МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

# МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до лабораторних робіт з дисципліни

# “ЕЛЕМЕНТИ ТА КОМПОНЕНТИ ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ”

152 „Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка“
(освітня програма: „Якість, стандартизація та сертифікація“);
153 „Мікро- та наносистемна техніка“
(освітня програма: „Мікро- та наноелектронні прилади і пристрої“)
денної й заочної форм навчання

2021

Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни “Елементи та компоненти електронних систем” 152 „Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка“ (освітня програма: „Якість, стандартизація та сертифікація“); 153 „Мікро- та наносистемна техніка“ (освітня програма: „Мікро- та наноелектронні прилади і пристрої“) денної й заочної форм навчання / Укл.: А. В. Коротун, Н. А. Смирнова, Н. М. Нагорна, Н. І. Павлище. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2021. – 70 с.

Укладачі: А. В. Коротун, доц., канд. фіз.-мат. наук,
Н. А. Смирнова, ст. викладач,
Н. М. Нагорна, ст. викладач,
Н. І. Павлище, аспірант

Рецензент: В. В. Погосов, проф., д-р фіз.-мат. наук

Відповідальний за випуск: А. В. Коротун, доц., канд. фіз.-мат. наук

Затверджено
на засіданні кафедри
мікро- та наноелектроніки

Протокол № 1
від “ 17 ” серпня 2021 р.

Рекомендовано до видання
НМК ФРЕТ
Протокол № 1
від “ 19 ” серпня 2021 р.

# ЗМІСТ

1 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1 „ДОСЛІДЖЕННЯ ПРЯМОЇ ГІЛКИ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДІОДА” . . . . . 6

1.1 Теоретичні відомості . . . . . 6
1.1.1 Класифікація електронно-діркових переходів . . . . . 6
1.1.2 Рівноважний стан *p-n* переходу . . . . . 7
1.1.3 Пряме зміщення *p-n* переходу. . . . . 7
1.1.4 Зворотне зміщення *p-n* переходу . . . . . 11
1.1.5 Вольт-амперна характеристика *p-n* переходу. Методика визначення струму насичення . . . . . 11
1.2 Схема електрична установки для зняття ВАХ діода. . . . . 13
1.3 Завдання. . . . . 14
1.4 Порядок виконання роботи. . . . . 14
1.5 Зміст звіту. . . . . 14
1.6 Контрольні запитання. . . . . 15

2 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2 „ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНОЇ ЗАЛЕЖНОСТІ ЗВОРОТНОЇ ГІЛКИ ВАХ ДІОДА”. . . . . 16

2.1 Теоретичні відомості . . . . . 16
2.1.1 Методика визначення контактної різниці потенціалів . . . . . 16
2.1.2 Вплив процесів генерації в *p-n* переході на ВАХ діода . . . . . 19
2.2 Завдання. . . . . 20
2.3 Порядок виконання роботи. . . . . 21
2.4 Зміст звіту. . . . . 21
2.5 Контрольні запитання. . . . . 22

3 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3 „ВИЗНАЧЕННЯ ОПОРУ БАЗИ ДІОДА” . . . . . 23

3.1 Теоретичні відомості. . . . . 23
3.1.1 Відмінності реальних ВАХ діодів від ідеальних. Явища, пов'язані з наявністю об'ємного опору бази . . . . . 23
3.1.2 Рівняння ВАХ діода з урахуванням падіння напруги на опорі бази. Методика визначення опору бази $R_b$ . . . . . 26
3.2 Завдання. . . . . 28
3.3 Порядок виконання роботи. . . . . 28
3.4 Зміст звіту. . . . . 29
3.5 Контрольні запитання. . . . . 29

4 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4 „ДОСЛІДЖЕННЯ ВАХ ДІОДА В ОБЛАСТІ ТЕПЛОВОГО ПРОБОЮ” . . . . . 30

4.1 Теоретичні відомості. . . . . 30
4.1.1 Механізм виникнення теплового пробою . . . . . 30
4.1.2 Зворотна гілка ВАХ діода в режимі теплового пробою. Методика визначення теплового опору конструкції діода . . . . . 30
4.1.3 Особливості теплового пробою в реальних діодах . . . . . 35
4.2 Завдання. . . . . 36
4.3 Порядок виконання роботи. . . . . 36
4.4 Зміст звіту. . . . . 36
4.5 Контрольні запитання. . . . . 37

5 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5 „ДОСЛІДЖЕННЯ ВАХ ДІОДА ПРИ ЛАВИННОМУ ПРОБОЇ”. . . . . 38

5.1 Теоретичні відомості. . . . . 38
5.1.1 Механізм утворення лавинного пробою. Коефіцієнт ударної іонізації . . . . . 38
5.1.2 Рівняння ВАХ діода в передпробійній області. Методика розрахунку напруги лавинного пробою і коефіцієнта лавинного помноження . . 39
5.1.3 Залежності напруги лавинного пробою від концентрації домішок у базі, її питомого опору і температури . . . . . 41
5.2 Завдання. . . . . 43
5.3 Порядок виконання роботи. . . . . 43
5.4 Зміст звіту. . . . . 43
5.5 Контрольні запитання. . . . . 44

6 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6 „БІПОЛЯРНИЙ ТРАНЗИСТОР”. . . . . 45

6.1 Теоретичні відомості. . . . . 45
6.1.1 Основні положення . . . . . 45
6.1.2 Принцип дії біполярного транзистора . . . . . 49
6.2 Завдання. . . . . 55
6.3 Порядок виконання роботи. . . . . 56
6.4 Зміст звіту. . . . . 57
6.5 Контрольні запитання. . . . . 57

7 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №7 „ПОЛЬОВИЙ ТРАНЗИСТОР З МДН-СТРУКТУРОЮ”. . . . . 58

7.1 Теоретичні відомості. . . . . 58
7.1.1 Основні положення . . . . . 58
7.1.2 Принцип дії МДН-транзистора на основі напівпровідника *p*-типу . 60

7.1.3 Характеристики МДН-транзистора . . . . . 63
7.1.4 Параметри МДН-транзистора . . . . . 64
7.2 Завдання. . . . . 67
7.3 Порядок виконання роботи. . . . . 67
7.4 Зміст звіту. . . . . 68
7.5 Контрольні запитання. . . . . 69

ПЕРЕЛІК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ . . . . . 70

# 1 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1 "ДОСЛІДЖЕННЯ ПРЯМОЇ ГІЛКИ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДІОДА"

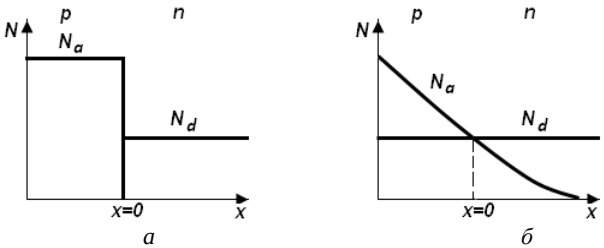
Метою роботи є: дослідження експериментально отриманої прямої гілки вольт-амперної характеристики (ВАХ) германієвого діода, визначення струму насичення.

## 1.1 Теоретичні відомості

### 1.1.1 Класифікація електронно-діркових переходів

Принцип роботи більшості сучасних напівпровідникових приладів оснований на використанні властивостей *p-n* переходу. Електронно-дірковий перехід − це перехідний шар між напівпровідниками *p*- і *n*- типу.

Електронно-діркові переходи класифікують за різними ознаками. За геометричними ознаками розрізняють площинні і сферичні *p-n* переходи. Якщо розміри сферичного *p-n* переходу порівнянні з дифузійною довжиною носіїв заряду, його називають *точковим*; якщо концентрації домішок по обидві сторони рівні − це *симетричний* перехід, якщо не рівні − *несиметричний*. При відмінності концентрацій домішок на один-два порядки і більше переходи називають *однобічними* і позначають $n^+$-*p*, $p^+$-*n*. За характером розподілу домішок *p-n* переходи підрозділяють на *різкі* − із ступінчастим розподілом домішкових атомів і *плавні* − з розподілом концентрації домішкових атомів, що описуються якою-небудь неперервною функцією. Розподіли домішок у таких переходах показані на рис. 1.1.




*а* − розподіл домішок у різкому переході; *б* − розподіл домішок у плавному переході

Рисунок 1.1 – Розподіли домішок у *p-n* переходах

*Металургійною межею* називають площину, де змінюється тип легуючої домішки.

### 1.1.2 Рівноважний стан *p-n* переходу

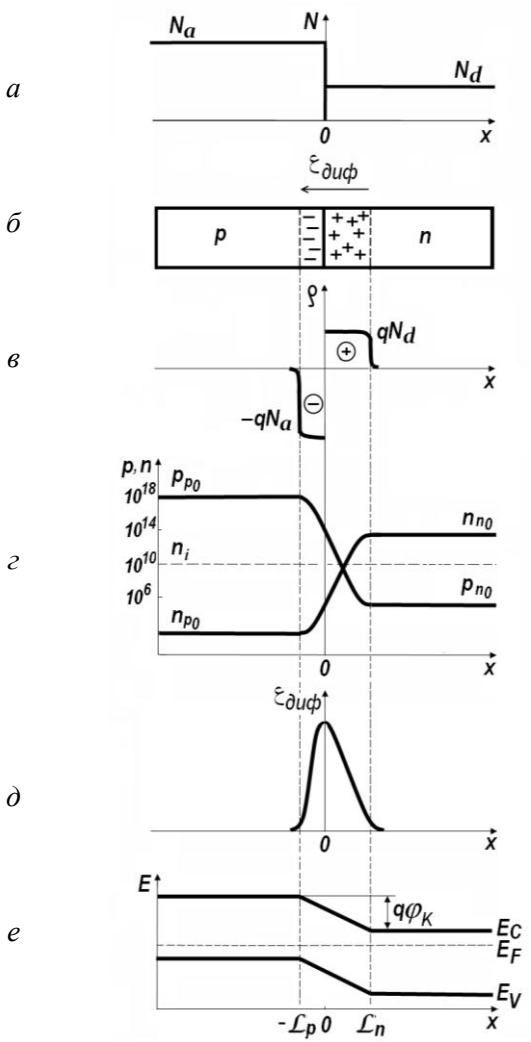
Стан *p-n* переходу називають *рівноважним*, якщо до нього не прикладена зовнішня напруга. У рівноважному стані *p-n* переходу за наявності градієнта концентрації з напівпровідника *n*-типу в напівпровідник *p*-типу дифундують електрони, а у зворотному напрямі – дірки. Після відходу електронів з тієї частини *n*-області, яка безпосередньо примикає до металургійної границі, в ній залишаються позитивні іони донорної домішки. Дірки, які дифундують з *p*- в *n*-область, залишають біля металургійної границі негативні іони акцепторної домішки. Таким чином, в результаті дифузії носіїв в областях, що примикають до границі поділу, утворюються просторові заряди іонів домішки (рис. 1.2, б), що не компенсуються. Це і є *p-n* перехід. Оскільки область переходу збіднена основними носіями заряду, вона матиме набагато більший опір, ніж електронейтральні *p*- і *n*-шари. Тому *p-n* перехід часто називають *збідненим шаром*. Позитивний і негативний заряди в суміжних шарах однакові, в цілому перехід електронейтральний (рис. 1.2, в), Тому в несиметричних переходах області, займані просторовими зарядами, різні: в шарі з меншою концентрацією домішки ширина області просторового заряду більша, тобто несиметричний перехід розташований переважно у високоомному шарі.

Між різнойменними зарядами в *p*- і *n*- областях виникає дифузійне поле, що перешкоджає подальшій дифузії основних носіїв заряду через перехід. Встановлюється рівноважний стан. Між *p*- і *n*-областями при цьому існує різниця потенціалів, яку називають *контактною різницею потенціалів*.

Зонну діаграму *p-n* переходу в рівноважному стані показано на рис. 1.2, е. Енергетичні рівні в *p*- і *n*-областях зсунуті на величину, яка дорівнює різниці рівнів Фермі в цих областях за відсутності контакту.

### 1.1.3 Пряме зміщення *p-n* переходу

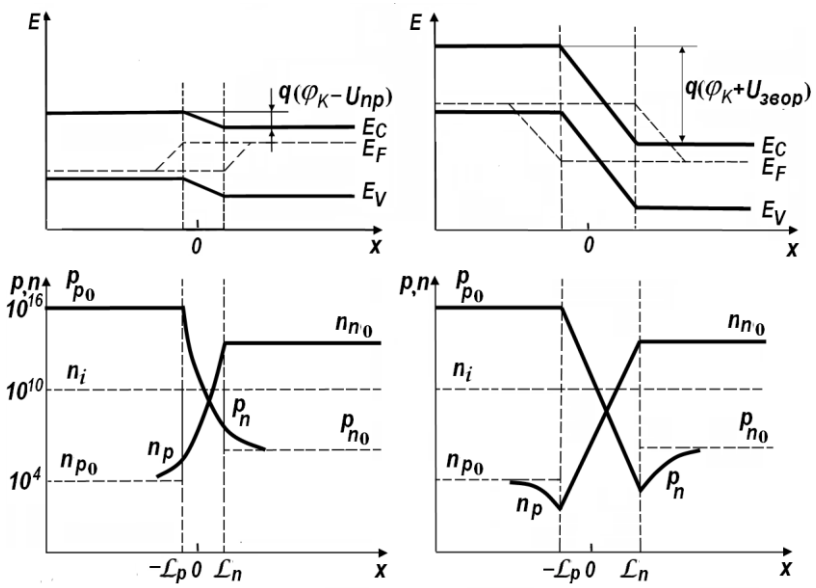
Якщо подати на *p-n* перехід пряме зміщення, зовнішнє електричне поле буде протилежного напряму до дифузійного поля, а потенціальний бар'єр на переході зменшиться (рис. 1.3, а). В результаті через




*а* – розподіл концентрації домішок; *б* – розділення зарядів і виникнення електричного поля; *в* – розподіл густини об'ємного заряду; *г* – розподіл концентрації носіїв заряду; *д* – розподіл напруженості поля; *е* – зонна діаграма

Рисунок 1.2 – Розподіли різних типів у ступінчастому *p-n* переході і зонна діаграма *p-n* переходу в рівноважному стані

*p-n* перехід проходитимуть дифузійні струми, зумовлені переміщенням електронів з *n*- області в *p*- область і дірок у протилежному напрямі. Відбувається процес введення (*інжекція*) носіїв заряду в область, де вони стають неосновними.




*а* – пряме зміщення *p-n* переходу; *б* – зворотне зміщення *p-n* переходу

Рисунок 1.3 − Енергетична діаграма *p-n* переходу і розподіл концентрації носіїв при подаванні на перехід прямого і зворотного зміщення

Зменшення висоти потенціального бар'єра переходу викликає зменшення напруженості результуючого поля $\mathcal{E}$. Ширина *p-n* переходу із зростанням прямої напруги швидко зменшується, і при рівності прямої напруги і контактної різниці потенціалу ($U_{пр} = \varphi_к$) збіднена область переходу зникає. Коли $U_{пр} > \varphi_к$, надлишок зовнішньої напруги падає на об'ємному опорі напівпровідникового матеріалу.

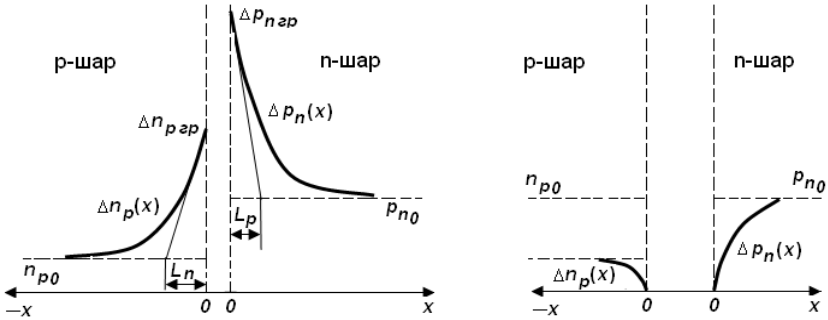
Під впливом інжекції поблизу границь запірного шару виникають нерівноважні концентрації неосновних носіїв заряду (рис. 1.3, а, 1.4, а). По мірі просування углиб областей нерівноважні носії заряду рекомбінують з основними носіями. На відстані декількох дифузійних

довжин від металургійної границі концентрація нерівноважних носіїв в обох областях зменшується до нуля.

Розподіл надмірної концентрації електронів в *n*–області (рис. 1.4, а)

$$\Delta n_p(x) = \Delta n_{p\,гр} \exp(x/L_n), \tag{1.1}$$

Координата $x$ прийнята рівною нулю на межах *p-n* переходу і нейтральних областей кристала. У формулі (1.1) координата $x$ від'ємна, оскільки напрям осі $x$ прийнятий протилежним.




*а* *б*

*а* – при прямому зміщенні; *б* – при зворотному зміщенні

Рисунок 1.4 – Розподіл надмірної концентрації нерівноважних носіїв заряду

Аналогічно в *p*-області

$$\Delta p_n(x) = \Delta p_{n\,гр} \exp(-x/L_p).$$

Концентрації неосновних носіїв на границях переходу залежать від напруги, прикладеної до переходу:

$$\begin{aligned} n_{p\,гр} &= n_{p0} \exp(U/\varphi_T); \\ p_{n\,гр} &= p_{n0} \exp(U/\varphi_T). \end{aligned}; \tag{1.2}$$

Чим більша напруга $U$, тим більше всередині запірного шару з'являється надлишкових носіїв заряду. При достатньо великій напрузі концентрації надлишкових електронів і дірок стають порівняними з

концентраціями основних носіїв заряду, що призводить до зменшення опору запірного шару.

Якщо перехід несиметричний, то нерівноважна концентрація носіїв заряду, інжектованих у високоомний шар, значно більша, ніж концентрація носіїв заряду, інжектованих у низькоомний шар. Тобто інжекція в несиметричному переході носить однобічний характер. Тому шар з меншим питомим опором, звідки переважно інжектують носії заряду, називається *емітером*, а шар з більшим питомим опором, в який переважно інжектують неосновні для нього носії, − *базою*.

### 1.1.4 Зворотне зміщення *p-n* переходу

Зміщення переходу у зворотному напрямі викликає збільшення напруженості електричного поля усередині області об'ємного заряду, оскільки поле, що створюється зовнішнім джерелом, додається до існуючого дифузійного поля. При цьому висота потенціального бар'єра для основних носіїв збільшується (рис. 1.3, б). Для неосновних носіїв потенціальний бар'єр у *p-n* переході відсутній. Неосновні носії втягуються полем в *p-n* перехід і проходять через нього в сусідню область. Відбувається процес введення носіїв заряду в область, де вони стають основними, цей процес називається *екстракцією*.

Концентрація неосновних носіїв біля границь переходу при цьому зменшується (рис. 1.3, б та рис. 1.4, б). Максимальне відхилення від рівноважної концентрації відбувається на границях переходу. З видаленням від границь збідненої області на відстань декількох дифузійних довжин концентрація наближається до рівноважної.

Оскільки неосновних носіїв завжди дуже мало (має місце співвідношення $np = n_i^2$), то і зворотні струми мають дуже малі значення.

### 1.1.5 Вольт-амперна характеристика *p-n* переходу. Методика визначення струму насичення

Детальний аналіз ВАХ *p-n* переходів − складне завдання. Зазвичай розглядають ідеальний *p-n* перехід, нехтуючи при цьому падінням напруги на нейтральних областях кристала і не враховуючи явищ на поверхні кристала, вважаючи, що товщина запірного шару дуже мала (при цьому не враховуються явища, що відбуваються в самому переході), а рівень інжекції низький: $\delta = \Delta p_n / n_{n0} \ll 1$ (це дозволяє вважати

надмірну концентрацію невеликою і враховувати тільки дифузійну складову струму).

Надмірні концентрації неосновних носіїв на границях переходу знайдемо, віднімаючи з $n_{p\,гр}$ та $p_{n\,гр}$ (1.2) відповідно рівноважні концентрації $n_{p0}$ та $p_{n0}$:

$$\Delta n_{p\,гр} = n_{p0}\left(e^{\frac{U}{\varphi_T}} - 1\right); \qquad \Delta p_{n\,гр} = p_{n0}\left(e^{\frac{U}{\varphi_T}} - 1\right). \tag{1.3}$$

Вважаємо, що на межах переходу напруженість поля дорівнює нулю і, отже, струм має дифузійну природу. Густину дифузійних струмів, зумовлених переміщенням електронів і дірок, визначають за виразами

$$\begin{aligned} j_{n\,диф} &= qD_n grad(\Delta n_p) = qD_n \frac{d(\Delta n_p)}{dx}; \\ j_{p\,диф}\, p\,диф &= -qD_p grad(\Delta p_n) = -qD_p \frac{d(\Delta p_n)}{dx}. \end{aligned} \tag{1.4}$$

Диференціюємо вирази (1.1)

$$\begin{aligned} \frac{d(\Delta n_p)}{dx} &= \frac{\Delta n_{p\,гр}}{L_n} e^{x/L_n}; \\ \frac{d(\Delta p_n)}{dx} &= -\frac{\Delta p_{n\,гр}}{L_p} e^{-x/L_p}. \end{aligned} \tag{1.5}$$

Підставляючи вирази (1.3) і (1.5) в (1.4) з урахуванням того, що $x = 0$ на границі переходу, отримуємо густини дифузійних струмів

$$j_{n\,диф} = \frac{qD_n}{L_n} n_{p0}(e^{U/\varphi_T} - 1);$$

$$j_{p\,диф} = \frac{qD_p}{L_p} p_{n0}(e^{U/\varphi_T} - 1).$$

Повна густина струму через *p-n* перехід дорівнює сумі густин струмів електронів і дірок у будь-якому перерізі діода. Підсумовуючи

величини $j_{n\,диф}$ та $j_{p\,диф}$, помноживши їх суму на площу переходу, отримуємо математичний вираз ВАХ ідеального *p-n* переходу

$$I = I_s(e^{U/\varphi_T} - 1), \qquad (1.6)$$

де струм насичення

$$I_s = \frac{qD_nS}{L_n} n_{p0} + \frac{qD_pS}{L_p} p_{n0}.$$

Вольт-амперні характеристики реальних діодів відрізняються від ідеалізованої ВАХ. Але, оскільки формула (1.6) проста і наочна, при аналізі і розрахунку напівпровідникових приладів та ІМС нею завжди користуються, але при цьому вводять поправочний коефіцієнт $m$ в знаменник аргументу експоненти.

Оскільки ВАХ германієвого точкового діода найбільш близька до ідеалізованої, то, використовуючи вираз (1.6) для опису ВАХ, отриманої в результаті експерименту, знаходимо струм насичення.

Без враховування одиниці у виразі (1.6) можна записати

$$I / I_s = e^{U/\varphi_T}; \quad \ln(I / I_s) = \ln I - \ln I_s = U / \varphi_T.$$

Тоді при $U = 0$ маємо $\ln I = \ln I_s$ Тобто побудувавши отриману експериментальну характеристику в напівлогарифмічних координатах $\ln I = f(U)$ і продовживши залежність до перетину з віссю ординат, можна знайти з достатнім ступенем точності струм насичення $I_s$, який дорівнюватиме величині відрізку, що відсікається на осі.

## 1.2 Схема електрична установки для зняття ВАХ діода

Схема, за допомогою якої знімається ВАХ діода, зображена на рис. 1.5.

В якості джерела змінної напруги використовують джерело живлення ВС−24М з можливістю регулювання напруги від 0 до 50 В. Щоб отримати ВАХ діода на екрані осцилографа, на його горизонтальні відхиляючі пластини подають напругу, що падає на діоді, а пропорційну струму через діод напругу, що падає на опорі $R2 = 1$ Ом, подають на вертикальні відхиляючі пластини.

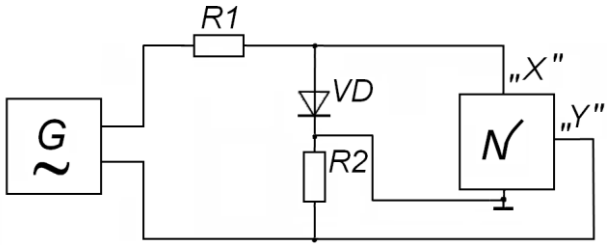



Рисунок 1.5 − Схема електрична установки для зняття ВАХ діода

Тип досліджуваного діода − Д9. У таких діодах за нормальних умов роботи постійна напруга, за даними ТУ, складає не більше 1 В при постійному струмі від 10 до 90 мА залежно від модифікації діода. Опір $R1$ потрібний в схемі для обмеження напруги, що подається на діод, до допустимого значення. Для спостереження ВАХ слід використати осцилограф з двома входами.

### 1.3 Завдання

1.3.1 Зніміть ВАХ діода.

1.3.2 Визначте струм насичення діода.

### 1.4 Порядок виконання роботи

1.4.1 Зберіть установку для зняття ВАХ діода.

1.4.2 Замалюйте ВАХ діода з екрана осцилографа.

1.4.3 Відкалібруйте осцилограф, якщо калібратор в осцилограф не вбудований.

1.4.4 Побудуйте ВАХ діода, відкладаючи по осях фізичні одиниці.

1.4.5 Визначте струм насичення діода, використовуючи приведену у п.1.1.5 методику знаходження струму насичення.

### 1.5 Зміст звіту

Звіт повинен містити: мету роботи; схему електричну установки для зняття ВАХ діода (рис. 1.5); рисунок ВАХ діода, що відповідає зображенню на екрані осцилографа; ціну поділки по осі $X$ установки у вольтах, ціну поділки по осі $Y$ установки в амперах; графік прямої гілки ВАХ діода з використанням фізичних одиниць; графік вказаної гіл-

ки у півлогарифмічних координатах; значення розрахованого струму насичення; висновки за результатами роботи.

### 1.6 Контрольні запитання

1 Що таке електронно-дірковий перехід?
2 Що таке контактна різниця потенціалів?
3 Який стан *p-n* переходу називається рівноважним?
4 Що розуміється під прямозміщеним *p-n* переходом?
5 Що розуміється під оберненозміщеним *p-n* переходом?
6 Як змінюється ширина *p-n* переходу при прикладенні до нього прямої і зворотної зовнішньої напруги?
7 Що таке рівень Фермі?
8 Яке рівняння і вигляд ВАХ ідеалізованого *p-n* переходу?
9 Що таке інжекція носіїв заряду?
10 Що таке екстракція носіїв заряду?
11 Що таке металургійна межа?
12 Який вид мають зонні діаграми діркового і електронного напівпровідників при абсолютному нулі температури?
13 Який вид зонних діаграм власного, електронного, діркового напівпровідників при $T \neq 0$ К?
14 Що таке ширина забороненої зони?
15 Як класифікуються електронно-діркові переходи?
16 Який шар в діоді називають емітером, а який базою?
17 Який за величиною опір області переходу?
18 За яким законом розподіляються надлишкові концентрації носіїв заряду в *p*- і *n*-областях при прямому зміщенні *p-n* переходу?
19 Що таке ідеальний *p-n* перехід?

# 2 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2 ”ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНОЇ ЗАЛЕЖНОСТІ ЗВОРОТНОЇ ГІЛКИ ВАХ ДІОДА”

Метою роботи є: дослідження впливу температури на зворотну гілку ВАХ діода; простеження зміни струму насичення зі зміною температури на *p-n* переході; визначення контактної різниці потенціалів *p-n* переходу на основі отриманих в результаті експерименту характеристик.

## 2.1 Теоретичні відомості

### 2.1.1 Методика визначення контактної різниці потенціалів

При зворотному ввімкненні діода висота потенціального бар'єра збільшується, що перешкоджає проходженню через *p-n* перехід основних носіїв. Неосновні носії втягуються електричним полем в *p-n* перехід і екстрагують в сусідню область. При цьому через *p-n* перехід тече малий зворотний струм, оскільки концентрація неосновних носіїв незначна.

Концентрація неосновних носіїв заряду біля меж *p-n* переходу зменшується, виникає градієнт їх концентрації і, як наслідок, дифузія неосновних носіїв заряду з об'ємів *p*- і *n*-областей діода. Неосновні носії заряду, що дифундіюють, виникають в результаті теплової генерації і на невипрямляючих контактах.

Зворотний струм діода, починаючи з дуже малих значень зворотної напруги, не змінюється при зміні напруги. Цей струм називають струмом насичення діода. Його постійність можна пояснити тим, що за час життя до *p-n* переходу можуть продифундувати тільки неосновні носії, що виникли на відстані, яка не перевищує дифузійну довжину. Інші неосновні носії, не встигнувши дійти до переходу, рекомбінують в об'ємі (рис. 2.1).

Струм насичення може змінюватися тільки при зміні концентрації неосновних носіїв заряду в *p*- і *n*-областях, що може бути викликано тільки зміною температури. Тому струм насичення називають також тепловим струмом.

Струм, що тече через *p-n* перехід, можна виразити залежністю

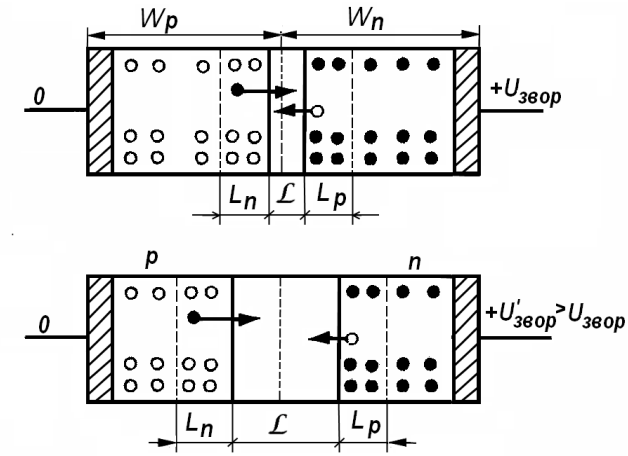



Рисунок 2.1 − Екстракція неосновних носіїв з прилеглих до *p-n* переходу областей при різній зворотній напрузі на діоді

$$I = Sq\left(\frac{D_p p_{n0}}{L_p}\operatorname{cth}\frac{W_n}{L_p} + \frac{D_n n_{p0}}{L_n}\operatorname{cth}\frac{W_p}{L_n}\right)\left(e^{qU/k_BT} - 1\right), \qquad (2.1)$$

де $D_n$, $D_p$ − коефіцієнти дифузії електронів і дірок; $L_n$, $L_p$ − дифузійні довжини електронів і дірок; $p_{n0}$, $n_{p0}$ − концентрації неосновних носіїв в рівноважному стані *p-n* переходу; $S$ − площа переходу; $W_n$, $W_p$ − товщини *n*- і *p*-областей.

При негативних значеннях $U$, більших за $3\varphi_T$, другий співмножник в рівнянні наближається до мінус одиниці і, отже, через *p-n* перехід проходитиме струм насичення, незалежний від прикладеної напруги. Його вираз

$$I_s = Sq\left(\frac{D_p p_{n0}}{L_p}\operatorname{cth}\frac{W_n}{L_p} + \frac{D_n n_{p0}}{L_n}\operatorname{cth}\frac{W_p}{L_n}\right).$$

Струм насичення залежить від співвідношення $W/L$. При $W_n \gg L_p$ та $W_p \gg L_n$ можна вважати $\operatorname{cth}(W/L) \approx 1$, тоді

$$I_s = Sq\left(\frac{D_p p_{n0}}{L_p} + \frac{D_n n_{p0}}{L_n}\right) = Sqn_i^2\left(\frac{D_p}{L_p p_{p0}} + \frac{D_n}{L_n n_{n0}}\right). \qquad (2.2)$$

Із виразу (2.2) виходить, що струм $I_s$ визначається електрофізичними властивостями напівпровідника, на основі якого виготовлений *p-n* перехід. Випрямляючі властивості *p-n* переходу тим кращі, чим меншим є струм насичення.

Використовуючи співвідношення

$$\frac{p_{n0}}{p_{p0}} = \frac{n_{p0}}{n_{n0}} = e^{-q\varphi_к/(k_B T)},$$

рівняння (2.2) можна перетворити наступним чином:

$$I_s = Sq\left(\frac{D_n p_{p0}}{L_p} + \frac{D_n n_{n0}}{L_n}\right)e^{-q\varphi_к/(k_B T)}.$$

Залежністю коефіцієнтів дифузії $D_n$ та $D_p$, дифузійних довжин $L_n$ і $L_p$ від температури можна знехтувати; концентрацію $p_{p0}$ можна прийняти рівною $N_a$, а концентрацію $n_{n0}$ − рівною $N_d$. Тому з великою мірою точності можна представити температурну залежність струму насичення у вигляді

$$I_s(T) = I_{s\infty}e^{-q\varphi_к/(k_B T)}. \qquad (2.3)$$

Приймаємо, що струм $I_{s\infty}$ не залежить від температури. Збільшення струму насичення із зростанням температури дуже велике. Наприклад, для германієвого діода при $I_s(T_0) = 1\,\text{мкА}$, $T_0 = 20\,°\text{C}$ зворотний струм збільшується у 430 разів − до $0{,}43\,\text{мА}$ при $T = 80\,°\text{C}$. При великих температурах струм $I_s$ збільшується настільки, що діод втрачає працездатність.

Отримавши в результаті експерименту значення струмів насичення діода для різних температур і випрямивши вказану залежність в

координатах $\ln I_s = f\left(1/T\right)$, можна визначити через тангенс кута нахилу прямої контактну різницю потенціалів $\varphi_к$.

У пропонованій методиці розрахунку контактної різниці потенціалів не враховується залежність її від температури. Насправді $\varphi_к$ із зростанням температури зменшується. Це пов'язано з тим, що при збільшенні температури рівень Фермі як в *p*-, так і в *n*-областях прагне до середини забороненої зони. Тому в результаті розрахунків отримуємо деяку усереднену в діапазоні вимірюваних температур контактну різницю потенціалів.

### 2.1.2 Вплив процесів генерації в *p-n* переході на ВАХ діода

Рівняння ВАХ переходу (2.1) отримано без урахування процесів генерації і рекомбінації носіїв заряду в області просторового заряду. Таке припущення справедливе тільки для дуже тонких переходів. Для більшості реальних переходів вид ВАХ істотно залежатиме від цих процесів.

При зворотному зміщенні *p-n* переходу його запірний шар збіднений носіями заряду ($np \ll n_i^2$) і рівновага між процесами генерації і рекомбінації порушена. Переважаючим буде процес генерації носіїв заряду.

Генерація носіїв заряду відбувається через пастки, що мають енергетичні рівні поблизу середини забороненої зони. Пастки захоплюють електрони з валентної зони. Дірки, що утворюються при цьому у валентній зоні, зразу ж переносяться полем у *p*-область. Електрони, що потрапили у пастки, повернутися у валентну зону не можуть, оскільки там немає дірок, з якими вони могли б рекомбінувати. Під дією теплового збудження електрони переходять в зону провідності і під дією зовнішнього поля миттєво виводяться в *n*-область з *p-n* переходу.

В результаті генерації пар електрон − дірка виникає зворотний струм генерації. Цей струм пропорційний об'єму збідненого шару $S\mathcal{L}$ (де $\mathcal{L}$ − товщина *p-n* переходу) і швидкості генерації носіїв в ньому $G = n_i / \tau$, де $n_i$ − концентрація носіїв, що виникають у збідненому шарі; $\tau = \tau_n + \tau_p$ − сумарний час життя електрона і дірки. Звідси струм термогенерації

$$I_{\text{G}} = qS\mathcal{L}G = qS\mathcal{L}n_i / \tau.$$

У діодах на основі напівпровідників з малою шириною забороненою зони ($n_i$ велике) при зворотному зміщенні переважає струм насичення, з великою шириною − струм термогенерації.

Струм термогенерації залежить від зворотної напруги, яка визначає товщину *p-n* переходу. Тому в діодах, де переважаючим є струм термогенерації, немає ділянки постійного струму на зворотній гілці ВАХ.

Якщо час життя носіїв заряду слабко змінюється з температурою, то струм термогенерації матиме таку ж температурну залежність, що і $n_i$. З виразу (2.2) видно, що струм насичення пропорційний $n_i^2$, тому зі зміною температури він змінюється швидше, ніж струм термогенерації.

**2.2 Завдання**

2.2.1 Використовуючи отримані в результаті експерименту зворотні гілки ВАХ діода при різних температурах, побудуйте таблицю за формою 2.1. На основі таблиці побудуйте графік залежності $\ln I_s = f\left(1/T\right)$, визначте струм $I_{s\infty}$, що дорівнює величині відрізку, який відсікається графіком на осі ординат, а також контактну різницю потенціалів $\varphi_к$ *p-n* переходу, якщо тангенс кута між спрямленою залежністю $\ln I_s = f\left(1/T\right)$ і оссю абсцис $\mathrm{tg}\alpha = \frac{q\varphi_к}{k_B}$, де $k_B$ – стала Больцмана.

Таблиця 2.1 – Форма таблиці для запису результатів вимірювань

| $T$, K | $I_s$, A | $1/T$, K$^{-1}$ | $\ln I_s$ |
|---|---|---|---|
| | | | |

2.2.2 Побудуйте в масштабі зонну діаграму досліджуваного *p-n* переходу в рівноважному стані.

## 2.3 Порядок виконання роботи

2.3.1 Для дослідження необхідно вибрати діод, виготовлений з напівпровідника з малою шириною забороненої зони (наприклад, германію). Тільки у таких діодів визначальною складовою зворотного струму діода буде струм насичення. Зворотні гілки ВАХ кремнієвих і арсенід-галієвих діодів не мають ділянки насичення.

2.3.2 Зібрати установку для зняття зворотної гілки ВАХ діода (схема електрична установки приведена на рис. 1.5).

2.3.3 Зобразити зворотні гілки ВАХ діода при різних температурах середовища. Зміна температури середовища імітується нагріванням діода в термостаті. Підвищувати температуру слід до виникнення пробійних явищ у діоді.

2.3.4 Зробити калібрування осцилографа по кожному з вхідних каналів, якщо калібратор в осцилограф не вбудований.

2.3.5 Побудувати графічні залежності зворотних гілок ВАХ діода при різних температурах середовища в абсолютних одиницях.

2.3.6 Побудувати графічну залежність $\ln I_s = f\left(1/T\right)$.

2.3.7 Виконати пункти 2.2.1 і 2.2.2 завдання.

## 2.4 Зміст звіту

Звіт повинен містити:

– мету роботи;
– схему електричну установки для зняття зворотної гілки ВАХ діода (рис. 1.5);
– зображення зворотних гілок ВАХ діода при різних температурах середовища;
– графіки залежностей зворотних гілок ВАХ діода при різних температурах середовища в абсолютних одиницях;
– заповнену за формою 2.1 таблицю результатів експерименту;
– залежність $\ln I_s = f\left(1/T\right)$;
– визначений струм $I_{S\infty}$ і контактну різницю потенціалів $\varphi_к$ *p-n* переходу;
– зонну діаграму досліджуваного *p-n* переходу в рівноважному стані у масштабі;

– висновки за результатами роботи.

## 2.5 Контрольні запитання

1 Яке явище називається дифузією носіїв заряду?
2 Що таке дифузійна довжина носіїв заряду?
3 Як змінюється ширина забороненої зони напівпровідників зі зміною температури?
4 Які носії заряду і під дією чого створюють зворотний струм через *p-n* перехід?
5 Який струм називають струмом насичення діода?
6 Як розрізняються струми насичення двох *p-n* переходів, виготовлених з одного матеріалу, але з різним ступенем легування бази?
7 Яким явищем обумовлений струм термогенерації *p-n* переходу?
8 Яке співвідношення між струмами термогенерації і струмами насичення у германієвих і кремнієвих переходів?
9 Як залежить контактна різниця потенціалів від температури?
10 Чим зумовлено зростання струму термогенерації при збільшенні зворотного зміщення *p-n* переходу?
11 Як змінюється висота потенціального бар'єра при зворотному зміщенні *p-n* переходу?
12 Як змінюється висота потенціального бар'єра при прямому зміщенні *p-n* переходу?
13 Чому зворотний струм германієвого діода, починаючи з дуже малих значень зворотної напруги, не змінюється при зміні напруги?
14 Дайте якісну оцінку залежностей коефіцієнтів дифузії $D_n$ та $D_p$, дифузійних довжин $L_n$ і $L_p$ від температури.
15 Чому струм насичення зі зміною температури змінюється швидше, ніж струм термогенерації?
16 Чому струм насичення називають також тепловим струмом?

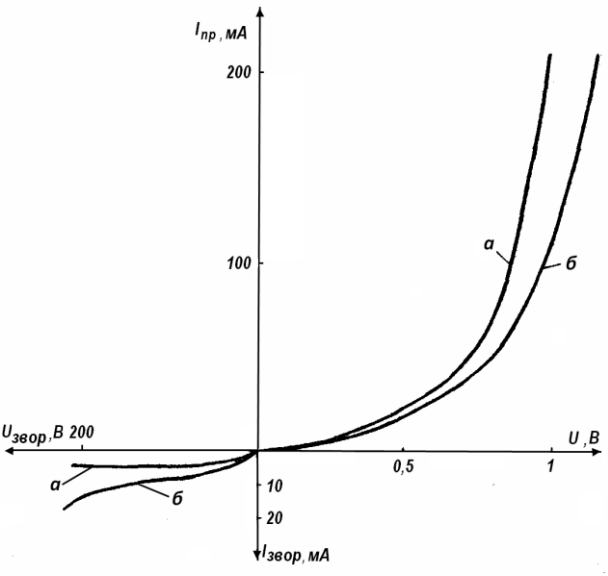
# 3 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3 ”ВИЗНАЧЕННЯ ОПОРУ БАЗИ ДІОДА”

Метою роботи є: вивчення впливу базової області діода на пряму гілку ВАХ діода; визначення опору базової області напівпровідникового діода; визначення *m*-фактора.

## 3.1 Теоретичні відомості

### 3.1.1 Відмінності реальних ВАХ діодів від ідеальних. Явища, пов'язані з наявністю об'ємного опору бази

Вольт-амперні характеристики реальних діодів мають деякі відхилення від теоретичних (рис. 3.1). Основні причини таких відхилень: наявність поверхневих струмів витікання, генерація і рекомбінація носіїв у збідненому шарі; високий рівень інжекції; вплив послідовного опору. Відмінності особливо істотні для діодів, виготовлених з широкозонних напівпровідників.




а – ВАХ ідеального р-п переходу; б – ВАХ реального діода

Рисунок 3.1 − ВАХ діода

Розглянемо вплив наведених причин на пряму гілку ВАХ кремнієвого діода. Наявність струмів витікання пояснюється існуванням на поверхні напівпровідника іонних зарядів, які індукують заряди в напівпровіднику, що призводить до утворення поверхневих каналів. У кремнієвих діодах поверхневі струми витікання менші за струми рекомбінації.

У діодах на основі напівпровідників з великою шириною забороненої зони із-за великої висоти потенціального бар'єра при малих прямих напругах інжекція носіїв ускладнена. Тому прямий струм при малій напрузі визначатиметься рекомбінаційним струмом. Основна частина носіїв не може здолати потенціальний бар'єр переходу і поблизу середини *p-n* переходу може відбуватися їх рекомбінація. Складову прямого струму, пов'язану з процесом рекомбінації носіїв в електронно-дірковому переході, називають рекомбінаційним струмом. Для діодів, у яких товщина бази набагато більша дифузійної довжини носіїв заряду, струм рекомбінації

$$I_{рек} \sim \exp(\frac{U}{2\varphi_T}).$$

Тоді повний струм, що є сумою струмів рекомбінації і інжекції,

$$I_{пр} \approx \exp\left(\frac{U}{m\varphi_T}\right),$$

де $m$ – $m$-фактор ($m = 2$, якщо переважає рекомбінаційний струм, і $m = 1$, якщо переважає інжекційний струм). Якщо обидва струми порівнянні за значенням, то значення $m$ знаходиться між 1 і 2.

При невеликій густині струму($\sim 10$ А/см$^2$) діод працює в режимі низького рівня інжекції ($\Delta p_n \ll n_{n0}$). Майже вся прикладена напруга падає на *p-n* переході. Концентрація нерівноважних носіїв в *n*- і *p*-областях незначна.

При густині струму близько $10^3$ А/см$^2$ нерівноважні носії порушують електронейтральність *p*- і *n*- областей. Дірки, наприклад, проникають в *n*-область, створюють в ній деякий позитивний заряд, в результаті з'являється електричне поле, що призводить до руху електронів від невипрямляючого контакту до приграничної області переходу.

Заряд електронів практично повністю компенсує заряд дірок. У *n*-області товщиною $W_n$, у якій товщина запірної області $L_n$, приростання концентрацій електронів і дірок приблизно рівні (рис. 3.2). Проте надлишкова концентрація основних носіїв біля *p-n* переходу дещо менше надлишкової концентрації неосновних носіїв. В цьому випадку дотримується не ідеальна електронейтральність бази, а наближена або, як її називають, *квазінейтральність*.

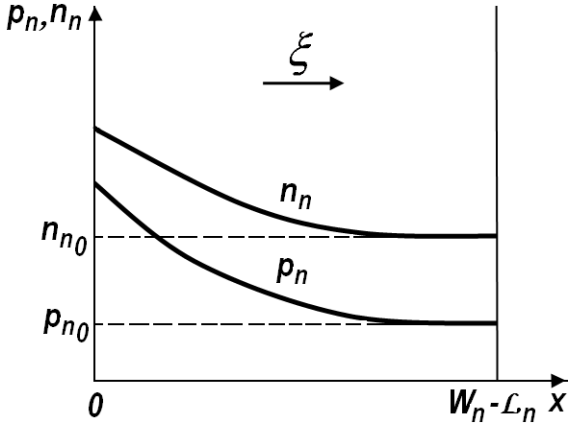



Рисунок 3.2 – Розподіл концентрації неосновних і основних носіїв в базі діода при прямому ввімкненні та густині струму близько $10^3$ А/см$^2$

Густина струму величиною приблизно $10^4$ А/см$^2$ призводить до дуже високого рівня інжекції ($\Delta p_n \geq n_{n0}$). При цьому падіння напруги на переході зі зростанням струму змінюється слабо в порівнянні зі зміною омічного падіння напруги в обох областях діода. Але падіння напруги на об'ємному опорі бази більше, ніж на опорі емітера, оскільки база легована менше.

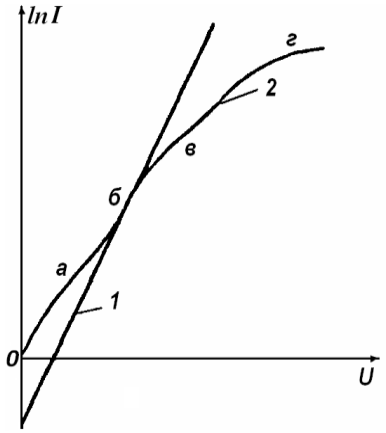
Побудова ВАХ в напівлогарифмічному масштабі може дати інформацію відносно механізмів протікання струму. Не завжди характеристика може співпадати з характеристикою на рис. 3.3, деякі ділянки на ній можуть бути відсутніми. Наприклад, ділянка, що відповідає рекомбінаційному струму, може відразу перейти в ділянку з переважанням дифузійного струму.

Опір бази із зростанням струму зменшується. Це явище, що називається *модуляцією опору бази*, виникає із-за збільшення концент-

рації електронів у базі внаслідок дотримання умови квазінейтральності. Провідність бази в цьому разі слід розраховувати за формулою

$$\sigma = q\mu_n(n_{n0} + \Delta n(x)) .$$

Вказане явище покращує ВАХ діода при великих струмах.




*а* − переважання генераційно-рекомбінаційного струму; *б* − переважання дифузійного струму; *в* − високий рівень інжекції і модуляція опору бази; *г* − напруга на електронно-дірковому переході наближається до $\varphi_к$

Рисунок 3.3 − Пряма гілка ВАХ діода в напівлогарифмічних координатах ідеального (1) і реального (2) діода

### 3.1.2 Рівняння ВАХ діода з урахуванням падіння напруги на опорі бази. Методика визначення опору бази $R_Б$

Модуляцією опору бази можна знехтувати у тому випадку, якщо товщина бази у багато разів перевищує дифузійну довжину неосновних носіїв. Тоді рівняння ВАХ діода може бути представлене у вигляді

$$I = I_s\left(e^{\frac{U - IR_Б}{m\varphi_T}} - 1\right), \qquad (3.1)$$

де $I_s$ − зворотний струм насичення;

$U$ − напруга, прикладена до діода;

$R_Б$ − опір бази діода;

$m$ − коефіцієнт при температурному потенціалі ($m$-фактор); що вводиться для врахування неідеальності переходу.

При високих рівнях інжекції на опорі бази падає достатньо велика частина напруги, прикладеної до діода.

Тоді пряма напруга виражатиметься

$$U = m\varphi_T \ln\left(\frac{I}{I_s} + 1\right) + IR_Б . \qquad (3.2)$$

Для кремнієвих діодів у виразі (3.1) можна знехтувати одиницею, оскільки струм $I_s$ дуже малий.

Другий доданок (омічне падіння напруги) залежить від струму лінійно, а перший − логарифмічно. Тому при досить великому струмі експоненціальна ВАХ вироджується, стає більш лінійною:

$$U = \varphi_к + IR_Б ,$$

що дозволяє для діодів з товстою базою оцінити контактну різницю потенціалів (рис. 3.4).

1 − пряма гілка ідеального *p-n* переходу; 2 – ВАХ реального діода

Рисунок 3.4 − Пряма гілка ідеального *p-n* переходу та ВАХ діода

Ділянка ВАХ, де характеристика наближається до лінійної, називається омічною. Якби модуляція опору бази не мала місця, ділянка була б лінійною. Опір бази залежить від її питомого опору і визначається геометрією розтікання струму бази. Із-за наявності опору бази

погіршуються випрямляючі властивості *p-n* переходу, оскільки збільшується пряме падіння напруги на діоді і зростає розсіювана на ньому потужність. Вплив опору бази істотно зменшується при використанні матеріалів з епітаксіальними шарами.

Зручним параметром, що характеризує пряму гілку ВАХ, є диференціальний опір переходу. Шляхом нескладних перетворень значення цього опору може бути отримане з виразу (3.2):

$$R_{диф} = \frac{dU}{dI} = \frac{m\varphi_T}{I + I_s} + R_Б .$$

Залежність $R_{диф}(I)$ показана на рис. 3.5. При великих струмах диференціальний опір наближається до опору бази.

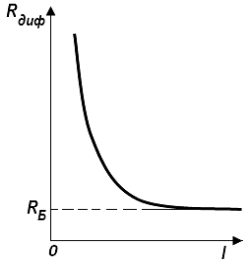



Рисунок 3.5 − Залежність диференціального опору діода від струму діода

## 3.2 Завдання

3.2.1 Отримайте експериментальним шляхом пряму гілку ВАХ кремнієвого діода.

3.2.2 Визначте опір бази діода, $m$-фактор.

## 3.3 Порядок виконання роботи

3.3.1 Зберіть установку для зняття прямої гілки ВАХ діода (схема електрична установки показана на рис. 1.5).

3.3.2 Замалюйте пряму гілку ВАХ діода з екрану осцилографа.

3.3.3 Зробіть калібрування осцилографа по кожному з вхідних каналів, якщо калібратор в осцилограф не вбудований.

3.3.4 Побудуйте ВАХ діода в абсолютних одиницях.

3.3.5 Побудуйте графік залежності диференціального опору діода від струму, визначаючи $R_{диф} = dU / dI$ як тангенс кута нахилу дотичної до точки на прямій гілці ВАХ. По графіку визначте $R_Б$.

3.3.6 Побудуйте графічну залежність $\ln I = f\left(U - \Delta U\right)$, де $\Delta U$ − падіння напруги на базі діода, рівне $IR_Б$; $U - \Delta U$ − падіння напруги на *p-n* переході. Визначте з графіка $m\varphi_T$.

3.3.7 Розрахуйте $m$-фактор, прийнявши $\varphi_T = 0{,}0258$ В.

3.3.8 Побудуйте ВАХ *p-n* переходу.

### 3.4 Зміст звіту

Звіт повинен містити: мету роботи; схему електричну установки для зняття прямої гілки ВАХ (рис. 1.5); рисунок прямої гілки ВАХ діода з екрану осцилографа; ВАХ діода в абсолютних одиницях; побудований графік залежності диференціального опору діода від струму діода; визначений з вказаного графіка опір бази $R_Б$; графічну залежність $\ln I = f\left(U - \Delta U\right)$ відповідно до п. 3.3.6; добуток $m$-фактора на тепловий потенціал $m\varphi_T$; $m$-фактор, розрахований відповідно до п. 3.3.7, ВАХ *p-n* переходу у графічному вигляді; висновки за результатами роботи.

### 3.5 Контрольні запитання

1 Від чого залежить опір бази діода?

2 Як впливає процес рекомбінації носіїв в *p-n* переході діода на його ВАХ?

3 З яких причин ВАХ реальних діодів відрізняються від ідеальних?

4 Які явища потрібно враховувати при роботі діода на високому рівні інжекції?

5 Як впливає наявність опору бази діода на випрямляючі властивості *p-n* переходу?

6 Яке явище називається модуляцією опору бази?

7 Як визначається диференціальний опір діода?

8 Характерні ділянки ВАХ діода.

9 Чим відрізняються ВАХ діодів з товстою і тонкою базами?

# 4 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4 ”ДОСЛІДЖЕННЯ ВАХ ДІОДА В ОБЛАСТІ ТЕПЛОВОГО ПРОБОЮ”

Метою роботи є: дослідження ВАХ діода в області теплового пробою; визначення теплового опору конструкції діода.

## 4.1 Теоретичні відомості

### 4.1.1 Механізм виникнення теплового пробою

Різке зменшення диференціального опору запірного шару при досягненні зворотною напругою критичного значення називається пробоєм *p-n* переходу. Існує три основні механізми пробою: тепловий, лавинний і тунельний.

Тепловий пробій обумовлений саморозігріванням *p-n* переходу зворотним струмом, що проходить через нього, при недостатньому тепловідводі. У подібній ситуації перехід може нагрітися до температури, при якій можливий розрив валентних зв'язків внаслідок теплового збудження. Це викликає підвищення концентрації вільних носіїв заряду в *p-n* переході і, отже, подальше збільшення струму. В результаті перехід буде ще розігріватися, а струм зростати.

Тепловий пробій незворотний, оскільки супроводжується руйнуванням напівпровідникового матеріалу в місці *p-n* переходу. Руйнуванню матеріалу можна запобігти, якщо послідовно з діодом включити опір, що обмежує струм.

### 4.1.2 Зворотна гілка ВАХ діода в режимі теплового пробою. Методика визначення теплового опору конструкції діода

При зворотному зміщенні *p-n* переходу через нього тече невеликий зворотний струм. Потужність, що виділяється на *p-n* переході

$$P_{вид} = U_{звор} I_{звор} .$$

Від *p-n* переходу в результаті теплопровідності відводиться потужність

$$P_{відв} = \left(T_j - T_0\right) / R_T ,$$

де $T_j$ − температура *p-n* переходу;

$T_0$ – температура довкілля;

$R_T$ – тепловий опір діода, К/Вт .

У стаціонарному режимі встановлюється теплова рівновага між теплотою, що виділяється і відводиться. *Рівняння теплового балансу* має вигляд

$$U_{звор} I_{звор} = \frac{T_j - T_0}{R_T} .$$

З фізики напівпровідників відомо, що

$$q\varphi_к = k_B T \ln \frac{n_{n0} p_{p0}}{n_i^2} ; \qquad n_i^2 = N_c N_v \exp(-\Delta E_g / (k_B T)) ,$$

де $N_c$, $N_v$ – ефективна густина станів у зоні провідності та у валентній зоні;

$n_i$ – концентрація носіїв заряду у власному напівпровіднику.

Тоді

$$q\varphi_к = k_B T (\ln(n_{n0} p_{p0}) - \ln(N_c N_v) + \Delta E_g / (k_B T)) =$$

$$= \Delta E_g + k_B T \ln \frac{n_{n0} p_{p0}}{N_c N_v} = \Delta E_g - k_B T \ln \frac{N_c N_v}{n_{n0} p_{p0}} .$$

На підставі формули (2.3)

$$I_s(T) = I_{s\infty} e^{-q\varphi_к / (k_B T)} = I_{s\infty} \exp(-\frac{\Delta E_g}{k_B T} + \ln \frac{N_c N_v}{n_{n0} p_{p0}}) =$$

$$= I_{s\infty} \cdot \frac{N_c N_v}{n_{n0} p_{p0}} \exp(-\frac{\Delta E_g}{k_B T}) = I'_{s\infty} \cdot \exp(-\frac{\Delta E_g}{k_B T}).$$

Вважаючи, що $I'_{s\infty}$ менше залежить від температури порівняно з експонентою, температурна залежність зворотного струму насичення з достатньою точністю описується формулою

$$I_{звор} = I'_{s\infty} e^{-\frac{\Delta E_g}{k_B T_j}}, \qquad (4.1)$$

де $I'_{s\infty}$ має формальний сенс зворотного струму при нескінченно великій температурі.

Щоб оцінити вплив розігрівання *p-n*-переходу на зворотний струм діода, уводять поняття температурного коефіцієнта зворотного струму:

$$\alpha = TKI = \frac{1}{I_{звор}} \frac{dI_{звор}}{dT_j}. \qquad (4.2)$$

Підставляючи рівняння (4.1) у вираз ( 4.2), отримаємо

$$\alpha = \frac{1}{I'_{s\infty} \exp(-\frac{\Delta E_g}{k_B T_j})} \cdot \frac{I'_{s\infty} \exp(-\frac{\Delta E_g}{k_B T_j}) \cdot \Delta E_g}{k_B T_j^2} = \frac{\Delta E_g}{k_B T_j^2}. \qquad (4.3)$$

Розділимо змінні в диференціальному рівнянні (4.2) і зробимо інтегрування, погодивши межі інтегрування :

$$\int_{I_0}^{I_{звор}} \frac{dI_{звор}}{I_{звор}} = \alpha \int_{T_0}^{T_j} dT_j,$$

де $I_0$ − початкове значення зворотного струму насичення при початковій температурі переходу $T_0$.

При інтегруванні припускаємо, що температурний коефіцієнт $\alpha$ не залежить від температури. Це припущення вірне на початку розвитку теплового пробою.

В результаті інтегрування отримаємо

$$\ln \frac{I_{звор}}{I_0} = \alpha (T_j - T_0) \qquad (4.4)$$

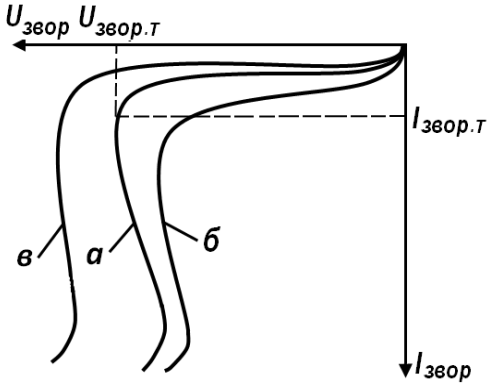
або

$$I_{звор} = I_0 e^{\alpha\left(T_j - T_0\right)}. \qquad (4.5)$$

Підставимо $I_{звор}$ в рівняння теплового балансу і розв'яжемо його відносно $U_{звор}$:

$$U_{звор} = \frac{T_j - T_0}{R_T I_0 e^{\alpha\left(T_j - T_0\right)}}. \qquad (4.6)$$

Вирази (4.5) і (4.6) є системою двох рівнянь зворотної гілки ВАХ діода з урахуванням тепловиділення в *p-n* переході. ВАХ діода в області теплового пробою показана на рис. 4.1.




*а* – ВАХ діода в області теплового пробою при температурі $T_0$; *б* – ВАХ діода в області теплового пробою при температурі $T_1 > T_0$; *в* – ВАХ діода при переході лавинного пробою у тепловий

Рисунок 4.1 – Зворотні гілки ВАХ діода в режимі теплового пробою

При тепловому пробої $\frac{dU_{звор}}{T_j} = 0$. Після диференціювання рівняння (4.6) і спрощень отримаємо

$$1 - \alpha(T_j - T_0) = 0.$$

З урахуванням виразу (4.3)

$$1-\frac{\Delta E_g}{k_B T_j^2}(T_j - T_0) = 0$$

або

$$T_j^2 - \frac{\Delta E_g}{k_B} T_j + \frac{\Delta E_g}{k_B} T_0 = 0. \qquad (4.7)$$

Із виразу (4.7) можна оцінити температуру *p-n* переходу при $U_{проб.T}$

$$T_j = \frac{\Delta E_g}{2k_B} - \sqrt{\left(\frac{\Delta E_g}{2k_B}\right)^2 - \frac{\Delta E_g}{k_B} T_0}.$$

Використовуючи рівняння (4.4) і (4.6), виразимо $U_{звор}$ відносно $I_{звор}$

$$U_{звор} = \frac{\ln(I_{звор} / I_0)}{\alpha R_T I_{звор}}. \qquad (4.8)$$

Вираз (4.8) є рівнянням ВАХ в області теплового пробою.

Як видно з рис. 4.1, зі зростанням струму напруга на *p-n* переході спочатку зростає, а потім починає зменшуватися. Характеристика в області теплового пробою має ділянку з негативним диференціальним опором, який може бути визначений з виразу

$$R_{диф} = \frac{dU_{звор}}{dI_{звор}} = \frac{1}{\alpha R_T I_{звор}^2}(1 - \ln\frac{I_{звор}}{I_0}). \qquad (4.9)$$

При $U_{звор} = U_{проб.T}$ $R_{диф} = 0$, що можливо при дотриманні умови $\ln\frac{I_{звор}}{I_0} = 1$ або при $U_{звор} = U_{проб.T}$:

$$I_{звор} = eI_0 \cong 2,72 I_0 = I_{звор.T}.$$

Напруга теплового пробою з урахуванням виразів (4.3), (4.8) і (4.9)

$$U_{проб.T} = \frac{1}{\alpha R_T I_{звор.T}} = \frac{k_B T_j^2}{\Delta E_g R_T I_{звор.T}}. \qquad (4.10)$$

Напруга теплового пробою тим менша, чим більший тепловий опір і чим більший зворотний струм через діод.

Отримавши в результаті експерименту ВАХ діода в області теплового пробою і визначивши з неї $U_{проб.T}$ та $I_{звор.T}$ можна, використовуючи рівняння (4.10), знайти тепловий опір діода.

### 4.1.3 Особливості теплового пробою в реальних діодах

Тепловий пробій в реальних діодах, як правило, локалізується в деяких "слабких" місцях *p-n* переходу, і в такому разі говорять про теплове шнурування струму в *p-n* переході. Утворення шнура може бути викликане або дефектами в реальному *p-n* переході, або статистичною флуктуацією густини зворотного струму за площею *p-n* переходу. Діаметр шнура може бути всього декілька мікрометрів, а довжина визначається товщиною *p-n* переходу і складає десятки мікрометрів. Із-за малого об'єму шнура тепловий пробій може статися при малих зворотних струмах і малій зворотній напрузі.

Напруга теплового пробою для кремнієвих діодів, де зворотні струми малі, набагато вище за напругу лавинного і тунельного пробоїв. В цьому випадку тепловий пробій може початися лише тоді, коли зворотний струм вже досяг досить великого значення за рахунок лавинного або тунельного механізму пробою. У германієвих діодах зворотні струми значно більші, отже, підвищується і ймовірність виникнення теплового пробою.

Тепловий пробій може настати при відносно невисокій зворотній напрузі, якщо не забезпечене задовільне тепловідведення або перехід працює в умовах неприпустимо високої температури довкілля.

Передача теплоти від корпусу приладу в довкілля здійснюється конвекцією. Під конвекцією розуміють передачу теплоти газоподібному середовищу з урахуванням перемішування і переміщення газу поблизу джерела теплоти (в даному випадку корпусу). Уводиться поняття теплового опору корпус – середовище $R_{T\,KC}$, яке залежить від площі тепловідведення корпусу або радіатора, ступеню його чорноти, тиску і швидкості руху повітря. Оскільки ці величини залежать від

умов експлуатації, в технічних умовах на напівпровідниковий прилад переважно вказують тепловий опір перехід – корпус $R_{T\ ПК}$ і всі вимірювання проводять при заданій температурі корпусу. Тепловий опір перехід - корпус прямо пропорційний товщині кристала і обернено пропорційний площі *p-n* переходу і коефіцієнту теплопровідності напівпровідника (для кремнію $\lambda = 1,45\ \text{Вт}/(\text{К}\cdot\text{см})$, для германію $\lambda = 0,64\ \text{Вт}/(\text{К}\cdot\text{см})$). Отже, під тепловим опором діода розумітимемо тепловий опір перехід – корпус при заданій температурі корпусу.

### 4.2 Завдання

4.2.1 Визначте температуру *p-n* переходу при $U_{звор} = U_{проб.T}$ на основі отриманої в результаті експерименту ВАХ діода в області теплового пробою.

4.2.2 Визначте тепловий опір конструкції досліджуваного германієвого діода на основі методики, приведеної у п. 4.1.2.

### 4.3 Порядок виконання роботи

4.3.1 Зберіть установку для зняття ВАХ діода (схема електрична установки показана на рис. 1.5).

4.3.2 Отримайте ВАХ діода в області теплового пробою, помістивши діод у термостат і нагріваючи його до виникнення пробою. При цьому необхідно вимірювати температуру довкілля (у термостаті).

4.3.3 Зробіть калібрування осцилографа, якщо калібратор в осцилограф не вбудований.

4.3.4 Побудуйте ВАХ діода в абсолютних одиницях.

4.3.5 Використовуючи отриману ВАХ діода в області теплового пробою, визначте тепловий опір діода і температуру *p-n* переходу.

### 4.4 Зміст звіту

Звіт повинен містити: мету роботи; схему електричну дослідної установки (рис. 1.5); рисунок ВАХ діода в області теплового пробою з екрану осцилографа; ВАХ діода в області теплового пробою в абсолютних одиницях; визначену температуру *p-n* переходу при

$U_{звор} = U_{проб.T}$; тепловий опір досліджуваного германієвого діода; висновки за результатами роботи.

### 4.5 Контрольні запитання

1 Який механізм утворення теплового пробою?
2 Який вигляд має рівняння теплового балансу?
3 Яка залежність зворотного струму насичення від температури?
4 Що таке температурний коефіцієнт зворотного струму діода?
5 Які характерні ділянки ВАХ в області теплового пробою?
6 Від чого залежить напруга теплового пробою?
7 Чим відрізняються ВАХ діода в області теплового пробою при різних температурах довкілля?
8 Чому в германієвих діодах імовірність виникнення теплового пробою вища?
9 Яке явище називають тепловим шнуруванням струму в *p-n* переході?
10 Що розуміють під теплопровідністю і конвекцією?
11 Від чого залежить тепловий опір перехід − корпус?
12 Від чого залежить тепловий опір корпус − середовище?

# 5 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5 ”ДОСЛІДЖЕННЯ ВАХ ДІОДА ПРИ ЛАВИННОМУ ПРОБОЇ”

Метою роботи є: вивчення механізму виникнення лавинного пробою; експериментальне отримання ВАХ досліджуваного діода при лавинному пробої; складення рівняння ВАХ діода у передпробійній області; аналіз залежності коефіцієнта лавинного помноження від напруги на електронно-дірковому переході.

## 5.1 Теоретичні відомості

### 5.1.1 Механізм утворення лавинного пробою. Коефіцієнт ударної іонізації

В основі механізму утворення лавинного пробою лежить явище лавинного помноження рухливих носіїв заряду в сильному електричному полі *p-n* переходу.

Якщо до *p-n* переходу прикладена досить висока зворотна напруга, в ньому виникає сильне електричне поле. Носії заряду, що прискорюються цим полем, на довжині вільного пробігу отримують енергію, достатню для ударної іонізації атомів напівпровідника. Інакше кажучи, при зіткненні носіїв з атомами відбувається розрив ковалентних зв'язків нейтральних атомів напівпровідника, тобто генерація електронно-діркових пар.

Електрони, що утворилися, і дірки прискорюються полем і також отримують енергію, достатню для генерації вільних носіїв. При цьому електрон, рухаючись в зоні провідності, при зіткненні віддає частину своєї енергії для генерації пари носіїв і переходить на нижчий енергетичний рівень в зоні провідності. Дірка при зіткненні теж віддає частину енергії для утворення електронно-діркової пари і переміщується ближче до стелі валентної зони (насправді електрон, знаходячись у валентній зоні і віддавши частину енергії, опускається на нижчий енергетичний рівень, оскільки дірки - фіктивні частинки, що лише допомагають описати рух сукупності електронів валентної зони напівпровідника).

Існує два механізми ударної іонізації. При одному електрон набирає енергію, достатню для ударної іонізації, відразу на довжині вільного пробігу. При іншому механізмі цю енергію він набирає на декількох довжинах вільного пробігу, оскільки при кожному зіткненні

втрачає енергію, дещо меншу, ніж та, яку він набрав, рухаючись рівноприскорено в проміжку часу між зіткненнями.

Ударна іонізація носить лавиноподібний характер і настає, як показує досвід, при напруженостях поля $10^4...10^6$ В/см. Пробій же настає лише при напруженостях поля $10^7$ В/см. При менших напруженостях лавина не може наростати до нескінченності, оскільки при ударній іонізації разом з утворенням пар електрон – дірка зростає ймовірність рекомбінації, що перешкоджає пробою.

Швидкість нетеплової генерації електронно-діркових пар в одиниці об'єму при ударній іонізації

$$G = \alpha_n n v_n + \alpha_p p v_p ,$$

де $\alpha_n$, $\alpha_p$ – коефіцієнти ударної іонізації електронів і дірок відповідно, $см^{-1}$;

$v_n$, $v_p$ – швидкість руху електронів і дірок відповідно, см/с;

$n$, $p$ – концентрації вільних електронів і дірок у *p-n* переході.

Коефіцієнт ударної іонізації показує, яке число електронно-діркових пар генерує електрон (дірка) на одиниці шляху переміщення. Коефіцієнт $\alpha$ експоненціально зростає зі збільшенням напруженості поля в області об'ємного заряду. При однакових електричних полях коефіцієнт ударної іонізації тим менший, чим вища температура.

### 5.1.2 Рівняння ВАХ діода в передпробійній області. Методика розрахунку напруги лавинного пробою і коефіцієнта лавинного помноження

Напруга, при якій відбувається стрімке зростання струму, називається *напругою лавинного пробою*.

Лавинне помноження носіїв заряду враховується *коефіцієнтом лавинного помноження* $M$, який дорівнює відношенню кількості носіїв певного типу, що виходять з переходу, до кількості носіїв цього ж типу, що входять у перехід, $M = n / n_0$. З наростанням концентрації носіїв пов'язано збільшення зворотного струму, тому коефіцієнт лавинного помноження може бути визначений як відношення зворотного струму при лавиноутворенні до початкового зворотного струму $I_0$:

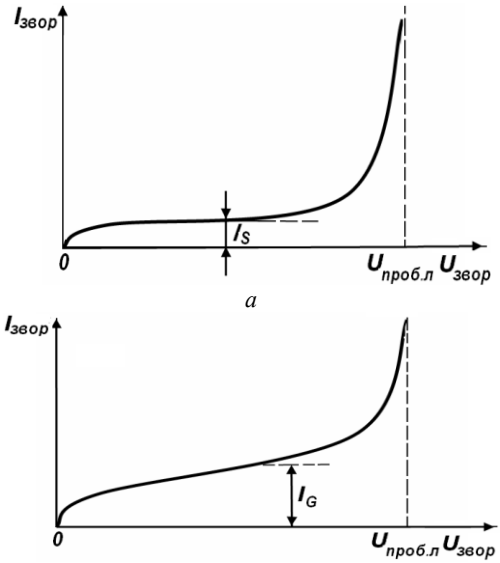
$$M = I / I_0.$$

Вольт-амперні характеристики германієвого і кремнієвого *p-n* переходів в області лавинного пробою показані на рис. 5.1. Рівняння ВАХ в передпробійній області описується формулою

$$M = \frac{I}{I_0} = \frac{1}{1-(U / U_{проб.л})^n}, \qquad (5.1)$$

де $n$ − константа, залежна від напівпровідникового матеріалу і типу переходу ($p^+$-$n$, $n^+$-$p$), оскільки рухливості електронів і дірок для різних випадків різні; $I_0$ − сума струмів насичення і термогенерації ($I_0 = I_s + I_G$).

Для дифузійних *p-n* переходів, отриманих дифузією домішок в кремній *p*-типу і в германій *n*-типу, $n = 3$, а для *p-n* переходів, отриманих дифузією домішок в германій *p*-типу і в кремній *n*-типу, $n = 5$.




*а* – зворотна гілка ВАХ германієвого *p-n*- переходу; *б* – зворотна гілка ВАХ кремнієвого *p-n*- переходу

Рисунок 5.1 − Вольт-амперні характеристики германієвого і кремнієвого *p-n*-переходів в області лавинного пробою

Розв'язавши рівняння (5.1) відносно зворотної напруги, отримаємо залежність

$$U = U_{проб.л}(1 - \frac{I_0}{I})^{\frac{1}{n}}. \qquad (5.2)$$

Напругу лавинного пробою і константу *n* для рівняння, що описує ВАХ досліджуваного діода, можна розрахувати, отримавши експериментально ВАХ діода в передпробійній області і припустивши, що вона описується виразом (5.2). Для цього необхідно побудувати графічну залежність $\ln U = f(\ln(1 - \frac{I_0}{I}))$. Зворотний струм $I_0$ слід задавати, якщо його важко визначити з отриманої експериментальної характеристики.

### 5.1.3 Залежності напруги лавинного пробою від концентрації домішок у базі, її питомого опору і температури

Напруга лавинного пробою *p-n* переходу залежить від концентрації домішок в нейтральних *p*- і *n*-областях. Для різких несиметричних переходів ця залежність може бути виражена таким чином:

$$U_{проб.л} = B\frac{1}{N^{K1}}, \qquad (5.3)$$

де $B$ − константа, залежна від типу переходу і матеріалу; $K1$ − коефіцієнт, різний для діодів з різних матеріалів; $N$ − концентрація домішок в слаболегованій області, тобто в базі діода.

Враховуючи, що питомий опір обернено пропорційний концентрації домішки, співвідношення (5.3) зручніше записати у вигляді

$$U_{проб} = m\rho^{K},$$

де $\rho$ − питомий опір бази, Ом·см; $m$, $к$ − константи, залежні від матеріалу і типу переходу.

Щоб носії встигли придбати достатню для іонізації енергію, час їхнього руху в переході має бути відносно великий. Тому ударна іонізація і лавинний пробій відбуваються тільки в широких переходах. Лавинний пробій характерний для широких переходів, які формують-

ся шляхом контактування низьколегованих напівпровідникових областей.

Підвищення температури призводить до збільшення пробивної напруги (рис. 5.2), оскільки довжина вільного пробігу зменшується з підвищенням температури, зменшується і енергія, яку носій може придбати, рухаючись в полі на довжині вільного пробігу.

Напруга лавинного пробою визначає верхню межу зворотної напруги більшості діодів і колекторної напруги біполярних транзисторів, а також напругу стоку МДП-транзисторів.

У разі прикладення до діода великої зворотної напруги може статися лавинний пробій *p-n* переходу; зворотний струм при цьому різко збільшується, що викликає розігрівання діода, подальше зростання струму і, як наслідок, тепловий пробій і руйнування *p-n* переходу. Більшість діодів можуть надійно працювати при зворотній напрузі, що не перевищує 0,7-0,8 пробивної напруги. Підвищення напруги понад пробивну, як правило, приводить до пробою переходу і виходу діода з ладу. Тому параметром діода є максимально допустима зворотна напруга.

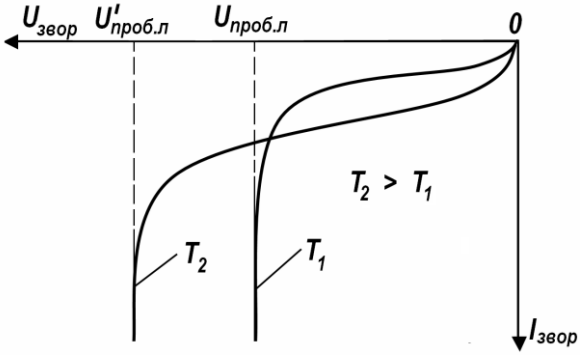



Рисунок 5.2 − Зворотні гілки вольт-амперних характеристик діода в режимі лавинного пробою при температурах $T_1$ і $T_2$ ($T_2 > T_1$)

Властивість різкого збільшення зворотного струму і дуже малого збільшення зворотної напруги при лавинному пробої використана в напівпровідниковому приладі стабілітроні, призначеному для отримання стабілізованої напруги. Стабілітрони виготовляють з кремнію, оскільки характеристики кремнієвих *p-n* переходів мають дуже круту

зворотну гілку в передпробійній області і в широкому діапазоні робочих струмів у них не виникає теплового пробою, що призводить до появи на ВАХ ділянки з негативним опором, як у германієвих приладах.

### 5.2 Завдання

5.2.1 Використовуючи отриману в результаті експерименту ВАХ діода при лавинному пробої, складіть рівняння, що описує її в передпробійній області.

5.2.2 Побудуйте графічну залежність коефіцієнта лавинного помноження від відношення $U / U_{проб.л}$.

### 5.3 Порядок виконання роботи

5.3.1 Зберіть установку для зняття ВАХ діода (схема електрична установки приведена на рис. 1.5).

5.3.2 Отримайте ВАХ діода при лавинному пробої.

5.3.3 Зробіть калібрування осцилографа по кожному з вхідних каналів, якщо калібратор в осцилограф не вбудований.

5.3.4 Побудуйте ВАХ діода в абсолютних одиницях.

5.3.5 Побудуйте графічну залежність $\ln U = f(\ln(1-\frac{I_0}{I}))$. З графіка визначте $U_{проб.л}$ і коефіцієнт *n*. Початковий зворотний струм діода $I_0$ прийміть рівним зворотному струму діода при $0,5U_{проб.л}$.

5.3.6 Запишіть рівняння ВАХ діода в передпробійній області на основі формули (5.2) і конкретизованих значень $U_{проб.л}$ та $n$.

5.3.7 Побудуйте графічну залежність $M = f(U / U_{проб.л})$ на основі співвідношення (5.1).

### 5.4 Зміст звіту

Звіт повинен містити: мету роботи; схему електричну установки для зняття ВАХ діода (рис. 1.5); рисунок ВАХ діода при лавинному пробої з екрану осцилографа; ВАХ діода при лавинному пробої в абсолютних одиницях; графік залежності $\ln U = f(\ln(1-\frac{I_0}{I}))$; значення

напруги пробою $U_{проб.л}$ та коефіцієнта *n*; рівняння ВАХ діода в передпробійній області; графік залежності $M = f(U / U_{проб.л})$; висновки за результатами роботи.

### 5.5 Контрольні запитання

1 Який механізм утворення лавинного пробою?
2 Які існують два механізми ударної іонізації?
3 Що таке коефіцієнт ударної іонізації?
4 Що таке коефіцієнт лавинного помноження?
5 Як залежить напруга лавинного пробою від концентрації домішки у базі і від питомого опору бази?
6 Як залежить напруга лавинного пробою від температури?
7 Як залежить коефіцієнт ударної іонізації від напруженості поля в області об'ємного заряду, від температури?
8 За яких умов можлива ударна іонізація напівпровідника?
9 Який принцип дії має стабілітрон?
10 Чому підвищення температури призводить до збільшення пробивної напруги?
11 При яких напруженостях електричного поля ударна іонізація має лавиноподібний характер?
12 У якому випадку відбувається лавинний пробій в біполярних і МДН-транзисторах?

## 6 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6 ”БІПОЛЯРНИЙ ТРАНЗИСТОР”

Метою роботи є: вивчення фізичних основ роботи інтегрованого біполярного транзистора; ознайомлення зі структурами біполярного транзистора і технологією виготовлення напівпровідникових біполярних ІМС; дослідження схем ввімкнення, характеристик і параметрів біполярного транзистора.

## 6.1 Теоретичні відомості

### 6.1.1 Основні положення

Біполярний транзистор являє собою перетворювальний напівпровідниковий елемент із двома *p-n* переходами.

Принцип дії біполярного транзистора полягає у взаємодії двох зустрічно ввімкнених *p-n* переходів. Взаємодія *p-n* переходів забезпечується тим, що переходи розташовані достатньо близько один від одного − на відстані меншій, ніж дифузійна довжина. *Дифузійна довжина* носіїв заряду − це відстань, у межах якої концентрація нерівноважних носіїв заряду зменшується в *e* разів.

Основні властивості транзисторів визначаються процесами в базі транзистора. Основну роль при цьому відіграють носії, що є неосновними в базовій області транзистора: в транзисторі *p-n-p*-типу основну роль відіграють дірки, а в транзисторі *n-p-n*-типу − електрони.

В напівпровідникових мікросхемах використовуються, в основному, транзистори типу *n-p-n*, бо вони мають переваги в порівнянні з транзисторами типу *p-n-p*. Наприклад, транзистори типу *n-p-n* характеризуються кращими підсилювальними і частотними властивостями, тому що електрони мають більш високу рухливість, ніж дірки. Крім того, технологія виготовлення транзисторів типу *n-p-n* більш проста.

Типова структура планарного біполярного транзистора, виготовленого за епітаксіально-планарною технологією з міжелементною ізоляцією оберненозміщеним *p-n* переходом, показана на рис. 6.1.

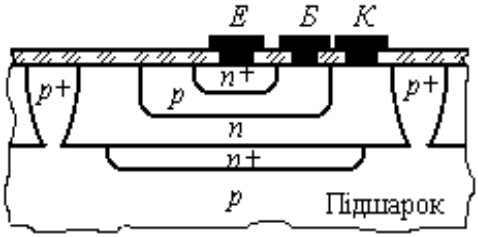



Рисунок 6.1 – Структура інтегрованого біполярного транзистора

Низькоомний схований $n^+$-шар служить для зниження опору колекторної *n*-області. Знизити опір областей колектора і бази можна за допомогою збільшення площі контактів до цих областей, але при цьо-

му збільшуються розміри транзистора і, відповідно, бар'єрні ємності *p-n*-переходів, що негативно впливає на швидкодію приладу.

Структура інтегрального біполярного транзистора (рис. 6.1) має такі характерні риси:

- площа емітерного переходу менше площі колекторного переходу;
- базова область транзистора легована значно менше, ніж емітерна, а колекторна – значно менше, ніж базова;
- транзистор має активну донну частину і пасивну бічну;
- всі омічні контакти розташовуються в одній площині (планарна конструкція);
- базова область транзистора є неоднорідною, тобто концентрація домішкових атомів зменшується з глибиною, тому що емітерна і базова області інтегрованого транзистора формуються методом дифузії.

Розподіл концентрації домішкових атомів за глибиною транзисторної структури зображений на рис. 6.2.

Неоднорідність базової області транзистора призводить до існування "*вбудованого*" електричного поля в базі, що впливає на підсилювальні і частотні властивості транзистора. Під дією електричного поля неосновні носії заряду дрейфують по базі. Тому інтегрований транзистор називають *дрейфовим* транзистором.

При виготовленні планарних транзисторів використовують захист поверхні, для цього утворюють суцільну маскуючу плівку на всій поверхні майбутньої планарної структури. В цій плівці потім витравлюють вікна, через які проводять дифузію. Плівка діоксиду кремнію є маскою для дифундіюючих атомів, що забезпечує локалізацію процесу дифузії. Тобто у відкриті ділянки підшарка домішкові атоми дифундіюють на необхідну глибину від поверхні, тоді як у маскуючу плівку вони проникають незначно.

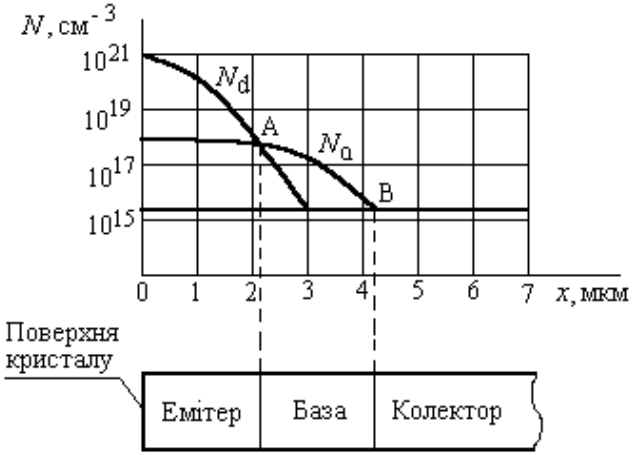



Рисунок 6.2 – Розподіл концентрації домішкових атомів за глибиною транзисторної структури

Технологія виготовлення транзистора включає такі основні технологічні етапи:

- початкове окислення;
- фотолітографія, за допомогою якої у шарі діоксиду кремнію формують вікна для подальшого створення високолегованого прихованого прошарку колектора;
- дифузія для створення прихованого прошарку колектора;
- контроль поверхневого опору, зняття окису;
- вирощування епітаксійного прошарку монокристалічного кремнію *n*-типу;
- контроль товщини епітаксійного прошарку і питомого опору, повторне окислення;
- фотолітографія для формування вікон під ізолюючі області і базову область транзистора;
- дифузія для створення ізолюючих областей і області бази;
- окислення і фотолітографія для створення області емітера;
- дифузія для створення області емітера і окислення;
- фотолітографія для формування вікон під омічні контакти до ділянок емітерної, базової, колекторної областей;

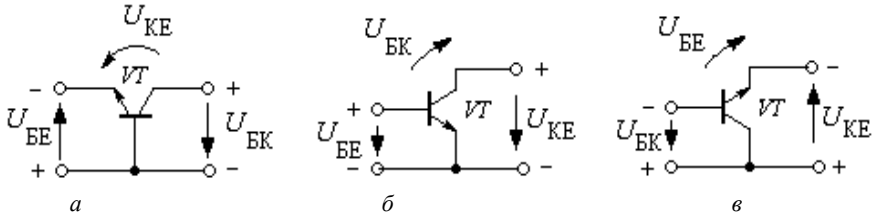
- металізація, тобто нанесення плівки алюмінію на всю поверхню підшарка для подальшого утворення омічних контактів і міжелементних з'єднань;
- фотолітографія для створення міжз'єднань;
- електричний контроль на функціювання.

Послідовність виконання технологічних операцій при виготовленні біполярних ІМС з ізоляцією елементів зворотнозміщеним *p-n* переходом наведена у табл. 6.1.

Існують три схеми ввімкнення транзистора: із спільною базою (СБ), із спільним емітером (СЕ), із спільним колектором (СК) (рис. 6.3) В усіх трьох схемах ввімкнення транзистор підсилює потужність. Крім того, в схемі із СБ транзистор підсилює напругу, в схемі з СЕ – напругу і струм, в схемі із СК – струм.

Розрізняють чотири області роботи транзистора в залежності від полярності напруг, що прикладені до емітерного і колекторного переходів (для *n-p-n*-транзистора):

- при $U_{БЕ} > 0,\ U_{БК} < 0$ – пряма активна область;
- при $U_{БЕ} > 0,\ U_{БК} > 0$ – область насичення;
- при $U_{БЕ} < 0,\ U_{БК} < 0$ – область відсікання;
- при $U_{БЕ} < 0,\ U_{БК} > 0$ – інверсна активна область (цей режим використовується рідко).




*а* – із спільною базою (СБ);
*б* – із спільним емітером (СЕ);
*в* – із спільним колектором (СК)

Рисунок 6.3 – Схеми ввімкнення транзистора

Логічні інтегровані схеми, вся цифрова схемотехніка використовують режими насичення і відсікання, а аналогова, підсилювальна

схемотехніка використовує активний режим, який є проміжним між режимами насичення і відсікання.

### 6.1.2 Принцип дії біполярного транзистора

Для забезпечення працездатності транзистора обов'язково повинні виконуватись дві умови: перша – базова область транзистора повинна бути тонкою, її товщина повинна бути значно меншою від дифузійної довжини неосновних носіїв заряду в базі; друга – концентрація основних носіїв заряду, яка обумовлена концентрацією домішкових атомів, в базі повинна бути значно меншою, ніж в емітері. Виконання цих умов забезпечує високі підсилювальні властивості транзистора.

*Принцип роботи транзистора*. В активному режимі до вхідного (емітерного) *p-n* переходу прикладена пряма напруга, до вихідного (колекторного) – зворотна. Під дією прямої напруги на вхідному переході основні носії заряду з емітера інжектують в базу, де вони стають неосновними носіями, далі вони шляхом дифузії та дрейфу майже стовідсотково доходять до колекторного переходу, потім, як неосновні носії, без перешкод долають зворотнозміщений колекторний *p-n* перехід і попадають в колектор, а потім шляхом дифузії та дрейфу проходять у вивід колектора. При цьому частка дифузійної складової колекторного струму зменшується при віддаленні від колекторного переходу, а частка дрейфової складової струму зростає.

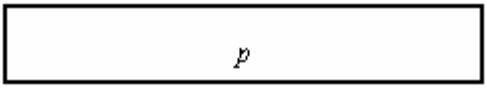
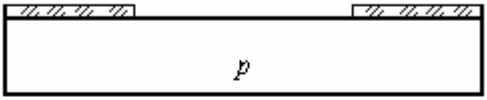
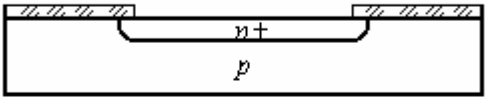
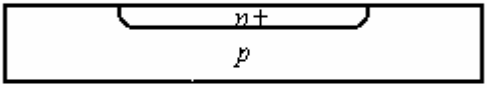
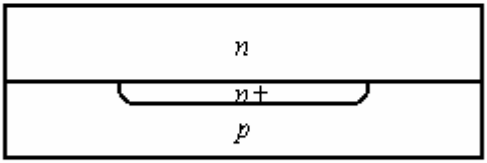
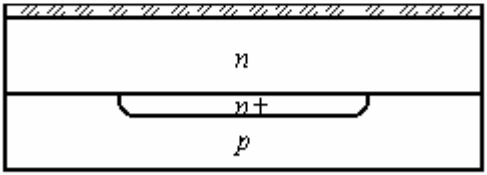
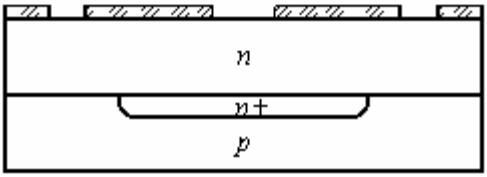
В базовій області до колектора не доходять лише, як правило, 1÷3% носіїв, що прийшли в базу з емітера. Вони в базі встигають рекомбінувати з основними (для бази) носіями заряду. Це призводить до появи невеликого (порівняно з емітерним і колекторним) базового струму. Звідси витікає рівняння:

$$I_E = I_Б + I_K,$$

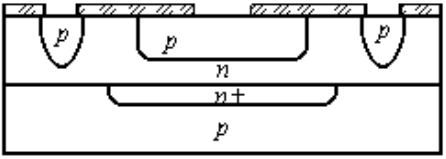
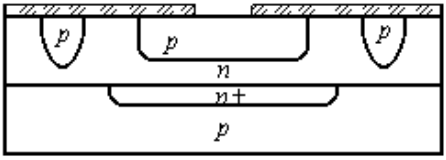
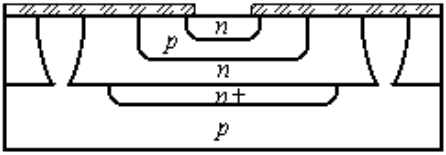
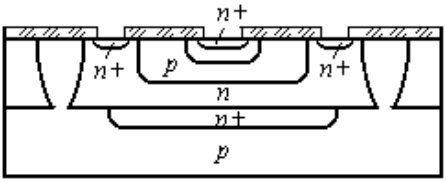
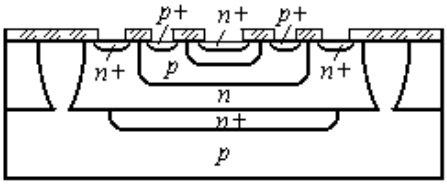
тобто струм емітера дорівнює сумі струмів бази і колектора.

Якщо в базовій області існує значний градієнт концентрації домішки (як у випадку інтегрованого транзистора), то дрейфова складова струму бази домінує над дифузійною, і транзистор називають *дрейфовим*.

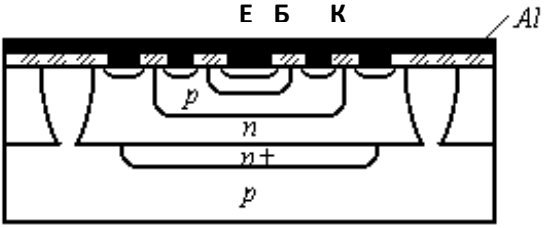
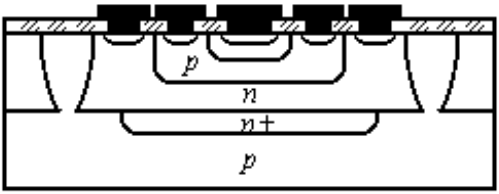
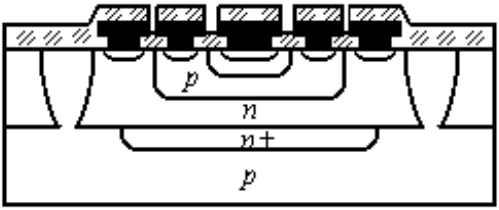
Таблиця 6.1 – Послідовність виконання технологічних операцій при виготовленні напівпровідникових біполярних ІМС

| Переріз структури | Найменування операцій |
|---|---|
|  | Хімічна обробка поверхні підшарів кремнію *p*-типу |
| | Перше окислення |
|  | Перша фотолітографія |
|  | Перша дифузія (отримання високолегованого прихованого $n^+$ -шару колекторів |
|  | Зняття шару діоксиду кремнію |
|  | Епітаксійне нарощування шару кремнію *n*-типу |
|  | Друге окислення |
|  | Друга фотолітографія |

Продовження таблиці 6.1

| Переріз структури | Найменування операцій |
|---|---|
|  | Друга дифузія (утворення ізолюючих базових областей) |
|  | Третя фотолітографія |
|  | Третя дифузія (утворення емітерних областей і замикання ізолюючої області) |
|  | Четверта дифузія (утворення низькоомних ділянок $n^+$-типу під омічні контакти до емітерів і колекторів) |
|  | П'ята дифузія (утворення низькоомних ділянок $p^+$-типу під омічні контакти до баз) |

Продовження таблиці 6.1

| Переріз структури | Найменування операцій |
|---|---|
|  | Напилення алюмінієвої плівки на поверхню підшарків |
|  | Шоста фотолітографія (формування міжелементних з'єднань) |
|  | Нанесення захисного покриття |

Режим роботи будь-якого транзистора можна визначити також за допомогою табл. 6.2.

Таблиця 6.2 – Режими роботи транзистора

| Режим роботи | Зміщення | |
|---|---|---|
| | емітерного *p-n* переходу | колекторного *p-n* переходу |
| Активний нормальний | Пряме | Зворотне |
| Насичення | Пряме | Пряме |
| Відсікання | Зворотне | Зворотне |
| Активний інверсний | Зворотне | Пряме |

В режимі насичення обидва *p-n* переходи (емітерний і колекторний) прямозміщені і тепер уже струм бази дорівнює сумі струму емітера і (частково чи повністю) струму колектора.

В режимі відсікання обидва *p-n* переходи зворотнозміщені, транзистор закритий, через *p-n* переходи протікають лише дуже маленькі зворотні струми.

Фізичні процеси в самому транзисторі протікають однаково незалежно від схеми ввімкнення транзистора; при зміні схеми ввімкнення змінюються лише електроди, які виконують функції вхідного і вихідного, спільний електрод, відносно якого відраховують вхідну і вихідну напруги, та параметри, характеристики і підсилювальні можливості транзистора.

В схемі із спільною базою транзистор може підсилювати (за наявності опору колекторного навантаження) напругу і потужність, а в схемі із спільним емітером – струм, а також (при наявності опору колекторного навантаження) напругу і потужність.

В схемі із спільною базою підсилювальні властивості транзистора характеризуються коефіцієнтом $\alpha$ – *коефіцієнтом передачі струму емітера*, що дорівнює відношенню прирощення струму колектора до прирощення струму емітера при незмінній напрузі на колекторному переході:

$$\alpha = \frac{\partial I_K}{\partial I_E} \quad \text{при} \quad U_{БК} = const .$$

В схемі із спільним емітером підсилювальні властивості транзистора характеризуються *коефіцієнтом передачі струму бази* $\beta$:

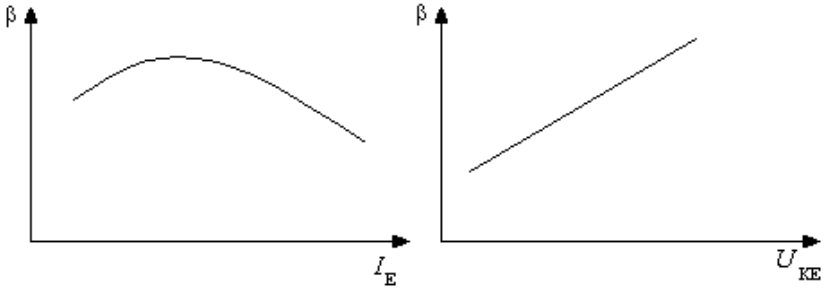
$$\beta = \frac{\partial I_K}{\partial I_Б} \quad \text{при} \quad U_{КЕ} = const .$$

Коефіцієнти $\alpha$ і $\beta$ взаємозв'язані між собою:

$$\alpha = \frac{\beta}{1+\beta} \quad , \quad \beta = \frac{\alpha}{1-\alpha} .$$

Коефіцієнти $\alpha$ і $\beta$ залежать від режиму роботи транзистора. Розглянемо залежність $\beta$ від струму $I_E$ і напруги $U_{БК}$. При малих $I_E$ швидкість електронів, інжектованих з емітера, мала. Тому більшість

електронів рекомбінує з дірками у базі. Коефіцієнт $\beta$ має невелике значення. При збільшенні $I_E$ швидкість електронів зростає, можливість рекомбінації зменшується, $I_K$ зростає, $\beta$ збільшується. При великих $I_E$ в базовій області транзистора накопичується великий заряд. Через те, що базова область повинна весь час залишатися нейтральною, до неї надходить позитивний заряд із зовнішнього кола. Можливість рекомбінації електронів і дірок збільшується. Струм колектора падає, $\beta$ зменшується. Графік залежності $\beta$ від $I_E$ наведений на рис. 6.4, *а*. Залежність $\beta$ від $U_{KE}$ показана на рис. 6.4, *б*.




*а* *б*

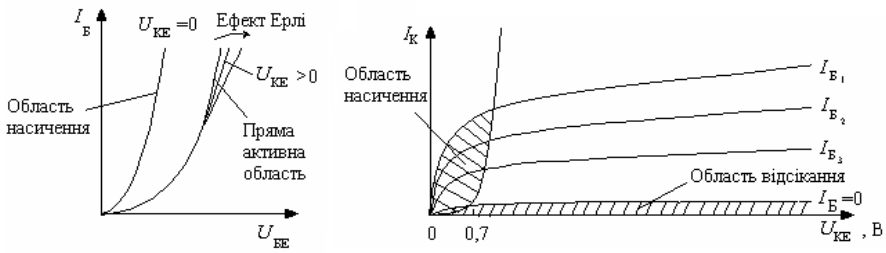
*а* – від струму емітера; *б* – від напруги $U_{KE}$

Рисунок 6.4 – Залежності коефіцієнта передачі струму бази $\beta$ від струму емітера і напруги колектор-емітер

Коефіцієнт $\beta$ збільшується з ростом зворотної напруги $U_{KE}$, що пояснюється наявністю ефекту Ерлі.

Вольт-амперні характеристики (ВАХ) біполярного транзистора за схемою із спільним емітером показані на рис. 6.5.

На рис. 6.5, *а* ліва характеристика (при $U_{KE} = 0$) відповідає правій границі області насичення роботи транзистора, в якій емітерний і колекторний переходи транзистора зміщені в прямому напрямку. Струм бази при цьому дорівнює сумі струмів двох *p-n* переходів. При збільшенні вихідної напруги $U_{KE}$ вхідні характеристики зміщуються праворуч, тобто відбувається зменшення струму бази при $U_{БЕ} = const$.




*а* *б*

*а* – вхідні; *б* – вихідні

Рисунок 6.5 – ВАХ біполярного транзистора за схемою СЕ

Така зміна положення характеристик пояснюється наявністю ефекту Ерлі в транзисторі. Сутність ефекту Ерлі (ефекту модуляції товщини бази) складається в тому, що при збільшенні зворотної напруги на колекторному переході відбувається розширення колекторного переходу, ширина базової області при цьому зменшується. Зменшується можливість рекомбінації електронів із дірками в базовій області, тому зменшується базовий струм. Вхідна характеристика зміщується праворуч.

Ряд вихідних характеристик транзистора, що включений за схемою СЕ, показано на рис. 6.5, *б*.

На цих графіках виділені три області: область насичення (при $U_{KE} < 0{,}7$ В, $I_Б > 0$); пряма активна область (при $U_{KE} > 0{,}7$ В, $I_Б > 0$); область відсікання (при $I_Б \approx 0$).

На вихідних характеристиках також виявляється ефект Ерлі. Зі зростанням вихідної напруги спостерігається зростання колекторного струму, тобто існує нахил вихідної характеристики в прямій активній області.

### 6.2 Завдання

6.2.1 Зніміть вхідні характеристики транзистора при $U_{KE} = 0; 4; 6$ В ($I_{Б\max} = 1$ мА). Схема установки для вимірювання ВАХ транзистора показана на рис. 6.6.

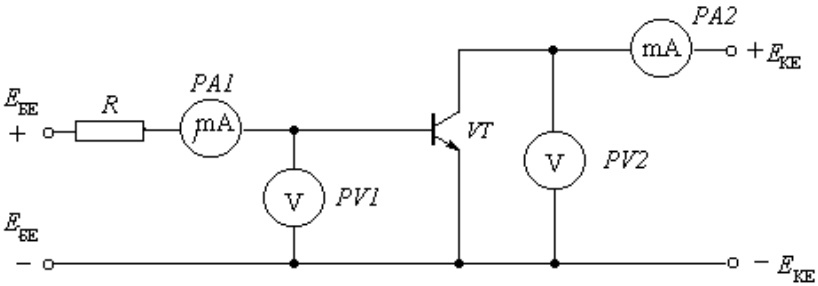



Рисунок 6.6 – Схема установки для вимірювання ВАХ транзистора

6.2.2 Зніміть вихідні характеристики транзистора для двох значень струмів бази 20; 35 мкА ($I_{K\max} = 50$ мА).

6.2.3 Побудуйте графіки вхідних і вихідних характеристик.

6.2.4 Розрахуйте вхідний диференціальний опір транзистора при $U_{KE} = 4$ В на лінійній ділянці вхідної характеристики. Для розрахунку використайте формулу $R_{BX} = \Delta U_{БЕ} / \Delta I_Б$.

6.2.5 З використанням вихідних характеристик транзистора розрахуйте статичний коефіцієнт передачі струму бази за формулою $\beta = \Delta I_K / \Delta I_Б$ при приблизному значенні $U_{KE} = 4$ В.

6.2.6 З вихідних характеристик транзистора визначте вихідні диференціальні опори транзистора за формулою $R_{диф} = \Delta U_{вих} / \Delta I_{вих}$, при $I_Б = 35$ мкА для двох струмів колектора на крутій і пологій ділянках характеристики.

### 6.3 Порядок виконання роботи

6.3.1 Зберіть схему для вимірювання ВАХ транзистора (рис. 6.6).

6.3.2 Виміряйте залежності $I_Б(U_{БЕ})$ при різних постійних значеннях $U_{KE}$ відповідно до п. 6.2.1. Результати вимірювань занесіть у таблицю, форма якої представлена в табл. 6.3.

6.3.3 Виміряйте залежності $I_K(U_{KE})$ при різних постійних значеннях $I_Б$ відповідно до п. 6.2.2. Результати вимірювань занесіть у таблицю, форма якої представлена в табл. 6.4.

Таблиця 6.3 – Форма таблиці для запису результатів вимірювань вхідних характеристик транзистора

| $U_{КЕ} = 0$ В | | $U_{КЕ} = 4$ В | | $U_{КЕ} = 6$ В | |
|---|---|---|---|---|---|
| $U_{БЕ}$, В | $I_Б$, мкА | $U_{БЕ}$, В | $I_Б$, мкА | $U_{БЕ}$, В | $I_Б$, мкА |
| | | | | | |

Таблиця 6.4 – Форма таблиці для запису результатів вимірювань вихідних характеристик транзистора

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $I_Б = 20$ мкА | $U_{КЕ}$, В | | | | | | |
| | $I_К$, мА | | | | | | |
| $I_Б = 35$ мкА | $U_{КЕ}$, В | | | | | | |
| | $I_К$, мА | | | | | | |

6.3.4 Побудуйте графіки і зробіть розрахунки відповідно до п. 6.2.3 – 6.2.6.

### 6.4 Зміст звіту

Звіт повинен містити: мету роботи; таблиці за формами табл.6.3, табл. 6.4; графіки, побудовані на основі вказаних таблиць; результати розрахунків за п. 6.2.4 - 6.2.6; висновки за результатами роботи.

### 6.5 Контрольні запитання

1 Структура біполярного транзистора.
2 Який принцип дії має біполярний транзистор?
3 Які основні етапи технологічного процесу виготовлення біполярного транзистора?
4 Які особливості має структура інтегрованого транзистора?
5 В яких режимах може працювати біполярний транзистор?
6 Який розподіл домішок по глибині в планарному біполярному транзисторі?
7 Які підсилювальні можливості мають основні схеми включення транзистора?
8 Чим характеризуються підсилювальні властивості транзистора в схемах вмикання СБ, СЕ?
9 В чому полягає методика визначення параметрів транзистора?

# 7 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №7 ”ПОЛЬОВИЙ ТРАНЗИСТОР З МДН-СТРУКТУРОЮ”

Метою роботи є: ознайомлення з фізичними основами роботи МДН-транзисторів; вивчення структури і технології виготовлення МДН-транзисторів; дослідження характеристик і параметрів транзисторів.

## 7.1 Теоретичні відомості

### 7.1.1 Основні положення

Транзистор із структурою метал-діелектрик-напівпровідник (МДН) відноситься до уніполярних транзисторів, в основі роботи яких лежить використання носіїв заряду одного типу: або електронів, або дірок. Основним способом руху носіїв в МДН-транзисторі є дрейф в електричному полі. Процеси інжекції і дифузії в таких транзисторах не відіграють суттєвої ролі. Робота транзистора пояснюється зміною величини струму в приповерхневому прошарку напівпровідника (каналі) внаслідок зміни електропровідності каналу під впливом ефекту поля.

*Ефектом поля* називають зміну концентрації носіїв заряду, а значить і провідності, в приповерхневому прошарку напівпровідника під впливом електричного поля (рис. 7.1). Якщо створений таким чином прошарок має підвищену відносно рівноважної концентрацію носіїв заряду, його називають *збагаченим*, а прошарок із зниженою концентрацією – *збідненим*.

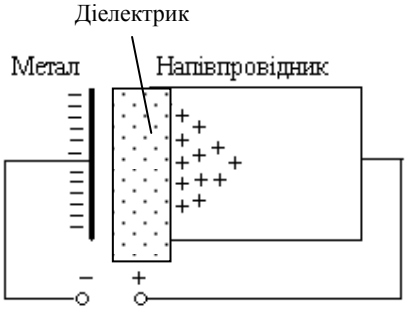



Рисунок 7.1 – Ефект поля у структурі метал–діелектрик–напівпровідник

Через систему метал-діелектрик-напівпровідник протікання струму неможливе, тому така система є своєрідним конденсатором, у якого одна з обкладок напівпровідникова, а інша – металева. На напівпровідниковій обкладці буде наведений такої ж величини заряд, як і на металевій, але знак його – протилежний.

Проте, на відміну від металу, заряд у напівпровіднику поширюється на деяку глибину, а не зосереджується на його поверхні. Знак заряду напівпровідника залежить від полярності прикладеної до металу напруги. При негативній полярності наведений заряд позитивний. У напівпровіднику *p*-типу позитивний заряд зумовлений дірками, що притяглися до поверхні, а в *n*-напівпровіднику – іонами донорів, від яких відштовхнулися електрони. У першому випадку відбувається *збагачення*, а в другому – *збідніння* приповерхневого прошарку основними носіями.

При позитивній полярності напруги в *n*-напівпровіднику відбувається збагачення приповерхневого прошарку електронами, а в *p*-напівпровіднику – збідніння дірками й оголення негативних акцепторних іонів.

Структура МДН-транзистора з індукованим (наведеним) *n*-каналом, що виготовлена на основі напівпровідника *p*-типу, показана на рис. 7.2.

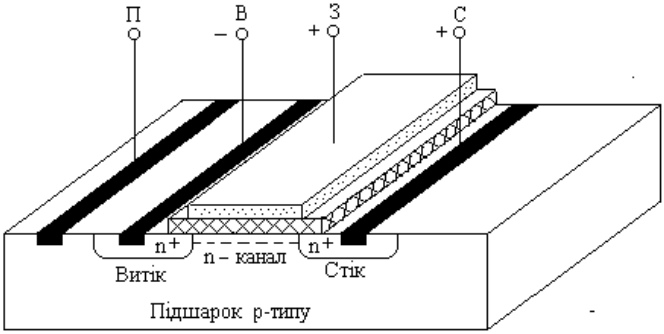



Рисунок 7.2 – Структура МДН-транзистора з індукованим каналом

Металевий електрод, що створює ефект поля, називають затвором (З). Два інших електрода називають витоком (В) і стоком (С). Ці електроди в принципі зворотні. Стоком називається той із них, на який надходять робочі носії заряду. Якщо канал *n*-типу, то робочі но-

сії – електрони, а полярність струму позитивна. Витік, як правило, з'єднують з основною пластиною напівпровідника, яку називають підшарком (П).

### 7.1.2 Принцип дії МДН-транзистора на основі напівпровідника *p*-типу

Як правило, МДН-транзистор включають за схемою із спільним витоком. При напрузі між затвором і витоком $U_{ЗВ}$, що дорівнює нулю, канал не індукується, і на шляху між стоком і витоком опиняються два зустрічноввімкнених *p-n* переходи. Тому при подаванні напруги $U_{СВ}$ між стоком і витоком струм у ланцюзі витоку буде мізерно малим.

Якщо подати на затвор негативну напругу $U_{ЗВ} < 0$, то приповерхневий прошарок збагатиться дірками, при цьому струм у робочому ланцюзі мало зміниться. Якщо ж подавати на затвор усе більшу позитивну напругу $U_{ЗВ} > 0$, то спочатку утвориться збіднений прошарок, а потім інверсний прошарок електронів, тобто електропровідний канал. Після цього струм стоку набуває кінцевого значення і є функцією від напруги на затворі. Це і є робочий режим МДН-транзистора. Оскільки вхідний струм в колі затвора дуже малий, утворюється значне підсилення потужності, набагато більше, ніж у біполярних транзисторів.

Канали, що відсутні в рівноважному стані і утворюються тільки під дією зовнішньої напруги, називаються *індукованими*.

Напруга на затворі, при якій утворюється канал, називається *пороговою напругою* і позначається $U_{пор}$.

Існують МДН-транзистори, в яких канал сформований у процесі виготовлення транзистора. Такий канал називається *власним* або *виготовленим (вбудованим)*. На затвор транзистора з виготовленим каналом можна подавати напругу як негативної, так і позитивної полярності. При негативній полярності напруги електричне поле затвора намагається як би виштовхнути електрони з каналу, і канал збіднюється основними носіями. В результаті провідність каналу і струм стоку зменшуються. При достатньо великій негативній напрузі на затворі провідність каналу наближається до нуля. Такий режим роботи називають *режимом збіднення*. При позитивній полярності напруги електричне поле затвора намагається втягти в канал додаткові електрони, і він збагачується основними носіями. В результаті провідність каналу і

струм стоку збільшуються. Такий режим називається *режимом збагачення*.

Якщо в МДН-транзисторі підшарок має *n*-тип, а прошарки витоку і стоку зроблені *p*-типу, то утвориться МДН-транзистор із індукованим *p*-каналом. Він характеризується негативними полярностями порогової і робочих напруг: $U_{пор} < 0$; $U_{ЗВ} < 0$; $U_{СВ} < 0$.

Оскільки напруги між затвором і витоком ($U_{ЗВ}$) та між стоком і витоком ($U_{СВ}$) визначаються відносно одного й того ж електрода (витоку), то далі по тексту при позначенні напруг другий індекс ($B$) буде опущений (буде позначено $U_З$ та $U_С$).

Підшарок МДН-транзисторів намагаються зробити з матеріалу з високим питомим опором, щоб полегшити утворення каналу і збільшити пробивну напругу переходів витоку і стоку.

Схема технологічного процесу виготовлення кремнієвого МДН-транзистора з індукованим каналом *n*-типу наведена на рис. 7.3.

На кремнієвий підшарок *n*-типу (рис. 7.3, а) за допомогою епітаксії нарощується прошарок *p*-типу (рис. 7.3, б). Далі шляхом окислювання прошарку і формування на його поверхні прошарку двоокису кремнію (рис. 7.3, в) і наступного травлення цього прошарку (рис. 7.3, г) одержують захисну маску (рис. 7.3, г). За допомогою дифузії донорної домішки епітаксійний прошарок *p*-напівпровідника "ріжеться" на кишені (рис. 7.3, д). МДН-транзистор, сформований у кожній кишені, електрично ізольований від інших елементів *p-n* переходом кишені.

В результаті виготовлення другої маски з прошарку двоокису кремнію (рис. 7.3, е) і повторної дифузії донорної домішки утворюють сильнолегійовані області стоку і витоку (рис. 7.3, ж). Забруднену домішками маску видаляють і виготовляють нову (рис. 7.3, з), після чого формують електроди – контакти витоку і стоку (рис. 7.3, і), а також напилюють електрод затвора (рис. 7.3, к). Електроди витоку, стоку і затвора виконують з алюмінію, танталу та інших металів із високою електропровідністю.

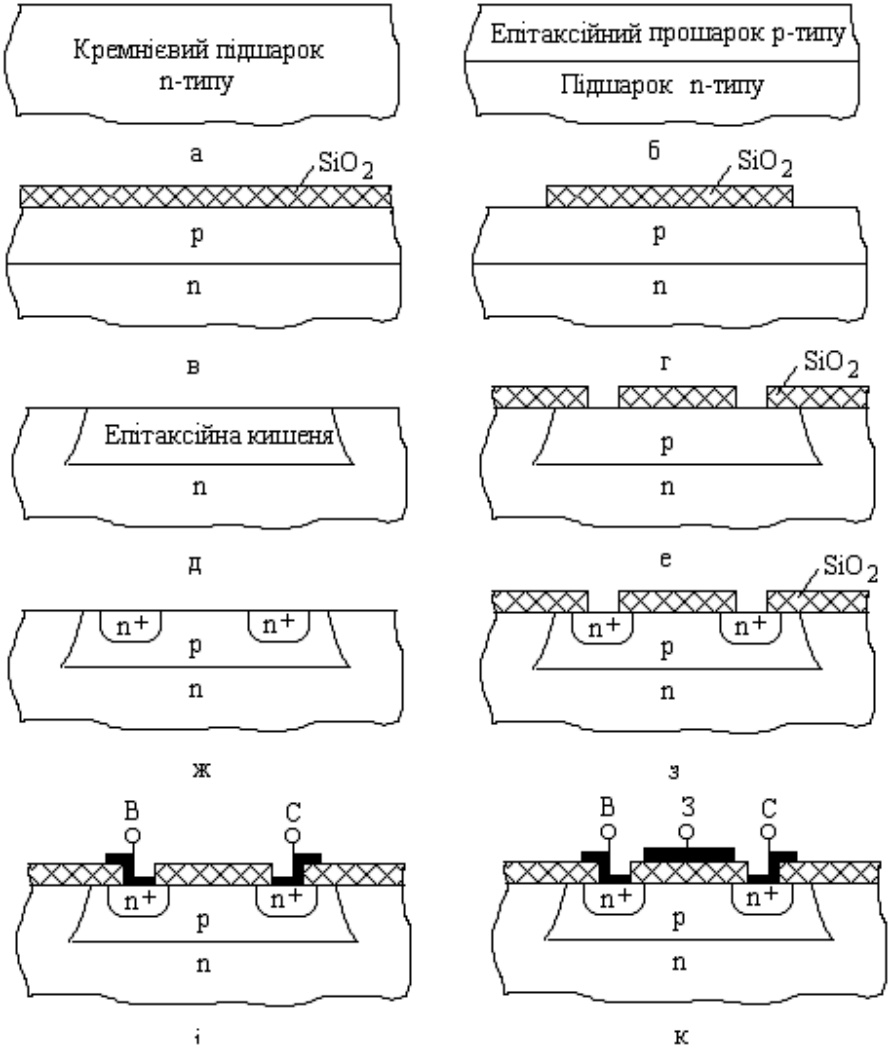
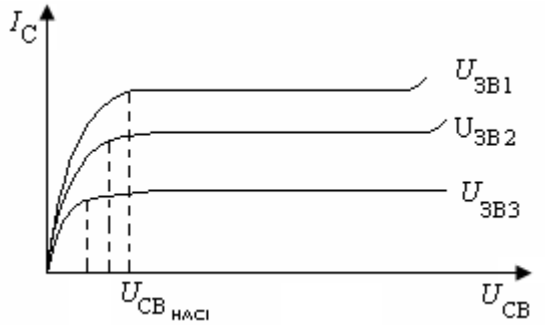



Рисунок 7.3 – Схема технологічного маршруту виготовлення МДН-транзистора

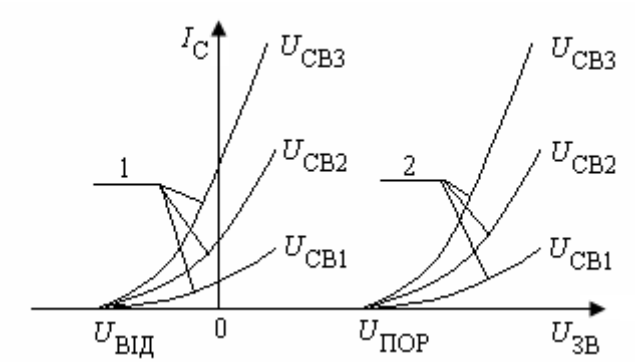
### 7.1.3 Характеристики МДН-транзистора

Ряд вихідних (стокових) характеристик наведено на рис. 7.4, а. У випадку вбудованого *n*-каналу напруги $U_{З1} < 0$; $U_{З2} = 0$; $U_{З3} > 0$, а індукованого *n*-каналу – $U_{З1} > 0$; $U_{З2} > 0$; $U_{З3} > 0$. Характеристики можна розділити на дві ділянки: початкова – лінійна ділянка і друга ділянка – насичення стокового струму – при достатньо великій стоковій напрузі. Межу насичення характеризує напруга насичення $U_{СВнас}$:

$$U_{СВнас} = U_{ЗВ} - U_{пор}.$$




*а*




*б*

*а* – стокові; *б* – стокозатворні: 1 – характеристики транзистора з вбудованим каналом; 2 − характеристики транзистора з індукованим каналом

Рисунок 7.4 – Статичні характеристики МДН - транзистора

Першу ділянку характеристики часто називають тріодною або омічною, а другу − пентодною або насичення.

На практиці користуються апроксимаціями ВАХ, із яких для тріодної ділянки найбільш простою і поширеною є така:

$$I_C = b\left[\left(U_З - U_{пор}\right)U_C - \frac{1}{2}U_C^2\right],$$

$$b = S / \left(U_{ЗВ} - U_{пор}\right),$$

де $b$ − питома крутість МДН-транзистора (типове значення $b \approx 0{,}1$ mA/B$^2$).

На пентодній ділянці характеристики струм стоку не змінюється і залишається рівним тому значенню, яке він має при напрузі насичення:

$$I_C = \frac{1}{2}b\left(U_З - U_{пор}\right)^2.$$

Як правило, номінальним струмом МДН-транзистора вважається струм при напрузі $U_З = 2U_{пор}$, тобто:

$$I_{C\,ном} = \frac{1}{2}bU_{пор}^2.$$

Ряд передавальних (стокозатворних) характеристик МДН-транзисторів наведено на рис. 7.4, б. Перша сукупність характеристик (№ 1) відноситься до транзистора з вбудованим каналом, а друга (№ 2) – з індукованим каналом. При стокових напругах, що відповідають режиму насичення, характеристики практично зливаються. Початок усіх характеристик відповідає пороговій напрузі $U_{пор}$.

### 7.1.4 Параметри МДН-транзистора

Підсилювальні властивості МДН-транзистора характеризуються коефіцієнтом підсилення $K$ і крутістю $S$ вольт-амперної характеристики:

$$S = \frac{\partial I_C}{\partial U_З} \qquad \text{при} \qquad U_C = const,$$

$$K = \frac{\partial U_C}{\partial U_З} \qquad \text{при} \qquad I_C = const .$$

Вихідний диференціальний опір стоку

$$R_{ВИХ} = \frac{\partial U_C}{\partial I_C} \qquad \text{при} \qquad U_З = const .$$

Виходячи з цього, величина коефіцієнта підсилення $K$

$$K = S \cdot R_{ВИХ} .$$

Таке визначення коефіцієнта підсилення приводять Тугов, Глібов, Чариков, Степаненко та інші автори підручників.

Розглянемо уважніше формули для визначення коефіцієнта підсилення. Очевидно, мова йде про підсилення напруги МДН-транзистором. Умова, що $I_C = const$, означає, що транзистор живиться від генератора струму, у якого внутрішній опір $R_{внутр} \to \infty$. В абсолютній же більшості випадків транзисторні схеми живляться від генераторів напруги, у яких $R_{внутр} \to 0$. Тоді для того, щоб мати підсилення напруги, в коло стоку обов′язково потрібно включити опір навантаження $R_H$.

В такому випадку формула для визначення коефіцієнта підсилення напруги буде мати такий вигляд:

$$K = \frac{\partial U_C}{\partial U_З} = -\frac{\partial U_H}{\partial U_З} = -\frac{R_H \cdot \partial I_C}{\partial U_З} = -S \cdot R_H ,$$

де $U_H$ – напруга на опорі навантаження.

Крім того, коефіцієнт підсилення слід брати за модулем, опускаючи знак “–“, що з′являється при числових розрахунках і вказує на зміну фази вихідного сигналу відносно вхідного.

МДН-транзистор теоретично не споживає вхідного активного струму. Отже, його можна вважати активним елементом, керованим напругою.

Частотна межа і швидкодія МДН-транзистора обмежуються швидкістю процесу встановлення концентрації основних носіїв заряду в каналі після зміни напруженості поля в ньому. Затвор і канал утворюють розподілену *RC*-лінію, ланки якої заряджаються неодночасно і неоднаково: ємності, віддалені від витоку, заряджаються повільніше і пізніше, тому що вони заряджаються через довшу ділянку каналу.

Приблизно можна вважати, що стала часу каналу $\tau_K$ дорівнює:

$$\tau_K = C_{ЗК} \cdot r_K \ ,$$

де $C_{ЗК}$ − еквівалент розподіленої ємності затвор-канал;

$r_K$ − еквівалент розподіленого опору каналу (величина $r_K$ має порядок сотень Ом).

Мінімально досяжна величина $\tau_K$ дорівнює 0,1…1 нс. З урахуванням зовнішнього опору в ланцюзі затвора $\tau_K$ збільшується до 10÷100 нс.

Крім ємності затвор-канал $C_{ЗК}$, у транзисторі є паразитні ємності: затвор - витік $C_{ЗВ}$, затвор - стік $C_{ЗС}$, витік - стік $C_{ВС}$. Кожна з них, як правило, не перевищує 1 пФ.

П-подібна еквівалентна схема ідеального МДН-транзистора без врахування впливу підшарка зображена на рис. 7.5. Ця схема моделює роботу транзистора на низьких частотах.

Температурна залежність порогової напруги і напруги відсікання зумовлена зміною положення рівня Фермі, зміною об'ємного заряду в збідненій області і впливом температури на величину заряду в діелектрику.

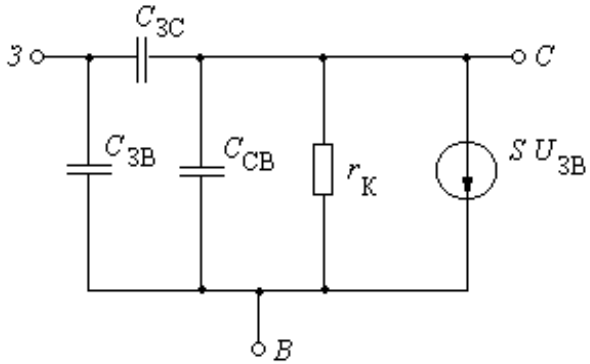



Рисунок 7.5 – Еквівалентна схема ідеального МДН-транзистора

**7.2 Завдання**

7.2.1 Зніміть дві вихідні (стокові) характеристики МДН-транзистора.

7.2.2 Зніміть дві передаточні (стокозатворні) характеристики МДН-транзистора.

7.2.3 За допомогою стокозатворних характеристик визначте порогову напругу або напругу відсікання транзистора.

7.2.4 Обчисліть коефіцієнт підсилення для двох значень $R_H$.

7.2.5 Обчисліть крутість стокозатворної характеристики.

7.2.6 Обчисліть вихідний диференціальний опір для двох ділянок ВАХ.

**7.3 Порядок виконання роботи**

7.3.1 Зберіть схему вимірювання, що наведена на рис. 7.6, де V1 − вольтметр, що вимірює напругу $U_{ЗВ}$; V2 − вольтметр, що вимірює напругу $U_{СВ}$; mA − міліамперметр, що вимірює струм стоку.

7.3.2 Проведіть вимірювання. При вимірюванні стокових характеристик МДН-транзистора напруга $U_З$ для кожної характеристики залишається постійною, а напруга $U_С$ змінюється від нуля до $U_{С\max}$.

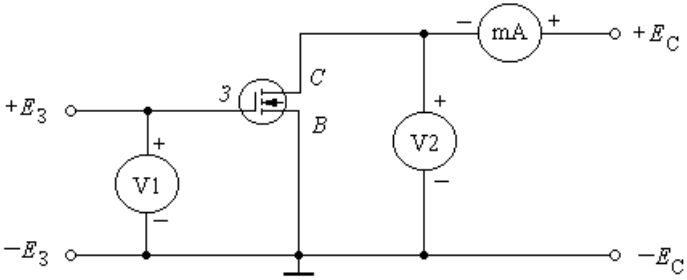



Рисунок 7.6 – Схема для вимірювання характеристик МДН-транзистора

Величина максимальної напруги $U_{C\max}$ залежить від типу транзистора і визначається з довідника. Величини напруг $U_{ЗВ}$ задаються викладачем.

При вимірюванні стокозатворних характеристик МДН-транзистора напруга $U_C$ для кожної характеристики залишається постійною, а напруга $U_З$ змінюється від нуля до $U_{З\max}$. При вимірюванні цих характеристик контролюється струм стоку, величина якого не повинна перевищувати $I_{C\max}$. Значення струму $I_{C\max}$ визначаєтся з довідника. Величини напруг $U_{CB}$ задаються викладачем.

7.3.3 Побудуйте графіки і зробіть розрахунки.

## 7.4 Зміст звіту

Звіт повинен містити:
- титульну сторінку;
- мету роботи;
- схему для вимірювань характеристик;
- графіки стокових і передавальних характеристик;
- формули і розрахунки параметрів;
- висновки.

### 7.5 Контрольні запитання

1 В чому полягає ефект поля?
2 Яку структуру має МДН-транзистор?
3 В чому полягає принцип дії МДН-транзистора?
4 Які етапи має технологічний процес виготовлення МДН-транзистора?
5 В яких режимах може працювати МДН-транзистор?
6 Які характерні ділянки можна виділити на стокових характеристиках МДН-транзистора?
7 Які відмінності мають передавальні характеристики МДН-транзисторів з виготовленим та індукованим каналами?
8 Чим визначається швидкодія МДН-транзистора?
9 Якими основними параметрами характеризується робота МДН-транзистора?

# ПЕРЕЛІК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ


1. **Борисов, О. В.** Твердотільна електроніка: Лабораторний практикум [Текст] / О. В. Борисов, В. О. Гусєв. − К.: Політехніка, 2004. − 208 с.
2. **Борисов, О. В.** Твердотільна електроніка [Електронний ресурс]: підручник для студ. спеціальності 153 «Мікро- та наносистемна техніка» / О. В. Борисов, Ю. І. Якименко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 19,2 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 484 с.
1. **Борисов, О. В.** Твердотільна електроніка: Навчальний посібник [Текст] / О. В. Борисов, В. О. Гусєв, Ю. І. Якименко. − К.: НТУУ КПІ, 2004. − 200 с.
2. **Колонтаєвський, Ю. П.** Електроніка і мікросхемотехніка [Текст] / Ю. П. Колонтаєвський, А. Г. Сосков; Підручник. 2-е вид. / За ред. А. Г. Соскова. – К.: Каравела, 2009. – 416 с.
3. **Стахів, П. Г.** Основи електроніки: функціональні елементи та їх застосування [Текст] / П. Г. Стахів., В. І. Коруд, О. Є. Гамола; Підручник для студентів неелектротехнічних спеціальностей вищих навчальних закладів. − Львів: : «Новий Світ − 2000»; «Магнолія плюс». − 2003. − 208 с.
4. **Прищепа, М. М.** Мікроелектроніка. Елементи мікросхем. Збірник задач [Текст] / М. М. Прищепа, В. П. Погребняк. − К.: Вища школа, 2005. − 167 с.
5. **Прохоров, Е. Д.** Твердотіла електроніка [Текст] / Е. Д. Прохоров. − Х. ХНУ ім. В. Н. Каразіна, 2007. − 544 с.
6. **Находкін, М. Г.** Фізичні основи мікро- та наноелектроніки / М. Г. Находкін, Д. І. Шека. − К.: КНУ ім. Т. Г. Шевченка, 2005. − 431 с.
7. **Прищепа, М. М.** Елементи мікроелектроніки [Текст] / М. М. Прищепа, В. П. Погребняк; За ред. М. М. Прищепи. − К.: Вища школа, 2004. − 431 с. − (Мікроелектроніка: в 3 ч. / М. М. Прищепа, В. П. Погребняк; ч. 1).
8. **Прохоров, Е. Д.** Квантово-розмірні ефекти у твердотілих надвисокочастотних приладах [Текст] / Е. Д. Прохоров. − Х.: ХНУ ім. В. Н. Каразіна, 2005. − 208 с.