

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до лабораторних робіт з дисципліни
«Технологічні основи електроніки»
для студентів спеціальності
153 «Мікро- та наносистемна техніка»

Затверджено
на засіданні кафедри фізичного
матеріалознавства для електроніки
та геліоенергетики,
протокол №7 від 30.01.2019 р.

Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни «Технологічні основи електроніки» для студентів спеціальності 153 «Мікро- та наносистемна техніка». / Уклад.: М.В. Кіріченко, Р.В. Зайцев, К.О. Мінакова, А.М. Дроздов. – Харків: НТУ «ХПІ», 2019. – 47 с.

Укладачі: М.В. Кіріченко,
Р.В. Зайцев,
К.О. Мінакова,
А.М. Дроздов

Рецензент проф. Г.С. Хрипунов

Кафедра фізичного матеріалознавства для електроніки та
геліоенергетики

ВСТУП

Методичні вказівки містять лабораторні роботи для студентів усіх спеціальностей. Основна спрямованість методичних вказівок з предмету «Технологічні основи електроніки» – дати можливість студентам за допомогою досліду ознайомитись з принципами роботи базових електронних приладів. Опис лабораторних робіт не претендує на те, щоб створити у студентів повне уявлення про явища, які вивчаються. Таке уявлення може виникнути лише внаслідок опрацювання лекцій та підручників. Для успішного виконання робіт необхідна попередня самостійна підготовка, в першу чергу теоретична.

Кожна лабораторна робота розрахована на дві академічні години занять у лабораторії. Перед заняттям студент повинен підготувати протокол лабораторної роботи, вивчивши відповідний теоретичний матеріал. Під час заняття студенти проводять необхідні виміри, виконують розрахунки, доводять звіт до висновку. Результати вимірювання обговорюються з викладачем і затверджуються. Повністю оформлений звіт по лабораторній роботі потрібно подати викладачу до кінця заняття. Він повинен містити: титульний лист, номер лабораторної роботи та її назву, перелік приладів і обладнання, мету роботи, схему установки, розрахункові формули, відповіді на контрольні питання, таблицю результатів вимірів і розрахунки, висновки за результатами роботи. Графіки повинні бути виконані на міліметровому папері.

Якщо студент не встигає захистити лабораторну роботу до кінця заняття, дозволяється оформити звіт (графіки) з використанням комп'ютерних програм (Excel, Origin) до наступного заняття.

Лабораторна робота вважається виконаною після успішно проведеного захисту шляхом співбесіди студента з викладачем (захист звіту + оцінка за теоретичний матеріал). Захист звіту: мета роботи + експериментальна методика + висновки. Теоретичний матеріал: знання фізичних явищ, які вивчалися у даній лабораторній роботі (закони, формули).

Заходи безпеки:

1. Збірка електричних схем виконується провідниками із високоякісною ізоляцією при вимкненій напрузі.

2. Вмикання зібраних схем в роботу проводиться тільки з дозволу викладача.

3. Торкатися руками клем, відкритих струмопровідних частин приладів і апаратів при увімкненій напрузі забороняється.

4. Всі перемикання в електричних схемах і їх розбірку необхідно проводити тільки при знятій напрузі. Після виконання роботи електрична схема повинна бути розібрана, робоче місце прибрано, додаткові прилади здані викладачеві.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 1

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПІВПРОВІДНИКОВОГО ВИПРЯМНОГО ДІОДУ

Мета роботи - експериментальне отримання вольт-амперної характеристики випрямного діода і використання її для визначення значень напруги і струму в резистивному ланцюзі.

1.1 Загальні відомості

Напівпровідниковий діод - це прилад з одним електронно-дірковим переходом, утвореним двома шарами (зонами) з напівпровідникових матеріалів (германій, кремній) і з різними p і n - типами провідності. В шарі n -типу вільними носіями заряду є електрони, а в p -провідному шарі - дірки. Провідності p та n - типів отримують введенням певних домішок в базові напівпровідникові матеріали. До напівпровідникових діодів відносяться випрямні, імпульсні, високочастотні і тунельні діоди, світлодіоди, варікапи та стабілітрони. Основної характеристикою діодів як нелінійних безінерційних резистивних елементів є несиметрична нелінійна вольт-амперна характеристика (ВАХ) $I(U)$, яка не залежить від зміни з часом напруги та струмів. Тому ця характеристика зазвичай знімається при постійних напругах і струмах. На рис. 1.1 наведена типова ВАХ $I(U)$ напівпровідникового діода, де вказані напруги і струми при прямому ($U_{пр}$, $I_{пр}$) та зворотному ($U_{зв}$, $I_{зв}$) включеннях. При прямому включенні позитивний потенціал подається на p -шар діода, а негативний потенціал - на n -шар. При зворотному включенні діода потенціали на p - та n -шари подаються навпаки.

При прямому включенні випрямного діода опір p - n -переходу різко знижується і виникає струм, створюваний основними носіями заряду, який називають прямим ($I_{пр}$), а перехід в цей час - відкритим.

При прямому включенні випрямного діода опір p - n -переходу різко знижується і виникає струм, створюваний основними носіями заряду, який називають прямим ($I_{пр}$), а перехід в цей час - відкритим. При зміні полярності напруги на діоді опір p - n -переходу стає великим, струм через нього протікає значно менший і обумовлений неосновними носіями заряду. Цей струм називають зворотним ($I_{зв}$) і часто через його вельми малу величину приймають рівним нулю, а p - n -перехід при цьому вважається закритим.

Таким чином, основною особливістю випрямного діода є $I_{пр} \gg I_{зв}$.

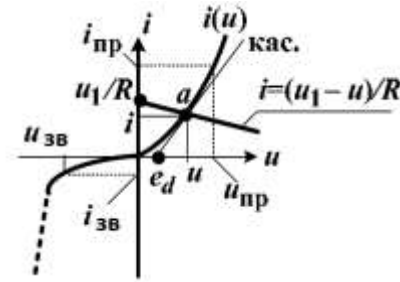


Рис. 1.1 - Типова ВАХ $I(U)$ напівпровідникового діода

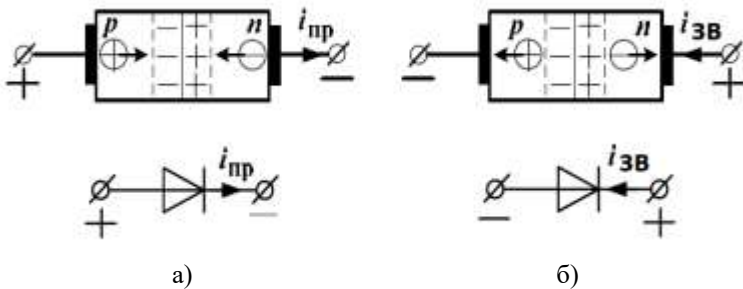


Рис. 1.2 – Пряме (а) та зворотне (б) включення діода

На рис. 1.2 а показані p - та n -шари при прямому включенні діода і умовне позначення діода, а на рис. 1.2, б наведено p - та n -шари і умовне позначення діода при зворотньому включенні. Випрямні діоди використовуються в пристроях, призначених для перетворення змінної напруги і струму в пульсуючі або практично постійні напруги і струми. Ці пристрої називають випрямлячами. Наведена на рис. 1.4 досліджувана електрична схема при синусоїдальній вхідній напрузі U_1 може розглядатися як однонапівперіодний випрямляч. Обмежимося дослідженням прямого включення діода, вважаючи $I_{зв} \approx 0$. Для схеми, наведеної на рис. 1.4, використовуючи другий закон Кірхгофа, можна записати рівняння для струму

$$I = \frac{U_1 - U}{R}. \quad (1.1)$$

Точка перетину прямої лінії навантаження, побудованої за рівнянням (1.1), з ВАХ діода $I(U)$ дозволяє визначити робочу точку a та знайти миттєві значення струму I та напруги U діода (рис. 1.1). Якщо до ВАХ діода $I(U)$ в точці a провести дотичну й визначити на осі U відрізок e_d (рис. 1.1), то тоді диференційний опір діода в цій точці можна розрахувати так

$$r_{\text{диф}} = \frac{dU}{dI} = \frac{U - e_d}{I}. \quad (1.2)$$

Параметри $r_{\text{диф}}$, e_d залежать від величин U , I та використовуються для складання схеми заміщення діода (рис. 1.3).

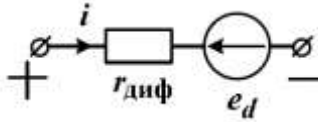


Рис. 1.3 - Схема заміщення діода

В результаті з урахуванням схеми заміщення діода (рис. 1.3) для ланцюга на рис. 1.4 можна записати рівняння за другим законом Кірхгофа

$$U_I = R \cdot I + U = R \cdot I + r_{\text{диф}} \cdot I + e_d$$

на підставі, якого отримуємо формулу для розрахунку струму

$$I = \frac{U_1 - e_d}{R + r_{\text{диф}}}. \quad (1.3)$$

Якщо вхідна напруга ланцюга на рис. 1.4 синусоїдальна $U_1 = 2\sqrt{U_1} \sin(\omega t)$, то, на інтервалі часу $0 < t < \pi/\omega$, коли $U_1 > 0$, струм дорівнює $I = I_{\text{пр}} \approx I_M \sin(\omega t)$, а на інтервалі $\pi/\omega < t < 2\pi/\omega$ отримуємо $I = I_{\text{зв}} \approx 0$. Таким чином, пульсуючий струм I з періодом $T = 2\pi/\omega$ буде характеризуватися постійною складовою (середнє значення)

$$I_0 = \frac{1}{T} \int_0^T i dt \approx I_M / \pi, \quad (1.4)$$

і чинним (середньоквадратичним) значенням

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} \approx I_M / \sqrt{2}. \quad (1.5)$$

При цьому амплітуда струму I_M може бути визначена експериментально за допомогою електронного осцилографа і графічно, коли $U_1 = U_{1M} = \sqrt{2}U_1$ та $I = I_M$ (рис. 1.1).

Схема лабораторної установки показана на рис. 1.4. Прилади в усіх дослідах мають такі ліміти: V_1 - 20 В, V_2 - 2 В, A - 20 мА або 200 мА. У табл. 1.1 наведені для різних варіантів значення опору резистора R і величини амплітуди вхідної синусоїдальної напруги U_{1M} . Для зняття ВАХ $I(U)$ випрямного діода використовується джерело постійної регульованої напруги $U_1 = 0 \div 15$ В. При цьому прилади встановлюються на вимірювання постійних величин напруги та струму. Для визначення значень струму I_M , I_0 і I , які відповідають заданій в табл. 1.1 амплітуді вхідної синусоїдальної напруги U_{1M} , електрична схема підключається до регульованого джерела синусоїдальної напруги і встановлюється частота $f = 200$ Гц, за вольтметром V_1 виставляється напруга $U_1 = 0,707 \cdot U_{1M}$.

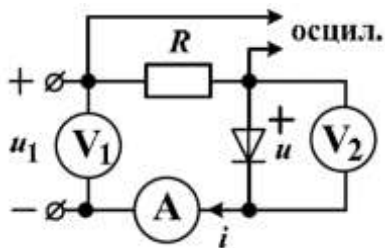


Рис. 1.4 - Схема лабораторної установки

Таблиця 1.1

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$R, \text{ Ом}$	330	220	150	100	150	220	330	470	680	1000
$U_{1m}, \text{ В}$	10	9	8	7	5	6	7	8	9	10

При цьому вольтметри V_1 та V_2 перемикаються для вимірювання змінної напруги. Амплітуда струму I_M визначається за осцилограмою з урахуванням встановленого масштабу напруги $m_U = 1 \div 5 \text{ В}$ та розрахованого масштабу струму $m_I = 1000m_U/R \text{ мА}$, причому масштаб часу $m_T = 1 \div 2 \text{ мс}$, а осцилограф повинен мати відкритий вхід. Постійна складова I_0 струму і діюче значення I його змінної складової фіксуються амперметром, встановленим по черзі на вимір відповідно постійних і змінних струмів. Дійсне значення струму розраховується як

$$I = \sqrt{I_0^2 + (I^{\sim})^2}. \quad (1.6)$$

1.2 Порядок виконання роботи

1. Зібрати електричну схему як показано на рис. 1.4. На вхід схеми підключити джерело регульованої постійної напруги U_1 , змінюючи яку визначити ВАХ $I(U)$ діода. Показання приладів, встановлених на вимірювання постійних величин, занести в табл. 1.2.

Таблиця 1.2

$U_1, \text{ В}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$U, \text{ В}$														
$I, \text{ мА}$														

2. Змінити полярність джерела постійної напруги і переконатися, що зворотний струм дорівнює нулю.

3. Досліджувану схему підключити до джерела регульованої синусоїдальної напруги. Вольтметри переключити на вимірювання змінної напруги. Встановити частоту $f = 200$ Гц і напругу $U_1 = 0,707 U_{1M}$. Увімкнути осцилограф і відрегулювати його так, щоб на екрані було стійке зображення одного періоду струму, записати масштаби часу m_T і напруги m_U . Сфотографувати або замалювати на кальку осцилограму струму. Розрахувати масштаб струму m_I та визначити за осцилограмою його амплітуду I_M . Амперметром виміряти постійну складову I_0 і дійсне значення змінної складової струму I' . За формулою (1.6) розрахувати дійсне значення I . Результати занести в табл. 1.3.

Таблиця 1.3

U_{1m} , В	U_1 , В	m_T , мс/дел	m_U , В/дел	m_I , мс/дел	I_M , мА	I_0 , мА	I' , мА	I , мА

4. За результатами п.1 побудувати ВАХ $I(U)$ діода. У цих же осях за рівнянням (1.1) при заданих значеннях $U_1 = U_{1M}$ та R побудувати пряму лінію навантаження і визначити робочу точку a , графічно знайти значення напруги U та струму I . У точці a ВАХ $I(U)$ провести дотичну і визначити e_d . За формулою (1.2) розрахувати r_{diff} , а за формулою (1.3) при $U_1 = U_{1M}$ обчислити амплітуду струму $I_M = I$. За формулами (1.4) і (1.5) визначити постійну складову I_0 та дійсне значення струму I . Результати занести в табл. 1.4.

Таблиця 1.4

U , В	I' , мА	e_d , В	r_{diff} , Ом	I_M , мА	I_0 , мА	I , мА

5. Проаналізувати отримані результати і сформулювати висновки по роботі.

1.3 Контрольні питання

1. Що являє собою напівпровідниковий діод, які типи діодів ви знаєте?
2. Яким елементом ланцюга є напівпровідниковий діод? Якою залежністю характеризується цей елемент?
3. Яке включення діода є прямим, а яке - зворотним?

4. У чому полягає основна особливість випрямних діодів? Наведіть зображення ВАХ $I(U)$ ідеального випрямного діода.
5. Як побудувати лінію навантаження і визначити робочу точку діода?
6. Як визначити диференціальний опір діода?
7. Запишіть рівняння для напруги U на виводах діода, якщо відомі параметри його схеми заміщення I , $r_{диф}$, e_d .
8. Як експериментально і аналітично визначаються значення періодичного струму I_M , I_0 та I ?

ХАРАКТЕРИСТИКИ НАПІВПРОВІДНИКОВОГО СТАБІЛІТРОНУ

Мета роботи – експериментальне отримання вольт-амперної характеристики стабілітрона і використання її для стабілізації напруги на навантаженні.

2.1 Загальні відомості

Стабілітрон це напівпровідниковий діод *p-n*-типу зазвичай виготовлений на основі кремнію, вольт-амперна характеристика (ВАХ) $I(U)$ якого у відкритому стані така ж, як у випрямного діода. Відмінність стабілітрона від випрямного діода - у відносно низькій напрузі пробую (U_{CT}) при зворотному включенні. Коли цю напруга перевищено, струм зворотного напрямку ($I_{ЗВ}$) зростає стрибком (т. зв. ефект Зенера). У випрямних діодах такий режим є аварійним, а стабілітрони нормально працюють при зворотному струмі, що не перевищує максимально допустимого значення (I_{CT}). Стабілітрони як нелінійні безінерційні резистивні елементи мають несиметричну нелінійну ВАХ, яка не залежить від законів зміни в часі напруги і струму. Тому ця характеристика зазвичай знімається при постійній напрузі та струмі і зворотному включенні стабілітрона в режимі пробую ($U \geq U_{CT}$). На рис. 2.1 наведено типову ВАХ стабілітрона при зворотному включенні, де вказані напруга пробую (стабілізації) U_{CT} і максимально допустимий струм стабілізації I_{CT} . При зворотному включенні позитивний потенціал подається на *n*-шар стабілітрона, а негативний потенціал - на *p*-шар (рис. 2.2, а). На рис. 2.2, б показано умовне позначення стабілітрона. У режимі пробую при значній зміні струму стабілітрона I його напруга U змінюється несуттєво (рис. 2.1). Ця особливість ВАХ стабілітрона використовується для стабілізації і згладжування пульсації напруги на навантаженні (R_2), підключеному паралельно стабілітроні (рис. 2.5). Таким чином, стабілітрони можуть застосовуватися в пристроях, призначених для зменшення зміни вихідної напруги, тобто для її стабілізації, при значній зміні вхідної напруги.

Такі пристрої називають стабілізаторами. Наведена на рис. 2.5 електрична схема експериментальної установки при вхідній напрузі U_1 може розглядатися як стабілізатор напруги U_2 на навантаженні R_2 . Якість стабілізації характеризується коефіцієнтом стабілізації

$$K_{CT} = \frac{\Delta U_1 / U_{1P}}{\Delta U_2 / U_{2P}}, \quad (2.1)$$

де U_{1P} - задана вхідна напруга, а U_{2P} відповідна цьому значенню вихідна напруга; ΔU_1 - задана зміна вхідної напруги щодо U_{1P} , а ΔU_2 відповідна їй зміна вихідної напруги (рис. 2.3).

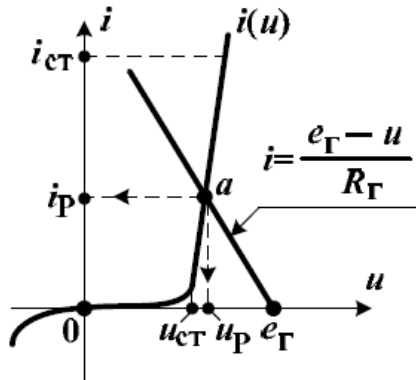


Рис. 2.1 - Типова ВАХ стабілітрона

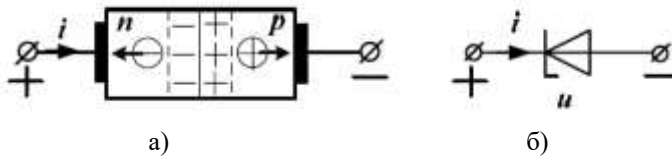


Рис. 2.2 - Зворотнє включення (а) та умовне позначення стабілітрона (б)

Чим більше коефіцієнт K_{CT} , тим краща якість стабілізації. Для запобігання перевантажень стабілітрона включається баластний резистор $R_B = R_1$ (рис. 2.5), величина номіналу якого обчислюється за формулою, отриманою на основі законів Кірхгофа:

$$R_B = R_1 = R_2 \frac{(U_{1P} - U_{CT})}{(U_{CT} + R_2 I_{CT})}. \quad (2.2)$$

Досліджувана схема (рис. 2.5) містить один нелінійний елемент (власне стабілітрон). Тому для такої схеми застосуємо метод еквівалентного генератора, коли лінійна частина схеми замінюється еквівалентним джерелом (генератором) з ЕРС e_G , що дорівнює напрузі холостого ходу U_{XX} при $I = 0$, і з опором R_G , що дорівнює еквівалентному опору лінійної частини ланцюга щодо нелінійного елемента (рис. 2.4). Таким чином, можна записати розрахункові формули:

$$e_{\Gamma} = U_{XX} = \frac{U_{1P}R_2}{R_1+R_2}; R_{\Gamma} = \frac{U_{XX}}{I_{K3}} = \frac{R_1R_2}{R_1+R_2}; I_{K3} = \frac{e_{\Gamma}}{R_{\Gamma}} \quad (2.3)$$

де I_{K3} - струм короткого замикання при $U = 0$.

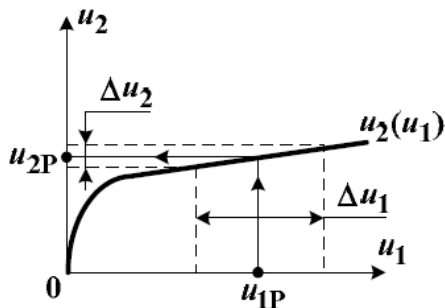


Рис. 2.3 - До пояснення принципу роботи стабілітрона

Використовуючи другий закон Кірхгофа, можна записати рівняння для струму

$$I = \frac{e_{\Gamma} - U}{R_{\Gamma}}. \quad (2.4)$$

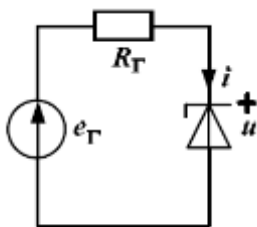


Рис. 2.4 – Еквівалентна схема стабілітрона

Точка перетину прямої лінії навантаження, побудованої за рівнянням (2.4), з ВАХ стабілітрона дозволяє визначити робочу точку a та знайти розрахункові значення струму I_P і напруги U_P стабілітрона, відповідні заданій величині вхідної напруги U_{1P} (рис. 2.1). Далі за законами Ома і Кірхгофа можна визначити для схеми на рис. 2.5 напруги і струми

$$U_{2P} = U_P; I_{2P} = \frac{U_{2P}}{R_2}; I_{1P} = I_P + I_{2P} \quad (2.5)$$

і розрахувати ефективність (ККД) передачі енергії стабілізатором

$$\eta = \frac{U_{2P}I_{2P}}{U_{1P}I_{1P}}. \quad (2.6)$$

Схема експериментальної установки показана на рис. 2.5. Електрична схема підключається до джерела постійної регульованої напруги $U_1 = 0 \div 15$ В. Прилади встановлюються на вимірювання постійних значень при наступних лімітах: V_1 і V_2 - 20 В, А - 20 мА або 200 мА. У табл. 2.1 наведені для різних варіантів значення опорів резисторів R_1 і R_2 , а також величина заданої вхідної напруги U_{1P} . При визначеній за вольтметром V_1 напрузі U_{1P} і розімкненому ключі K за даними вольтметра V_2 визначається ЕРС $e_{\Gamma} = U_{XX}$ (режим холостого ходу), а при замкнутому ключі K і підключенні провідника a до вузла b за даними амперметра A визначається струм $I_{KЗ}$ (режим короткого замикання).

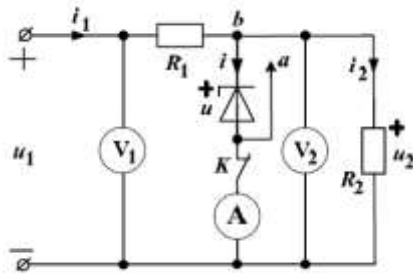


Рис. 2.5 - Схема експериментальної установки

Таблиця 2.1

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U_{1P} , В	13,5	14,5	14	13,5	13,5	12,5	12,5	11,5	11,5	11
R_1 , Ом	100	220	150	220	330	150	330	150	150	100
R_2 , Ом	330	680	470	1000	2200	1000	4700	2200	4700	10000

2.2 Порядок виконання роботи

1. Для свого варіанту за заданими в табл. 2.1 значенням U_{1P} і R_2 при $U_{CT} = 10$ В, $I_{CT} = 5 \times 10^{-3}$ А розрахувати величину баластного опору R_B і записати його в табл. 2.2. Порівняти отримане значення R_B з величиною R_1 в табл. 2.1.

2. Для свого варіанту за заданими в табл. 2.1 значеннями і формулами (2.3) розрахувати параметри e_{Γ} , R_{Γ} , $I_{KЗ}$. Результати записати в табл. 2.2.

Таблиця 2.2

Варіант	R_b , Ом	e_G , В	R_G , Ом	I_{K3} , мА

3. Зібрати електричну схему як показано на рис. 2.5. До входу схеми підключити джерело регульованої постійної напруги U_1 , змінюючи яку в межах $U_1 = 9,5 \div U_{1P}$ В при замкнутому ключі K визначити ВАХ стабілітрона (8 значень). Показання приладів занести в табл. 2.3.

Таблиця 2.3

$U_1 = U_{V1}$, В								U_{1P}
$U = U_{V2}$, В								
$I = I_A$, мА								

4. Встановити за вольтметром V_1 задану вхідну напругу U_{1P} . В режимах холостого ходу (ключ K розімкнений) і короткого замикання (ключ K замкнутий і провідник a підключений до вузла b) визначити відповідно $e_G = U_{XX} = U_{V2}$ і $I_{K3} = I_A$. Розрахувати опір генератора $R_G = e_G / I_{K3}$. Результати занести в табл. 2.4.

Таблиця 2.4

I_P , В	e_G , В	$K3$, мА	R_G , Ом	U		$2P$, мА	$1P$, мА	, %	CT , %
				$P = U_{2P}$, В	P , мА				

5. За результатами п.1 побудувати ВАХ стабілітрона. У цих же осях за рівнянням (2.4) при e_G та R_G з табл. 2.4 побудувати пряму лінію навантаження і визначити робочу точку a , графічно знайти значення напруги U_P і струму I_P стабілітрона. Значення U_P і I_P занести в табл. 2.4.

4. За формулами (2.5) і (2.6) розрахувати струми I_{2P} , та I_{1P} і ефективність η стабілізатора. Результати занести в табл. 2.4.

5. За результатами табл. 2.3 при $U_2 = U$ побудувати залежність $U_2(U_1)$, на якій при $U_1 = U_{1P}$ і $\Delta U_1 = 1$ В, визначити U_{2P} і ΔU_2 . За формулою (2.1) розрахувати коефіцієнт стабілізації K_{CT} і занести його значення в табл. 2.4.

6. Проаналізувати отримані результати, порівняти дані табл. 2.2 і 2.4, сформулювати висновки по роботі.

2.3 Контрольні питання

1. Що являє собою напівпровідниковий стабілітрон і в чому полягає ефект Зенера?
2. Яким елементом електричної схеми є стабілітрон?
3. Який пристрій називають стабілізатором? Яка особливість стабілітрона використовується в стабілізаторах? Яким параметром характеризується якість стабілізації?
4. Для чого включається баластний опір і як визначається його номінал?
5. При яких режимах аналітично і експериментально визначаються параметри еквівалентного генератора e_G, R_G, I_{K3} ?
6. Як побудувати лінію навантаження і визначити робочу точку стабілітрона? Як знайти розрахункові значення струму I_P і напруги U_P стабілітрона, відповідні заданій вхідній напрузі U_{1P} ?
7. Як за знайденими значеннями I_P, U_P стабілітрона для схеми, зображеної на рис. 2.5 розрахувати напруги і струми?
8. Що характеризує ефективність η стабілізатора (рис. 2.5) і як вона розраховується?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ВАРИКАПА

Мета роботи - експериментальне визначення диференціальної ємності варикапа і розрахунок його кулон-вольтної характеристики.

3.1 Загальні відомості

Варикап (діод зі змінною ємністю) - це спеціальний напівпровідниковий діод, призначений для роботи в якості конденсатора, ємністю якого керує постійна напруга (U_K). Ємність варикапа C - це бар'єрна ємність зворотно включеного p - n -переходу. Позитивний потенціал постійної напруги керування U_K подається на n -шар варикапа, а негативний - на p -шар. Зі збільшенням цієї напруги ширина p - n -переходу зростає і ємність варикапа знижується подібно до ємності конденсатора, у якого відстань між обкладинками збільшується. Вольт-амперна характеристика (ВАХ) варикапа в відкритому і закритому стані така ж, як у випрямного діода. Відмінність варикапа від випрямного діода полягає у відносно більшій ємності p - n -переходу, що досягає десятків і сотень пікофарад (пФ). При робочих кутових частотах ω ємнісний опір варикапа ($X_C = 1/\omega C$) значно перевищує його активний опір ($R = U/I$). Тому варикапи розглядаються у випадку змінного струму як нелінійні ємнісні елементи, які характеризуються нелінійною кулон-вольтною характеристикою (КВХ) $q(U_C)$, яка не залежить від законів зміни з часом напруги і струму (q - заряд p - n -переходу, U_C - напруга на ємності варикапа C).

Кулон-вольтна характеристика $q(U_C)$ може бути отримана експериментально при прикладенні синусоїдального струму

$$I \approx I_M \sin \omega t \quad (3.1)$$

і різних значеннях постійної напруги керування U_K , коли $U_K \gg X_C I_M$ і $U_C \approx U_K$.

При протіканні через варикап синусоїдального струму (3.1) напруга на ємності варикапа дорівнюватиме

$$U_C \approx U_K + U_M \sin(\omega t - 90^\circ), \quad (3.2)$$

де $U_M = X_C I_M$ - максимальне значення змінної складової напруги.

В результаті диференціальну ємність варикапа наближено можна визначити так

$$C = \frac{dq}{dU_C} \approx \frac{I_M}{\omega U_M} = \frac{I}{\omega U}, \quad (3.3)$$

де $U = U_M/\sqrt{2}$ та $I = I_M/\sqrt{2}$ - дійсні значення змінної складової напруги U_C та синусоїдального струму (3.1), відповідно.

Якщо $U_K \gg U$, то

$$U_C \approx U_K; \quad q(U_C) = \int_0^{U_C} C(U_C) dU_C. \quad (3.4)$$

Експериментально отриману залежність для диференціальної ємності $C(U_C)$ можна наближено представити аналітичної формулою

$$C(U_C) \approx C_0 - m \cdot U_C^2 - n \cdot U_C^4, \quad (3.5)$$

тоді, з огляду на співвідношення (3.4), отримуємо аналітичний запис КВХ

$$q(U_C) \approx C_0 U_C - \frac{m}{3} \cdot U_C^3 - \frac{n}{5} \cdot U_C^5, \quad (3.6)$$

де C_0 - початкове значення ємності при $U_C \approx U_K = 0$ (рис. 3.1); m і n - деякі сталі коефіцієнти.

Коефіцієнти m і n знаходять вирішивши систему рівнянь

$$\begin{aligned} C_1 &\approx C_0 - m \cdot U_{C1}^2 - n \cdot U_{C1}^4, \\ C_2 &\approx C_0 - m \cdot U_{C2}^2 - n \cdot U_{C2}^4, \end{aligned} \quad (3.7)$$

де C_1 і C_2 - ємності варикапа при напруженнях U_{C1} і U_{C2} відповідно (рис. 3.1).

В результаті з рівнянь (3.7) визначаємо

$$\begin{aligned} m &= \frac{(C_0 - C_1) \cdot U_{C2}^4 - (C_0 - C_2) \cdot U_{C1}^4}{U_{C1}^2 \cdot U_{C2}^2 \cdot (U_{C2}^2 - U_{C1}^2)}, \\ n &= \frac{(C_0 - C_2) \cdot U_{C1}^2 - (C_0 - C_1) \cdot U_{C2}^2}{U_{C1}^2 \cdot U_{C2}^2 \cdot (U_{C2}^2 - U_{C1}^2)}. \end{aligned} \quad (3.8)$$

Якщо в формули (3.8) підставити $U_{C1} = 6$ (В) і $U_{C2} = 14$ (В), то тоді

$$m \approx 0.03285 \cdot C_0 - 0.034 \cdot C_1 + 0.00115 \cdot C_2, \quad (\text{пФ/В}^2), \quad (3.9)$$

$$n \approx (-1.4172 \cdot C_0 + 1.7361 \cdot C_1 - 0.3189 \cdot C_2 \cdot 10^{-4}), \quad (\text{пФ/В}^4), \quad (3.10)$$

де C_0, C_1, C_2 - ємності варикапа в пікофарадах (пФ).

На рис. 3.1 наведена типова КВХ варикапа і характерна залежність для його диференціальної ємності $C(U_C) = dq/dU_C$. Позитивний потенціал напруги керування U_K подається на n -шар варикапа, а негативний

потенціал - на p -шар (рис. 3.2, а). На рис. 3.2, б показано умовне позначення варикапа.

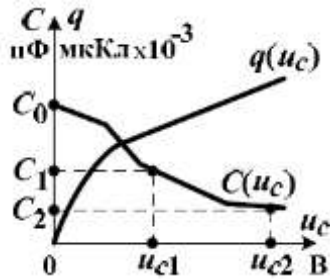


Рис. 3.1 - Типова КВХ варикапа

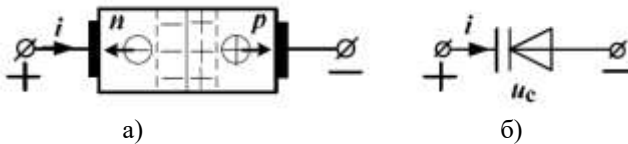


Рис. 3.2 – Включення варикапа (а) та його умовне позначення (б)

Варикапи застосовуються в радіотехніці як регульовані ємності для налаштування резонансних контурів на певну резонансну частоту

$$f_p \approx 1/2\pi\sqrt{LC} \quad (3.11)$$

де L і C - індуктивність котушки і ємність варикапа резонансного контуру.

Схема експериментальної установки наведена на рис. 3.3. Контакти a, b підключаються до джерела постійної регульованої напруги $U_1 = 0 \div 15$ В, а контакти c, d - до джерела регульованої синусоїдальної напруги U_2 , на якому встановлюється частота $f = 10$ кГц. Резистор $R_1 = 100$ кОм слугує для запобігання шунтування джерелом постійної напруги варикапа, а конденсатор з ємністю $C_\phi = 1$ мкФ виключає наявність постійної складової у змінному струмі I , так що цей струм за рахунок великого опору резистора $R_2 = 100$ кОм наближено можна прийняти синусоїдальним. Вольтметр V_1 з лімітом вимірювання 20 В встановлюється на вимірювання постійної напруги і фіксує напругу керування U_K , яка наближено дорівнює напрузі на ємності варикапа U_C , тобто $U_K \approx U_C$. Вольтметр V_2 з лімітом вимірювання 2 В встановлюється на вимірювання дійсного значення U змінної складової напруги U_C варикапа. Регулятором амплітуди напруги синусоїдального джерела за даними вольтметру V_2

виставляється у всіх дослідах дійсне значення $U \approx 0,1U_K$, а при $U_K = 0$ встановлюється $U \approx 0,1$ В. Амперметр з лімітом 200 мкА встановлюється на вимірювання дійсного значення I синусоїдального струму варикапа. У табл. 3.1 наведені для різних варіантів значення напруги $U_K \approx U_C$ і величини індуктивності L котушки для розрахунку за формулою (3.11) резонансної частоти.

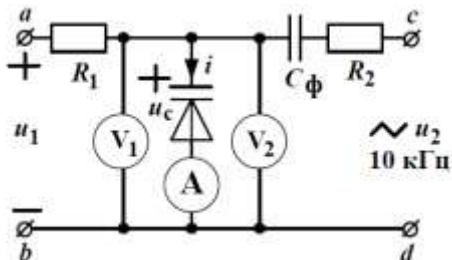


Рис. 3.3 - Схема експериментальної установки

Таблиця 3.1

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$U_K \approx U_C$, В	0	2	4	6	8	10	12	14	10	6
L , мГн	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100

3.2 Порядок виконання роботи

1. Зібрати електричну схему як показано на рис. 3.3. До входів схеми підключити джерела регульованої постійної напруги U_1 і регульованої синусоїдальної напруги U_2 з частотою $f = 10$ кГц, при зміні напруги на яких показання приладів записати в табл. 3.2.

Таблиця 3.2

$U_{V1} = U_K \approx U_C$, В	0	2	4	6	8	10	12	14
$U_{V2} = U$, В	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4
$I_A = I$, мкА								
C , пФ								
q , мкКл								

2. За формулою (3.3) при $\omega = 2\pi f = 6,28 \times 10^4$ (р/с) розрахувати ємність C варикапа. Результати занести в табл. 3.2.

3. Знайдені при напругах $U_C = 0$ В, $U_{C1} = 6$ В, $U_{C2} = 14$ В значення ємності варикапа C_0 , C_1 і C_2 записати в табл. 3.3. За формулами (3.8) визначити коефіцієнти m і n , які також занести в табл. 3.3.

4. Для заданого в табл. 3.1 значення напруги U_C і індуктивності L визначити ємність C варикапа і за формулою (3.11) розрахувати резонансну частоту f_p . Результати занести в табл. 3.3.

Таблиця 3.3

C_0 , пФ	C_1 , пФ	C_2 , пФ	C , пФ	m , пФ/В ²	n , пФ/В ⁴	f_p , кГц

5. За формулою (3.6) для заданих в табл. 3.2 значень напруги U_C розрахувати заряди q , значення яких записати в цю ж таблицю. За даними цієї таблиці побудувати в одних осях залежності $q(U_C)$ та $C(U_C)$.

6. Проаналізувати отримані результати і сформулювати висновки по роботі.

3.3 Контрольні питання

1. Що являє собою варикап і чим є його ємність?
2. Яким елементом електричної схеми є варикап?
3. Чому дорівнює диференційна ємність варикапа і як вона визначається експериментально?
4. Як розраховується кулон-вольтна характеристика варикапа?
5. Де і для чого застосовуються варикапи?
6. Для чого слугують елементи R_1 , C_ϕ , R_2 електричної схеми, наведеної на рис. 3.3?

ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРІОДНОГО ТИРИСТОРА

Мета роботи - дослідити процеси відмикання і замикання тиристора. Зняти статичні вольт-амперні характеристики ланцюга керування і анодного ланцюга тиристора, дослідити фазовий керування тиристора за допомогою динамічної характеристики.

4.1 Загальні відомості

Триодний тиристор є напівпровідниковим приладом (рис. 4.1), що має чотири шари *p-n-p-n*, один з яких з'єднаний з зовнішнім керуючим електродом (КЕ).

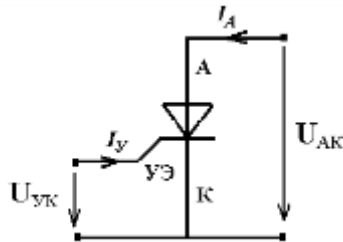


Рис.4.1 – Схема включення тиристора

Це дозволяє приводити ланцюг між анодом (А) і катодом (К) тиристора у відкритий стан напругою керування U_{KK} , яка подається між електродом керування (ЕК) і катодом (К). При цьому струм, що протікає у такому ланцюгу керування I_K значно менший за анодний струм I_A , який протікає крізь опір навантаження. Тиристор можна перевести у відкритий стан анодно-катодною напругою U_{AK} (напруга лавинного пробую), що може призвести до руйнування напівпровідникової структури тиристора, тому робоча напруга U_{AK} при замкненому тиристорі не повинна перевищувати величини напруги лавинного пробую, яка вказується в довідкових даних для кожного типу тиристорів.

У відкритому стані напруга U_{AK} є близькою до нуля і тиристор зберігає низькоомний стан навіть при відключеній напрузі на електроді керування. Тиристор повертається до замкненого стану, коли анодний струм зменшується нижче мінімальної величини, яка називається струмом утримання I_{UTP} в ланцюгах постійного струму, або переходить через нульове значення в ланцюгах змінного струму.

Тиристори широко застосовуються в якості комутуючих елементів в ланцюгах постійного струму, а також для регулювання величини струму навантаження I_A за допомогою фазового керування у випрямлячах змінного

струму за допомогою зміни кута вмикання тиристора φ . На рис. 4.2 зображена діаграма двох періодів анодного струму I_A при роботі однонапівперіодного керуваного випрямляча. На інтервалі $0^\circ \leq \omega t \leq 180^\circ$ тиристор відмикається з затримкою фази на кут φ , на інтервалі $180^\circ \leq \omega t \leq 360^\circ$ тиристор замкнений і струм $I_A = 0$. Таким чином, при збільшенні кута φ постійна складова I_0 анодного струму I_A буде зменшуватися.

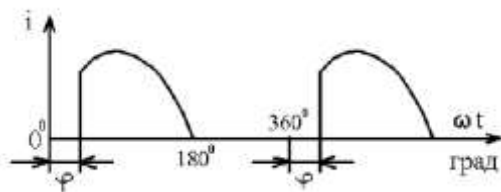


Рис.4.2 - Діаграма анодного струму I_A при роботі однонапівперіодного керуваного випрямляча

В роботі досліджується тиристор КУ-101Е. Для зняття статичної вольт-амперної характеристики керування $I_K(U_{KK})$, а також анодно-катодної характеристики $I_A(U_{AK})$ застосовується схема, зображена на рис. 4.3.

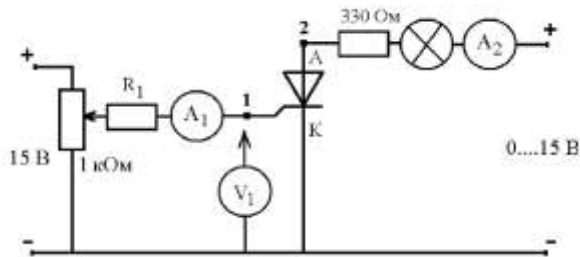


Рис. 4.3 - Схема експериментальної установки для вимірювання статичної вольт-амперної та анодно-катодної характеристик

Всі прилади встановлені на вимірювання постійної напруги і постійного струму. Амперметр A_1 вимірює струм керування I_K , амперметр A_2 - струм в анодному ланцюзі I_A , вольтметр V_1 - напругу між електродом керування і катодом U_{KK} при підключенні в точку 1 і напругу між анодом і катодом U_{AK} при підключенні в точку 2. Прилади мають такі ліміти вимірювань: V_1 - 20 В, A_1 - 20 мА, A_2 - 200 мА. Для зняття характеристики фазового керування $I_A(\varphi)$. застосовується схема, зображена на рис. 4.4.

Вольтметр V_2 встановлено на вимірювання змінної напруги і має ліміт - 20 В. Амперметр A_2 встановлений на вимірювання постійного струму і має ліміт - 200 мА. Градування осцилографа наступне: масштаб за напругою - $m_u = 1$ В, за часом - $m_t = 0,5$ мс, осцилограф повинен мати відкритий вхід.

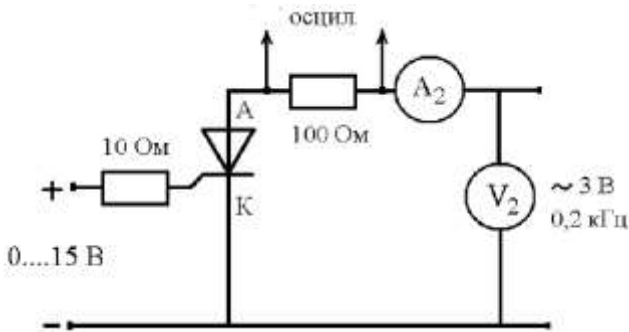


Рис. 4.4 - Схема експериментальної установки для вимірювання характеристики фазового керування $I_A(\varphi)$

4.2 Порядок виконання роботи

1. Зібрати електричну схему, як показано на рис. 4.3, встановити опір $R_1 = 2,2$ кОм, вольтметр V_1 підключити в точку 1.

2. За допомогою регульованого джерела постійної напруги подати на ланцюг анод-катод максимальну напругу $U_{AK} = 15$ В.

3. За допомогою потенціометра 1 кОм спочатку збільшувати, а потім зменшувати напругу керування U_{KK} , і за допомогою амперметра A_1 вимірювати струм керування I_K . Дані занести в табл. 4.1. відзначити при якій напрузі $U_{ВДМ}$ і струмі $I_{ВДМ}$ відмикається тиристор (загоряється лампочка).

4. За даними табл. 4.1 побудувати графіки $I_K(U_{KK})$ при збільшенні і зменшенні напруги. Відзначити на графіку $U_{ВДМ}$ і $I_{ВДМ}$.

Таблиця 4.1

U_{KK} , В	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3
I_K (при збільшенні), мА							
I_K (при зменшенні), мА							

5. Визначити струм утримання тиристора $I_{УТР}$. Для цього при нульовому струмі керування і при відімкненому тиристорі необхідно за допомогою регулятора постійної напруги плавно зменшувати напругу U_{AK}

до тих пір, доки струм навантаження стрибком не впаде до нуля. Останнє значення струму перед стрибком і є струм утримання:

$$I_{УТР} = \dots \text{ (мА)}$$

6. Підключити опір $R_1 = 1 \text{ кОм}$, перемкнути вольтметр V_1 в точку 2, задати струм керування тиристора I_K відповідно до номеру варіанта за табл. 4.2.

Таблиця 4.2

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$I_K, \text{ мА}$	2	3	4	5	6	4	5	6	7	8

7. Змінюючи напругу U_{AK} , виміряти величину анодного струму I_A . Дані занести до табл. 4.3.

Таблиця 4.3

$U_{AK}, \text{ В}$	0	0,5	0,6	0,7	0,8	0,85
$I_A, \text{ мА}$						

8. За даними табл. 4.3 побудувати графік $I_A(U_{AK})$.

9. Зібрати електричну схему, як показано на рис. 4.4. Ручкою регулятора встановити нульове значення напруги керування. Плавню підвищуючи напругу керування перевести тиристор у повністю відкритий стан, що відповідає стрибку постійного струму I_0 у анодно-катодному ланцюзі. Налаштувати осцилограф на одну півхвилю струму. Плавню зменшуючи напругу керування, і збільшуючи тим самим кут φ відмикання тиристора, виміряти величини постійного струму I_0 за допомогою амперметра A_2 , відповідні приблизним значенням кута φ на осцилограмі струму (рис. 4.2). Дані занести в табл. 4.4.

10. За даними табл. 4.4 побудувати характеристику фазового керування тиристора $I_0(\varphi)$.

Таблиця 4.4

$\varphi, \text{ град.}$	0	30	45	60	90
$I_0, \text{ мА}$					

11. Проаналізувати отримані результати і сформулювати висновки по роботі.

4.3 Контрольні питання

1. Що являє собою тріодний тиристор?
2. Замикається чи відмикається тиристор, коли відключається напруга ланцюга керування при постійному струмі? А при змінному струмі?
3. Що таке струм утримання тиристора?
4. Що відбувається з тиристором, коли анодно-катодна напруга перевищує напругу лавинного пробою?
5. Поясніть принцип роботи фазового керування тиристора?
6. Назвіть область застосування тиристорів в техніці?

ХАРАКТЕРИСТИКИ БІПОЛЯРНИХ ТРАНЗИСТОРІВ

Мета роботи – зняти експериментально і побудувати графіки сімейств характеристик біполярного транзистора $n-p-n$ типу.

5.1 Загальні відомості

Транзистор є напівпровідниковим тріодом, у якого тонкий шар p -типу провідності розміщений між двома шарами n -типу провідності ($n-p-n$ транзистор) або шар n -типу провідності розміщений між двома шарами p -типу провідності ($p-n-p$ транзистор) (рис. 5.1).

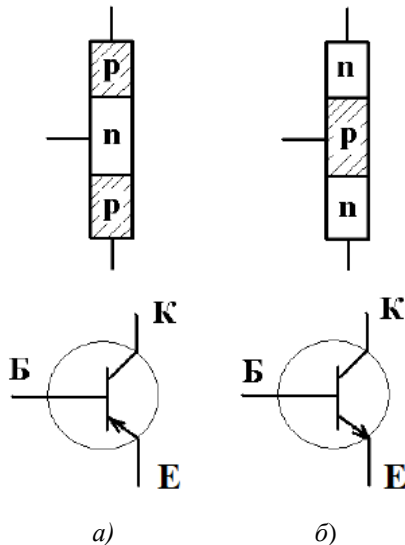


Рис. 5.1 - Транзистори $n-p-n$ типу (а) та $p-n-p$ типу (б)

Переходи $p-n$ мають випрямні властивості напівпровідникового діода. У транзисторі $p-n-p$ типу (рис. 5.2, а) струм емітера до колектору через базу обумовлений неосновними для бази носіями заряду - дірками.

При позитивному напрямку напруги U_{EB} емітерний $p-n$ перехід відкривається, і дірки з емітера проникають в область бази. Частина з них іде до джерела напруги U_{EB} , а інша частина досягає колектору. Виникає транзитний струм від емітера до колектору, який різко зростає зі збільшенням струму бази I_B і напруги U_{EB} .

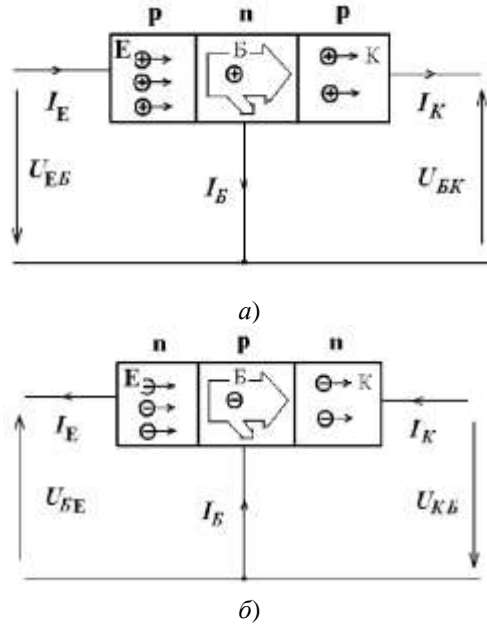


Рис.5.2 – Схеми протікання струму у транзисторах $n-p-n$ типу (а) та $p-n-p$ типу (б)

У транзисторі $n-p-n$ типу (рис. 5.2, б) транзитний струм крізь базу обумовлений також неосновними для бази носіями заряду - електронами. Там вони з'являються з емітера під дією напруги U_{BE} . Струми емітера, колектору і бази пов'язані між собою рівнянням першого закону Кірхгофа: $I_K = I_E - I_B$. Зазвичай струм бази I_B істотно менше струмів I_E і I_K . Співвідношення збільшення струму колектору до приросту струму бази називається коефіцієнтом підсилення по струму:

$$\beta = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B}.$$

Цей коефіцієнт може мати значення від декількох десятків до декількох сотень одиниць.

Властивості транзистора описуються чотирма сімействами характеристик:

Вхідна характеристика $I_B(U_{BE})$ - залежність струму бази від напруги між базою і емітером при постійній напрузі між емітером і колектором $U_{KE} = \text{const}$.

Вихідна характеристика $I_K(U_{KE})$ - залежність струму колектору від напруги між колектором і емітером при різних фіксованих струмах бази I_B .

Характеристика керування $I_K(I_B)$ - залежність струму колектору від струму бази при $U_{KE} = \text{const}$.

Характеристика зворотного зв'язку $U_{BE}(U_{KE})$ - залежність напруги між базою і емітером від напруги між колектором і емітером при різних фіксованих струмах бази I_B .

В роботі досліджується транзистор *n-p-n* типу КТ-503Г. Для зняття вхідної характеристики $I_B(U_{BE})$ застосовується схема, зображена на рис. 5.3.

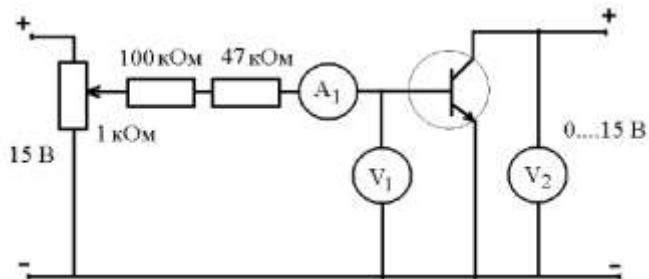


Рис.5.3 - Схема експериментальної установки для вимірювання вхідної характеристики $I_B(U_{BE})$

Амперметр A_1 вимірює струм бази I_B , вольтметр V_1 - напругу U_{BE} , вольтметр V_2 - напругу U_{KE} . Прилади мають наступні ліміти вимірювань: V_1 - 20 В, V_2 - 20 В, A_1 - 20 мкА. Для зняття вихідної характеристики $I_K(U_{KE})$ застосовується схема, зображена на рис. 5.4.

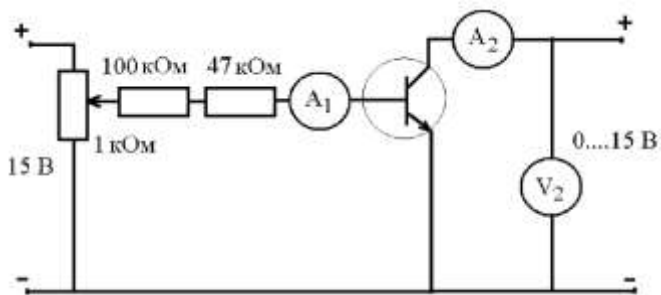


Рис. 5.4 - Схема експериментальної установки для вимірювання вихідної характеристики $I_K(U_{KE})$

Амперметр A_2 фіксує струм колектору I_K і має ліміт 20 мА. У табл. 5.1 для різних варіантів наведені значення струму бази I_B і напруги U_{KE} для побудови за результатами експериментів залежностей $U_{BE}(U_{KE})$ та $I_K(I_B)$.

Таблиця 5.1

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I_B , мкА	20	40	60	80	20	40	60	80	20	40
U_{KE} , В	0,5	1	2	5	10	0,5	1	2	5	10

5.2 Порядок виконання роботи

1. Зібрати електричну схему, як показано на рис. 5.3. Змінюючи струм бази від 20 мкА до 80 мкА за допомогою реостату 1 кОм, зняти сімейство вхідних характеристик $I_B(U_{BE})$ при різній напрузі U_{KE} , яка змінюється за допомогою регульованого джерела постійної напруги. Дані занести в табл. 5.2.

Таблиця 5.2

$U_{KE} = 0$ В		$U_{KE} = 1$ В		$U_{KE} = 5$ В		$U_{KE} = 10$ В	
I_B , мкА	U_{BE} , В	I_B , мкА	U_{BE} , В	I_B , мкА	U_{BE} , В	I_B , мкА	U_{BE} , В
20		20		20		20	
40		40		40		40	
60		60		60		60	
80		80		80		80	

2. Побудувати в одних осях сімейство вхідних характеристик транзистора $I_B(U_{BE})$ при різній напрузі U_{KE} .

3. За даними табл. 5.2 для одного зі струмів бази $I_B = \text{const}$, відповідно до номеру варіанту з табл. 5.1, побудувати характеристику зворотного зв'язку $U_{BE}(U_{KE})$.

4. Зібрати електричну схему, як показано на рис. 5.4. Змінюючи напругу U_{KE} , зняти сімейство вихідних характеристик $I_K(U_{KE})$ при різних струмах бази. Дані занести в табл. 5.3.

5. За даними табл. 5.3 для одного зі значень напруги $U_{KE} = \text{const}$, відповідно до номеру варіанта з табл. 5.1, побудувати характеристику керування $I_K(I_B)$.

6. Використовуючи характеристику керування $I_K(I_B)$, розрахувати коефіцієнт підсилення транзистора по струму β при зміні струму бази від 40 мкА до 60 мкА.

7. Проаналізувати отримані результати і сформулювати висновки по роботі.

Таблиця 5.3

$I_B = 20 \text{ мкА}$		$I_B = 40 \text{ мкА}$		$I_B = 60 \text{ мкА}$		$I_B = 80 \text{ мкА}$	
$U_{KE}, \text{ В}$	$I_K, \text{ мА}$	$U_{KE}, \text{ В}$	$I_K, \text{ мА}$	$U_{KE}, \text{ В}$	$I_K, \text{ мА}$	$U_{KE}, \text{ В}$	$I_K, \text{ мА}$
0		0		0		0	
0,5		0,5		0,5		0,5	
1		1		1		1	
2		2		2		2	
5		5		5		5	
10		10		10		10	

5.3 Контрольні питання

1. Які типи біполярних транзисторів існують і в чому їх конструктивна відмінність?
2. Що таке транзитний струм і як він виникає?
3. Як визначається коефіцієнт підсилення по струму?
4. Які характеристики описують властивості транзистора?

ПІДСИЛЮВАЧІ НА БІПОЛЯРНИХ ТРАНЗИСТОРАХ

Мета роботи - дослідження схем підсилювачів на біполярних транзисторах.

6.1 Загальні відомості

Транзистори використовують як елементи керування в підсилюючих ланцюгах. За назвою того електрода транзистора, який використовується як загальна точка для напруги вхідного і вихідного сигналів, розрізняють три основні схеми підсилювачів на біполярних транзисторах:

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

Схема із загальним емітером показана на рис. 6.1.

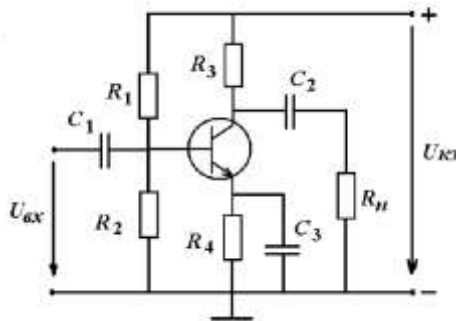


Рис.6.1 – Схема підсилювача із загальним емітером

Схеми з ЗЕ використовуються в якості низькочастотних підсилювачів у різних пристроях промислової і побутової радіоапаратури. Вони мають великі коефіцієнти підсилення по струму, напрузі і потужності і низький рівень нелінійних відхилень. Головною відмінною рисою підсилювачів з ЗЕ є зсув фаз вихідного сигналу на 180 град. щодо вхідного. Пасивні елементи на схемі, наведеній на рис. 6.1 виконують наступну роль:

C_1 і C_2 - розподільні конденсатори, запобігають проникненню постійної складової з виходу одного каскаду на вхід іншого;

R_1 і R_2 - резистори, що забезпечують положення робочої точки на вихідній вольт-амперній характеристиці транзистора;

C_3 - блокуючий конденсатор, що зменшує опір змінному струму в ланцюзі емітера, блокує дію негативного зворотного зв'язку за струмом навантаження в робочому діапазоні частот підсилювача;

R_3 - обмежує колекторний струм;

R_H - опір навантаження.

Схема із загальним колектором показана на рис. 6.2.

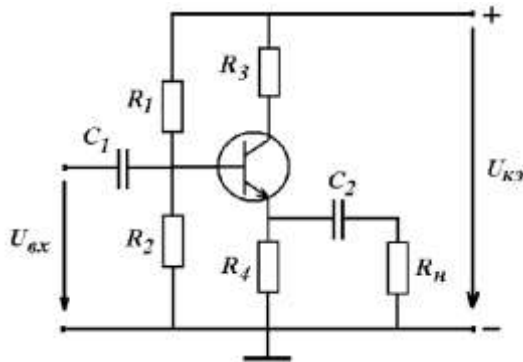


Рис.6.2 - Схема підсилювача із загальним колектором

Схема з ЗК має високий вхідний опір (такий же як і в схемі з ЗЕ) і малий вихідний опір, що широко застосовується для узгодження високоомних джерел сигналу з низькоомним навантаженням. Каскад із ЗК має невеликий коефіцієнт підсилення по напрузі і великий коефіцієнт підсилення по струму, що забезпечує значний коефіцієнт підсилення по потужності. Форма сигналу на навантаженні в точності повторює форму вхідного сигналу, а оскільки вихідна напруга знімається з емітера транзистора, то такі підсилювачі називають **емітерними повторювачами**.

Схема із загальною базою показана на рис. 6.3.

Схема з ЗБ має на порядок менший вхідний опір, а вихідний опір у 1,5-2 рази вище в порівнянні зі схемою з ОЕ. Даний каскад має значний коефіцієнт підсилення по напрузі, а коефіцієнт підсилення по струму менше одиниці. Підсилювачі з ЗБ застосовуються в високочастотних, широкосмугових підсилювачах, де найважливішими параметрами є чутливість і малий коефіцієнт шуму каскаду.

Основними параметрами будь-якого підсилювача є:

1. Вхідний опір $R_{вх}$;
2. Вихідний опір $R_{вих}$;
3. Коефіцієнт підсилення по напрузі K_U ;
4. Коефіцієнт підсилення по струму K_I ;
5. Коефіцієнт підсилення по потужності K_P .

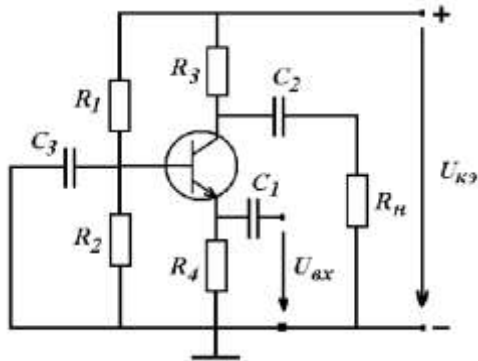


Рис.6.3 - Схема підсилювача із загальною базою

Вони можуть бути визначені експериментально або розрахунковим шляхом з урахуванням елементів схеми і параметрів транзистора. За експериментальними даними розрахунковими формулами є:

$$R_{ВХ} = \frac{U_1}{I_1}; R_{ВВХ} = \frac{U_{2ХХ} - U_2}{I_2}; I_2 = \frac{U_2}{R_H},$$

$$K_U = \frac{U_2}{U_1}; K_I = \frac{I_2}{I_1}; K_P = K_U \cdot K_I \quad (6.1)$$

де: U_1, I_1 - вхідні напруги і струм підсилювача;
 $U_{2ХХ}$ - напруга холостого ходу при $R_H = \infty$;
 U_2, I_2 - напруга і струм на навантаженні.

6.2 Порядок виконання роботи

6.2.1 Дослідження роботи підсилювача з загальним емітером

Схема підсилювача з ЗЕ на основі транзистора КТ-503Г представлена на рис. 6.4.

1. Зібрати електричну схему як показано на рис. 6.4. На вхід подільника напруги подається напруга синусоїдальної форми $U = 2 \text{ В}$, $f = 1 \text{ кГц}$, завдяки чому на базі транзистора вхідна напруга становить $U_1 = 0,2 \text{ В}$, а напруга постійного джерела напруги - $U_{KE} = 15 \text{ В}$. Змінюючи опір навантаження, записати показання приладів і занести їх в табл. 6.1.

2. За даними таблиці 6.1, використовуючи формули (6.1), розрахувати опір і коефіцієнти підсилювача.

3. Побудувати залежності $K_U(R_H)$, $K_I(R_H)$, $K_P(R_H)$, а також залежності $R_{ВХ}(R_H)$, $R_{ВВХ}(R_H)$.

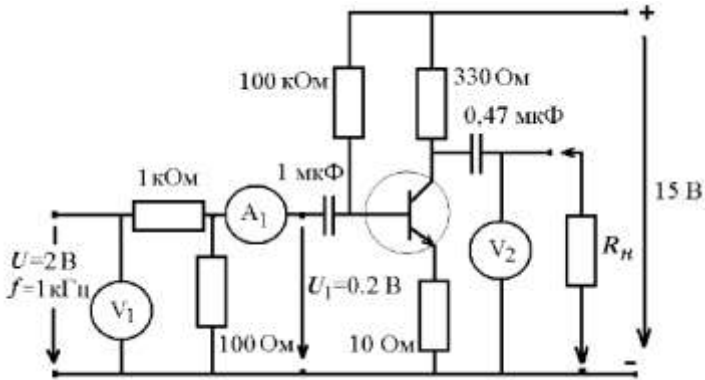


Рис. 6.4 – Схема експериментальної установки

Таблиця 6.1

R_H , кОм	U_1 , В	I_1 , мкА	R_{BX} , Ом	U_1 , В	I_1 , мА	$R_{ВИХ}$, Ом	K_U	K_I	K_P
∞	0,2				0	∞	-	-	-
4,7	0,2								
2,2	0,2								
1	0,2								
0,680	0,2								
0,470	0,2								

4. Проаналізувати отримані результати і сформулювати висновки по роботі.

6.2.2 Дослідження роботи підсилювача з загальним колектором

Схема підсилювача з ОК на основі транзистора КТ-503Г представлена на рис. 6.5.

1. Зібрати електричну схему, як показано на рис. 6.5. На вхід транзистора подається напруга синусоїдальної форми $U = 2$ В, $f = 1$ кГц, напруга постійного джерела становить $U_{KE} = 15$ В. Змінюючи опір навантаження, записати показання приладів і занести їх в табл. 6.2.

2. За даними таблиці 6.2, використовуючи формули (6.1), розрахувати опір і коефіцієнти підсилювача.

3. Побудувати залежності $K_U(R_H)$, $K_I(R_H)$, $K_P(R_H)$, а також залежності $R_{BX}(R_H)$, $R_{ВИХ}(R_H)$.

4. Проаналізувати отримані результати і сформулювати висновки по роботі.

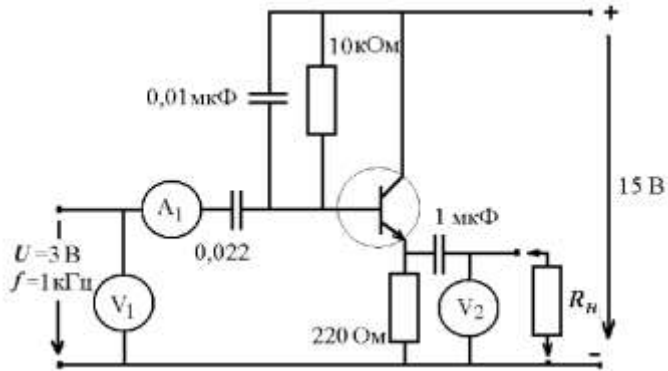


Рис.6.5 - Схема експериментальної установки

Таблиця 6.2

R_H , кОм	U_1 , В	I_1 , мкА	$R_{ВХ}$, Ом	U_1 , В	I_1 , мА	$R_{ВИХ}$, Ом	K_U	K_I	K_P
∞	3				0	∞	-	-	-
330	3								
150	3								
100	3								
47	3								
33	3								
22	3								

6.3 Контрольні питання

1. Які основні схеми підсилювачів на біполярних транзисторах ви знаєте?
2. У чому полягає різниця між собою підсилювальних каскадів з ЗЕ, ЗК і ЗБ?
3. На прикладі підсилювача з ЗЕ поясніть, які функції виконують пасивні елементи в схемі?
4. Як визначаються вхідний і вихідний опір підсилювача?
5. Як визначаються коефіцієнти підсилення по напрузі, струму і потужності?

СТАТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛЬОВОГО ТРАНЗИСТОРА ЗІ СТРУКТУРОЮ МЕТАЛ - ДІЕЛЕКТРИК – НАПІВПРОВІДНИК (МДП-ТРАНЗИСТОР)

Мета роботи - зняти статичні характеристики p -канального МДП-транзистора, розрахувати робочі параметри транзистора, вивчити вплив зворотного зсуву базового кристалу на граничну напругу МДП-транзистора і рухливість дірок в каналі, розрахувати рівень легування напівпровідникового базового кристалу за характеристиками МДП-транзистора.

7.1 Загальні відомості

Фізичною основою роботи МДП-транзистора є ефект поля, який полягає в зміні концентрації вільних носіїв заряду в приповерхневій області напівпровідника під дією зовнішнього електричного поля.

У структурах метал-діелектрик-напівпровідник зовнішнє поле обумовлено напругою, прикладеною до металевого електроду (затвору) відносно напівпровідникового базового кристалу (БК). Залежно від знаку і величини прикладеної напруги розрізняють три стану приповерхневої області напівпровідника:

1) **Збагачення** основними носіями. Цьому стану відповідає знак напруги на металевому електроді (затворі), що притягує основні носії (для n -типу, $V_G > 0$) (рис. 7.1а).

2) **Збіднення** основними носіями. Цьому стану відповідає невелика за величиною напруга, що відштовхує основні носії (для n -типу, $V_G < 0$) (рис. 7.1б).

3) **Інверсія** типу провідності. Такому стану відповідає велика за величиною напруга на затворі, що відповідає значному вигину зон і викликає збагачення поверхні неосновними носіями заряду (для n -типу, $V_G \ll 0$) (рис. 7.1в).

Коли на поверхні напівпровідника сформувався інверсійний канал, величина концентрації неосновних носіїв заряду (дірок) в інверсійних каналах дорівнює концентрації основних носіїв (електронів) в об'ємі напівпровідника. При цьому величина поверхневого потенціалу ψ_s дорівнює $\psi_s = 2\varphi_0$, де φ_0 - відстань від середини забороненої зони до рівня Фермі в квазінейтральному об'ємі.

Змінюючи величину напруги на затворі, можна змінювати концентрацію дірок у інверсійному каналі, і тим самим модулювати його провідність. При цьому дірки в каналі відокремлені від вільних носіїв в об'ємі напівпровідника областю просторового заряду.

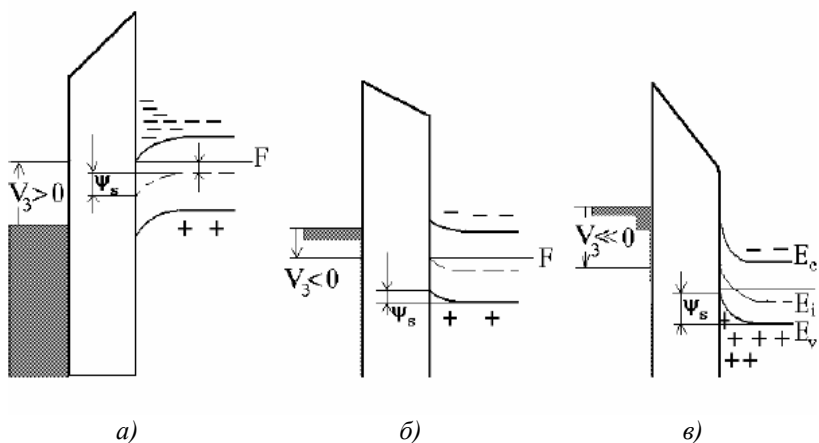


Рис. 7.1 - Зонна діаграма МДП-структури: а - збагачення, $V_G > 0$, $\psi_s > 0$; б - збіднення, $V_G < 0$, $\psi_s < 0$, $\psi_s < \varphi_0$; в - інверсія, $V_G \ll 0$, $\psi_s < 0$, $\varphi_0 < \psi_s < 2\varphi_0$ - слабка інверсія, $\psi_s > 2\varphi_0$ - сильна інверсія

Розглянемо польовий транзистор зі структурою МОП (метал-оксид-напівпровідник), схема якого наведена на рис. 7.2.

Основними елементами конструкції МДП-транзистора є:

1) дві сильно леговані області протилежного з БК типу провідності, стік і витік;

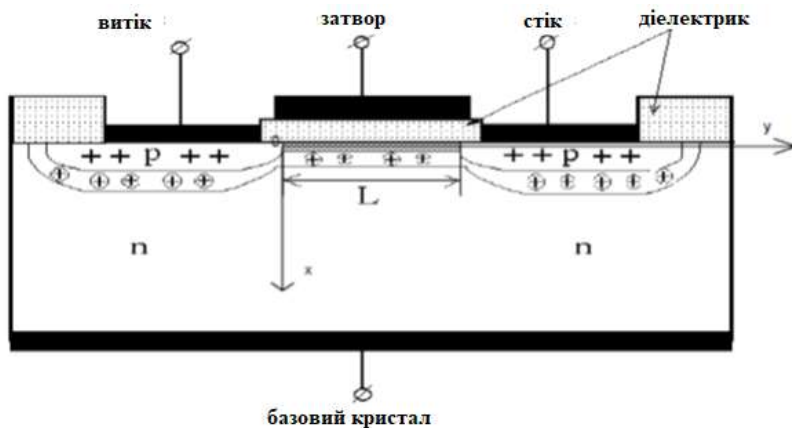


Рис. 7.2 - Схема МДП-транзистора. $V_D = 0$, $V_G < 0$

2) діелектричний шар, що відокремлює металевий електрод, затвор, від напівпровідникового БК і розташований над активною областю транзистора, інверсійним каналом, що з'єднує стік і витік.

Струм в каналі МДП-транзистора, виготовленого на підкладці n -типу, обумовлений вільними дірками, концентрація яких p . Електричне поле E_y обумовлене напругою між стоком і витіком V_D . Відповідно до закону Ома густина струму каналу

$$j(x, y, z) = qp(x)\mu_p E_y = qp(x)\mu_p \frac{dV}{dy}, \quad (7.1)$$

де q - заряд електрона, μ_p - рухливість і $p(x)$ - концентрація дірок в каналі.

Проінтегруємо (7.1) за шириною z і глибиною x каналу. Тоді інтеграл в лівій частині (7.1) дає повний струм каналу I_D , а для правої отримаємо

$$I_D = W\mu_p \frac{dV}{dy} \int_0^x qp(x)dx. \quad (7.2)$$

Величина під інтегралом є повний заряд дірок Q_P в каналі на одиницю площі. Тоді

$$I_D = W\mu_p Q_P \frac{dV}{dy}. \quad (7.3)$$

Знайдемо величину заряду дірок Q_P . Запишемо рівняння електронейтральності для зарядів на одиницю площі у вигляді

$$Q_M = Q_{OX} + Q_P + Q_V. \quad (7.4)$$

Згідно (7.4) заряд на металевому електроді Q_M врівноважується сумою зарядів на напівпровіднику: вільних дірок Q_P і іонізованих донорів Q_V та вбудованих зарядів у оксиді Q_{OX} .

На рис. 7.3 наведена схема розташування цих зарядів. З визначення ємності випливає, що повний заряд на металевій обкладинці Q_M конденсатора

$$Q_M = C_{OX} \cdot V_{OX}; \quad (7.5)$$

де V_{OX} - падіння напруги на шарі оксиду, C_{OX} - питома ємність підзатворного діелектрика.

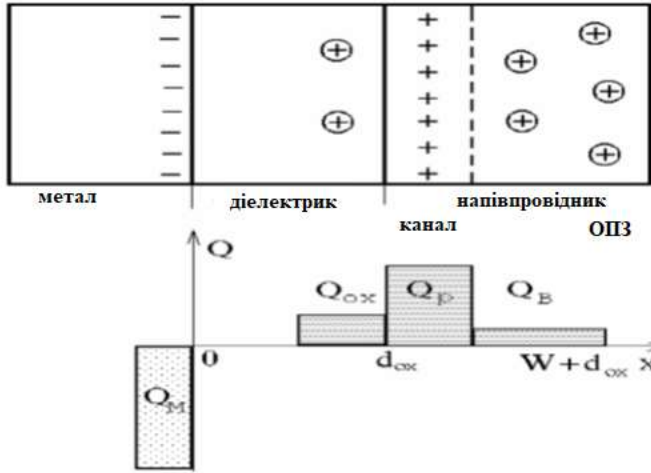


Рис. 7.3 - Схема розташування зарядів в активній області МДП-транзистору:

Q_B - заряд іонізованих донорів; Q_P - заряд вільних дірок;
 Q_{ox} - вбудований заряд в оксиді; Q_M - заряд на металевому електроді

Оскільки повна прикладена напруга V_G є сумою падінь напруги в оксиді V_{ox} і у напівпровіднику ψ_s , то

$$V_T = V_G - \Delta\varphi_{MS} - \psi_s - V(y), \quad (7.6)$$

де $\Delta\varphi_{MS}$ - різниця робіт виходу метал-напівпровідник, ψ_s - величина поверхневого потенціалу в рівноважних умовах, тобто при $V_D = 0$.

З (7.4), (7.5) і (7.6) випливає

$$Q_P = C_{ox}(V_G - \Delta\varphi_{MS} - \psi_s - V(y)) - Q_{ox} - Q_B. \quad (7.7)$$

Оскільки в області сильної інверсії при значній зміні V_G величина ψ_s змінюється слабо (умова плавного каналу), будемо надалі вважати її сталою і такою, що дорівнює потенціалу початку області сильної інверсії $\psi_s = 2\varphi_0$. Введемо порогову напругу $V_T = V_G - V(y)$ як напруга на затворі, відповідна відкриттю каналу в рівноважних умовах $Q_P(V_D = 0) = 0$. З (7.7) випливає, що

$$V_T = \Delta\varphi_{MS} + 2\varphi_0 + \frac{Q_{ox}}{C_{ox}} + \frac{Q_B}{C_{ox}}. \quad (7.8)$$

Тоді з урахуванням (7.8)

$$Q_P = C_{OX}[V_G - V_T - V(y)]. \quad (7.9)$$

Підставляючи (7.9) в (7.3) і провівши інтегрування уздовж каналу, при зміні y від 0 до L , а $V(y)$ - від 0 до V_D , отримуємо

$$I_D = \frac{W}{L} \mu_P C_{OX} \left[(V_G - V_T) V_D - \frac{V_D^2}{2} \right] = \frac{W}{L} \mu_P C_{OX} V_D \left[(V_G - V_T) - \frac{V_D}{2} \right] \quad (7.10)$$

якщо $V_G - V_T \gg \frac{V_D}{2}$, то $I_D \approx \frac{W}{L} \mu_P C_{OX} V_D (V_G - V_T)$.

Рівняння (7.10) описує вольт-амперну характеристику польового транзистора в області плавного каналу. Як випливає з (7.9), по мірі зростання V_D в каналі може наступити такий момент, коли відбудеться відсічення каналу, тобто $Q_P = 0$. Це відповідає умові

$$V(y) = V_D^{sat} = V_G - V_T. \quad (7.11)$$

Напруга на стосі V_D , необхідна для змикання каналу поблизу стоку, називається напругою відсічення, V_D^{sat} . На рис. 7.4 показані обидва стану: плавного і відсіченого каналу.

Із зростанням напруги стоку V_D точка каналу, що відповідає відсіченню, зсувається від стоку до витoku. У першому наближенні, при цьому на ділянці плавного каналу від витoku до точки відсічення падає однакова напруга $V_D^{sat} = V_G - V_T$, яка залежить від напруги витік-стік V_D . Оскільки ефективна довжина каналу L і $\Delta L = L - L' \ll L$, це обумовлює, в першому наближенні, струм стоку I_D , що не залежить від напруги стоку V_D . Підставивши (7.11) в (7.10) замість V_D , отримуємо для області відсічення:

$$I_D = m \frac{W}{L} \mu_P C_{OX} (V_G - V_T)^2, \text{ де } m \approx \frac{1}{2}. \quad (7.12)$$

На рисунку 7.5 наведено характеристики транзистора $I_D = f(V_D)$ при різних напрузі на затворі (V_G), та $I_D = f(V_G)$ при різних V_D .

При прикладенні напруги канал-БК V_{BS} , що розширює область просторового заряду, змінюється величина області іонізованих донорів. З теорії p - n переходу слідує, що величина заряду Q_B при зміщенні канал-БК V_{BS}

$$Q_B = \sqrt{2q \varepsilon_S \varepsilon_0 N_B (2\phi_0 - V_{BS})}. \quad (7.13)$$

Оскільки величина Q_B входить у формулу для граничної напруги V_T , то зміна V_{BS} викликає відповідну зміну V_T . При цьому

$$\Delta V_T = \frac{\sqrt{2\varepsilon_S\varepsilon_0qN_B}}{C_{OX}} (\sqrt{2\varphi_0 + V_{BS}} - \sqrt{2\varphi_0}). \quad (7.14)$$

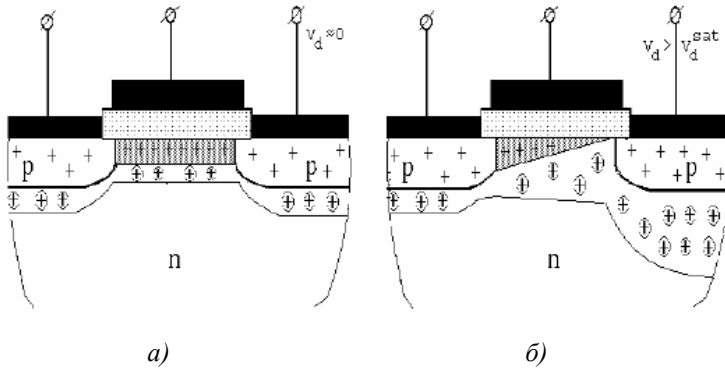


Рис. 7.4 - Схема роботи транзистора в області плавного каналу (а) та в області відсічення (б)

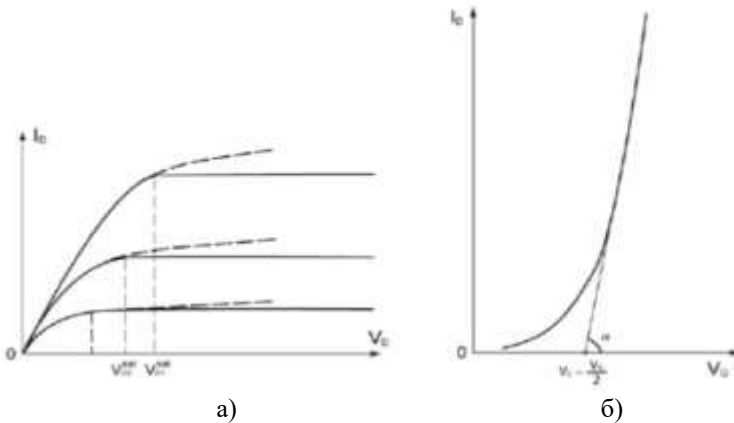


Рис. 7.5 - Залежність струму стоку I_D від напруги на стоку V_D при різних V_G (а) та залежність струму стоку I_D від напруги на затворі V_G в області плавного каналу (б)

Знаючи товщину оксиду d_{OX} і приблизне значення N_B (з точністю до порядку) для визначення φ_0 :

$$\varphi_0 = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_B}{n_i} \right). \quad (7.15)$$

З кута нахилу залежності (7.14) можна розрахувати величину (рівень) легуючої домішки в БК МДП-транзистора.

$$N_B = \frac{c_{OX}^2 tg^2 \alpha}{2 \varepsilon_S \varepsilon_0 q}, \text{ де } tg \alpha = \frac{\partial \Delta V_T}{\partial \sqrt{2 \varphi_0 + V_{BS}}}. \quad (7.16)$$

Для транзистора КП 301Б необхідні для розрахунку параметри мають значення: $W = 100$ мкм; $L = 20$ мкм; $d_{OX} = 100$ нм; $\varepsilon_S = 11,8$; $\varepsilon_{OX} = 3,82$; $\varphi_0 = 0,3$ В; $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-14}$ Ф/см.

7.2 Порядок виконання роботи

1. Зібрати схему для зняття статичних характеристик МДП-транзистора. Регулювання напруги V_G , V_D і V_{BS} здійснюється ручками потенціометрів, змонтованих на панелі. Струм стоку вимірюється за падінням напруги на опорі навантаження мікровольтметром в ланцюзі стоку. Потрібно, щоб опір навантаження R_H був би багато менше опору каналу R_C , тому падіння напруги V_{R_H} має бути багато менше напруги V (приблизно в 100 разів).

УВАГА! Щоб уникнути пробою статичною електрикою підзатворного діелектрика забороняється торкатися до виводів затвору руками без попереднього заземлення ланцюга затвору.

2. Зняти сімейство характеристик $I_D = f(V_D)$ при зміні напруги на стоці від 0 до -10 В: з кроком 1 В в кругій частині і 2 В у пологій частині вольт-амперної характеристики. Напруги на затворі встановлюються: -4 В, -6 В, -8 В, -10 В. (див. табл. 7.1). Результати вимірювань занести в таблицю 7.1. Побудувати графік залежності $I_D = f(V_D)$ і визначити з графіка напругу відсічення V_D^{sat} , порівняти одержані результати з розрахованими за (7.11).

Таблиця 7.1

V_G , В	V_D , В	0	-1	-2	-3	-4	-6	-8	-10
-4	I_D , мА								
-6	I_D , мА								
-8	I_D , мА								
-10	I_D , мА								

3. Зняти сімейство перехідних характеристик МДП-транзистора $I_D = f(V_G)$ при різних значеннях напруги стік-витік. Величину напруги на затворі змінювати в діапазоні від -1 В до -10 В з кроком 1 В.

а) Виставити напругу на стоці: $V_D = -0,1$ В і зняти $I_D = f(V_G)$ в області плавного каналу.

б) Послідовно виставляючи $V_D = -4$ В, -10 В, зняти характеристики МДП-транзистора в області відсічення. Занести результати вимірювань в табл. 7.2, побудувати графіки $I_D = f(V_G)$. За формулами (7.10) і (7.12) розрахувати значення порогової напруги V_T і рухливості дірок μ_p . Для цього на графіку залежності $I_D = f(V_G)$ в області плавного каналу екстраполяцією продовжити прямолінійну ділянку залежності до значення $I_D = 0$. Значення V_G при цьому, як випливає з (7.10), буде $V_G = V_T - V_D/2$. Величину рухливості μ_p визначити з тангенсів кута нахилу залежності $I_D = f(V_D)$ та $I_D = f(V_G)$.

Таблиця 7.2

V_D , В	V_G , В	0	-1	-2	-3	-4	-6	-8	-10
-0,1	I_D , мА								
-4	I_D , мА								
-10	I_D , мА								

4. Подати на БК напругу зсуву V_{BS} , протилежну за полярністю напрузі стоку V_D . Зняти сімейство характеристик $I_D = f(V_G)$ в області плавного каналу ($V_D = -0,1$ В) при різних V_{BS} (див. табл. 7.3). Побудувати графіки залежності $I_D = f(V_G)$ при різних значеннях V_{BS} і визначити за формулою (7.10) значення порогової напруги V_T . Побудувати графік залежності $\Delta V_T = V_T(V_{BS}) - V_T(V_{BS} = 0) = f(\sqrt{V_{BS} + 2\varphi_0} - \sqrt{2\varphi_0})$, і за співвідношеннями (7.15) і (7.16) розрахувати величину N_B .

Таблиця 7.3

V_{BS} , В	V_G , В	0	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-9	-10
0	I_D , мА											
2	I_D , мА											
4	I_D , мА											
6	I_D , мА											
8	I_D , мА											
10	I_D , мА											

5. Проаналізувати отримані дані та сформулювати висновки за результатами роботи.

7.3 Контрольні питання

- 1) У чому полягає фізичний принцип роботи польового МДП-транзистора?
- 2) Дати визначення основних структур, топологічних і електрофізичних параметрів МДП-транзисторів.
- 3) Чому в області відсічення струм стоку I_D не залежить від напруги на стоці V_D ?
- 4) Чим пояснити вплив напруги БК V_{BS} на характеристики МДП-транзистора?
- 5) Яким чином з експериментальних характеристик транзистора можна визначити його електрофізичні параметри?

ЛІТЕРАТУРА

1. Герасимов В. Г. и др. Основы промышленной электроники. – М.: Высшая школа, 1986. – 336 с.
2. Электротехника и электроника: Учебник в 3-х книгах. / Под ред. В.Г. Герасимова. Кн. 3. Электрические измерения и основы электроники. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 432 с.
3. Лачин В.И., Савелов Н.С. Электроника: учеб. пособие, 3-е изд., перераб. и доп. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2002. – 576 с.
4. Зі С. Фізика напівпровідникових приладів. – Москва: Мир, 1984. - кн. 1, 455 с., Кн. 2, 455 с.
5. Маллер Р., Кейминс Т. Элементы интегральных схем. – Москва, Мирю – 1989ю - 273 с.
6. Гуртов В. А. Полевые транзисторы со структурой металл - диэлектрик - полупроводник. - Петрозаводск, ПетрГУ. - 1984. - 92 с.
7. Кобболд Р. Теория применения полевых транзисторов. - Ленинград, Энергияю – 1975ю - гл. 2, 6, 7.
8. Парфенов А. Д. Технология микросхем. – Москва, Высшая школа. – 1977. - гл. 1.
9. Степаненко И. Л. Основы теории транзисторов и транзисторных микросхем. – Москва, Энергия. – 1973. - гл. 4, 5.
10. Черняев И. Н. Технология производства интегральных микросхем. – Москва, Энергия. – 1977. - гл. 17, 18.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
1. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 1	
Дослідження напівпровідникового випрямного діоду.....	4
1.1. Загальні відомості.....	4
1.2. Порядок виконання роботи.....	7
1.3. Контрольні запитання.....	8
2. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 2	
Характеристики напівпровідникового стабілітрону.....	10
2.1. Загальні відомості.....	10
2.2. Порядок виконання роботи.....	13
2.3. Контрольні запитання.....	15
3. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 3	
Дослідження варикапа.....	16
3.1. Загальні відомості.....	16
3.2. Порядок виконання роботи.....	19
3.3. Контрольні запитання.....	20
4. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 4	
Характеристики тріодного тиристора.....	21
4.1. Загальні відомості.....	21
4.2. Порядок виконання роботи.....	23
4.3. Контрольні запитання.....	25
5. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 5	
Характеристики біполярних транзисторів.....	26
5.1. Загальні відомості.....	26
5.2. Порядок виконання роботи.....	29
5.3. Контрольні запитання.....	30
6. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 6	
Підсилювачі на біполярних транзисторах.....	31
6.1. Загальні відомості.....	31
6.2. Порядок виконання роботи.....	33
6.3. Контрольні запитання.....	35
7. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 6	
Статичні характеристики польового транзистора зі структурою метал - діелектрик - напівпровідник (МДП-транзистор).....	36
7.1. Загальні відомості.....	36
7.2. Порядок виконання роботи.....	42
7.3. Контрольні запитання.....	44
ЛІТЕРАТУРА.....	45

Навчальне видання

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до лабораторних робіт з дисципліни
«Технологічні основи електроніки»
для студентів спеціальності
153 «Мікро- та наносистемна техніка»
Частина 1

Укладачі: КІРІЧЕНКО Михайло Валерійович
ЗАЙЦЕВ Роман Валентинович
МІНАКОВА Ксенія Олександрівна
ДРОЗДОВ Антон Миколайович

Відповідальний за випуск Р.В. Зайцев

План 2019 р.

Підписано до друку . Формат 60×84 1/16. Папір друк. №2.
Друк – ризографія. Гарнітура Times New Roman. Ум. друк. арк. 1,8.
Обл.-вид. 2,6. Тираж 50 прим.

Видавничий центр НТУ «ХП». 61002, Харків, вул. Кирипичева, 2.
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 116 від 10.07.2000 р.

Надруковано у типографії ТОВ «Цифра Принт»
на цифровому комплексі Xerox DocuTech 6135.
Свідоцтво про Державну реєстрацію А01 № 432705 від 3.08.2009 г.