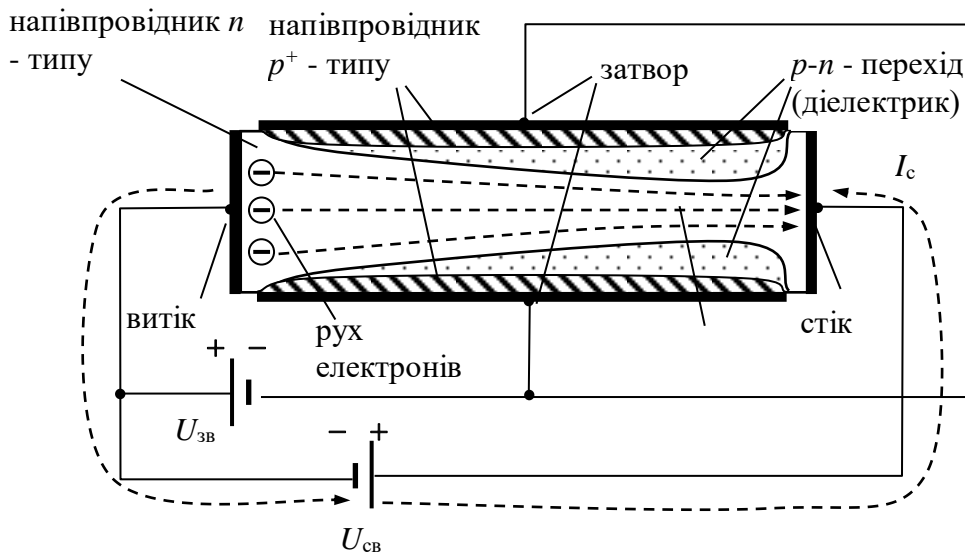


Рис. 1. Структура ПТ

При зростанні напруги розширюються $p-n$ переходи, зменшується площа перерізу каналу, збільшується його опір i , відповідно, зменшується струм у каналі. Ці процеси ілюструє прохідна або стокозатворна характеристика (характеристика передавання) такого ПТ (рис.2а). При напрузі відсічки на затворі $|U_{зв}| = |U_{зв.відс}|$ канал практично замикається, ефективна площа його поперечного перерізу прямує до нуля, опір каналу прямує до нескінченності, а струм стоку $I_c = 0$. $I_{c\text{ поч}}$ – початковий струм стоку.

Слід звернути увагу, що ПТ із затвором у вигляді $p-n$ переходу працює при керуючій напрузі “затвор-витік” лише однієї полярності (для каналу n -типу – від’ємній, а для p -типу – додатний).

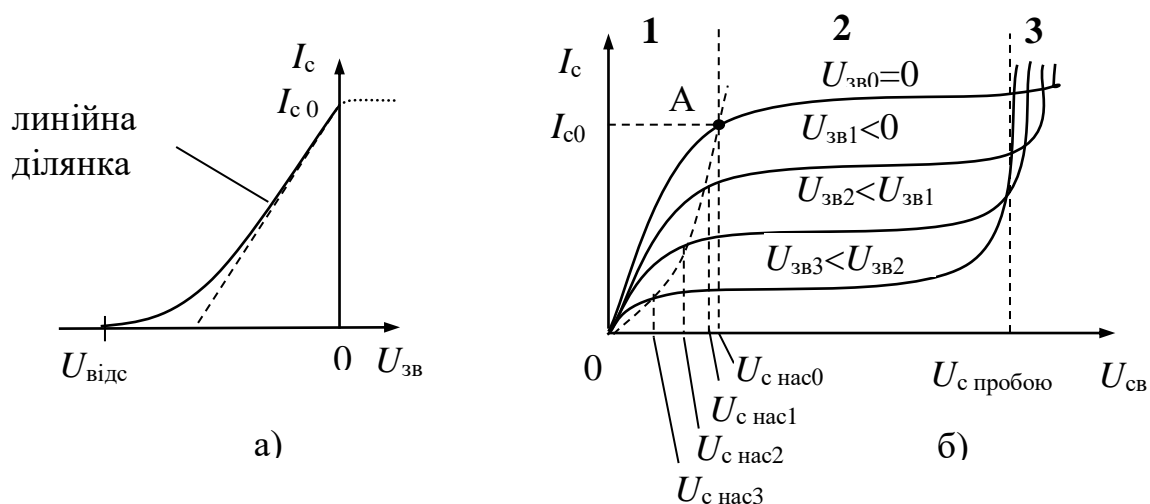


Рис. 2. Вольт-амперні характеристики польового транзистора:
а) прохідна; б) вихідна

На рис. 2 б зображені стоківі (вихідні) характеристики розглянутого ПТ, які мають яскраво виражену пологую (лінійну) ділянку насичення. Це пояснюється тим, що в процесі протікання струму в каналі, який спочатку зростає при збільшенні $U_{св}$, збільшується спад напруги на ньому. Цей спад в області стоку має додатний знак, тому зміщує $p-n$ переходи у зворотному напрямі. Площа перерізу каналу починає зменшуватися. Відбувається перекидання каналу спочатку в області стоку, а потім воно поширюється в глибину до витоку (рис.1). Це призводить до того, що величина струму I_c практично не змінюється при збільшенні $U_{св}$.

Границями області насичення є:

$$U_{св.нас} = U_{зв.відс} \quad \text{при } U_{зв} = 0 \quad (\text{при цьому } I_c = I_{c.нас});$$

$U_{св.нас} = U_{зв.відс} - U_{зв}$ при $U_{зв} \neq 0$ (при цьому $I_{c.нас}$ зменшується), де $U_{св.нас}$ – напруга між стоком і витоком, що відповідає границі області насичення;

$U_{зв.нас.}$ – напруга між затвором і витокком, що відповідає границі області відсічки.

У робочому режимі використовують пологі (лінійні) ділянки вихідних характеристик ПТ. При великих напругах на стоку може статися пробій структури ПТ. Тому в робочому режимі перевищення максимальної напруги $U_{св.мах}$ забороняється.

Підсилювальні властивості ПТ описуються крутизною характеристики

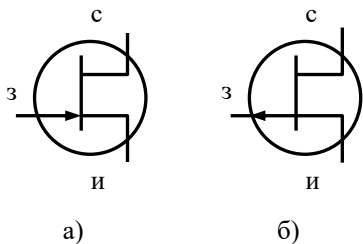
$$S = \frac{di_{св}}{du_{зв}}, \text{ при } U_{св} = const.$$

Гранична частота польового транзистора визначається сталою часу, яка дорівнює добутку ємності затвора на опір каналу. Аналіз показує, що опір каналу дорівнює $1/S$. Тому стала часу ПТ дорівнює

$$T = \frac{C_з}{S},$$

де $C_з$ – ємність затвора.

У реальних схемах на сталу часу впливають зовнішні ємності та опори.



Умовні позначення польового транзистора з каналом:
а) n -типу; б) p -типу

Польові транзистори мають такі основні властивості:

- низький рівень власних шумів (відсутній рекомбінаційний флуктуаційний шум, характерний для біполярних транзисторів), високий вхідний опір, високу економічність (керується не струмом, як біполярний транзистор, а напругою (полем));
- високу стійкість до дії іонізуючого випромінювання та високу радіаційну здатність;
- меншу, ніж у біполярних транзисторах, залежність параметрів від температури, відсутність залишкової напруги між витокком і стоком відкритого транзистора.

ПТ застосовують у вхідних підсилювальних каскадах із високим вхідним опором, у запам'ятовуючих пристроях, при виготовленні інтегральних схем із високим ступенем інтеграції, для комутації аналогових сигналів та інших пристроях.

2. Підготовка до роботи

- 2.1. Користуючись навчальними посібниками [1- 7], вивчити принцип дії, основні характеристики і параметри польового транзистора з затвором у вигляді р-п переходу.
- 2.2. Накреслити схему (рис. 3) для зняття вольт-амперних характеристик ПТ.
- 2.3. Виписати з довідника [6] основні параметри ПТ типу КП103М:
 - крутизну S ;
 - початковий струм стоку $I_{c \text{ поч.}}$;
 - напругу відсічки затвор-витік $U_{зв \text{ відс.}}$.

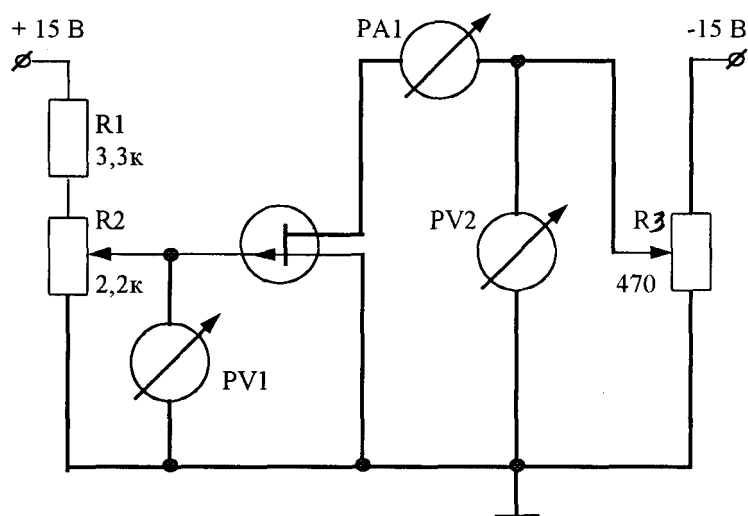


Рис.3. Схема для зняття вольт-амперних характеристик польового транзистора

3. Проведення досліджень

Зверніть увагу! У теоретичних відомостях розглянуто польовий транзистор з каналом *n*-типу, а експериментальні дослідження на стенді лабораторної роботи проводяться для транзистора з каналом *p*-типу. Тому полярності джерел живлення і відповідні напруги в схемі змінені на протилежні.

- 3.1. Увімкнути блок живлення лабораторного пристрою К4826 і встановити напругу на гніздах “+15В” і “-15В”, яка дорівнює номінальному значенню. Вимкнути блок живлення.
- 3.2. Зібрати схему (рис.3) для зняття вольт-амперних характеристик ПТ.
- 3.3. Зняти стокозатворну характеристику польового транзистора $I_c = f(U_{зв})$ при $U_{св} = -5В$. Регулювання напруги $U_{зв}$ здійснювати потенціометром R2. Результати вимірювань записати в табл.1.

Таблиця 1

$U_{зв}, B$	0	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,5	2	3	4	5
I_c, mA												

3.4. Зняти сімейство вольт-амперних характеристик $I_c=f(U_{св})$ при $U_{зв}=const.$

Регулювання напруги $U_{св}$ здійснювати потенціометром R3. Результати вимірювань записати в табл. 2.

Таблиця 2

$U_{св}, B$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	2	3	4	5	6
$I_c, mA \ U_{зв}=0 B$											
$I_c, mA \ U_{зв}=0,2 B$											
$I_c, mA \ U_{зв}=0,4 B$											
$I_c, mA \ U_{зв}=0,6 B$											
$I_c, mA \ U_{зв}=0,8 B$											

4. Опрацювання експериментальних даних

- 4.1. Користуючись таблицями 1 і 2, побудувати вольт-амперні характеристики.
- 4.2. На основі побкдованих характеристик визначити основні параметри польового транзистора, а саме :
- напругу відсічки $U_{відс}$;
 - крутизну лінійної ділянки

$$S = \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{зв}} \left[\frac{mA}{B} \right];$$

в) початковий струм стоку $I_{споч}$;

г) внутрішній опір транзистора $R_i = \frac{\Delta U_c}{\Delta I_c}$ при $U_{зв}=const.$

5. Контрольні запитання

- Поясніть принцип роботи польового транзистора із затвором у вигляді р-п переходу.
- Наведіть вольт-амперні характеристики ПТ із керуючим р-п переходом і поясніть їх.
- Охарактеризуйте основні параметри польового транзистора.
- Чим пояснити менший рівень власних шумів ПТ порівняно з біполярним транзистором?

5. Чим пояснити наявність ділянки насичення струму стоку I_c на вихідних (стокових) вольт-амперних характеристиках ПТ?
6. Назвіть основні переваги польових транзисторів із р-п переходом у порівнянні з біполярними транзисторами.
7. Назвіть основні області застосування польових транзисторів.

Література

- 1 Колонтаєвський Ю.П., Сосков А.Г. Промислова електроніка та мікросхемотехніка: теорія і практикум. К.: Каравела, 2021. – 496 с.
2. Колонтаєвський Ю.П., Сосков А.Г. Електроніка та мікросхемотехніка. К.: Каравела, 2009. – 416 с.
3. Основи електроніки : навч. посіб. / А. С. Васюра, Г. Д. Дорощенко, В. П. Кожем'яко, Г. Л. Лисенко. – Вінниця : ВНТУ, 2018. – 197 с.
4. Матвієнко М.П. Основи електроніки. / Видавництво: Ліра К. – 2019.- 364 с.
5. Буняк А. Електроніка та мікросхемотехніка. Київ – Тернопіль, 2001. - 382 с.
6. Промислова електроніка [Текст]: Методичні вказівки до лабораторних робіт і завдання для самостійної роботи / А.М. Лупенко. Тернопіль.: Видавництво ТНТУ, 2009. 129с.

ЗМІСТ

Вступ.....	3
Лабораторна робота №1. Дослідження напівпровідникових діодів.....	4
Лабораторна робота №2 Дослідження біполярних транзисторів у схемах зі спільною базою та спільним емітером	13
Лабораторна робота №3 Дослідження вольт-амперних характеристик польового транзистора.....	27
Література.....	34