

**Міністерство освіти України  
Ужгородський державний університет**

**Ю.С.Наконечний  
В.І.Феделеш  
О.О.Молнар**

# **НАПІВПРОВІДНИКОВІ ПРИЛАДИ**

*Лабораторний практикум*

Ужгород - 1995

Ця робота була частково підтримана Міжнародною  
Соросівською програмою підтримки освіти в галузі  
точних наук (ISSEP), грант JAPU052070

Напівпровідникові прилади. Лабораторний практикум: Навчальн. посібник / Ю. С. Наконечний, В. І. Феделеш, О. О. Молнар. - Ужгород, УЖДУ, 1995. - 122 с.

Посібник містить лабораторні роботи з фізики напівпровідникових приладів. Приведені теоретичні відомості, порядок проведення експериментальних досліджень, рекомендації по оформленню звіту та перелік запитань для цілеспрямованої підготовки до занять.

Описані навчальні програми, які використовуються при виконанні лабораторних робіт.

Для студентів фізичних факультетів університетів.

Іл. 34. Бібліогр.: 4 назв.

Рецензенти:

доктор фіз.-мат. наук, проф. І. В. Фекешгазі  
(Інститут фізики напівпровідників НАН України);  
канд. фіз.-мат. наук, доц. О. В. Лукаш  
(Ужгородський держуніверситет),

## ПЕРЕДМОВА

Лабораторний практикум з напівпровідникових приладів забезпечує вивчення дисципліни "Напівпровідникові прилади" для спеціальності 20.02 - фізика і технологія матеріалів і компонентів електронної техніки. Лабораторні заняття дають змогу студентам практично ознайомитись з роботом напівпровідникових приладів, їх властивостями, параметрами та характеристиками.

В процесі лабораторних занять реалізується один із самих важливих моментів навчального процесу - зв'язок теорії з практикою, в результаті чого студент одержує необхідні знання та навички в організації і проведенні досліджень та вимірювань з самостійною оцінкою одержаних результатів.

Загальні задачі даного лабораторного практикуму:

- поглиблене вивчення прослуханого на лекціях і опрацьованого в результаті самостійної роботи теоретичного матеріалу, розвиток практичних навичок вимірювань і обчислень основних параметрів напівпровідникових приладів, аналіз та побудова функціональних та математичних моделей напівпровідникових приладів;

- розвиток навичок постановки задачі досліджень, аналізу одержаних результатів та вміння робити обґрунтовані висновки із експериментальних результатів.

Лабораторний практикум, як і курс, розрахований на один семестр. У відповідності до програми курсу навчальний посібник включає в себе описи вісьми лабораторних робіт. Кожна робота містить мету і теоретичні відомості, порядок проведення експериментальних досліджень, рекомендації по оформленню звіту та перелік запитань для цілеспрямованої підготовки до занять.

В додатках представлені програми, які використовуються при

виконані лабораторних робіт.

Навчальний посібник складений на основі досвіду проведення лабораторних робіт на кафедрі фізики напівпровідників Ужгородського державного університету. Він розрахований на студентів фізичних факультетів університетів. Проте може бути корисний також для студентів інших спеціальностей, що вивчають фізику напівпровідникових приладів. Посібник стане у пригоді викладачам вузів, які займаються постановкою лабораторних робіт по відповідній тематиці.

Автори вдячні колегам по кафедрі дискусії з якими сприяли виробленню структури посібника і його написанню, рецензентам за цінні зауваження, а також М. В. Якимчук - за допомогу в підготовці рукопису.

## Розділ перший

## ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

## 1. Лабораторне обладнання

Для забезпечення лабораторних занять по вивченню напівпровідникових приладів використовується спеціальний клас, який обладнаний відповідним лабораторним обладнанням та технічними засобами навчання. Лабораторне обладнання розміщується на робочих місцях студентів і містить необхідні вимірвальні прилади та лабораторний макет, спеціально розроблений для практикуму по напівпровідникових приладах.

Всього в класі 8 робочих місць. Кожне із них розраховане для роботи одного студента. Таким чином забезпечується фронтальне виконання лабораторних робіт підгрупов в складі 7-8 студентів.

Типове робоче місце представляє собою стіл, на якому розміщені:

- штатив лабораторний для аналогових електромеханічних вимірвальних приладів. Внизу штатива є клеми, на які підведені напруги: 150 В, 5 В, +15 та -15 В від вторинних джерел живлення. На штативі закріплені також розетки, до яких підведена напруга 220 В від мережі змінного струму;

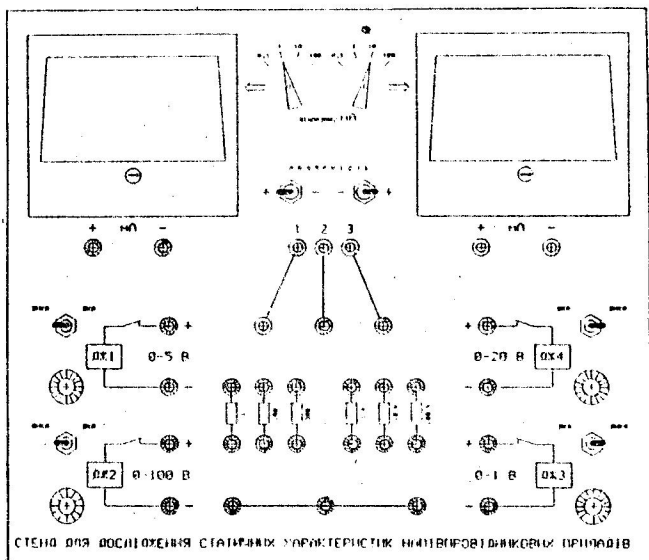
- універсальний лабораторний макет;

- дискретні елементи, необхідні для виконання лабораторної роботи;

- вимірвальні прилади (цифровий вольтметр, прилади для вимірювання струмів і напруг);

Робоче місце зручне для виконання досліджень, забезпечує вільний доступ як до лабораторного макету, так і до всіх вимірвальних приладів. Воно реалізоване на базі лабораторного стола із комплекту К4822-2.

Універсальний лабораторний макет орієнтований для дослідження статичних характеристик типових напівпровідникових приладів. Макет зручний в експлуатації та легко освоюється студентами. Він містить необхідне число комутаційних елементів, резистори, джерела постійного струму, що дозволяє збирати схеми, які описані в даному посібнику. Конструкція лабораторного макету, розміри якого 410x360 мм<sup>2</sup>, схематично представлена на мал. 1.



Мал. 1. Загальний вигляд лабораторного макету

Досліджуваний прилад своїми виводами кріпиться до клем 1, 2, 3. В електричну схему він приєднується провідниками, які кріпляться до нижніх клем. Чотири гальванічно розв'язаних джерел живлення, дозволяють змінювати вихідні напруги (за допомогою змінних резисторів), в межах: 0 - 1 В; 0 - 5 В; 0 - 20 В; 0 - 100 В. Джерела живлення мають захист від короткого замикання і відновлюють свою роботу після усу-

нення неполадок. Мнемонічні позначення на макеті дають змогу легко освоїти роботу з джерелами живлення. Для вимірювання струмів від 0 до 100 мА використовуються два мікроамперметри. Вказаний діапазон розбитий на чотири піддіапазони: 0 - 0,1; 0 - 1; 0 - 10; 0 - 100 мА, які вибираються перемикачами. Полярність міліамперметрів може змінюватися тумблерами "ПОЛЯРНІСТЬ".

## 2. Методика проведення лабораторних занять

Однією з важливих частин навчального процесу у вузі є лабораторні заняття, на яких студент здобуває практичні навички з вибраної спеціальності. Кожне лабораторне заняття передбачає досягнення певних виховної і навчальної мети.

Виховна мета досягається цілеспрямованим впливом викладача і повинна сприяти прагненню студентів глибоко засвоїти суть виконуваних ними робіт, оволодіти практичними навичками наукових та інженерних досліджень.

Навчальну мету заняття можна звести до наступних основних моментів:

- закріплення студентами теоретичних положень дисципліни, яка вивчається;

- вивчення методів наукових досліджень;

- розвиток навичок аналізу та узагальнення отриманих результатів;

- прищеплення практичних навичок роботи з вимірвальними приладами і лабораторним обладнанням, технічною документацією.

Виходячи із мети лабораторних занять, сучасних заходів, які ставляться перед ними, повинне вибиратися методика підготовки та проведення лабораторних занять.

В основу виконання лабораторних робіт покладений фронтальний метод, згідно якого експериментальні дослідження проводяться після



того, коли матеріал даної теми викладений на лекції і студенти, на лабораторному занятті, досліджують однакові напівпровідникові прилади. Така організація навчальних занять сприяє закріпленню і розширенню знань студентів. Фронтальне проведення лабораторних робіт дозволяє викладачу одночасно керувати і слідкувати за роботом студентів всієї групи, давати для всієї групи вказівки в процесі виконання лабораторної роботи, використовувати технічні засоби навчання, і пояснювати характерні помилки студентів, які допущені в процесі виконання роботи.

Виконання кожної лабораторної роботи складається із двох етапів.

1. Підготовка до лабораторної роботи, вивчення теоретичного матеріалу, методики досліджень.

2. Складання робочої схеми для вимірювань і дослідження напівпровідникових приладів, співставлення теоретичних і експериментальних результатів, їх аналіз, побудова моделі досліджуваного об'єкта, оформлення протоколу.

Протокол, підготовлений до лабораторної роботи, повинен містити назву та мету роботи, опис принципу роботи досліджуваних напівпровідникових приладів, їх основних параметрів та характеристик, нарисовані схеми для дослідження основних характеристик, таблиці для запису результатів вимірювань.

Порядок виконання досліджень в лабораторії слідуючий.

1. Студент допускається до виконання наступної роботи при наявності підготовленого, згідно вказаних вище вимог, протоколу.

Протокол попередньої роботи підписується викладачем на наступному занятті після занесення в нього всіх результатів і матеріалів досліджень і їх аналізу.

2. Після дозволу виконувати дослідження студент збирає схему для вимірювань і самостійно настроює її. У випадку, коли схема не працює, або працює неправильно, він зобов'язаний знайти причину

неполадок і виправити їх.

3. Після цього виконуються заплановані дослідження, а після їх закінчення одержані результати показуються викладачеві і після його дозволу схема розбирається і робоче місце приводиться до порядку.

4. До наступної лабораторної роботи повністю оформляється протокол і показується викладачеві.

Перед виконанням кожної лабораторної роботи викладач опитує студентів як по змісту самої роботи, так і по методиці її виконання. Непідготовленні студенти не допускаються до виконання лабораторної роботи і вивчають в лабораторії не засвоєний ними матеріал по рекомендованій літературі.

Описи лабораторних робіт складені настільки детально, містять вказівки що і як робити, щоб дати можливість студентам самостійно (без підказок викладача та участі персоналу лабораторії) виконувати дослідження, глибоко уникнути в суть фізичних явищ і процесів, які вивчаються.

### 3. Навчальні програми

При виконанні лабораторних робіт використовуються прикладні програми для моделювання основних функцій напівпровідникових приладів. Програми дозволяють із виміряних вольт-амперних характеристик одержати параметри функціональних електричних моделей напівпровідникових приладів та порівняти експериментальні ВАХ з теоретичними, що відповідають тій чи іншій моделі. Всі програми написані на мові BASIC і працюють в діалоговому режимі.

Програма "Моделювання напівпровідникового діода" (файл diod.exe). Вхідними даними програми є результати вимірювання прямої вітки ВАХ напівпровідникового діода. Із цих даних методом лінійної регресії визначаються параметри статичної моделі діода для малих струмів. Ці

ж параметри використовуються для побудови графіка вольт-амперної характеристики.

Програма "Моделювання тунельного діода" (файл diod\_tun.exe) служить для демонстрації типових ВАХ тунельних діодів, виготовлених з Ge і GaAs. Програма також враховує параметри моделі, яка враховує тунельну і дифузійну складові струму через р-п перехід.

Програма "Моделювання біполярного транзистора" (файл tran\_bip.exe) дозволяє будувати вхідні і вихідні ВАХ біполярного транзистора в рамках моделі Молла-Еберса. Вхідними даними програми є параметри вказаної моделі, які визначаються шляхом вимірювань. При побудові ВАХ здійснюється якісне порівняння з результатами вимірювань.

Програма "Моделювання МОП-транзистора" (файл tran\_mop.exe) працює аналогічно попереднім програмам. Вона дозволяє будувати вихідні та передавальні ВАХ польового транзистора з індукованим каналом в рамках моделі плавного каналу. Для того, щоб одержати на екрані дисплея статичні характеристики програма просить увести значення порогової напруги, напруги перекриття каналу та результати вимірювань струму стоку і напруги між стоком і витокм в лінійній області.

Лістинги описаних програм приведені в додатку.

## Розділ другий

### ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ

#### Лабораторна робота № 1

#### ДОСЛІДЖЕННЯ ВИПРЯМНИХ ДІОДІВ

**Мета роботи:** дослідження вольт-амперних характеристик кремнієвих та германієвих випрямних діодів, визначення основних параметрів діодів та побудова статичних моделей діода для малих і великих сигналів.

#### 1. Теоретичні відомості

Напівпровідниковим діодом називають напівпровідниковий прилад з одним електричним переходом і двома виводами.

В діоді з електронно-дірковим переходом крім випрямляючого електричного переходу повинно бути два не випрямляючі переходи, через які р- і n-області з'єднані з виводами. В діоді з випрямляючим електричним переходом метал-напівпровідник всього один не випрямляючий перехід.

Звичайно, напівпровідникові діоди мають несиметричні електронно-діркові переходи. Область напівпровідникового діода, яка слабше легована, називають *базою* діода. В залежності від співвідношення лінійних розмірів випрямляючого переходу і дифузійної довжини розрізняють *площинні* та *точкові* діоди. Площинним називають діод, у якого лінійні розміри, які визначають площу р-n переходу, значно більші дифузійної довжини. Точковим називають діод, у якого лінійні розміри, які визначають площу р-n переходу, значно менші дифузійної довжини.

## 1.1. Контактна різниця потенціалів

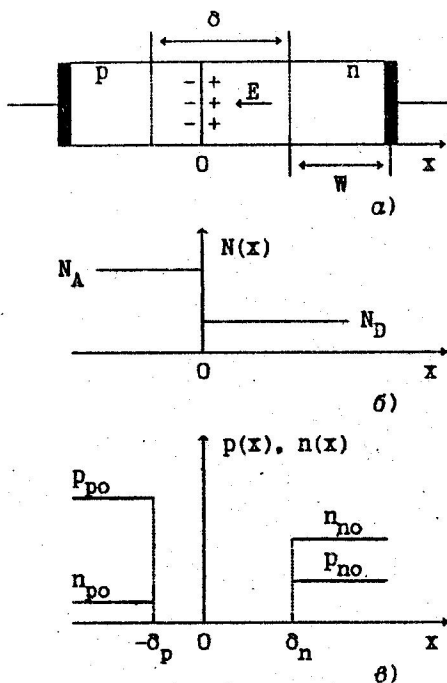
Електричний перехід між двома областями напівпровідника, одна з яких має електропровідність n-типу, а інша - р-типу називають *електронно-дірковим* переходом (р-п перехід).

Будемо розглядати р-п перехід виготовлений так, що в одну область напівпровідника уведена донорна домішка, а в іншу - акцепторна. Концентрації основних носіїв заряду в глибині напівпровідника будемо вважати рівними концентрації відповідної домішки:  $n_{po} = N_D$ ,  $p_{po} = N_A$ . Рівноважні концентрації неосновних носіїв заряду будуть рівні:

$$n_{po} = n_i^2 / p_{po}; \quad p_{po} = n_i^2 / n_{po}.$$

Врахуємо, що напівпровідник сильно легований:  $n_{po} \gg n_i$ ,  $p_{po} \gg n_i$ , і  $n_{po} \ll n_i$ ,  $p_{po} \ll n_i$ . Покладемо  $N_A \gg N_D$ . Це означає, що розглядаємо різко несиметричний р<sup>+</sup>-п перехід (мал.1.1).

Поскільки концентрація дірок в р-області набагато більша концентрації дірок в n-області, то дірки почнуть дифундувати в n-область. При цьому в р-області залишаться нерухомі від'ємні іони акцепторів і виникає від'ємний об'ємний



Мал. 1.1. Різкий р-п перехід в рівноважному стані

заряд  $-qN_A$ , де  $q$  - заряд електрона. Дірки в n-області рекомбінують з електронами, в результаті чого концентрація електронів зменшується.

Аналогічно електрони з n-області дифундуватимуть в р-область і в

p-області залишається нескомпенсований додатний заряд іонів донорів  $+qN_D$ . В результаті дифузійних потоків електронів і дірок виникає область просторового заряду (ОПЗ), в якій концентрація електронів і дірок понижена. Ця область має великий опір і її називають ще *зап'ятою шпорою*.

Електричне поле, яке виникає в ОПЗ, внаслідок розділення додатних і від'ємних зарядів, буде напрямлене проти осі  $x$  (мал. 1.1). Із збільшенням цього поля збільшується сила, яка перешкоджає дифузійному переміщенню дірок із р- в p-область, і електронів із p- в р-область. В результаті конкуруючих процесів дифузії і дрейфу носіїв заряду між р- і p-областями встановлюється деяка рівноважна різниця потенціалів, яка носить назву *контактної* різниці потенціалів. Розподіл напруженості електричного поля в ОПЗ переходу і контактна різниця потенціалів зв'язані співвідношенням:

$$\varphi_k = -\int E(x) dx$$

Контактна різниця потенціалів визначається із такого виразу:

$$\varphi_k = \frac{kT}{q} \cdot \ln \frac{p_{po} n_{po}}{n_i^2} \quad (1.1)$$

Значить, чим сильніше леговані області переходу, тим більша  $\varphi_k$ . При однакових ступенях легування  $\varphi_k$  більша в напівпровідниках з більшою шириною забороненої зони. Для більшості германієвих р-p переходів  $\varphi_k = 0,25 - 0,45$  В, а для кремнієвих -  $\varphi_k = 0,5 - 0,9$  В.

При прикладанні до р-p переходу зовнішньої напруги  $U$ , такої полярності, що напрям вектора напруженості зовнішнього електричного поля протилежний до напрямку напруженості електричного поля в ОПЗ, сумарна напруженість поля в р-p переході і висота потенціального бар'єру зменшуються. Частина основних носіїв заряду, які мають найбільші значення енергії, будуть переходити через р-p перехід. Зовнішню напругу такої полярності називають прямою і рахують додатною.

Носії заряду, які перейшли через потенціальний бар'єр, в сусідній області будуть неосновними носіями заряду. Явище збільшення концентрації неосновних носіїв заряду в квазінейтральних областях близьких до ОПЗ р-п переходу називають *інжекцією* неосновних носіїв заряду.

Сумарна напруженість електричного поля в р-п переході зменшується при збільшенні зовнішньої прямої напруги. А це приводить до зменшення ширини області об'ємного заряду  $\delta$  (див. мал. 1.1а).

Якщо зовнішнє електричне поле співпадає по напрямку з внутрішнім, то висота потенціального бар'єру для основних носіїв заряду зростає. Для неосновних носіїв заряду потенціальний бар'єр в р-п переході взагалі відсутній. Неосновні носії заряду будуть втягуватися електричним полем в р-п перехід і проходити в сусідню область - буде відбуватися *екстракція* неосновних носіїв заряду, тобто зменшення концентрації неосновних носіїв заряду в квазінейтральних областях, близьких до ОПЗ р-п переходу. При цьому через р-п перехід буде протікати зворотній струм, який набагато менший порівняно із прямим струмом із-за невеликої концентрації неосновних носіїв заряду в приграничних до р-п переходу областях. Зовнішню напругу такої полярності називають зворотною і вважають від'ємною.

Товщина р-п переходу із збільшенням зворотної напруги  $U$  по абсолютному значенню збільшується:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0(\varphi_k - U)}{qN^*}}, \quad (1.2)$$

де  $N^* = N_A N_D / (N_A + N_D)$  - приведена концентрація домішки.

Зміна товщини ОПЗ при зміні напруги на величину  $\Delta U$  обумовлена зміною об'ємного заряду некомпенсованих іонів акцепторів поблизу лівої (мал. 1.1а) градиці ОПЗ на величину  $\Delta Q$  і рівної їй зміні заряду іонів донорів поблизу правої границі. Одночасно, за рахунок протікання струму у зовнішньому колі, буде виникати ррх дірок до

лівої границі ОПЗ і електронів до правої границі ОПЗ. Електронно-дірковий перехід в колах змінного струму веде себе подібно до конденсатора. Ємність такого конденсатора називають бар'єрною ємністю р-п переходу.

Величину бар'єрної ємності можна визначити із формули:

$$C_{\sigma} = \frac{\Delta Q}{\Delta U} = S \sqrt{\frac{q \epsilon \epsilon_0 N^*}{2(\phi_K - U)}} \quad (1.3)$$

де  $S$  - площа р-п переходу.

В залежності від концентрації легуючої домішки в слаболегованій області товщина ОПЗ складає 1 - 10 мкм, а значення питомої ємності р-п переходу знаходиться в межах  $10^{-8} - 10^{-10}$  ф/см<sup>2</sup>. При зворотній напрузі  $C_{\sigma}$  зменшується, що обумовлено залежністю  $\delta(U)$ .

## 1.2. Вольт-амперна характеристика р-п переходу

В стані термодинамічної рівноваги області напівпровідника поза областями просторового заряду є електронейтральними. Для п-області умова електронейтральності запишеться

$$p_{no} - n_{no} + N_D = 0$$

і означає, що число додатніх зарядів дірок і іонів донорів, рівне числу від'ємних зарядів - електронів. Аналогічно, для р-області умова електронейтральності має вигляд

$$p_{po} - n_{po} - N_A = 0.$$

При прикладанні зовнішньої прямої напруги рівновага порушується. Зменшення висоти потенціального бар'єру приводить до того, що в р-області за рахунок дифузії в п-область за межу  $x = \delta_n$  будуть проходити дірки (мал. 1.1.6). Внаслідок того, що час життя дірок  $\tau_p$  скінченний, їх рекомбінація з електронами буде відбуватися не зразу, і тому, в деякій області, за межами області просторового заряду, концентрація дірок  $p_n$  буде більша рівноважної  $p_{no}$ . Одночасно в



p-області збільшиться концентрація електронів, так як дірки порушать електронейтральність і поле, обумовлене ними, підтягує електрони з правого (на мал. 1.1а) омичного контакту. По мірі руху вправо дірки будуть рекомбінувати з електронами і їх надлишкова концентрація буде спадати до нуля.

Аналогічно, при  $U > 0$ , електрони будуть рухатися через область просторового заряду вліво за межу  $x = -\delta_p$ , де їх надлишкова концентрація  $\Delta n = n_p - n_{po}$  зменшується за рахунок рекомбінації з дірками.

Для кількісних розрахунків необхідно знати, яка кількість носіїв заряду переходить потенціальний бар'єр і як ця кількість залежить від прикладеної напруги.

В стані термодинамічної рівноваги (ТДР) відношення коонцентрації дірок зліва від потенціального бар'єру ( $x = -\delta_p$ ) до концентрації дірок справа ( $x = \delta_n$ ) визначається співвідношенням:

$$\frac{p_n(\delta_n)}{p_n(-\delta_p)} = \frac{p_{no}}{p_{po}} = \exp\left[-\frac{\phi_k}{\phi_T}\right]. \quad (1.4)$$

де  $\phi_T = kT/q$  - температурний потенціал, рівний 26 мВ при 300 К. Фізичний зміст цього виразу такий. В невідродженому напівпровіднику носії заряду підлягають статистиці Максвелла-Больцмана, тобто їх число експоненціально зменшується з ростом енергії частинок. Тому в стані ТДР число дірок, які пройшли потенціальний бар'єр, рівне числу тих дірок зліва від ОПЗ, енергія яких більша висоти потенціального бар'єру  $\phi_k$ .

При прикладанні прямої напруги ( $U > 0$ ) висота потенціального бар'єру зменшується і стає рівною  $\phi_k - U$ . Тому концентрація дірок, які пройшли потенціальний бар'єр, збільшиться і стане рівною

$$p_{n1} = p_n(\delta_n) = p_{po} \exp\left[-(\phi_k - U)/\phi_T\right]. \quad (1.5)$$

Враховавши (1.4) можна записати:

$$p_{n1} = p_{no} \exp(U/\phi_T). \quad (1.6)$$

Аналогічно, число електронів, які проходять із p-області в квазіней-

тральну р-область

$$n_{p1} = n(-\delta_p) = n_{p0} \exp(U/\varphi_T) \quad (1.7)$$

При зворотньому зміщенні ( $U < 0$ ) р-п переходу висота потенціального бар'єру збільшується і кількість основних носіїв заряду, які можуть пройти потенціальний бар'єр експоненціально зменшується.

Умови (1.6) і (1.7) називають граничними умовами для неосновних носіїв або умовами Шоклі.

Розглянемо виведення формули для ідеалізованої ВАХ р-п переходу при низькому рівні інжекції носіїв заряду, в якому межа розділу між р і n областями являє собою протяжну площину і її лінійні розміри більші товщини ОПЗ.

Будемо рахувати, що атоми домішки повністю іонізовані і струм обумовлений тільки дифузиею.

Поведінка дірок описується рівнянням неперервності:

$$- \frac{1}{q} \frac{dJ_p}{dx} - \frac{p_n - p_{n0}}{\tau} = \frac{dp}{dt} \quad (1.8)$$

Для стаціонарного випадку  $dp/dt = 0$  і, врахувавши, що

$$J_p = -qD_p \frac{dp_n}{dx}, \quad (1.9)$$

рівняння (1.8) можна записати у вигляді:

$$D_p \frac{d^2 p_n}{dx^2} - \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p} = 0 \quad (1.10)$$

Поділимо обидві частини рівняння (1.10) на  $D_p$  і позначивши

$$L_p^2 = D_p \tau_p; \quad \Delta p = p_n - p_{n0},$$

де  $\Delta p$  - нерівноважна концентрація дірок, одержимо:

$$\frac{d^2 \Delta p}{dx^2} - \frac{\Delta p}{L_p^2} = 0$$

Загальний розв'язок цього рівняння має вигляд:

$$\Delta p(x) = A_1 \exp(x/L_p) + A_2 \exp(-x/L_p)$$

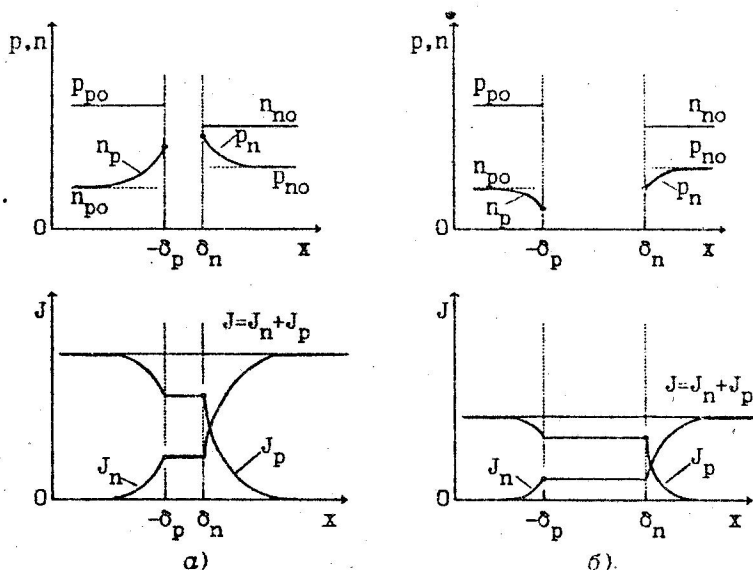
Постійні коефіцієнти знаходяться із граничних умов:

при  $x = \delta_n$

$$\Delta p_{n1} = p_{n0} [\exp(U/\varphi_T) - 1];$$

при  $x = W$   $\Delta p = 0$ .

В ідеальній теорії рахується, що практично всі надлишкові дірки рекомбінують не доходячи до контакту. В такому разі все одно на якій віддалі  $W$  від контакту (див. мал. 1.1а) знаходиться права границя р-п переходу (практично досить, щоб  $W > 3L$ ).



Мал. 1.2. Розподіл концентрації носіїв заряду і густин струмів в р-п переході.

а - при прямому з'єднанні; б - при зворотньому з'єднанні.

Розв'язок рівняння дифузії для дірок з заданими граничними умовами має вигляд:

$$\Delta p(x) = \Delta p_{n1} \exp(-x/L_p) = p_{n0} [\exp(U/\varphi_T) - 1] \exp(-x/L_p). \quad (1.11)$$

Вираз для густини струму дірок одержимо диференціюючи (1.11) по  $x$

і підставляючи одержаний результат в (1.9):

$$J_p(x) = \frac{qD_p \Delta p_{n1}}{L_p} \exp(-x/L_p) = \frac{qD_p p_{no}}{L_p} p_{no} [\exp(U/\varphi_T) - 1] \exp(-x/L_p).$$

Надлишкова концентрація і струм дірок, інжектованих в базу діода, експоненціально зменшується з ростом  $x$ . Це проходить за рахунок рекомбінації дірок з електронами. Надлишкова концентрація і струм дірок спадають в  $e$  раз на віддалі  $L_p$ .

Густина дифузійного струму дірок, інжектованих в  $n$ -область через межу  $x = \delta_n$  буде:

$$J_p(+0) = \frac{qD_p p_{no}}{L_p} [\exp(U/\varphi_T) - 1].$$

Аналогічно, можна одержати густину струму електронів, інжектованих в  $p$ -область, для координати  $x = -\delta_p$ :

$$J_p(-0) = \frac{qD_n n_{po}}{L_n} [\exp(U/\varphi_T) - 1],$$

де символічна координата  $-0$  відповідає лівій границі ОПЗ ( $x = -\delta_p$ ), а координата  $+0$  відповідає правій границі ОПЗ ( $x = \delta_n$ ).

Повна густина струму через  $p$ - $n$  перехід рівна сумі густин струмів електронів і дірок в будь-якому перерізі діода:

$$J(0) = J_p(+0) + J_n(-0) = J_S [\exp(U/\varphi_T) - 1],$$

де

$$J_S = \frac{qD_p p_{no}}{L_p} + \frac{qD_n n_{po}}{L_n}.$$

Якщо врахувати площу  $S$   $p$ - $n$  переходу, то струм  $I = SJ$ , тоді

$$I = I_S [\exp(U/\varphi_T) - 1]. \quad (1.12)$$

Вираз (1.12) описує вольт-амперну характеристику ідеалізованого  $p$ - $n$  переходу.

При прямій напрузі на  $p$ - $n$  переході прямий струм швидко зростає при збільшенні напруги. При зворотній напрузі струм через  $p$ - $n$  перехід прямує до постійної величини  $-I_S$ , яка називається струмом насичення.

В різко несиметричному  $p^+-n$  переході концентрація дірок  $p_{po}$  в  $p^+$ -області набагато більша концентрація електронів в  $n$ -області. Для неосновних носіїв заряду справджується обернена нерівність  $p_{no} \gg n_{po}$ . В цьому випадку густина струму дірок  $J_{Sp} = qD_p p_{no} / L_p$  на багато порядків більша густини струму електронів  $J_{Sn} = qD_n n_{po} / L_n$  і тому зворотній струм насичення визначається параметрами  $n$ -області:

$$I_S = \frac{SqL_p p_{no}}{\tau_p} = \frac{SqL_p n_i^2}{(n_{no} \tau_p)}$$

Но своїй природі струм  $I_S$  в  $p^+-n$  переході являє собою струм теплової генерації дірок в квазінейтральній  $n$ -базі. Його можна уявити собі як струм, який виникає в результаті теплової генерації дірок в об'ємі  $SL_p$  із швидкістю  $p_{no} / \tau_p$ , тобто в шарі бази товщиною  $L_p$ , яка примикає до правої границі ОПЗ.

Експериментально встановлено, що формула (1.12) задовільно описує ВАХ  $p-n$  переходів, виготовлених на основі напівпровідників з малю шириною забороненої зони, включаючи Ge ( $E_G = 0.66 \text{ eV}$ ). Зворотні вітки ВАХ Si, GaAs, GaP  $p-n$  переходів не мають ділянки насичення. Для пояснення цього явища необхідно врахувати наявність теплової генерації носіїв в середині ОПЗ  $p-n$  переходу.

При зворотній напрузі на  $p-n$  переході ОПЗ збіднена носіями заряду і рівновага між процесами генерації і рекомбінації зміщена в бік генерації носіїв заряду. В результаті генерації пар електрон-дірка утворюється зворотній струм генерації носіїв заряду в ОПЗ  $p-n$  переходу  $I_{RG}$ , який пропорційний об'єму ОПЗ  $S\delta$  і швидкості генерації носіїв в заперному шарі  $G = n_i / 2\tau_0$ , де  $\tau_0$  - час життя носіїв в ОПЗ:

$$I_{RG} = Sq \frac{n_i}{2\tau_0} \delta(U) = I_{RG0} \left( 1 - \frac{U}{\phi_K} \right)^n,$$

де  $I_{RG0} = Sq n_i \delta(0) / 2\tau_0$ ;  $n = 1/2$  для різкого і  $n = 1/3$  для плавного  $p-n$  переходів.

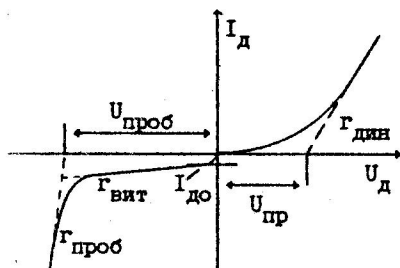
Повний зворотній струм визначається сумою струму насичення  $I_S$ ,

струму генерації носіїв в ОПЗ р-n переходу  $I_{RO}$ , струмів витоку в об'ємі і по поверхні.

### 1.3. Статична модель діода

Для побудови статичної моделі діода повну ВАХ діода представляють відрізками прямих так, щоб вона найточніше відображала реальну ВАХ (в заданому діапазоні струмів і напруг).

Апроксимуючі відрізки прямих найкраще проводити січними прями-



Мал. 1.3. Лінійна апроксимація ВАХ діода

ми (мал. 1.3). В цьому випадку реальна ВАХ діода січними розділяється на три області:

область провідності  $U_d > U_{пр}$

$$U_d = U_{пр} + I_d \gamma_{дин};$$

область відсікання  $-U_{проб} < U_d < U_{пр}$

$$U_d = -I_d \gamma_{вит} + I_{до} \gamma_{вит};$$

область пробивання  $U_d < -U_{проб}$

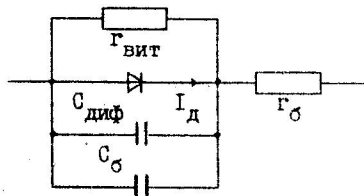
$$U_d = -U_{проб} - I_d \gamma_{проб}.$$

### 1.4. Динамічна модель діода

Дану модель одержують уведенням в схему елементів, які відображають реальні параметри діода (мал.1.4). Опір  $\gamma_{\sigma}$  - омичний опір бази (високоомної області структури діода)  $\gamma_{вит}$  - опір витоку діода.

Струм через діод моделюється джерелом струму  $I_d = I_0 [\exp(-U_d / \eta \varphi_T) - 1]$ , де  $I_0$ ,  $\eta$  - параметри моделі для прямої вітки ВАХ.

Динамічні властивості діода описуються бар'єрною  $C_{\sigma}$  і дифузійною  $C_{диф}$  ємностями. Бар'єрну ємність знаходять з формули:



Мал. 1.4. Динамічна модель діода

$C_0 = C_0 / (1 - U_d / \varphi_T)^{-\gamma}$ , де  $C_0$  - значення бар'єрної ємності при  $U_d = 0$ ;  $\gamma = 0,3 - 0,5$  - параметр апроксимації.

Дифузійну ємність, яка відображає накопичення неосновних нерівноважних носіїв заряду, можна записати в такому вигляді:

$$C_{\text{диф}} = \tau_{\text{еф}} I_d / \varphi_T,$$

де  $\tau_{\text{еф}}$  - ефективний час життя носіїв заряду.

### 1.5. Основні параметри діодів

Параметри діодів розділяються на граничні (максимальні і мінімальні допустимі значення) і характеризуючі (робочі).

Допустиме значення параметра - це значення, при якому очікується задовільна робота приладу, а гранично допустимі значення - це значення, за межами якого прилад може бути виведений з ладу.

Для характеристики випрямних діодів використовуються такі параметри:

- максимально допустима постійна зворотня напруга  $U_{\text{звmax}}$  - напруга, яка може бути прикладена до діода тривалий час без ризику порушення його працездатності. Звичайно  $U_{\text{звmax}} = 0,5 - 0,8 U_{\text{проб}}$ ;

- максимально допустимий постійний прямий струм  $I_{\text{прmax}}$ ;

- постійна пряма напруга  $U_{\text{пр}}$  при заданому прямому струмі  $I_{\text{пр}} = I_{\text{прmax}}$

- максимально допустимий постійний зворотній струм  $I_{\text{звmax}}$  - зворотній струм витoku діода при прикладенні до нього  $U_{\text{звmax}}$ ;

- частота без зниження режимів - верхнє значення частоти, при якій забезпечується задані струми і напруги.

По максимально допустимому випрямленому струмові діоди поділяються на три групи:

діоди малої потужності ( $I_{\text{пр}} < 0,3\text{А}$ );

діоди середньої потужності ( $0,3 < I_{\text{пр}} < 10\text{А}$ );

потужні, або силові діоди ( $I_{\text{пр}} > 10\text{А}$ ).

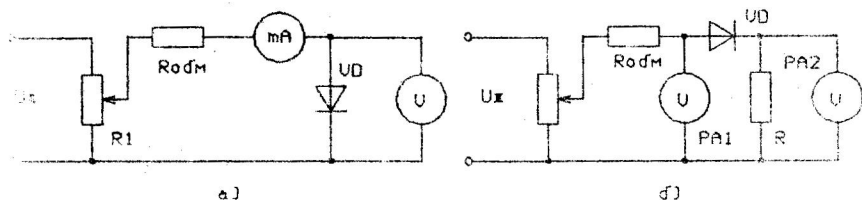
## 2. Порядок виконання роботи

### 2.1. Підготовка до роботи

Користуючись рекомендованою літературою вивчити основні властивості р-п переходу та вміти виводити формулу для вольт-амперної характеристики (ВАХ) ідеального р-п переходу (формула Шоклі). Ознайомитись з основними параметрами діодів та з системами позначень напівпровідникових діодів. Вивчити, як впливають процеси рекомбінації та генерації носіїв заряду в ОПЗ на ВАХ реальних діодів. Намалювати схеми для дослідження ВАХ діодів.

### 2.2. Проведення досліджень

2.2.1. Дослідження ВАХ кремнієвого та германієвого випрямних діодів (вказаних викладачем) при кімнатній температурі. Для дослідження прямих віток ВАХ збирають схеми, які зображені на мал. 1.5. Схема мал. 1.5а використовується при вимірюванні струмів більших 10 мкА. Напруга  $U_{\text{ж}}$  рівна 5 В,  $R_{\text{оом}}$  вибирається із умови  $U_{\text{ж}}/R_{\text{оом}} < I_{\text{прмаж}}$ , де  $I_{\text{прмаж}}$  - максимально допустимий постійний струм для досліджуваного діода. Струми менші за 10 мкА вимірюються по



Мал. 1.5. Схеми для дослідження ВАХ діодів

схемі мал. 1.5б. Значення опору резистора  $R_{\text{оом}}$  таке ж, як і в схемі мал. 1.5а, а опір резистора  $R$  рівний 100 кОм. Напруга на діоді  $U$  і струм через діод  $I$  вираховуються по формулах:



$$U = U_1 - U_2; \quad I = U_2/R,$$

де  $U_1$  і  $U_2$  - напруги вимірні вольтметрами PA1 і PA2 відповідно (вказані напруги можна вимірювати і одним вольтметром, перемикаючи його вхід то на один, то на другий виводи діода VD).

Дослідження зворотніх віток ВАХ здійснюється на окремому лабораторному макеті, який зібраний по схемі, аналогічній мал.1.5б, лише струм через діод і напруга на ньому вимірюється одним приладом - цифровим вольтметром типу Б7-2ІА.

Увага! Якщо ви не знаєте як працювати на вказаному макеті, то зверніться за консультацією до викладача, або чергового лаборанта.

### 2.3. Обробка та аналіз одержаних ВАХ

2.3.1. Побудувати прямі вітки ВАХ у звичайному та напівлогарифмічному масштабах (див. Л. 2, стор. 71, мал. 1.17).

2.3.2. Побудувати зворотні вітки ВАХ в звичайному масштабі.

2.3.3. Визначити із прямих віток ВАХ при великих струмах опір бази досліджуваних діодів  $r_G$ .

2.3.4. Користуючись програмою "Моделювання напівпровідникового діода" визначити параметри моделі для малих струмів.

2.3.5. Порівняти одержані експериментальні результати з теоретичними і зробити висновки.

### 3. Запитання до лабораторної роботи

3.1. Що називається р-п переходом?

3.2. Як вирахувати концентрацію основних і неосновних носіїв заряду?

3.3. Опишіть процеси дифузії та дрейфу носіїв заряду в р-п переході при відсутності зовнішньої напруги на ньому.

3.4. Опишіть процеси дифузії та дрейфу носіїв заряду в р-п

переході при прикладанні зовнішньої напруги до нього.

3.5. Що називають контактною різницею потенціалів р-п переходу?

3.6. Що називають базою діода?

3.7. Поясніть процес інжекції неосновних носіїв заряду через р-п перехід.

3.8. Поясніть процеси екстракції неосновних носіїв заряду через р-п перехід.

3.9. Намалюйте ВАХ ідеального р-п переходу. Запишіть формулу Шоклі.

3.10. Як впливають процеси рекомбінації носіїв заряду в ОПЗ на ВАХ діодів?

3.11. Як впливають процеси генерації носіїв заряду в ОПЗ на ВАХ діодів?

3.12. Як позначаються на схемах і маркуються напівпровідникові діоди?

3.13. Перерахуйте і поясніть відмінності у властивостях і параметрах кремнієвих і германієвих випрямних діодів.

3.14. Як впливає температура на параметри випрямних діодів?

## Лабораторна робота № 2

## ДОСЛІДЖЕННЯ СТАБІЛІТРОНІВ ТА ВАРИКАПІВ

**Мета роботи:** дослідження вольт-амперних та вольт-фарадних характеристик (ВФХ) стабілітронів та варикапів, визначення їх основних параметрів та побудова статичних моделей.

## 1. Теоретичні відомості

## 1.1. Лавинне пробивання p-n переходу

Це явище пов'язане з утворенням лавини носіїв заряду в області просторового заряду (ОПЗ) під дією електричного поля. Починаючи з певного значення напруженності електричного поля  $E_{кр}$  носії заряду одержують енергію, достатню для утворення нових електронно-діркових пар в результаті ударної іонізації атомів напівпровідника. По мірі підвищення зворотної напруги інтенсивність ударної іонізації збільшується і процес помноження електронно-діркових пар набуває лавинний характер, а струм через p-n перехід необмежено зростає. Напруга  $U_{пр}$ , при якій це проходить, називається *напругою лавинного пробивання*.

Для різкого несиметричного p<sup>+</sup>-n переходу середнє значення напруженності електричного поля в ОПЗ можна записати так

$$E = \frac{U}{\delta} = \sqrt{\frac{qUN_D}{2\epsilon\epsilon_0}} \quad (2.1)$$

Оскільки пробивання p-n переходу розпочинається при досягненні певного значення напруженності електричного поля  $E_{кр}$ , яке визначається типом матеріалу з якого виготовлений p-n перехід та його структурою, то із (2.1) можна оцінити значення напруги пробивання p-n переходу:

$$U_{\text{пр}} = \frac{2\epsilon\epsilon_0}{q} \frac{E_{\text{кр}}^2}{N_D} \quad (2.2)$$

На практиці для оцінки  $U_{\text{пр}}$  використовують наступну формулу

$$U_{\text{пр}} = 60 \left( \frac{E_G}{1.1} \right)^{3/2} \left( \frac{N_D}{10^{16}} \right)^{-3/4}, \quad (2.3)$$

де ширина забороненої зони напівпровідника  $E_G$  береться в електронвольтах,  $N$  - в  $\text{см}^{-3}$ , а  $U_{\text{пр}}$  буде у В.

Для р-п переходів з лінійним розподілом домішки:

$$U_{\text{пр}} = 60 \left( \frac{E_G}{1.1} \right)^{1.2} \left( \frac{\alpha}{3 \cdot 10^{20}} \right)^{-0.4}, \quad (2.4)$$

де  $\alpha$  - градієнт концентрації домішки,  $\text{см}^{-4}$ .

Якщо відомий питомий опір  $\rho$  вихідного напівпровідника, тоді для кремнієвих р<sup>+</sup>-п переходів  $U_{\text{пр}} = 96\rho^{0.78}$ ; для п<sup>+</sup>-р переходів  $U_{\text{пр}} = 48\rho^{0.78}$ ; для германієвих р<sup>+</sup>-п переходів  $U_{\text{пр}} = 100\rho^{0.8}$ , а для п<sup>+</sup>-р переходів  $U_{\text{пр}} = 55\rho^{0.8}$ . В записаних співвідношеннях  $U_{\text{пр}}$  входить у В, а  $\rho$  - в Омсм.

Пробивна напруга різких несиметричних р-п переходів визначається питомим опором слаболегованої області, так як від неї залежить товщина р-п переходу.

Зворотню вітку ВАХ р-п переходу в області лавинного пробивання наближено можна описати, якщо використати емпіричне співвідношення Міллера для коефіцієнта лавинного помноження:

$$M = \frac{1}{1 - (U/U_{\text{пр}})^n}$$

де показник степені  $n$  залежить від природи носіїв заряду, які викликають іонізацію атомів, та структури р-п переходу. Якщо прийняти, що  $n = I_{\text{д}}/I_0$ , де  $I_0 = I_S + I_{\text{RG}}$  то

$$I_{\text{д}} = \frac{I_0}{1 - (U/U_{\text{пр}})^n}$$

Із підвищенням температури зменшується довжина вільного пробігу

носіїв заряду, а значить, і енергія, яку може набути носій заряду на цій довжині в електричному полі. Тобто, підвищення температури приводить до збільшення пробивної напруги при лавинному пробиванні.

### 1.2. Тунельне пробивання р-п переходу

Із збільшенням концентрації домішки в базі, товщина ОПЗ стає меншою від довжини вільного пробігу носіїв заряду, ударна іонізація при цьому неможлива і пробивання р-п переходу буде проходити тільки за рахунок тунельного ефекту. При тунельному пробиванні зворотній струм р-п переходу різко зростає внаслідок тунельного проходження електронів із валентної зони р-області в зону провідності п-області напівпровідника в тій області р-п переходу, де існує сильне електричне поле. Якщо довжина хвилі електрона порівняна з товщиною ОПЗ, то існує кінцева імовірність тунелювання електронів із валентної зони р-області в зону провідності п-області. Зростання тунельного струму в області пробивання проходить при критичній напруженості електричного поля  $E_{кр}$ . Зворотня напруга різкого р-п переходу зв'язана з максимальною напруженістю поля співвідношенням (2.2) в якому  $N_D$  слід замінити на приведену концентрацію легуючої домішки  $N^* = N_A N_D / (N_A + N_D)$ .

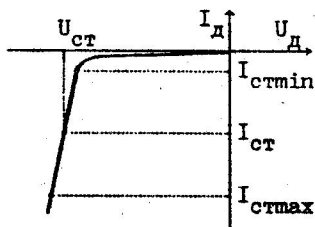
Експериментально знайдено, що для германію  $E_{кр} = 3,7 \cdot 10^5$  В/см, а для кремнію  $E_{кр} = 1,4 \cdot 10^6$  В/см. Тунельне пробивання в кремнієвих р-п переходах має місце при концентрації домішок в базі  $N_D = 10^{18}$  см<sup>-3</sup>. Напруга тунельного пробивання при цьому менше 5 В. При значно меншій степені легування має місце лавинне пробивання.

Тунельний механізм пробивання р-п переходу відрізняється від лавинного по знаку зміни  $U_{пр}$  при зміні температури. З підвищенням температури ширина забороненої зони в германії і кремнії зменшується, тому ймовірність тунелювання електронів збільшується, що обумовлює зменшення  $U_{пр}$ .

В зв'язку з тим, що лавинне пробивання характерне для діодів виготовлених на основі напівпровідників з великою шириною забороненої зони, вихідним матеріалом для стабілітронів є кремній. Шляхом зміни концентрації легуючої домішки одержують р-п переходи з різними значеннями напруги стабілізації  $U_{ст}$  (від 3 до 400 В). Низьковольтні стабілітрони виготовляють на основі сильнолегованого кремнію. Вони мають напругу стабілізації меншу 5 В, яка обумовлена тунельним пробиванням. Високовольтні стабілітрони виготовляються на основі слаболегованого кремнію. В них реалізується лавинний механізм пробивання р-п переходу.

### 1.3. Стабілітрони

Напівпровідниковий стабілітрон – це діод, напруга на якому в області електричного пробивання слабо залежить від струму і який використовується для стабілізації напруги.



Мал.2.1. Робоча ділянка ВАХ стабілітрона

Стабілітрони працюють в режимі лавинного або тунельного пробивання р-п переходу. При цьому має місце різке зростання зворотнього струму, а зворотня напруга змінюється дуже мало. Цю властивість ВАХ кремнієвого діода в області пробивання р-п переходу (мал. 2.1)

використовують для стабілізації напруги, а також для фіксування рівнів напруг в електричних схемах, останнім пояснюється друга назва цих діодів – опорні діоди.

Основні параметри стабілітронів:

- напруга стабілізації  $U_{ст}$  – значення напруги на стабілітроні при протіканні через нього заданого струму  $I_{ст}$ ;

- мінімальний струм стабілізації  $I_{стmin}$  – мінімальний струм при

якому встановлюється стійкий режим пробивання р-п переходу;

- температурний коефіцієнт напруги стабілізації

$$\alpha_{\text{ст}} = \frac{1}{U_{\text{ст}}} \frac{\Delta U_{\text{ст}}}{\Delta T} \Big|_{I_{\text{ст}} = \text{const}} ;$$

- динамічний опір стабілітрона  $\Gamma_{\text{дин}} = \Delta U_{\text{ст}} / \Delta I_{\text{ст}}$ ;

- статичний опір стабілітрона  $\Gamma_{\text{ст}} = U_{\text{ст}} / I_{\text{ст}}$ ;

- максимальний струм стабілізації  $I_{\text{стmax}}$  - найбільший струм, який може протікати через стабілітрон, щоб потужність, яка виділяється на приладі не перевищувала б встановлене значення.

Температурний коефіцієнт напруги стабілізації  $\alpha_{\text{ст}}$  має додатні значення для високовольтних стабілітронів і від'ємні - для низьковольтних. Це пояснюється залежністю механізму пробивання від ступеня легування напівпровідника. Зміна знаку  $\alpha_{\text{ст}}$  проходить при концентраціях домішки в кремнії біля  $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . При  $U_{\text{ст}} = 5 - 7 \text{ В}$  коефіцієнт  $\alpha_{\text{ст}}$  мінімальний.

Одним із методів зменшення  $\alpha_{\text{ст}}$  полягає в послідовному з'єднанні переходів з рівними по значенню, але протилежними по знаку коефіцієнтами  $dU_{\text{р}}/dT$ .

Різновидністю кремнієвих стабілітронів є стабістори. В цих діодах для стабілізації низьких напруг (до 2 В) використовується пряма вітка ВАХ р-п переходу. Для виготовлення стабісторів використовується сильнолегований кремній, що дозволяє отримати менші значення опору бази діода.

#### 1.4. Варикапи

Варикап - це напівпровідниковий діод, в якому використовується явище залежності бар'єрної ємності р-п переходу від зворотної напруги.

Варикапи використовуються у пристроях зміни частоти коливань в коливальному контурі, в схемах параметричних підсилювачів, помножу-

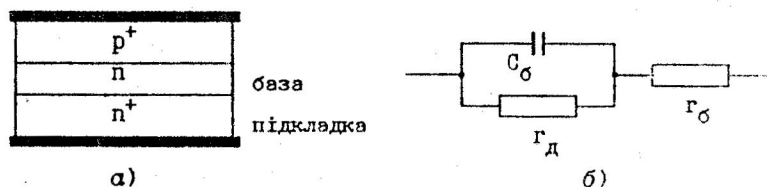
вачів частоти і в інших електронних пристроях.

Основний матеріал з якого виготовляються варикапи є кремній, а в останній час - GaAs. В сплавних варикапах електричний перехід різкий, розподіл легуючої домішки вздовж переходу рівномірний. В дифузійних - р-п перехід плавний. Вольт-Фарадна характеристика (ВФХ) варикапа апроксимується формулою (див. лабораторну роботу № 1):

$$C_{\sigma} = \frac{C_0}{(1 - U/\varphi_T)^{\gamma}}$$

Коефіцієнт  $\gamma = 0,5$  для сплавних і  $\gamma = 0,3$  для дифузійних р-п переходів (в цій формулі  $U < 0$  - зворотня напруга на діоді).

Для одержання різкої залежності  $C_{\sigma} = f(U)$  в епітаксіальних варикапах використовуються переходи з структурою р<sup>+</sup>-п-п<sup>+</sup>-типу і протилежним градієнтом легуючої домішки в базі діода (мал. 2.2).



Мал. 2.2. Структура (а) та еквівалентна схема (б) варикапа

Як і в інших діодах, опір бази варикапа повинен бути по можливості малим. Одночасно, для того, щоб пробивна напруга була велика необхідно збільшувати питомий опір шарів бази, які межують з р-п переходом. Тому база варикапа складається із двох шарів (мал. 2.2а). Основна частина бази - підкладка повинна бути низькоомною, а тонкий шар бази, який знаходиться біля переходу, робиться високоомним.

Еквівалентна схема варикапа приведена на мал. 2.2б. В схемі  $C_{\sigma}$  - конденсатор, який враховує бар'єрну ємність р-п переходу; резистор  $r_{\text{д}}$  враховує диференціальний опір і опір витоку переходу;  $r_{\sigma}$  - резистор, який моделює опір бази.



Основні параметри варикапів:

- ємність варикапа  $C_B$  - ємність виміряна між выводами діода при заданій зворотній напрузі;
- коефіцієнт перекриття по ємності  $K_C$  - відношення ємностей варикапа при двох заданих значеннях зворотньої напруги;
- добротність варикапа  $Q_B$  - відношення реактивного опору варикапа на заданій частоті змінного сигналу до опору втрет при заданому значенні ємності або зворотньої напруги.

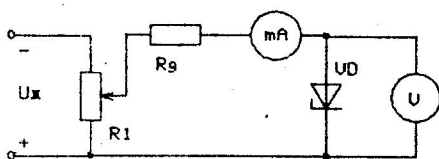
## 2. Порядок виконання роботи

### 2.1. Підготовка до роботи

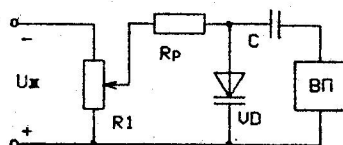
Користуючись рекомендованою літературою вивчити принцип роботи стабілітронів та варикапів. Ємні виводити формулу для ВФХ різкого р-п переходу. Ознайомитися з основними параметрами стабілітронів та варикапів, їх будовою та з системами позначень. Намалювати схеми для дослідження характеристик діодів.

### 2.2. Проведення досліджень

2.2.1. Дослідження ВАХ стабілітронів та варикапів при кімнатній температурі. Для дослідження прямих віток ВАХ збирають схему, яка зображена на мал. 1.5а (лабораторна робота № 1). Зворотня вітка ВАХ стабілітрона досліджується по схемі 2.3. Напруга  $U_{\text{ж}}=15 \text{ В}$ , опір



Мал. 2.3. Схема для дослідження ВАХ стабілітронів



Мал. 2.4. Схема для дослідження ВФХ варикапів

резистора  $R_d$  вибирається в межах 300–500 Ом. Зворотня вітка ВАХ варикапа досліджується аналогічно, як і випрямних діодів. Із вимірювань визначаються два параметри варикапа: зворотній струм варикапа  $I_{зв}$  при заданій напрузі,  $U_{зв}$  та максимальну зворотню напругу  $U_{звmax}$ . Із вимірювань зворотної вітки ВАХ стабілітрона визначаються: напруга стабілізації  $U_{ст}$ , мінімальний струм стабілізації  $I_{стmin}$ , максимальний струм стабілізації  $I_{стmax}$ , диференціальний  $r_{дин}$  та статичний  $r_{ст}$  опори.

2.2.2. Дослідження ВФХ варикапа. Для досліджень використовується схема, яка приведена на мал. 2.4. Вимірювання проводяться на окремому лабораторному макеті. Ємність р-п переходу вимірюється Q-метром типу ВМ-560.

Увага! Якщо Ви не знаєте як проводити вимірювання на лабораторному макеті, то зверніться за консультацією до викладача або чергового лаборанта.

### 2.3. Обробка та аналіз одержаних результатів

2.3.1. Побудувати прямі вітки ВАХ стабілітрона та варикапа в однаковому масштабі. Пояснити відмінності в графіках.

2.3.2. Побудувати зворотню вітку ВАХ стабілітрона. Із графіка визначити основні параметри стабілітрона.

2.3.3. Побудувати графік залежності ємності варикапа від напруги. Із графіка визначити параметри варикапа:  $C_v$  та  $K_c$ .

2.3.4. Користуючись методикою, описаною в Л. 2 (п. 6.2.4, стор. 466) одержати формулу для залежності  $C_0(U)$ .

2.3.5. Побудувати модель стабілітрона для області, де виникає пробивання р-п переходу.

2.3.6. Порівняти одержані експериментальні результати з теоретичними і зробити висновки.

### 3. Запитання до лабораторної роботи

3.1. Що називають бар'єрною ємністю р-п переходу?

3.2. Як вирахувати концентрацію легуючої домішки із ВФХ?

3.3. Опишіть процеси теплового пробивання р-п переходу.

3.4. Опишіть процеси лавинного пробивання р-п переходу.

3.5. Що називають контактною різницею потенціалів р-п переходу?

Як її визначити з ВФХ?

3.6. Що називають базою діода?

3.7. Намалюйте ВФХ ідеального р-п переходу. Запишіть формулу залежності ємності р-п переходу від прикладеної до нього напруги.

3.8. Як впливає концентрація легуючої домішки на ВАХ стабілітрона?

3.9. Чим відрізняються ВАХ стабілітронів з лавинним і тунельним механізмами пробивання р-п переходу?

3.10. Як позначаються на схемах і маркуються напівпровідникові стабілітрони?

3.11. Чому напівпровідникові стабілітрони виготовляються на основі кремнію?

3.14. Як впливає температура на параметри стабілітрона?

## Лабораторна робота № 3

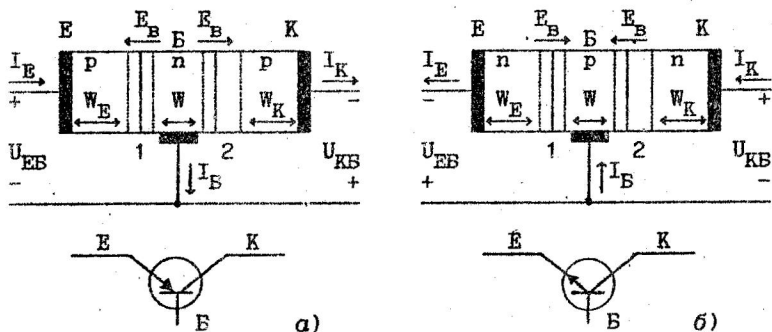
ДОСЛІДЖЕННЯ СТАТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК БІПОЛЯРНОГО  
ТРАНЗИСТОРА

**Мета роботи:** ознайомлення з основними схемами змикання та дослідження вольт-амперних характеристик біполярного транзистора, увімкненого по схемі із спільною базою. Визначення параметрів транзистора.

## 1. Теоретичні відомості

## 1.1. Структура і основні режими роботи біполярного транзистора

Біполярний транзистор – це напівпровідниковий прилад з двома взаємодіючими переходами і трьома або більше виводами, підсилювальні властивості якого обумовлені явищами інжекції і екстракції неосновних носіїв заряду.



Мал. 3.1. Структура біполярного транзистора та умовне графічне зображення:

а - p-n-p; б - n-p-n

Біполярний транзистор складається із трьох областей різного типу електропровідності, які утворюють два p-n переходи, що знаходяться

ться достатньо близько один до одного. В залежності від порядку розміщення областей розрізняють р-п-р і п-р-п транзистори. Спрощені структури транзисторів і їх умовні графічні зображення приведені на мал. 3.1.

В біполярних транзисторах, які далі по тексту називатимемо транзисторами, перенесення електричного струму через кристал напівпровідника і підсилення сигналу обумовлені рухом носіїв заряду обох знаків - електронів і дірок.

Центральну область напівпровідникової структури транзистора називають базою. До бази з лівого боку примикає емітерний р-п перехід (1 на мал. 3.1), а з другого боку (2 мал. 3.1) - колекторний. До зовнішніх областей емітера (Е), бази (Б) і колектора (К) приєднані виводи (металеві електроди), на які подається напруга.

В залежності від співвідношення полярності напруги на р-п переходах розрізняють такі режими роботи транзистора:

- активний (підсилювальний) режим, який відповідає значенням  $U_E > 0$ ,  $U_K < 0$ , при якому транзистор може підсилювати сигнали як по потужності, так і по напрузі;

- режим насичення ( $U_E > 0$ ,  $U_K > 0$ ); при якому колекторний та емітерний переходи інjektують неосновні носії заряду в базу транзистора.

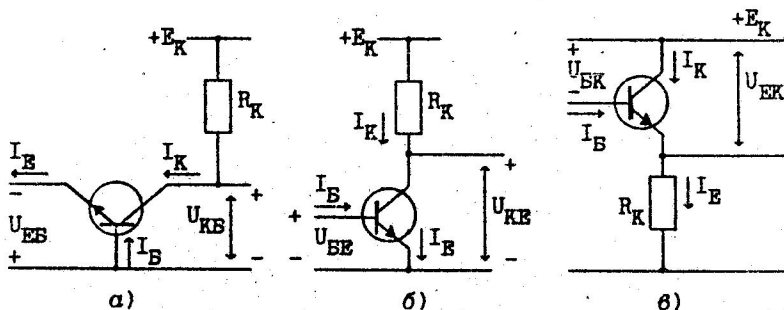
- режим відсікання струму колектора, який відповідає значенням  $U_E < 0$ ,  $U_K < 0$ , при якому струм колектора малий і майже не залежить від напруги на колекторі.

Це три основні режими роботи транзистора. Крім цих трьох режимів, транзистори можуть працювати ще в інверсному режимі, коли емітерний перехід зміщений у зворотньому ( $U_E < 0$ ) напрямку, а колекторний - в прямому ( $U_K > 0$ ).

В режимах відсікання і насичення управління струмами транзистора майже відсутнє.

Основні характеристики транзистора визначаються в першу чергу процесами, які проходять в базі. В залежності від розподілу домішок, в базі може існувати електричне поле, а може його і не бути. Якщо при відсутності струмів в базі існує електричне поле, яке сприяє рухові неосновних носіїв заряду від емітера до колектора, то транзистор називають дрейфовим. Якщо ж поле в базі відсутнє - бездрейфовим.

Розглянемо принцип дії  $p-n-p$  транзистора. В активному режимі на емітерний перехід подається пряме зміщення, а на колекторний - зворотнє, як показано на мал. 3.2а. Базовий вивід є спільним для вхідного (емітерного) і вихідного (колекторного) кола. В такому випадку говорять, що транзистор включений по схемі із спільною базою (СБ). Аналогічно можна включити транзистор із спільним емітером (СЕ) (мал. 3.2б) та спільним колектором (СК) (див. мал. 3.2в).



Мал. 3.2. Схеми увімкнення транзистора з спільною базою (а), з спільним емітером (б) та спільним колектором (в)

В  $p-n-p$  транзисторі з СБ емітерний  $p-n$  перехід інjektує електрони із  $p$ -емітера в базову область транзистора. Якщо концентрація легуючої домішки в емітері значно більша, ніж в базі,  $N_E \gg N_B$ , то струм електронів  $I_{En}$ , інjektованих в базу, буде практично рівний повному струмові емітера  $I_E$ . Ефективність емітера характеризується

коефіцієнтом інжекції  $\gamma = I_{En}/I_E$ , який повинен бути близький до одиниці.

Частина електронів, інжектованих емітером, буде рекомбінувати з дірками в базі. Якщо товщина бази набагато менша дифузійної довжини електронів  $L_{n1}$  в ній, то більшість електронів діде до колектора. Електрони, що дійшли до ОПЗ колектора, будуть захоплені електричним полем р-п переходу і перемістяться в квазінейтральну область колектора. Ефективність переміщення електронів через базу характеризується коефіцієнтом перенесення  $\alpha = I_{Kn}/I_{En}$ , де  $I_{Kn}$  - струм електронів, які досягли лівої границі ОПЗ колекторного переходу. Значення  $\alpha$  в транзисторі з малим відношенням  $W/L_{n1}$  близьке до одиниці. Загальний струм колектора описується таким виразом:

$$I_K = \alpha I_E - I_{KO} [\exp(U_K/\phi_T) - 1] \quad (3.1)$$

де  $\alpha = \gamma \beta$  - коефіцієнт передачі струму емітера;  $I_{KO}$  - зворотний струм насичення колекторного переходу;  $U_K$  - спад напруги на ОПЗ колектора.

Для активного режиму коли  $U_K/\phi_T \gg 1$  вираз (3.1) спрощується і має вигляд

$$I_K = \alpha I_E + I_{KO} \quad (3.2)$$

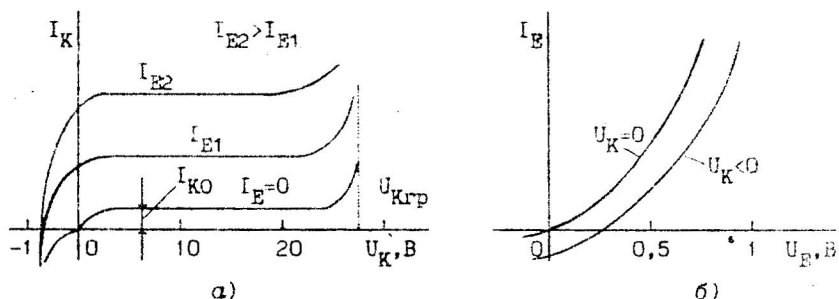
Потрібно мати на увазі, що в (3.1) під  $U_K$  розуміють різницю потенціалів на границях ОПЗ колекторного переходу. Ця напруга відрізняється від показаної на мал. 3.2а напруги  $U_{KB}$  за рахунок спаду напруги на квазінейтральних областях бази та колектора. Далше будемо вважати що,  $U_E = U_{EB}$ ,  $U_K = U_{KB}$ .

Струм бази транзистора завжди рівний різниці струмів емітера і колектора:

$$I_B = I_E - I_K \quad (3.3)$$

Формула (3.1) визначає сукупність вихідних ВАХ транзистора, увімкненого по схемі із спільною базою, параметром яких є струм емітера (мал. 3.3). При  $I_E = 0$  вихідна ВАХ транзистора подібна характеристичі ізольованого р-п переходу.

При увімкненні транзистора по схемі із спільною базою струм колектора практично рівний струму емітера ( $\alpha \approx 1$ ) і слабо залежить від  $U_K$ . Для зменшення струму колектора до нуля необхідно на перехід колектор-база подати невелику пряму напругу (див. мал. 3.3а).



Мал. 3.3. Вихідні (а) та вхідні (б) ВАХ транзистора, увімкненого по схемі з спільною базою

По мірі збільшення зворотної напруги на переході колектор-база до величини  $U_{Kгр}$  струм колектора починає зростати, що обумовлено або лавинним пробиванням р-п переходу, або проколом бази. Останнє має місце в транзисторах з малою шириною бази. В цьому випадку, при збільшенні напруги на колекторі, ОПЗ колекторного переходу розширюється в область бази і може з'єднатися з ОПЗ емітерного переходу.

Вхідні ВАХ транзистора увімкненого по схемі СБ представляють собою залежності  $I_E(U_E)$ , а параметром є напруга на колекторі  $U_K$  (мал. 3.3б).

Із статичних ВАХ транзистора визначаються:

$$- \text{диференційний опір колектора } r_K = \left. \frac{\Delta U_K}{\Delta I_K} \right|_{I_E = \text{const}}$$

$$- \text{диференційний опір емітера } r_E = \left. \frac{\Delta U_E}{\Delta I_E} \right|_{I_K = \text{const}}$$



## 2. Порядок виконання роботи

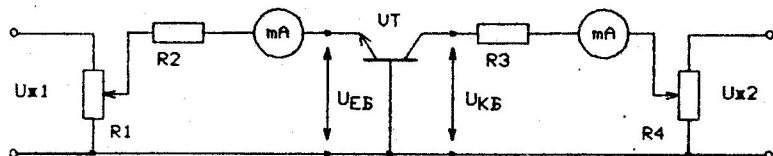
### 2.1. Підготовка до роботи

Користуючись рекомендованою літературою вивчити принцип роботи біполярних транзисторів, їх класифікацію та режим роботи. Ознайомитися з основними параметрами транзистора та системами позначень. Намалювати схеми для дослідження ВАХ транзистора.

### 2.2. Проведення досліджень.

2.2.1. Дослідження входних характеристик. Для дослідження входних характеристик  $I_E(U_{КБ})$  при різних значеннях напруги між колектором і базою  $U_{КБ}$  збирають схему, зображену на мал. 3.4.  $U_{Ж1} = 5 \text{ В}$ ,  $U_{Ж2} = 15 \text{ В}$ , опори резисторів  $R_2$ ,  $R_3$  вибрати в межах  $100\text{--}200 \text{ Ом}$ . Напруга  $U_{ЕБ}$  та  $U_{КБ}$  вимірюється одним вольтметром шляхом перемикавання входу з емітера на колектор і навпаки. Входні характеристики знімаються для  $U_{КБ} < 0$  і  $U_{КБ} > 0$ . Обов'язково дослідити входну характеристику при  $U_{КБ} = 0$  (колектор і базу транзистора з'єднати провідником). Струм емітера змінюйте в межах від  $0$  до  $100 \text{ мА}$ .

При дослідженні входних характеристик слідкуйте за напругою на колекторі і підтримуйте задане її значення з потенціометром  $R_4$ .



Мал. 3.4. Схема для дослідження ВАХ транзистора увімкненого по схемі із спільною базою

2.2.2. Дослідження вихідних характеристик. Вихідні характеристики  $I_K(U_{КБ})$  досліджуються при різних струмах емітера, для  $U_{КБ} < 0$  і  $U_{КБ} > 0$ . Обов'язково дослідити характеристику для  $U_{КБ} = 0$  (емітер

і базу транзистора з'єднати провідником). Струм колектора змінійте в межах від 0 до 100 мА.

### 2.3. Обробка та аналіз одержаних результатів.

2.3.1. Побудувати вхідні характеристики транзистора в однаковому масштабі.

2.3.2. Побудувати вихідні характеристики транзистора в однаковому масштабі.

2.3.3. Користуючись методикою, описаною в Л. 2 (п.6.3.1, стор. 471), та програмою "Моделювання напівпровідникового діода" вирахувати зворотні струми емітерного  $I_{EO}$  та колекторного  $I_{KO}$  переходів і параметри  $\beta_E$  та  $\beta_K$ .

2.3.4. Із вихідних характеристик оцінити коефіцієнт передачі струму емітера та диференціальний опір колектора.

2.3.5. Порівняти одержані експериментальні результати з теоретичними і зробити висновки.

### 3. Запитання до лабораторної роботи

3.1. Поясніть принцип роботи біполярного транзистора.

3.2. Які режими роботи транзистора Ви знаєте?

3.3. Намалюйте та поясніть енергетичну діаграму транзистора для рівноважного стану та для активного режиму.

3.4. Опишіть процеси інжекції та екстракції носіїв заряду в транзисторі.

3.5. Що називають коефіцієнтом передачі струму емітера? Як він залежить від параметрів напівпровідникової структури?

3.6. Що називають базою транзистора?

3.7. Намалюйте вхідні характеристики транзистора, увімкненого по схемі з спільною базою. Запишіть формулу, яка описує вхідні

характеристики.

3.8. Як впливає напруга на колекторі на коефіцієнт передачі струму емітера?

3.9. Намалюйте вихідні характеристики транзистора, увімкненого по схемі з спільною базою.

3.10. Як позначаються на схемах і маркуються біполярні транзистори?

3.11. Що називають диференціальним опором колектора? Як цей параметр визначити із вихідних характеристик?

3.12. Що називають об'ємним опором колектора?

3.13. Чому параметри транзистора залежать від температури?

## Лабораторна робота № 4

## ВИМІРВАННЯ ПАРАМЕТРІВ БІПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА

## ТА ПЕРЕВІРКА МОДЕЛІ МОЛЛА-БЕВРСА

**Мета роботи:** ознайомлення з основними схемами вмикання та методами вимірювань фізичних параметрів біполярного транзистора, моделювання основних властивостей транзистора.

## 1. Теоретичні відомості

Фізичні процеси в біполярному транзисторі описуються системою рівнянь, яке являє собою математичну модель транзистора. Для її побудови необхідно одержати зв'язок між струмами  $I_E$ ,  $I_K$ , які протікають в транзисторі, і напругами  $U_E$ ,  $U_K$ , прикладеними до р-п переходів транзистора.

## 1.1. Розподіл нерівноважних носіїв заряду в базі транзистора

В бездрейфовому транзисторі п-р-п структури густина струму електронів в р-базі, при низькому рівні інжекції, визначається дифузійною електронів:

$$J_n = qD_n \frac{dn}{dx}. \quad (4.1)$$

Це рівняння дозволяє по відомому розподілу електронів в базі  $n(x)$  визначити електронні складові струмів емітера  $I_{En}$  і колектора  $I_{Kn}$ . Для знаходження розподілу  $n(x)$  розв'язується рівняння дифузії електронів

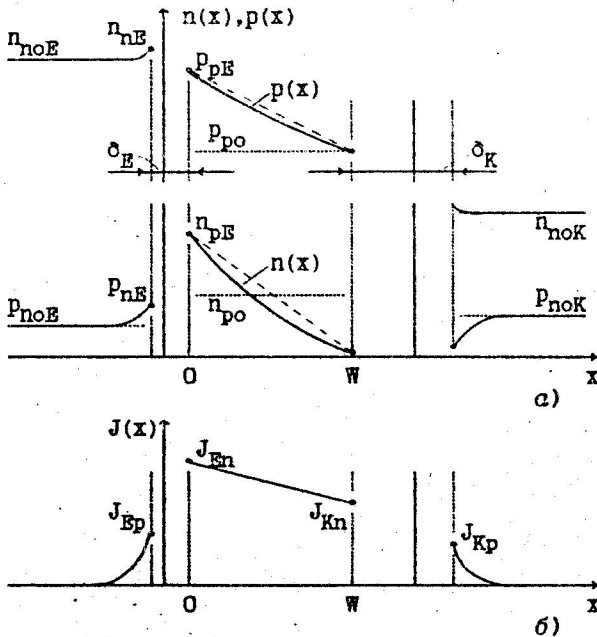
$$\frac{d^2 n}{dx^2} - \frac{n - n_{p0}}{L_n^2} = 0, \quad (4.2)$$

де  $L_n = \sqrt{D_n \tau_n}$  - дифузійна довжина електронів в базі.

Граничні умови при розв'язку рівняння (4.2) будуть наступні. Якщо до ОПЗ емітерного переходу прикладена напруга  $U_E$ , то концентра-

ція електронів на правій границі ОЕЗ емітера в базі при  $x = 0$  (мал. 4.1) визначається умовою Шоклі:

$$\Delta n_E = n_{pE} - n_{po} = n_{po} \left[ \exp(U_E / \phi_T) - 1 \right]. \quad (4.3)$$



Мал. 4.1. Розподіл концентрації електронів і дірок (а) та їх густини струмів (б) в n-p-n транзисторі

До ОЕЗ колекторного переходу прикладена наруга  $U_K$ . Тому надлишкову концентрацію електронів на границі області просторового заряду колектора в базі при  $x = W$  можна записати:

$$\Delta n_K = n_{pK} - n_{po} = n_{po} \left[ \exp(U_K / \phi_T) - 1 \right]. \quad (4.4)$$

Розв'язок рівняння дифузії (4.2) з граничними умовами (4.3), (4.4) має вигляд:

$$\Delta n(x) = n(x) - n_{po} = \frac{\Delta n_E \operatorname{sh}[(W-x)/L_n] + \Delta n_K \operatorname{sh}(x/L_n)}{\operatorname{sh}(W/L_n)}. \quad (4.5)$$

Диференціюючи (4.5) по  $x$  і підставляючи похідну у вираз (4.1), одержимо

$$J_n(x) = -\frac{qD_n}{L_n} \frac{\Delta n_E \operatorname{ch}[(W-x)/L_n] - \Delta n_K \operatorname{ch}(x/L_n)}{\operatorname{sh}(W/L_n)}. \quad (4.6)$$

Густина електронного струму емітера визначається з 4.6) при  $x = 0$ :

$$J_{En} = -\frac{qD_n n_{po}}{L_n \operatorname{th}(W/L_n)} \left[ \exp(U_E/\varphi_T) - 1 \right] + \frac{qD_n n_{po}}{L_n \operatorname{sh}(W/L_n)} \left[ \exp(U_K/\varphi_T) - 1 \right]. \quad (4.7)$$

Густина електронного струму колектора знайдено при  $x = W$ :

$$J_{Kn} = -\frac{qD_n n_{po}}{L_n \operatorname{sh}(W/L_n)} \left[ \exp(U_E/\varphi_T) - 1 \right] + \frac{qD_n n_{po}}{L_n \operatorname{th}(W/L_n)} \left[ \exp(U_K/\varphi_T) - 1 \right]. \quad (4.8)$$

Уведемо такі позначення:

$$J_{EnS} = J_{KnS} = \frac{qD_n n_{po}}{L_n \operatorname{th}(W/L_n)}; \quad (4.9)$$

$$J_{12S} = J_{21S} = \frac{qD_n n_{po}}{L_n \operatorname{sh}(W/L_n)}. \quad (4.10)$$

Тоді вирази (4.7) і (4.8) приймуть такий вигляд:

$$J_{En} = -J_{EnS} \left[ \exp(U_E/\varphi_T) - 1 \right] + J_{12S} \left[ \exp(U_K/\varphi_T) - 1 \right]; \quad (4.11)$$

$$J_{Kn} = -J_{21S} \left[ \exp(U_E/\varphi_T) - 1 \right] + J_{KnS} \left[ \exp(U_K/\varphi_T) - 1 \right]. \quad (4.12)$$

Із цих співвідношень випливає, що для активної області бази, структура рівнянь симетрична. Це означає, що помінявши місцями емітер і колектор і зберігши ці ж самі напруги, струми електронів  $J_{En}$  і  $J_{Kn}$  не зміняться.

Діркові складові дифузійних струмів  $J_{Ep}$  і  $J_{Kp}$  знаходяться з рівнянь неперервності для емітерної і колекторної областей (див. лабо-

реторну роботу \* 1). Густина струму дірок на лівій границі ОПЗ емітерного р-п переходу (мал. 4.1) визначається із співвідношення:

$$J_{Ep} = - \frac{qD_{pE}P_{поЕ}}{L_{pE}} \left[ \exp(U_E/\varphi_T) - 1 \right] = -J_{Eps} \left[ \exp(U_E/\varphi_T) - 1 \right]. \quad (4.13)$$

Аналогічно густина струму дірок на правій границі ОПЗ колекторного переходу:

$$J_{Kp} = - \frac{qD_{pK}P_{поК}}{L_{pK}} \left[ \exp(U_K/\varphi_T) - 1 \right] = -J_{Kps} \left[ \exp(U_K/\varphi_T) - 1 \right]. \quad (4.14)$$

Повний струм емітера  $I_E$  рівний сумі струмів електронів і дірок, помноженій на площу емітера  $S_E$ :

$$I_E = S_E (J_{Eps} + J_{Ens}) \left[ \exp(U_E/\varphi_T) - 1 \right] - S_E J_{12s} \left[ \exp(U_K/\varphi_T) - 1 \right]. \quad (4.15)$$

Аналогічно знаходять повний струм колектора  $I_K$ :

$$I_K = S_E J_{21s} \left[ \exp(U_E/\varphi_T) - 1 \right] - S_K (J_{Kns} + J_{Kps}) \left[ \exp(U_K/\varphi_T) - 1 \right]. \quad (4.16)$$

## 1.2. Модель Молла-Еберса

Для аналізу фізичних процесів в біполярних транзисторах систему рівнянь (4.15) і (4.16) записують у такому вигляді:

$$I_E = I_{EO} \left[ \exp(U_E/\varphi_T) - 1 \right] - \alpha_1 I_{KO} \left[ \exp(U_K/\varphi_T) - 1 \right]; \quad (4.17)$$

$$I_K = \alpha I_{EO} \left[ \exp(U_E/\varphi_T) - 1 \right] - I_{KO} \left[ \exp(U_K/\varphi_T) - 1 \right], \quad (4.18)$$

де  $\alpha = a_{21}/a_{12}$  - коефіцієнт передачі струму емітера;

$\alpha_N = a_{12}/a_{22}$  - інверсний коефіцієнт передачі струму емітера;

$$a_{12} = a_{21} = S_E J_{12s} = S_E J_{21s};$$

$$I_{EO} = a_{11} = S_E (J_{Eps} + J_{Ens}); \quad (4.19)$$

$$I_{KO} = a_{22} = S_K (J_{Kps} + J_{Kns}). \quad (4.20)$$

Струми  $I_{EO}$  і  $I_{KO}$  являють собою струми насичення емітера та колектора

обмін неосновними носіями заряду між емітером і колектором втрачується за допомогою множників  $\alpha_1 I_{KO} = a_{12}$  і  $\alpha I_{EO} = a_{21}$ , причому

$$\alpha_1 I_{KO} = \alpha I_{EO} = S_B \frac{q D_n n_{po}}{L_n \text{sh}(W/L_n)} \quad (4.21)$$

Уведемо такі позначення:

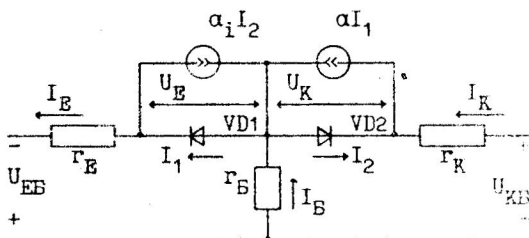
$$I_1 = I_{EO} [\exp(U_E/\varphi_T) - 1]; \quad I_2 = I_{KO} [\exp(U_K/\varphi_T) - 1].$$

Тоді систему рівнянь (4.17) і (4.18) запишемо так:

$$I_E = I_1 - \alpha_1 I_2 \quad (4.22)$$

$$I_K = \alpha I_1 - I_2 \quad (4.23)$$

Вперше основні рівняння транзистора у формі рівнянь (4.17) і (4.18) були одержані Моллом і Еберсом у 1954 році. Пізніше ця система рівнянь і електрична модель транзистора, яка їм відповідає (мал.4.2), була названа моделлю



Мал. 4.2. Еквівалентна схема n-p-n транзистора

Молла-Еберса. Кожному p-n переходу в еквівалентній схемі відповідає ідеалізований діод  $VD_1$  і  $VD_2$ . Через ці діоди протікають інжекційні струми емітера  $I_1$  і колектора  $I_2$ . Генератори струму  $\alpha_1 I_2$  і  $\alpha I_1$  моделюють взаємодію переходів через базу транзистора. Резистори  $r_E$ ,  $r_K$ ,  $r_B$  замінюють опори шарів емітера, колектора та бази. Якщо врахувати спад напруги на цих резисторах, то можна записати два рівняння, які виражають другий закон Кіргофа для вхідного і вихідного кола:

$$U_{EB} = I_E r_E + U_E + I_B r_B \quad (4.24)$$

$$U_{KB} = I_K r_K - U_K - I_B r_B \quad (4.25)$$

Часто вихідний струм транзистора  $I_K$  виражають через вхідний  $I_E$  і напругу на колекторі  $U_K$ :

$$I_K = \alpha I_E - I_{KO} (1 - \alpha \alpha_1) [\exp(U_K/\varphi_T) - 1]. \quad (4.26)$$



Порівнюючи (4.26 і (3.1) одержуємо:

$$I_{\text{КОВ}} = I_{\text{КО}}(1 - \alpha\alpha_1). \quad (4.27)$$

Струм  $I_{\text{КО}}$  визначається при короткозамкненому колі емітера ( $U_E = 0$ ), а струм  $I_{\text{КОВ}}$  - при розімкненому колі емітера ( $I_E = 0$ ).

При зворотньому змищенні колекторного переходу потрібно врахувати крім струму насичення  $I_{\text{КО}}$ , також струми теплової генерації носіїв заряду в ОПЗ колектора  $I_{\text{РГК}}$  і струми витоку по поверхні переходу  $I_{\text{ВТ}} = U_K/\gamma_{\text{ВК}}$ , де  $\gamma_{\text{ВК}}$  - опір витоку колектора. Отже, зворотній струм колектора рівний:

$$I_{\text{КОВ}} = I_{\text{КО}} + I_{\text{РГК}} + I_{\text{ВТ}} \quad (4.28)$$

### 1.3. Коефіцієнт передачі струму емітера

Коефіцієнт передачі струму емітера  $\alpha$  визначає підсилювальні властивості транзистора. Для активного режиму згідно (3.2):

$$I_K = \alpha I_E + I_{\text{КВО}}$$

Звідки

$$\alpha = \frac{I_K - I_{\text{КВО}}}{I_E}, \quad \text{при } U_K = \text{const.}$$

Коефіцієнт  $\alpha$  також називають коефіцієнтом передачі по постійному струму, або інтегральним коефіцієнтом передачі струму емітера. Тоді як величину

$$\bar{\alpha} = \left. \frac{dI_K}{dI_E} \right|_{U_K = \text{const}}$$

називають диференціальним коефіцієнтом передачі струму емітера.

Для ідеалізованої моделі транзистора, яка описується рівняннями (4.15) і (4.16)  $\alpha$  визначається так:

$$\alpha = \frac{a_{21}}{a_{11}} = \frac{J_{21S}}{(J_{Eps} + J_{Ems})} = \left[ \left( 1 + \frac{D_p N_B L_n}{D_n N_E L_{pE}} \operatorname{th} \frac{W}{L_n} \right) \operatorname{ch} \left( \frac{W}{L_n} \right) \right]^{-1} = \gamma \alpha. \quad (4.29)$$

В даному виразі 1-й співмножник являє собою коефіцієнт інжекції

$$\gamma = \frac{I_{En}}{I_{En} + I_{Ep}} = \frac{1}{1 + K_\gamma},$$

де  $K_\gamma = I_{Ep}/I_{En}$  - дефект інжекції емітера, який визначає не корисну долю струму емітера в загальному струмові емітера:

$$K_\gamma = \frac{D_p E N_B L_n}{D_n N_E L_p E} \operatorname{th} \frac{W}{L_n}.$$

В транзисторах з однорідно легованою базою і емітером  $\gamma$  визначається відношенням  $N_B/N_E$ , яке звичайно менше  $10^{-3}$ . Тому при низькому рівні інжекції  $\gamma$  близький до одиниці.

Коефіцієнт перенесення неосновних носіїв через базу:

$$\alpha = I_{Kn}/I_{En} = \operatorname{ch}^{-1}(W/L_n).$$

Якщо  $W/L_n < 0,5$ , то використовується така апроксимація для  $\alpha$ :

$$\alpha \approx 1 - \frac{D_p E^D n_{p0} E^W}{D_n n_{p0} L_p} - \frac{1}{2} \left( \frac{W}{L_n} \right)^2. \quad (4.30)$$

Коефіцієнт передачі струму емітера  $\alpha$  - основний параметр транзистора. Якщо зменшити втрати струму в транзисторі, то збільшиться доля емітерного струму, який протікає в колекторі, і значення  $\alpha$  буде близьке до одиниці. Із (4.30) слідує, що  $\alpha$  буде наближатися до 1, якщо відношення  $W/L_n$ ,  $W/L_p$  та  $D_p E^D n_{p0} E^W / D_n n_{p0}$  дуже малі. Це має місце при тонкій базі і високому ступені легування емітерної області n-типу порівняно з базою p-типу.

Аналогічно можна вирахувати  $\alpha_1$ , використовувачи методику і наближення, що і при обчисленні  $\alpha$ . Тоді

$$\alpha_1 \approx 1 - \frac{D_p K^D n_{p0} K^W}{D_n n_{p0} L_p} - \frac{1}{2} \left( \frac{W}{L_n} \right)^2. \quad (4.31)$$

Типові значення  $\alpha_1 \approx 0,4-0,5$ , а  $\alpha$  - порядку 0,99. Інверсний коефіцієнт передачі емітера малий із-за того, що колекторна область n-типу легована менше, ніж область бази. Крім того практично біполярні транзистори виготовляються несиметричними - ефективною площею емітера

значно менша за ефективну площу колектора і  $\alpha_1$  додатково зменшується порівняно з  $\alpha$ .

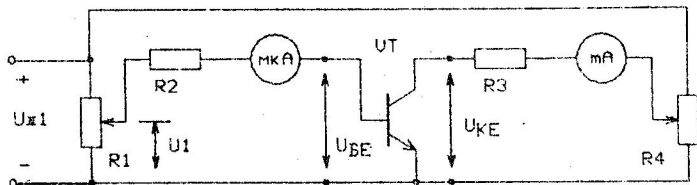
## 2. Порядок виконання роботи

### 2.1. Підготовка до роботи

Користуючись рекомендованою літературою вивчити розподіл нерівноважних носіїв заряду в базі транзистора для різних режимів роботи та ознайомитись з виведенням рівнянь ВАХ транзистора. Намалювати схеми для дослідження ВАХ транзистора та вимірювань його параметрів.

### 2.2. Проведення досліджень

2.2.1. Дослідження вихідних характеристик транзистора, увімкненого по схемі з спільним емітером. Для дослідження вихідних характеристик  $I_K(U_{KB})$  при різних значеннях струму бази  $I_B$  збирається схема, зображена на мал. 4.3. В даній схемі  $U_{ж2} = 15$  В, а резистор  $R_2$  беруть різних номіналів від 500 до 10 кОм. Зверніть увагу, що при великих значеннях опору резистора  $R_2$  вимірювання струму бази мікроамперметром можна замінити вимірювання напруги  $U_1$ , а струм бази вираховувати по формулі  $I_B = U_1/R_2$ . Опір резистора  $R_3$  вибрати в межах 100–200 Ом. Напруги  $U_{BE}$  та  $U_{KE}$  вимірюють одним вольтметром шляхом перемикання входу з бази на колектор і навпаки. Вихідні характеристики знімаються для  $U_{KE} < 0$  при різних струмах бази. Обов'язково дослідити вихідну



Мал. 4.3. Схема для дослідження ВАХ транзистора, увімкненого по схемі з спільним емітером

характеристику при  $I_B=0$  (базу транзистора від'єднати від схеми).  
Струм колектора змінійте в межах від 0 до 100 мА.

2.2.2. Вимірювання прямого  $\alpha$  та інверсного  $\alpha_1$  коефіцієнтів передачі струму емітера. Для вимірювання використовують схеми із попереднього завдання. Параметри  $\alpha$  та  $\alpha_1$  визначають при  $I_K=5$  мА і  $U_{KE}=5$  В. Спочатку задайте:  $I_E=0$ ,  $U_{KE}=5$  В і виміряйте зворотній струм колектора  $I_{KO}$ . Збільшуючи струм бази встановіть струм колектора 5 мА, а напругу колектор-емітер - 5 В. По формулах:

$$\beta = \frac{(I_K - I_{KO})}{I_B}, \quad \alpha = \frac{\beta}{(1 + \beta)}$$

вираховують коефіцієнт передачі струму емітера  $\alpha$ .

Інверсний режим роботи транзистора встановлюється, якщо поміняти місцями підключення колектора і емітера, залишивши попередні полярності напруг в схемі.

Увага! Виключайте живлення схеми при перемиканнях виводів транзистора.

Для знаходження  $\alpha_1$  повторіть вимірювання та обчислення по пункту 2.2.2.

## 2.3. Обробка та аналіз одержаних результатів

2.3.1. Побудувати вихідні характеристики транзистора в однокеровому масштабі.

2.3.2. Із вихідних характеристик для різних струмів колектора вирахуйте диференціальний опір колектора

$$r_k = \Delta U_{KE} / \Delta I_K \quad \text{при} \quad (\Delta I_B = 0).$$

2.3.3. Із вихідних характеристик оцініть напругу насичення  $U_{KE \text{ нас}}$  (див. Л. 2, стор. 178) та перевірте формулу:

$$U_{KE \text{ нас}} = \ln(1/\alpha_1) + I_K \text{ нас} r_k.$$

2.3.4. Користуючись програмою "Моделювання біполярного транзистора" перевірте, наскільки добре модель Молла-Еберса описує ВАХ

транзистора, який Ви досліджували. Параметри моделі  $I_{BO}$ ,  $I_{KO}$  та  $\beta_B$ ,  $\beta_K$  візьміть із попередньої роботи.

### 3. Запитання до лабораторної роботи

- 3.1. Намалюйте та поясніть вхідні характеристики транзистора, увімкненого по схемі з спільним емітером.
- 3.2. Які режими роботи транзистора Ви знаєте?
- 3.3. Намалюйте графік та поясніть розподіл концентрації дірок та електронів в базі транзистора для активного режиму.
- 3.4. Поясніть зміст параметрів  $\alpha$  та  $\alpha_1$ .
- 3.5. Що називають коефіцієнтом передачі струму емітера? Як він залежить від параметрів напівпровідникової структури?
- 3.6. Що називають ефективністю емітера?
- 3.7. Що називають моделю Молла-Еберса?
- 3.8. Запишіть формулу, яка описує вхідні характеристики транзистора в схемі з спільним емітером.
- 3.9. Поясніть процеси в транзисторі, який працює в режимі насичення.
- 3.10. Намалюйте вихідні характеристики транзистора, увімкненого по схемі з спільним емітером.
- 3.11. Що називають диференціальним опором колектора? Як цей параметр визначити із вихідних характеристик?
- 3.12. Що називають об'ємним опором колектора?
- 3.13. Як впливає товщина бази на коефіцієнт передачі струму бази?
- 3.14. Намалюйте структуру епітаксialно-планарного транзистора.

## Лабораторна робота № 5

ЗАЛЕЖНІСТЬ ПАРАМЕТРІВ БІПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА  
ВІД РЕЖИМУ РОБОТИ

**Мета роботи:** дослідження залежності коефіцієнта передачі струму бази від струму емітера та напруги колектор-емітер.

## 1. Теоретичні відомості

В попередній лабораторній роботі було показано, що для ідеального  $n-p-n$  транзистора, який працює в активному режимі струм емітера  $I_E$  складається із струму електронів  $I_{E_n} = S_E J_{E_n}$  (мал. 4.1), які інjektуються в базу, і струму дірок  $I_{E_p} = S_E J_{E_p}$ , які рухаються із бази в область емітера. Струм колектора  $I_K$  також містить дві складові: струм електронів  $I_{K_n} = S_K J_{K_n}$  і струм дірок  $I_{K_p} = S_K J_{K_p}$ . Значення вказаних струмів можуть бути визначені із співвідношень (4.15) та (4.16).

Коефіцієнт передачі струму емітера транзистора, увімкненого по схемі з спільною базою  $\alpha_0$ , який позначається в системі  $h$ -параметрів як  $h_{21B}$ , визначається наступним чином:

$$\alpha_0 = h_{21B} = \frac{\partial I_K}{\partial I_E} = \frac{\partial I_{E_n}}{\partial I_E} \frac{\partial I_{K_n}}{\partial I_{E_n}} \frac{\partial I_K}{\partial I_{K_n}}. \quad (5.1)$$

Перший із співмножників  $\partial I_{E_n} / \partial I_E$  називають ефективністю емітера  $\gamma$ , співмножник  $\partial I_{K_n} / \partial I_{E_n}$  - коефіцієнтом перенесення в базі  $\alpha$ , а множник  $\partial I_K / \partial I_{K_n}$  - коефіцієнтом помноження колектора  $M$ . Якщо напруга на переході колектор-база значно менша напруги пробивання, то  $M$  близький до 1. Тоді коефіцієнт передачі струму емітера в схемі з спільною базою  $\alpha_0 = \gamma \alpha M \approx \gamma \alpha$ .

Коефіцієнт передачі струму бази в схемі з спільним емітером  $\beta_0$ , який позначається також  $h_{21E}$ , рівний

$$\beta_0 = h_{21E} = \frac{\partial I_K}{\partial I_B}. \quad (5.2)$$

Коефіцієнти  $\alpha_o$  і  $\beta_o$  є основними фізичними параметрами транзистора. Можна показати, що  $\beta_o = \alpha_o / (1 - \alpha_o)$ . Оскільки величина  $\alpha_o$  в біполярних транзисторах близька до 1, то  $\beta_o$  звичайно набагато більше 1. Наприклад, якщо  $\alpha_o = 0,99$ , то  $\beta_o = 99$ , а якщо  $\alpha_o = 0,998$ , то  $\beta_o = 498$ .

Із розгляду ідеалізованої теорії n-p-n транзистора випливає, що коефіцієнт передачі струму емітера  $\alpha_o$  для низького рівня інжекції може бути записаний у вигляді:

$$\alpha_o = \left[ \left( 1 + \frac{D_{pE} N_B L_n}{D_n N_E L_{pE}} \operatorname{th} \frac{W}{L_n} \right) \operatorname{ch} \left( \frac{W}{L_n} \right) \right]^{-1} \quad (5.3)$$

В біполярних транзисторах з шириною бази  $W$ , яка менше  $0,1 L_n$ ,  $\alpha_o > 0,995$  ( $\gamma$  і  $\beta$  завжди менші за 1), і коефіцієнт передачі струму бази майже повністю визначається ефективністю емітера. Тоді

$$h_{21E} = \frac{\gamma}{1 - \gamma} = \frac{D_n N_E L_{pE}}{D_{pE} N_B L_n} \operatorname{cth} \frac{W}{L_n} \approx \frac{N_E}{N_B W}, \quad (5.4)$$

де  $N_B$  і  $N_E$  - концентрації легуючої домішки в базі і в емітері відповідно. Для заданої концентрації  $N_E$  коефіцієнт передачі струму бази обернено пропорційний  $N_B$ .

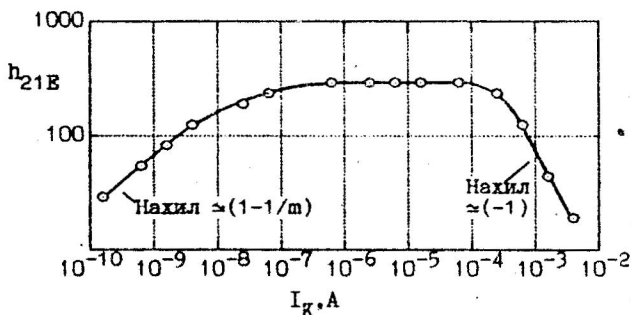
Коефіцієнти підсилення  $h_{21E}$  та  $h_{21B}$  в загальному випадку залежать від режиму роботи транзистора і в першу чергу від струму колектора  $I_K$  та напруги колектор-база (колектор-емітер). На мал. 5.2 приведена типова залежність коефіцієнта передачі струму бази від струму колектора. Така залежність обумовлена процесами генерації - рекомбінації носіїв заряду в ОПЗ переходів, оже-рекомбінацією, збільшенням ефективною ширини бази  $W$  (див. (5.4) та звуженням ширини забороненої зони.

При дуже малих струмах колектора вклад рекомбінаційно-генераційного струму в ОПЗ емітера і поверхневих струмів витоку може перевищити корисний дифузійний струм неосновних носіїв у базі, що приводить до зменшення ефективності емітера  $\gamma$ . Коефіцієнт передачі струму бази  $h_{21E}$  зростає із збільшенням струму колектора по наступному

закону:

$$h_{21E} = \frac{\partial I_K}{\partial I_B} \approx \frac{\exp(U_K/\varphi_T)}{\exp(U_K/m\varphi_T)} = \exp\left[\frac{U_K}{\varphi_T} \left(1 - \frac{1}{m}\right)\right] \approx [I_K]^{1-1/m}.$$

При прямому зміщенні емітерного р-п переходу, коли основну роль відіграють рекомбінаційні процеси,  $m=2$ . Зменшення числа об'ємних та поверхневих рівнів уловлення веде до підвищення  $h_{21E}$  при низьких струмах колектора. Коли дифузійний струм інжекттованих електронів  $I_{Eн}$



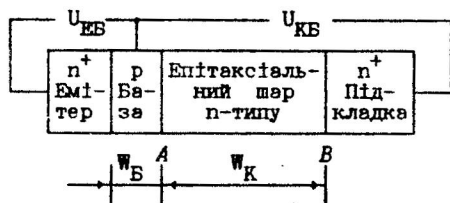
Мал. 5.1. Залежність коефіцієнта передачі струму бази від струму колектора

значно перевищує струм рекомбінації  $I_{RG} = I_{RO} [\exp(U_K/2\varphi_T) - 1]$ , то  $h_{21E}$  досягає максимальних значень. Із збільшенням колекторного струму густина неосновних носіїв, інжекттованих у базу, наближається до значення густини основних носіїв (умова високого рівня інжекції). Інжекттовані носії викликають збільшення концентрації основних носіїв, що в свою чергу приводить до зменшення ефективності емітера. Аналіз процесів, які протікають в базі, потребують сумісного розв'язку рівнянь неперервності і рівнянь для густин струмів з врахуванням як дрейфової, так і дифузійної компонент. Зменшення коефіцієнта підсилення транзистора при зростанні  $I_K$  відоме під назвою ефекту Вебстера. При високих рівнях інжекції  $h_{21E}$  змінюється обернено пропорційно  $I_K$ :



$$h_{21B} = \frac{\partial I_K}{\partial I_E} \approx \frac{\exp(U_E/2\phi_T)}{\exp(U_E/\phi_T)} = \exp\left(-\frac{U_K}{2\phi_T}\right) \approx (I_K)^{-1}.$$

Ефект оже-рекомбінації полягає у взаємному знищенні електрона і дірки, що супроводжується передачею енергії другому електрону (дірці). Такий процес, в якому приймають участь два електрони і одна дірка, можливий в сильнолегованій  $n^+$ -області емітера. При зростанні струму колектора оже-рекомбінація переважає, що викликає зменшення часу життя неосновних носіїв в емітері. Це, в свою чергу, приводить до зменшення дифузійної довжини  $L_{pE}$ , що згідно формули (5.3) знижує ефективність емітера.

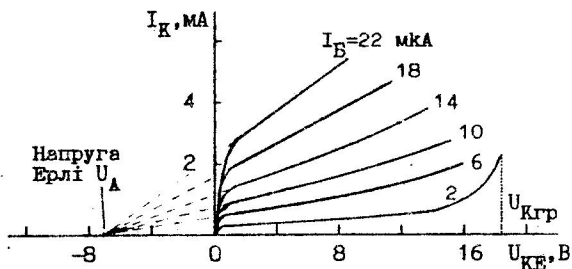


Мал. 5.2. Структура n-p-n транзистора з епітаксціальним колектором

В сучасних біполярних транзисторах із слаболегованим епітаксціальним колектором на коефіцієнт підсилення впливає переміщення, під дією великих струмів, області з високим електричним полем із точки А в точку В (мал. 5.2). В результаті цього ефективна ширина бази зростає від  $W_B$  до  $(W_B + W_K)$ . Це явище, яке одержало назву ефекта Кірка, приводить, згідно формул (5.3) і (5.4), до зменшення  $h_{21B}$ . У випадку високого рівня інжекції струми настільки великі, що в області колектора виникають великі електричні поля і класична модель транзистора вже непридатна.

Залежність коефіцієнта передачі струму бази  $h_{21E}$  від напруги колектор-емітер  $U_K$  обумовлена зміною границь ОПЗ колекторного переходу при зміні  $U_K$ . При малих густинах струмів основну роль відіграє розширення ОПЗ колектора в область бази. Із збільшенням  $U_K$  зменшується товщина квазінейтральної області бази  $W_B$  (мал. 5.2), що приводить до зростання  $h_{21E}$ . Відсутність насичення вихідних хара-

характеристик транзистора в схемі із спільним емітером якраз обумовлено значним зростанням  $h_{21E}$  при збільшенні  $U_K$ . Це явище одержало назву ефекта Ерлі. Напругу  $U_A$ , при якій перетинаються екстрапольовані



Мал. 5.3. Вихідні характеристики n-p-n транзистора, увімкненого по схемі з спільним емітером

вихідні характеристики, називають напругою Ерлі (мал. 5.3). В транзисторі з шириною бази  $W_B$  і концентрацією легуючої домішки в базі  $N_B$  напруга Ерлі рівна:

$$U_A = \frac{qN_B W_B^2}{\epsilon \epsilon_0}$$

При великих густинах струмів і малих напругах на колекторі  $U_K$  має місце зменшення коефіцієнта підсилення транзистора  $h_{21E}$  за рахунок спаду напруги на квазінейтральній області n-колектора. Найбільш чітко цей ефект проявляється у високовольтних  $n^+ - p - n^+$  транзисторах, колекторна область яких слаболегована і має велику протяжність (мал. 5.2). Спад напруги на квазінейтральній області колектора:

$$U_{KK} = \rho_K J_K W_K,$$

де  $\rho_K$  - питомий опір слаболегованої ділянки колектора;  $W_K$  - її товщина,  $J_K$  - густина струму колектора. Спад напруги на ОПЗ колектора

$$U_K = -U_{KB} + U_{KK},$$

де  $U_{KB}$  - напруга між базою і колектором на виводах транзистора. При

малих струмах колектора значення  $U_{КК}$  малі, тому при заданих значеннях  $U_{КВ}$  колекторний перехід знаходиться під зворотнім зміщенням  $U_{К} = -U_{КВ}$ . Якщо густина струму  $J_{К}$  збільшиться, то  $U_{КК}$  зросте і  $U_{К} \rightarrow 0$ , при цьому ОПЗ колектора звужується. Напруга  $U_{К}$  буде рівна нулю при густинах струмів колектора:

$$J_{Кгр} = \frac{U_{КВ}}{\rho_{К} W_{К}}$$

При  $J_{К} > J_{Кгр}$  полярність напруги на ОПЗ колектора зміниться із зворотньої на пряму ( $U_{К} > 0$ ). Це буде означати, що транзистор входить в режим насичення, а роль опору навантаження колектора, виконує колекторний шар товщиною  $W_{К}$ .

При достатньо високих значеннях зворотньої напруги  $U_{К}$  в ОПЗ колектора можливе лавинне помноження носіїв заряду. В цьому випадку коефіцієнт передачі струму бази буде рівний:

$$\beta_{М} = \beta_{0М} = \frac{\beta_0}{1 - (U_{К}/U_{Кгр})^n}$$

При деякому значенні напруги  $U_{К} = U_{Кгр}$  значення  $\beta_{М} \rightarrow \infty$  і струм колектора різко зростає (мал. 5.3).

## 2. Порядок виконання роботи

### 2.1. Підготовка до роботи.

Користуючись рекомендованою літературою вивчити як впливають процеси рекомбінації та генерації носіїв заряду в емітерному та колекторному переходах на основі параметри біполярного транзистора. Намалювати схеми для вимірювання коефіцієнту передачі струму бази.

### 2.2. Проведення досліджень

2.2.1. Дослідження залежності коефіцієнту передачі струму бази  $\beta$  від струму колектора. Для досліджень залежності  $\beta(I_{К})$  викорис-

товується схема мал. 4.3. Вимірювання проводяться згідно пункту 2.2.2 лабораторної роботи № 4. Струм колектора  $I_K$  змінювати в межах від 0 до 100 мА, використовуючи резистори  $R_2$  різних номіналів (від 10 МОм до 10 кОм) та шляхом зміни напруги  $U_1$ . Встановіть напругу  $U_{KE}=7$  В і підтримуйте її сталою при всіх вимірюваннях, а струм бази при  $R_2 > 10$  кОм вираховуйте по формулі  $I_E = U_1 / R_2$ .

2.2.2. Дослідження залежності коефіцієнта передачі струму бази від напруги колектор-емітер. Для вимірювання використовують схему із попереднього завдання. Дослідження залежності  $\beta(U_{KE})$  провести при  $I_K = 5$  мА. Змінюючи струм бази і напругу  $U_{KE}$  підтримуйте сталим  $I_K$ .

### 2.3. Обробка та аналіз одержаних результатів

2.3.1. Побудувати графік залежності  $\beta(I_K)$ .

2.3.2. Побудувати графік залежності  $\beta(U_{KE})$ .

2.3.4. Порівняти одержані результати з теоретичними та зробити висновки.

### 3. Запитання до лабораторної роботи

3.1. Що таке одномірня теоретична модель транзистора?

3.2. Як впливають процеси рекомбінації носіїв заряду в емітерному переході на параметри транзистора  $\alpha$  і  $\beta$ ?

3.3. Намалюйте графік та поясніть залежність коефіцієнту передачі струму емітера від струму емітера.

3.4. Як впливають процеси генерації носіїв заряду в переходах транзистора на його параметри?

3.5. Яке явище називається ефектом Ерлі?

3.6. Яку напругу називають напругою Ерлі?

3.7. Поясніть механізм пробивання колекторного переходу?

3.8. Запишіть формулу для бар'єрної ємності р-п переходу.

3.9. Поясніть процеси в транзисторі, який працює в режимі насичення?

3.10. Намалуйте вихідні характеристики транзистора, увімкненого по схемі із спільним емітером.

3.11. Що називають диференціальним та статичним коефіцієнтом передачі струму емітера? Напишіть зв'язок між ними.

3.12. Що називають  $h$ -параметрами транзистора?

3.13. Як впливає товщина бази на коефіцієнт передачі струму бази?

3.14. Як впливає високий рівень інжекції на коефіцієнт передачі струму емітера?

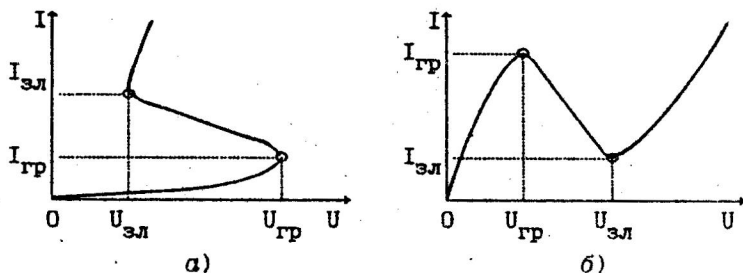
## Лабораторна робота № 6

## ДОСЛІДЖЕННЯ СТАТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПРИБАДІВ З ВІД'ЄМНИМ ОПОРОМ

**Мета роботи:** дослідження вольт-амперних характеристик тунельного діода та діодного тиристора, визначення їх основних параметрів та побудова статичної моделі тунельного діода.

## 1. Теоретичні відомості

Напівпровідниковими приладами з від'ємним опором називають прилади, на вольт-амперній характеристиці яких є ділянка з від'ємним диференціальним опором  $R_D = dU/dI$ . По вигляду ВАХ ці прилади поділяють на прилади з характеристикою S- і N-типу (мал. 6.1). На характеристиках S-типу (мал. 6.1а) ділянка з від'ємним диференціальним опором знаходиться між значеннями струмів  $I_{зл} > I > I_{гр}$ , а на характеристиках N-типу (мал. 6.1б) – між значеннями напруг  $U_{зл} > U > U_{гр}$ . На цих ділянках при зростанні напруги струм зменшується, тобто додатньому приросту напруги  $dU$  відповідає від'ємний приріст струму  $dI$  і



Мал. 6.1. Вольт-амперні характеристики S-типу (а) і N-типу (б)

$R_D = dU/dI < 0$ . Слід відмітити, що мова іде про відношення приросту напруги до відповідного приросту струму, тому що для будь-якої точки ВАХ

статичний опір  $R_c = U/I$  завжди додатній.

На вольт-амперних характеристиках S-типу кожному значенню струму відповідає одне значення напруги. Тоді як одному значенню напруги може відповідати до трьох різних значень струму. Відповідно кожному точці на ВАХ N-типу можна однозначно визначити лише значенням напруги.

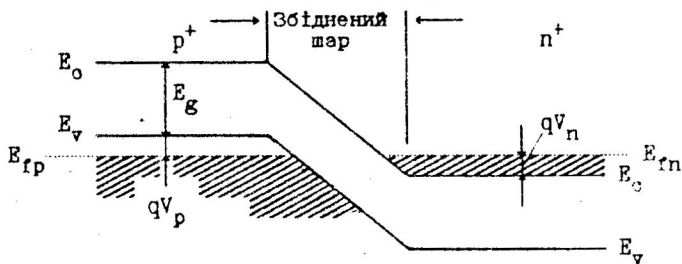
Поняття від'ємного диференціального опору широко використовується у радіоелектроніці. Цим поняттям описуються процеси, які в автоколивальних системах відносять за постачання енергії для компенсації втрат на тертя. Наприклад типовий генератор незатухаючих електричних коливань містить активний елемент (транзистор, або інший напівпровідниковий прилад), коливальний контур і коло оберненого додатнього зв'язку між виходом і входом. Коливальні процеси в такому генераторі моделюються диференціальними рівняннями в яких від'ємним опором моделюються властивості активного елементу разом із колом оберненого зв'язку. В напівпровідникових приладах від'ємний опір теж обумовлений наявністю оберненого зв'язку між входом і виходом, лише ці явища обумовлюють процеси, які протікають в середині напівпровідникової структури.

### 1.1. Тунельний діод

Тунельний діод - це напівпровідниковий прилад на основі виродженого напівпровідника, в якому тунельний ефект приводить до появи на вольт-амперній характеристиці ділянки з від'ємним диференціальним опором.

Тунельний діод характеризується порівняно малим питомим опором р- і n-областей і малою товщиною р-n переходу. Він представляє собою простий р-n перехід, обидві сторони якого вироджені (тобто сильно леговані). На мал. 6.2 приведена енергетична діаграма тунельного діода, який знаходиться в стані термодинамічної рівноваги. В резуль-

таті сильного легування рівень Фермі розміщується в гібридній валентній зоні р-області і в гібридній зоні провідності п-області. Як видно з мал. 6.2, верхня частина валентної зони р-області і нижня



Мал. 6.2. Енергетична діаграма тунельного діода в стані термодинамічної рівноваги.  $V_p$  і  $V_n$  - ступені виродження р-області і п-області відповідно

частина зони провідності в п-області взаємно перекриваються і розділяються вузьким (біля  $100 \text{ \AA}$ ) збідненим шаром. Така особливість діаграми енергетичних зон дозволяє носіям заряду переходити із однієї області в іншу не долаючи потенціальний бар'єр, і обумовлює ВАХ тунельного діода N-типу.

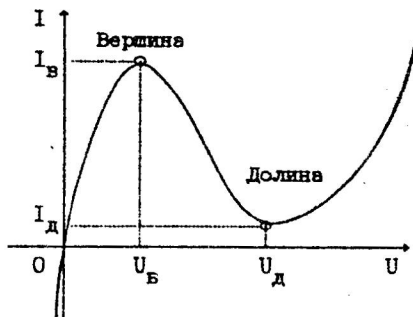
На мал. 6.3 приведена типова статична вольт-амперна характеристика тунельного діода, із якої видно, що струм у зворотньому напрямку (потенціал р-області від'ємний по відношенню до потенціала п-області) монотонно збільшується. В прямому напрямку струм спочатку зростає до максимального значення  $I_B$  при напрузі  $U_B$ , а подім спадає до мінімальної величини  $I_D$  при напрузі  $U_D$ . При напругах, які перевищують  $U_D$ , струм зростає по еспоненціальному закону із зростанням напруги на р-п переході.

В рівноважному стані вище рівня Фермі всі дозволені рівні енергії по обидві сторони р-п переходу є вільними, а нижче рівня Фермі всі дозволені рівні енергії по обидві сторони р-п переходу заповнені



ні електронами і тунельний струм не протікає.

Якщо на р-п перехід подати напругу, то електрони можуть тунелю-



Мал. 6.3. Типова вольт-амперна характеристика тунельного діода

вати із валентної зони в зону провідності або навпаки. Для протікання тунельного струму необхідним є виконання наступних умов: 1) енергетичні стани на тій стороні переходу, звідки тунелюють електрони, повинні бути заповнені; 2) на другій стороні переходу енергетичні стани з тою ж самою енергією повинні бути вільними; 3) висота і ширина потенціального бар'єру повинні бути малими, щоб існувала скінченна ймовірність тунелювання.

При прикладанні до діода зворотної напруги, перекриття зон збільшиться, а число електронів, які переходять із р-області в п-область зросте. Результуючий струм буде протікати в напрямку від п-області до р-області. Цей зворотній струм різко зростає із збільшенням зворотної напруги, оскільки густина електронів в глибокій валентній зоні велика, і незначне перекриття зон супроводжується суттєвою зміною струму через перехід.

Якщо до переходу прикладена невелика пряма напруга, то перекриття зон зменшиться. Електрони із валентної зони р-області вже не можуть тунелювати в зону провідності п-області. Тунелюють лише електрони із п-області в р-область. По мірі збільшення прямої напруги струм буде зростати. Він зростатиме до того часу (вершина на ВАХ мал. 6.3), поки рівень Фермі п-області не співпаде з стелею валентної зони р-області.

При зростанні прямої напруги перекриття зон буде зменшуватися.

Число електронів, які переходять із зони провідності  $n$ -області в валентну зону  $p$ -області теж зменшуватиметься і прямий струм тунельного діода починає спадати. На ВАХ появляється ділянка з від'ємним диференціальним опором. При напрузі  $U_d$  тунельний ефект зникає. Це відповідає мінімуму на вольт-амперній характеристиці. Ділянка прямої вітки ВАХ при напругах більших за  $U_d$  відповідає дифузії носіїв заряду через перехід (висота потенціального бар'єру знижується і починуть проявлятися інжекційні процеси). На цій ділянці струм тунельного діода експоненціально збільшується з ростом прямої напруги. Однак пряма напруга, при якій появляється ця ділянка на ВАХ, значно більша, ніж у звичайних діодів.

Вигляд статичної вольт-амперної характеристики тунельного діода визначається трьома складовими струму: тунельним, дифузійним і надлишковим. В ідеальному тунельному діоді тунельний струм зменшується до нуля коли значення прямої напруги стає рівне або більше за величину  $U_T = V_n + V_p$  (див. мал. 6.2). Проте на практиці струм через тунельний діод значно більший струму інжекції при  $U > U_d$ . Основна причина надлишкового струму - тунелювання носіїв через енергетичні рівні, які розташовані в забороненій зоні.

Статична вольт-амперна характеристика тунельного діода може бути записана у вигляді:

$$I = I_n \left[ \frac{U}{U_B} \right] \exp \left[ 1 - \frac{U}{U_B} \right] + I_d \exp [A(U - U_d)] + I_o \exp \left[ \frac{U}{\phi_T} \right]. \quad (6.1)$$

Вклад тунельного струму суттєвий при  $U < U_d$ , надлишковий струм слід враховувати при  $U = U_d$ , а дифузійний струм переважає при  $U > U_d$ .

Температура по-різному впливає на тунельну та інжекційну складові струму. З підвищенням температури тунельна складова струму зростає за рахунок зменшення ширини забороненої зони. Крім того, при підвищенні температури змінюється розподіл електронів по енергетичних рівнях - кількість електронів під рівнем Фермі в зоні провідно-

сті,  $n$ -області зменшується. Тому зменшується і число електронів, які можуть тунелювати із  $n$ -області в  $p$ -область, що приводить до зменшення тунельної складової прямого струму.

Інжекційна складова струму зростає при підвищенні температури за рахунок зменшення висоти потенціального бар'єру та перерозподілу носіїв заряду по енергетичних рівнях, що веде до зростання струму долини при підвищенні температури.

Тунельні діоди характеризуються такими параметрами:

- струм вершини  $I_B$  - прямий струм в точці максимуму ВАХ, коли  $dI/dU=0$ ;

- струм долини  $I_D$  - прямий струм в точці мінімуму ВАХ, при якому значення  $dI/dU=0$ ;

- відношення струмів  $I_B/I_D$ . Для тунельних діодів із GaAs  $I_B/I_D = 12$ , а для Ge діодів  $I_B/I_D = 8$ ;

- напруга вершини  $U_B$  - пряма напруга, яка відповідає значенню струму  $I_B$ . Напруга  $U_B$  рівна 100-150 мВ для GaAs діодів і 40-60 мВ для германієвих;

- напруга долини  $U_D$  - пряма напруга, яка відповідає значенню струму  $I_D$ . Напруга  $U_D$  у тунельних діодів із GaAs рівна 400-500 мВ, і 250-350 мВ у германієвих;

- напруга розхилу  $U_p$  - пряма напруга, яка більша напруги впадіння, і при якій струм рівний значенню  $I_B$ ;

- питома ємність тунельного діода  $C_D/I_B$  - відношення ємності тунельного діода до значення струму вершини;

- гранична резистивна частота  $f_R$  - розрахункова частота, на якій активна складова повного опору  $p$ - $n$  переходу, перетворюється в нуль:

$$f_R = \frac{1}{2\pi R_D C_D};$$

- резонансна частота  $f_0$  - розрахункова частота, на якій зага-

льний реактивний опір тунельного діода перетворюється в нуль:

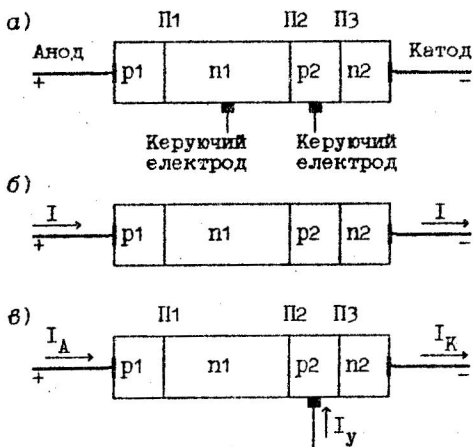
$$f_0 = \frac{1}{2\pi R_D C_0} \sqrt{\frac{R_D^2 C_0}{L} - 1},$$

де  $L$  - індуктивність виводів діода;  $C_0$  - бар'єрна ємність р-п переходу.

## 1.2 Тиристори

Тиристорами називають напівпровідникові прилади, які мають вольт-амперні характеристики S-типу і можуть знаходитись у двох стійких станах. В одному стані тиристор має великий опір (закритий стан), а в другому - малий опір (відкритий стан). Принцип дії тиристора ґрунтується на принципі дії біполярного транзистора, в якому електропровідність обумовлена носіями обох знаків.

Основна схема тиристорної структури показана на мал. 6.4. Вона



Мал. 6.4. Структура тиристора

а - основна чотиришарувата п-р-п-р-структура; б - діодний тиристор; в - тріодний тиристор.

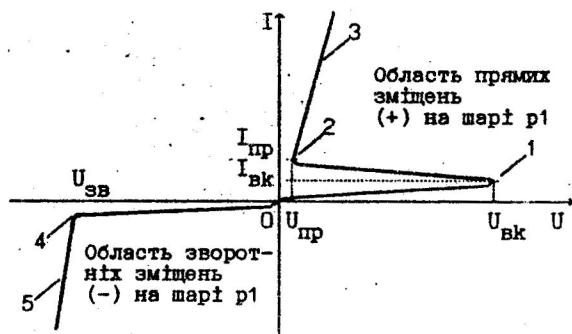
представляє собою три взаємодіючі між собою р-п переходи П1, П2 і П3. Контакт з зовнішнім р-шаром називають *анодом*, а контакт з зовнішнім п-шаром - *катодом*. В загальному випадку р-п-р-п-структура може мати два керуючі електроди, які приєднуються до внутрішніх р- і п-шарів. Прилад без керуючих електродів (мал. 6.4б) називають *дiodним* тиристором, або *диодним* тиристором. Прилад з одним керуючим електродом (мал.6.4в)

називають *триодним* тиристором, або просто тиристором.

По аналогії з транзисторами крайні р-п переходи називають *емітерними*, а середній - *колекторним* (відповідно області р1 і п2 називаються емітерами, а області п1 і р2 - базами).

Особливістю чотиришаруватих р-п-р-п-структур є наявність в них лавиноподібних процесів, які обумовлені внутрішнім додатнім зворотнім зв'язком. Цей зв'язок являється наслідком залежності параметрів структури від величини струму, який протікає через неї.

Вольт-амперна характеристика тиристора (з керуючим електродом або без нього) приведена на мал. 6.5. На характеристиці можна виділити різні ділянки. Ділянка характеристики між точками 0 і 1 відповідає закритому стану з великим опором. Пряме перемикання (або вмикання) тиристора відбувається коли  $dU/dI=0$  (цьому стану відповідають напруга  $U_{вк}$  та струм  $I_{вк}$ ). Між точками 1 і 2 знаходиться ділянка з від'ємним диференціальним опором, а ділянка між точками 2 і 3 відповідає відкритому стану (прямій провідності). В точці 2, в який теж  $dU/dI=0$ , через прилад протікає мінімальний утримувачий струм  $I_{пр}$ .



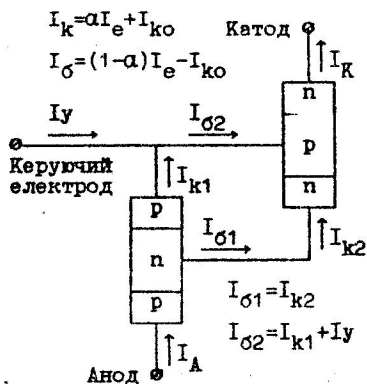
Мал. 6.5. Вольт-амперна характеристика тиристора

Ділянка між точками 0 і 4 описує режим зворотнього зміщення приладу, а ділянка між точками 4 і 5 - режим зворотнього пробивання. В обла-

сті прямих зміщень тиристор представляє собою бістабільний прилад, який здатний перемикатися із стану з великим опором і малим струмом у стан з низьким опором і великим струмом і навпаки. В кожному із вказаних станів прилад може знаходитися як завгодно довго.

В режимі зворотнього зміщення напруга на аноді від'ємна по відношенню до катоду; переходи П1 і П3 зміщенні в зворотньому напрямку, а перехід П2 - в прямому (мал.6.4а). Більша частина прикладеної напруги падає на перехід П1 (концентрація легуючої домішки в області п1 найменша). В залежності від товщини області п1 пробивання обумовлене лавинним помноженням носіїв, або проколом (збіднений шар поширюється на всю область п1 і відбувається перекриття ОПЗ переходів П1 і П2).

При прямому зміщенні напруга на аноді додатня по відношенню до катоду; переходи П1 і П3 зміщенні в прямому напрямку, а перехід П2 - в зворотньому. Для пояснення властивостей тиристора в області прямих зміщень використовується двотранзисторна модель. Із мал. 6.6 видно, що тиристор можна представити як з'єднання р-п-р транзистора



Мал. 6.6. Двотранзисторна модель триодного тиристора

з п-р-п транзистором, причому колектор кожного із них з'єднаний з базою другого. Центральний перехід працює як колектор дірок, які інjektуються переходом П1, і електронів, які інjektуються переходом П3. Взаємозв'язок між струмами емітера  $I_e$ , колектора  $I_k$  і бази  $I_g$  транзисторів приведено на мал. 6.6, де  $\alpha$  - статичний коефіцієнт передачі струму емітера,  $I_{k0}$  - зворотній струм колектора. Як видно із малюнка колекторний струм транзистора р-п-р одно-

часно є базовим струмом п-р-п транзистора, тобто  $I_{k1} = I_{o2}$  (якщо струм управління  $I_y = 0$ ). Одночасно колекторний струм транзистора п-р-п являється базовим струмом транзистора р-п-р, тобто  $I_{k2} = I_{o1}$ .

Струм бази р-п-р транзистора рівний

$$I_{o1} = (1 - \alpha_1)I_A - I_{ko1}. \quad (6.2)$$

Струм колектора п-р-п транзистора рівний

$$I_{k2} = \alpha_2 I_K + I_{ko2}. \quad (6.3)$$

Прирівнявши  $I_{o1}$  і  $I_{k2}$  та враховувачи, що  $I_K = I_A + I_y$ , одержимо:

хх

$$I_A = \frac{\alpha_2 I_y + I_{ko1} + I_{ko2}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)}. \quad (6.4)$$

Рівнянн (6.4) описує статичну характеристику тиристора (або диністора, коли  $I_y=0$ ) в діапазоні напруг до  $U_{BK}$ . Ділянка 0-1 характеристики (мал. 6.5) відповідає виключеному станові тиристора. На більшій частині цієї ділянки струми емітерів малі і справедлива нерівність  $\alpha_1 + \alpha_2 \ll 1$ . Через тиристор протікає струм витoku  $I_{вит}$ , який мало відрізняється від зворотнього струму р-п переходу. По мірі збільшення напруги зростають струми емітерів та зворотній струм колекторного переходу. В кінці початкової ділянки струм через тиристор різко зростає за рахунок збільшення коефіцієнтів передачі  $\alpha_1$  і  $\alpha_2$  і лавинного помноження носіїв в переході ПЗ. Початкова ділянка закінчується точкою 1, де диференційний опір тиристора  $r_d=0$ . Точки 1 відповідають напруга і струм, які називають напругою перемикання  $U_{BK}$  та струмом перемикання  $I_{BK}$ . Перемикання тиристора можливе за умови  $(\alpha_1 + \alpha_2) = 1$ .

Зростання струму тиристора на ділянці 1-2 супроводжується зменшенням напруги на ньому, це означає, що диференціальний опір на цій ділянці від'ємний  $r_d < 0$ . Ділянка 2-3 відповідає відкритому стану тиристора, на якій зростання струму майже не впливає на спад напруги на ньому. Незначне збільшення спаду напруги обумовлено

об'ємним опором області  $\pi_1$ . Співвідношення (6.4) на цій ділянці не дійсне. Для того, щоб підтримувати прилад у відкритому стані, через нього необхідно пропускати струм, який повинен бути більшим за струм виключення  $I_{\text{пр}}$ . Точку 2 називають точкою виключення.

Отже, тиристор може знаходитись у двох стійких станах (при  $r_d > 0$ ). Перший стан характеризується малим струмом, який протікає через прилад, і великим спадом напруги на ньому (ділянка 0-1). В другому стані на приладі існує малий спад напруги і через нього протікає великий струм (ділянка 2-3). Ділянка 1-2 відповідає не стійкому положенню робочої точки.

Основними електричними параметрами тиристора являються:

- напруга перемикавання  $U_{\text{вк}}$  - напруга, при якій струм через прилад починає різко зростати;

- струм витоку  $I_{\text{вит}}$  - прямий струм, який відповідає максимально допустимій прямій напрузі -  $U_{\text{пр.макс}}$ ;

- струм виключення  $I_{\text{пр}}$  - мінімальний прямий струм через тиристор у відкритому стані;

- залишкова напруга  $U_{\text{зл}}$  - пряма напруга, яка відповідає протіканню максимально допустимого прямого струму  $I_{\text{пр.макс}}$ ;

- зворотній струм витоку  $I_{\text{зв}}$  - зворотній струм, що відповідає максимально допустимій зворотній напрузі  $U_{\text{зв}}$ ;

- максимально допустима розсіювана потужність  $P_{\text{мах}}$ .

Перемикаючі властивості тиристора характеризують часом вмикання  $\tau_{\text{вкл}}$  - інтервалом часу, на протязі якого напруга на приладі зменшиться до  $2U_{\text{зл}}$  з моменту подачі пускового імпульсу, та часом вимикання  $\tau_{\text{вим}}$  - мінімальний час, протягом якого прилад переводиться із відкритого стану в закритий після подачі зворотної напруги. Час  $\tau_{\text{вим}}$  значно більший часу  $\tau_{\text{вкл}}$ .



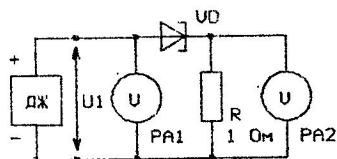
## 2. Порядок виконання роботи

### 2.1. Підготовка до роботи

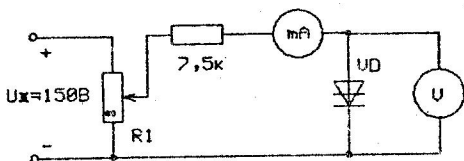
Користуючись рекомендованою літературою вивчити принцип дії тунельного діода, діодного та тріодного тиристорів, ознайомитися з їх основними параметрами. Намалювати схеми для дослідження ВАХ тунельного діода та тиристора.

### 2.2. Проведення досліджень

2.2.1. Для дослідження вольт-амперної характеристики тунельного діода при кімнатній температурі збирати схему, яка зображена на мал. 6.7. Дослідження вольт-амперних характеристик приладів, які містять ділянку з від'ємним диференціальним опором ( $dU/dI < 0$ ), має певні особливості. Наявність ділянки з  $dU/dI < 0$  на статичній ВАХ N-типу обумовлює можливість роботи діода в режимі генерації електричних коливань. Як правило, ВАХ тунельного діода досліджується шляхом зміни величини напруги  $U_1$  в межах від 0 до 1 В, злишаючи незмінним опір



Мал. 6.7. Схема для дослідження ВАХ тунельних діодів



Мал. 6.8. Схема для дослідження ВАХ діодних тиристорів

обмежувального резистора  $R$ . Щоб запобігти збудженню коливань у вимірювальній схемі потрібно задовільнити умову:  $R_{\Sigma} < R_{д.мін}$ , де  $R_{\Sigma}$  - сумарний опір вимірювальної схеми, який рівний сумі опорів з'єднувальних провідників і резистора  $R$  та внутрішнього опору джерела живлення;  $R_{д.мін}$  - мінімальне значення від'ємного диференці-

ального опору.

Струм через діод і та напругу на діоді  $U$  вираховують по формулах:  $I = U_R/R$ ;  $U = U_1 - U_R$ , де  $U_R$  - спад напруги на резисторі  $R$ , яка вимірюється вольтметром PA2.

Досліджуючи пряму вітку ВАХ тунельного діода обов'язково виміряйте параметри:

- струм вершини  $I_B$  і напругу вершини  $U_B$  - в точці максимуму ВАХ, для якої  $dU/dI = 0$ ;
- струм долини  $I_D$  і напругу долини  $U_D$  - в точці мінімуму ВАХ, для якої  $dU/dI = 0$ ;
- напругу розхилу  $U_p$  - пряму напругу, яка більша за  $U_D$ , при якій струм рівний  $I_B$ .

2.2.2. Дослідження ВАХ діодного тиристора. Для дослідження прямих і зворотніх віток ВАХ збирають схему мал. 6.8. При дослідженні прямих віток в режимі збільшення напруги на тиристорі визначають:

- напругу перемикання  $U_{BK}$  та струм перемикання  $I_{BK}$  - напругу і струм для закритого стану в точці, для якої  $dU/dI=0$ ;
- напругу на тиристорі  $U_{TP}$  для заданого прямого струму  $I_{TP}$  при відкритому стані.

В режимі зменшення напруги на тиристорі визначають  $I_{TP}$  - мінімальний струм через тиристор, при якому він знаходиться у відкритому стані.

### 2.3. Обробка та аналіз одержаних ВАХ

2.3.1. Побудувати прямі та зворотні вітки ВАХ тунельного діода і тиристора у звичайному масштабах.

2.3.2. Визначити із прямої витки ВАХ для тунельного діода відношення  $I_B/I_D$ .

2.3.3. Визначити із зворотної вітки ВАХ тиристора  $U_{ЗВ}$ .

2.3.4. Користувачись програмою "Моделювання тунельного діода".

визначити параметри моделі тунельного діода. Вольт-амперна характеристика діода апроксимується сумою тунельного і дифузійного струмів через р-п перехід (див. формулу (6.1)):

$$I = I_B \left[ \frac{U}{U_B} \right] \exp \left[ 1 - \frac{U}{U_B} \right] + I_0 \exp \left[ \frac{U}{\phi_T} \right].$$

2.3.5. Порівняти одержані експериментальні результати з теоретичними і зробити висновки.

### 3. Запитання до лабораторної роботи

3.1. Що називають тунельним пробиванням р-п переходу?

3.2. Намалюйте пряму вітку ВАХ тунельного діода.

3.3. Опишіть процес руху носіїв заряду через р-п перехід в тунельному діоді при відсутності зовнішньої напруги на ньому.

3.4. Опишіть процеси руху носіїв заряду через р-п перехід в тунельному діоді при прикладанні зовнішньої напруги до нього.

3.5. Назвіть та поясніть основні параметри тунельних діодів.

3.6. З яких матеріалів виготовляються р-п переходи тунельних діодів?

3.7. Намалюйте структуру та поясніть принцип роботи тиристора.

3.8. Яким способом можна перевести тиристор із відкритого стану в закритий?

3.9. Намалюйте ВАХ тріодного тиристора.

3.10. Поясніть структуру та принцип дії симетричного тиристора.

3.11. Що називають і як реалізується "шунтування" емітера в тиристорній структурі?

## Лабораторна робота № 7

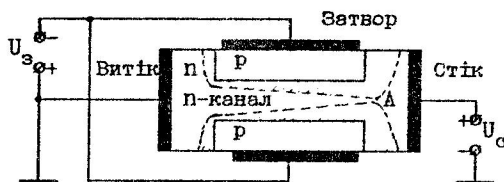
ДОСЛІДЖЕННЯ СТАТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛЬОВИХ  
ТРАНЗИСТОРІВ З p-n ПЕРЕХОДОМ

**Мета роботи:** ознайомлення з схемами вмикання та дослідження вольт-амперних характеристик польових транзисторів з затвором на основі p-n переходу; ознайомлення з основними параметрами польових транзисторів та їх використанням.

## I. Теоретичні відомості

## 1.1. Структура та принцип роботи польового транзистора

Польовий транзистор з затвором на основі p-n переходу має два омичних контакти – стік і витік до області напівпровідника, по якій протікає потік основних носіїв заряду, інтенсивність якого може змінюватися, і один або два p-n переходи, увімкнені у зворотньому напрямку (мал. 7.1). При зміні величини зворотної напруги на p-n переході змінюється його товщина  $i$ , відповідно, товщина області, по якій протікає потік основних носіїв заряду. Область напівпровідника, в якій регулюється потік основних носіїв заряду, називають *каналом*.



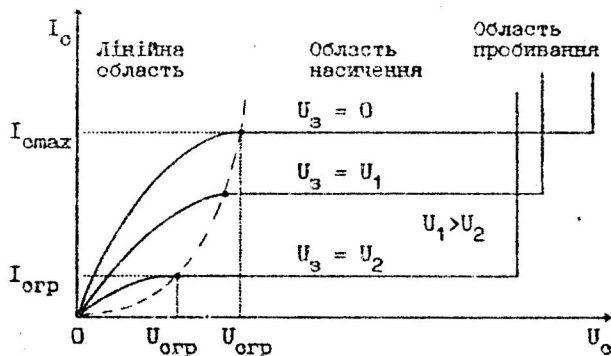
Мал. 7.1. Структура польового транзистора з затвором на основі p-n переходу

Контакт, через який в канал поступають носії заряду, називають *витіком*. Контакт польового транзистора який збирає носії заряду, що пройшли через канал, називають *стоком*. Електричний

контакт польового транзистора, на який подають напругу, щоб змінювати величину потоку основних носіїв заряду, називають *затвором*. Канал транзистора може мати електропровідність як n- так і p-типу.

Відповідно розрізняють польові транзистори з n-каналом і р-каналом. Полярності напруг на мал. 7.1 відповідають n-канальному транзистору.

При фіксованій напрузі на затворі ( $U_{зв} = 0$ , або  $U_{зв} < 0$ ) р-п переходи будуть знаходитися під зворотньою напругою і струм через канал  $I_c$  буде збільшуватися по мірі зростання напруги на стокові  $U_c$ . Типові вольт-амперні характеристики польового транзистора з р-п переходом приведені на мал. 7.2. На цих характеристиках розрізняють



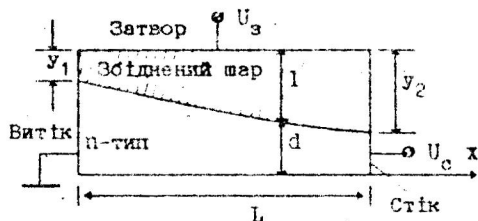
Мал. 7.2. Вольт-амперна характеристика польового транзистора з затвором на основі р-п переходу

три області: лінійну (при малих напругах на стокові), коли струм стоку  $I_c$  пропорціональний напрузі  $U_c$ ; область насичення, де  $I_c = I_{cгр}$  і незалежить від напруги стоку; область пробивання, де струм стоку різко наростає при незначному збільшенні напруги  $U_c$ . При збільшенні від'ємної напруги на затворі  $U_з$  струм насичення  $I_{cгр}$  і напруга, яка відповідає початку насичення  $U_{cгр}$ , зменшуються. Це обумовлено зменшення товщини каналу  $d$ , що в свою чергу приводить до зростання опору каналу транзистора.

## 1.2. ВАХ польового транзистора з р-п переходом

Проведемо аналіз вольт-амперних характеристик польового транзис-

тора з довгим каналом ( $L \gg a$ , де  $a$  - ширина каналу) з р-п переходом при слідуючих допущеннях: канал рівномірно легований, р-п перехід



Мал. 7.3. Поперечний переріз верхньої половини транзистора ( $y_1$  і  $y_2$  - товщина збідненого шару біля витоків і стоку)

різкий і рухливість носіїв заряду не залежить від напруженності електричного поля. Враховуючи симетрію приладу (див. мал. 7.1), розглянемо лише верхню половину польового транзистора (мал. 7.3).

Якщо напруга  $U_с = 0$  то товщина каналу залежить

від напруги  $U_з$  згідно співвідношення:

$$d = d_0 - 1(U_з) = d_0 - \sqrt{2\epsilon_0\epsilon_r U_з / qN} . \quad (7.1)$$

де  $d_0$  - максимально можлива товщина каналу при  $U_з = 0$ . При деякому значенні напруги  $U_з$  ОПЗ займе весь канал ( $y_2 = d_0$ ) - відбудеться перекриття каналу. Напруга перекриття каналу:

$$U_{пр} = (qN/2\epsilon_0\epsilon_r)d_0^2 . \quad (7.2)$$

Отже, загальна товщина накалу залежить від напруги  $U_з$ :

$$d = d_0 (1 - \sqrt{U_з / U_{пр}}) . \quad (7.3)$$

Якщо напруга  $U_с \neq 0$ , то товщина каналу буде залежати як від  $U_з$  так і від  $U_с$  (див. мал. 7.3):

$$d(x) = d_0 \left[ 1 - \sqrt{\frac{U_з + U(x)}{U_{пр}}} \right] . \quad (7.4)$$

При збільшенні  $U_с$  товщина каналу поблизу стока почне зменшуватися, і при досягненні граничного значення

$$U_{сгр} = U_{пр} - U_з .$$

канал, в точці  $x=L$  перекриється областю просторового заряду. По мірі

збільшення напруги  $U_c > U_{cгр}$  ОПЗ заповнює канал по його довжині в бік витоку. Потенціал в точці А (мал. 7.1) є майже незмінним і рівний  $U_{cгр}$ . Це означає, що струм стоку залишається незмінним при зміні  $U_c$ :

$$I_{cгр} = U_{cгр} / \Gamma_{кан} \quad (7.5)$$

Незначне збільшення струму пояснюється зменшенням довжини каналу  $L$  і, відповідно, зменшенням опору каналу. Отже, при  $U_c > U_{cгр}$  в області насичення польовий транзистор по відношенню до зовнішнього кола є генератором струму  $I_{cгр}$  і має великий вихідний опір. При напрузі  $U_3 = 0$  струм стоку максимальний і рівний  $I_{омах}$ .

Струм в каналі транзистора однаковий для будь-якої точки  $x$ :

$$I_c = \frac{dU(x)}{(\rho/ад) \cdot dx},$$

де  $\rho$  - питомий опір каналу;  $a$  - ширина каналу. Врахувавши (7.4) одержимо:

$$dU(x) = \frac{I_c \rho dx}{ад_0} \left[ 1 - \sqrt{\frac{U_3 + U(x)}{U_{пр}}} \right]^{-1}.$$

Розв'язок цього диференціального рівняння з граничними умовами:

$$U(0) = 0; U(L) = U_c,$$

має вигляд:

$$I_c = \left( \frac{\rho L}{ад_0} \right)^{-1} \left[ U_c - \frac{2}{3} \frac{(U_3 + U_c)^{3/2} - (U_3)^{3/2}}{(U_{пр})^{1/2}} \right] \quad (7.6)$$

Криві, побудовані по (7.6) мають максимум при  $U_c = U_{cгр} = U_{пр} - U_3$ . При  $U_c > U_{cгр}$  струм стоку змінюється слабо, тому формула (7.6) справедлива лише в лінійній області ВАХ (див. мал. 7.2).

В області насичення (активна область роботи транзистора) при  $U_c > U_{cгр}$  струм стоку залежить лише від  $U_3$ :

$$I_c = I_{cгр} = \frac{1}{3} \frac{U_{пр}}{\Gamma_{окан}} \left( 1 - \frac{U_3}{U_{пр}} \right)^2 \quad (7.7)$$

$\Gamma_{окан} = \rho L / ад_0$  - мінімальний опір каналу. Рівняння (7.7) описує пе-

редавальну характеристику польового транзистора з р-п переходом, тобто залежність  $I_o = f(U_3)$ , для активного режиму роботи. Збільшення струму  $I_o$  в області насичення вихідних ВАХ враховується за допомогою внутрішнього опору  $r_o$ . Тоді рівняння (7.7) буде мати вигляд:

$$I_c = I_{cmax} \left[ 1 - \frac{U_3}{U_{пр}} \right]^2 + \frac{U_o - U_{огр}}{r_o} \quad (7.8)$$

де  $I_{cmax} = \frac{1}{3} \frac{U_{пр}}{r_{окан}}$  - максимальний струм стоку.

В підсилювальному режимі транзистори з р-п переходом характеризуються малосигнальними параметрами - крутизною  $S$  і внутрішнім опором  $r_o$ . По визначенню -  $S = dI_o/dU_3$ , тоді згідно (7.7):

$$S = - \frac{2I_{cmax}}{U_{пр}} \left[ 1 - \frac{U_3}{U_{пр}} \right] = - \frac{2}{3} r_{окан} \left[ 1 - \frac{U_3}{U_{пр}} \right]. \quad (7.9)$$

Крутизна транзистора зменшується із зростанням напруги на затворі  $U_3$  і досягає максимального значення при  $U_3 = 0$ . Знак мінус у виразі (7.9) показує, що струм  $I_o$  зменшується при збільшенні напруги  $U_3$ .

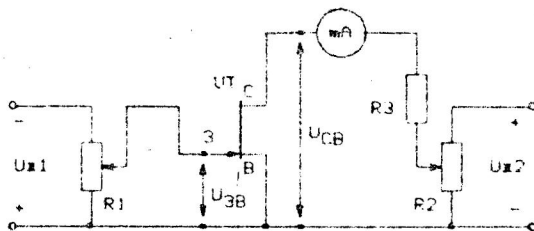
## 2. Порядок виконання роботи

Користуючись рекомендованою літературою вивчити принципи дії, позначення на електричних схемах та способи вмикання польових транзисторів з затвором на основі р-п переходу з каналами п- і р-типів. Навчитись виводити рівняння, які описують ВАХ польових транзисторів з р-п переходом. Намалювати схему для дослідження ВАХ польових транзисторів з р-п переходом.



## 2.2. Проведення досліджень

2.2.1. Дослідження передавальних характеристик польового транзистора  $I_c(U_{зв})$  з затвором на основі р-п переходу проводять при різних значеннях напруги між стоком і витком  $U_{св}$ . Для цього збирається схема, зображена на мал. 7.4. В цій схемі  $U_{ж1} = 15$  В,  $U_{ж2} = 15$  В.



Мал. 7.4. Схема для дослідження ВАХ польових транзисторів з р-п переходом і каналом n-типу.

опір резистора  $R_3$  вибирають в межах 100–500 Ом (полярності напруг джерел живлення на мал. 7.1 відповідають транзистору з каналом n-типу). Напруги  $U_{зв}$  та  $U_{св}$  вимірюються одним вольтметром шляхом перемикання входу вольтметра із затвора на стік і навпаки. Передавальні характеристики знімаються при постійних напругах між стоком і витком  $U_{св} = 0,2; 0,5; 1; 10$  В. Струм стоку змінійте в межах від 0 до 10 мА.

При дослідженні характеристик слідкуйте за напругою на стоковій і підтримуйте задане її значення з допомогою потенціометра  $R_2$ .

2.2.2. Дослідження вихідних характеристик польового транзистора з затвором на основі р-п переходу. Вихідні характеристики  $I_c(U_{св})$  досліджуються при різних напругах на затворі, починаючи з напруги, яка більша за напругу перекриття каналу  $U_{пр}$ . Струм стоку змінійте в межах від 0 до 10 мА.

### 2.3. Обробка та аналіз одержаних результатів

2.3.1. Побудувати передавальні характеристики транзистора в однаковому масштабі.

2.3.2. Побудувати вихідні характеристики транзистора в однаковому масштабі.

2.3.3. Користуючись методикою, описаною в Л. 2 (п. 6.4.1, стор. 483) та програмою "Моделювання польового транзистора" визначити параметри моделі та перевірити узгодження експериментальних ВАХ з теоретичними.

2.3.4. Із передавальних і вихідних характеристик визначити основні параметри транзистора: напругу перекриття каналу; крутість сток-затворної характеристики, вихідний диференціальний опір  $r_o = dU_{cb} / dI_o$ .

2.3.5. Порівняти одержані експериментальні результати з теоретичними і зробити висновки.

### 3. Запитання до лабораторної роботи

3.1. Поясніть принцип роботи польового транзистора в з'єднанні на основі р-п переходу.

3.2. Поясніть принцип роботи польового транзистора з переходом метал-напівпровідник.

3.3. Намалюйте та поясніть планарну структуру польового транзистора з р-п переходом та каналом n-типу.

3.4. Яку напругу називають напругою перекриття каналу? Як її вирахувати?

3.5. Що називають напругою насичення польового транзистора?

3.6. Які різновидності польових транзисторів Ви знаєте?

3.7. Намалюйте вихідні характеристики польового транзистора з каналом р-типу. Запишіть рівняння, які описують вихідні харак-

теристики.

3.8. Що називають ефектом модуляції довжини каналу? Як це явище проявляється на ВАХ транзисторах?

3.9. Намалюйте вхідні характеристики польового транзистора.

3.10. Якими фізичними процесами обмежується діапазон частот, на яких може працювати польовий транзистор?

3.11. Як позначаються на схемах і маркуються польові транзистори?

3.12. Що називають коефіцієнтом підсилення? Як цей параметр визначити із статичних характеристик транзистора?

3.13. Чому параметри польового транзистора залежать від температури?

## Лабораторна робота № 8

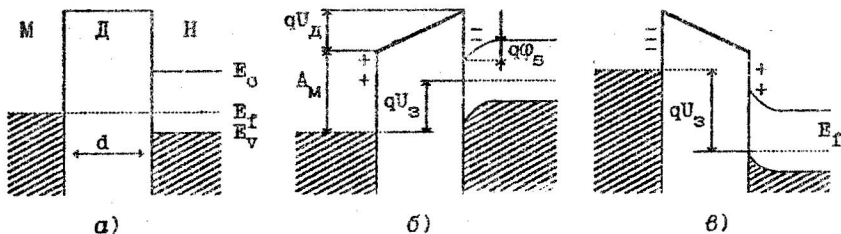
## ДОСЛІДЖЕННЯ СТАТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МДН-ТРАНЗИСТОРІВ

**Мета роботи:** ознайомлення з схемами вмикання та дослідження вольт-амперних характеристик польових транзисторів з ізолюваним затвором структури метал-діелектрик-напівпровідник; визначення основних параметрів та побудова статичної моделі МДН-транзисторів.

## 1. Теоретичні відомості

## 1.1. Ефект поля і поверхнева провідність

В польових транзисторах з ізолюваним затвором зовнішня напруга подається на металевий електрод, який ізолюований від напівпровідника шаром діелектрика. Розглянемо енергетичну діаграму структури метал (М) - діелектрик (Д) - напівпровідник (Н), яка зображена на мал. 8.1. Для спрощення приймається, що термодинамічні роботи виходу із металу і напівпровідника однакові, а контактна різниця потенціалів між ними рівна нулеві. Оскільки рівень Фермі в усіх частинах структури однаковий, то енергетична діаграма має вигляд, показаний



Мал. 8.1. Енергетична діаграма МДН-структури без зовнішньої напруги (а) та із зовнішньою напругою (б, в)

на мал. 8.1а. МДН-структуру можна розглядати як конденсатор, обкладками якого є метал і напівпровідник р-типу. Якщо на такий конден-

сатор подати зовнішню напругу  $U_3$  такої полярності, що на металі буде додатний заряд (мал. 8.1б), то на межі між напівпровідником і діелектриком появиться індукований від'ємний заряд. Від'ємний заряд виникає за рахунок витіснення дірок від поверхні у глибину напівпровідника.

В діелектрику вільні електричні заряди відсутні, тому напруженість електричного поля однакова по всій товщині  $d$  і розподіл потенціалу  $U_d$  має лінійний характер.

У напівпровіднику, при віддаленні від поверхні, концентрація нерівноважних носіїв зменшується до нуля. Такий розподіл просторового заряду приводить до виникнення в приповерхневій області електричного поля, яке направлене назустріч зовнішньому полю і екранує його. Електричне поле змінює потенціальну енергію електронів біля поверхні (в даному випадку зменшує її), що приводить до викривлення зон на величину  $q\phi_s$ , де  $\phi_s = \phi_T \ln(N_A/n_1)$  - приповерхневий потенціал. При збільшенні зовнішньої напруги викривлення зон збільшується. Рівень Фермі, положення якого не змінюється, на поверхні напівпровідника буде наближатися до дна зони провідності (мал. 8.1б), що відповідає зменшенню концентрації дірок  $i$ , як наслідок, зменшенню поверхневої провідності. При певній зовнішній напрузі  $U_3$ , яку називають пороговою  $U_{пор}$ , концентрація нерівноважних електронів біля поверхні напівпровідника  $n(0)$  стане рівною концентрації рівноважних дірок в об'ємі  $n(0) = p_{ро}$ . Поверхневий потенціал в цьому випадку рівний:

$$\phi_s = 2\phi_T \ln(N_A/n_1). \quad (8.1)$$

При збільшенні напруги  $U_3$  значення  $\phi_s$  практично не змінюється, так як зростаючий заряд електронів на поверхні напівпровідника екранує об'єм напівпровідника від дії  $U_3$ . Коли  $U_3 > U_{пор}$  знак провідності біля поверхні зміниться на протилежний і біля поверхні утвориться шар з n-типом провідності. такий стан називають інверсією поверхневої провідності.

Коли поміняти полярність зовнішньої напруги  $U_3$  на поверхні напівпровідника індукується додатний заряд (мал. 8.16), обумовлений збагаченням приповерхневої області дірками. Внаслідок збільшення концентрації дірок збільшується поверхнева провідність напівпровідника.

Таким чином в залежності від знаку і величини зовнішньої напруги  $U_3$  поверхнева провідність може зменшуватися, збільшуватися, а також змінювати знак носіїв заряду. Зміна поверхневої провідності напівпровідника, який є однією з обкладинок конденсатора, при зміні напруги на ньому називається "ефектом поля".

В режимі сильної інверсії  $n(0) = p_{po}$  ємність одиниці площі МДН-структури рівна:

$$C_3 = \epsilon_d \epsilon_o / d, \quad (8.2)$$

де  $\epsilon_d$  - діелектрична проникність діелектрика.

При відсутності вільних зарядів в діелектрику напруженість електричного поля в ньому  $E_d = (U_3 - \phi_s) / d$ , а заряд одиниці площі металевої обкладинки конденсатора:

$$Q_3 = \epsilon_d \epsilon_o E_d = \epsilon_d \epsilon_o (U_3 - \phi_s) / d = C_3 (U_3 - \phi_s) \quad (8.3)$$

Тоді від'ємний заряд електронів, індукований на межі напівпровідник-діелектрик, віднесений до одиниці площі:

$$Q_n = Q_3 - Q_{пов} - Q_{опз} = C_3 (U_3 - \phi_s) - Q_{пов} - Q_{опз}, \quad (8.4)$$

де  $Q_{пов}$  - питомий заряд приповерхневих станів;  $Q_{опз} = q N_A l_o$  - заряд іонів акцепторів;  $l_o = \sqrt{2 \epsilon_d \epsilon_o \phi_s / q N_A}$  - товщина області ОПЗ.

З (8.4) можна оцінити значення порогової напруги із умови, що  $Q_n = 0$ :

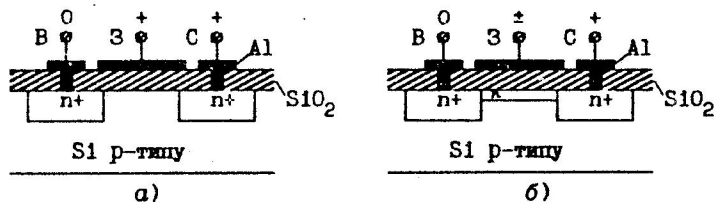
$$U_{пор} = \phi_s + (Q_{пов} + Q_{опз}) / C_3 \quad (8.5)$$

Для ідеальної МДН-структури ( $Q_{пов} = 0$ )

$$U_{пор} = \phi_s + \frac{\sqrt{2 \epsilon_d \epsilon_o \phi_s q N_A}}{C_3}.$$

## 1.2. Польові транзистори з ізолюваним затвором

Структури польових транзисторів з ізолюваним затвором показані на мал. 8.2. В напівпровідниковій пластині з порівняно високим питомим опором, яку називають *підкладкою*, створені дві сильнолеговані області - *виток* і *стік*, відмінні по типу провідності від підкладки.



Мал. 8.2. Структури польових транзисторів з ізолюваним затвором і каналом n-типу.

а - з індукованим каналом; б - із заготовленим каналом

На ці області нанесені металеві контакти. Металевий електрод, ізолюваний від підкладки шаром діелектрика, називають *затвором*. Основними параметрами структури є довжина каналу  $L$  - відстань між металургійними границями  $n^+$ - $p$  переходів виток і сток, ширина каналу  $Z$  (мал. 8.3), товщина шару ізолятора під затвором  $d$  та ступінь легування підкладки  $N_A$ .

Транзистор, в якому ізолятором між затвором і підкладкою служить діелектрик, називають польовим транзистором типу метал - діелектрик - напівпровідник або МДН-транзистором. Коли в польових транзисторах з ізолюваним затвором для ізоляції затвора від підкладки використовується оксид напівпровідника (як правило це діоксид кремнію  $SiO_2$ ), то транзистор називають польовим транзистором типу метал - оксид - напівпровідник, або МОН-транзистор. Проте частіше використовується більш загальний термін - МДН-транзистор.

МОН-транзистори бувають двох типів: з індукованим каналом і з

заготовленим каналом (мал.8.2)

МОН-транзистори з індукованим каналом працюють лише в режимі збагачення каналу носіями заряду. В цих транзисторах коли на затворі напруга рівна нулеві, або від'ємна канал відсутній і, якщо між витокom і стоком прикладена напруга, буде протікати дуже малий струм стоку, що є зворотнім струмом  $p^+$ -р переходу. Лише при додатній нарузі на затворі, яка перевищує певне значення (її називають *пороговою напругою*  $U_{пор}$ ), на поверхні підкладки під затвором тип провідності змінюється на протилежний (індукується канал) і між витокom і стоком буде протікати струм. При цьому полярність напруги на затворі повинна співпадати із знаком основних носіїв заряду в підкладці.

МОН-транзистори з заготовленим каналом працюють в режимах збагачення і збіднення каналу носіями заряду. Зменшення струму між витокom і стоком МОН-транзистора буде спостерігатись, коли на затвор подавати від'ємну напругу, яка відповідає знаку носіїв заряду в каналі. Якщо змінити полярність напруги на затворі, то буде мати місце збагачення каналу носіями заряду, а значить струм стоку зростатиме.

Зображені на мал. 8.2 структури МДН-транзисторів мають підкладку р-типу. Тому сильнолеговані області витокy і стоку, а також індукований і заготовлений канали мають електропровідність n-типу. Якщо ж аналогічні транзистори виготовляють на підкладці з електропровідністю p-типу, то канал цих транзисторів буде мати електропровідність p-типу. Тоді напруги на затворі і стоківі, відносно витокy, матимуть протилежні знаки (до тих, які вказані на мал. 8.2).

МДН-транзистор з індукованим каналом при відсутності напруги на затворі є закритий, струм між витокom і стоком не протікає - це нормально закритий прилад. Польові транзистори із заготовленим каналом, а також із затвором на основі p-n переходу - прилади норма-

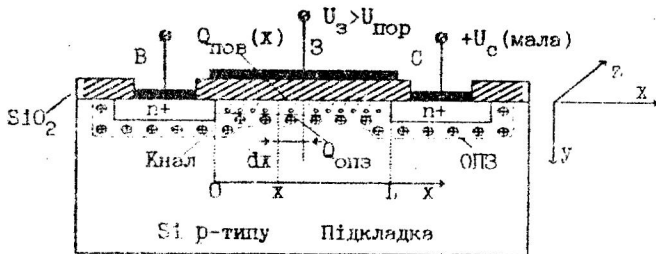


льно відкриті. Це означає, що закритий стан приладу реалізується шляхом подачі запираючої напруги управління на затвор.

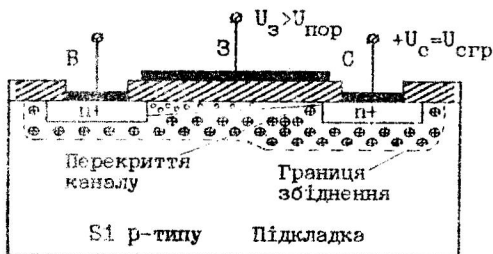
### 1.3. Статичні характеристики МДН-транзистора з індукованим каналом n-типу

Розглянемо спочатку якісно роботу МДН-транзистора. Будемо вважати, що напруга на затворі структури достатня для сильної інверсії на межі напівпровідника з окислом (мал. 8.3а). Тоді, якщо напруга на стокові  $U_c$  не дуже велика, інверсний шар n-типу (індукований канал) виступає як звичайний резистор і струм через канал  $I_c$ , буде збільшуватися пропорційно напрузі  $U_c$ . Ця область називається лінійною областю роботи приладу. По мірі збільшення напруги на стокові наступить момент, коли коли товщина каналу  $y$  і заряд інверсного шару  $Q_n$  в точці  $x=L$  стануть рівними нулю. Вказані умови відповідають початку перекриття каналу (мал. 8.3б). Напругу на стокові, при якій починає перекриватись канал позначимо  $U_{cgr}$ . Для напруг  $U_c > U_{cgr}$  точка перекриття каналу переміщується до витоку, а струм стоку змінюється дуже мало (мал. 8.3в). В цьому випадку говорять, що транзистор працює в режимі насичення.

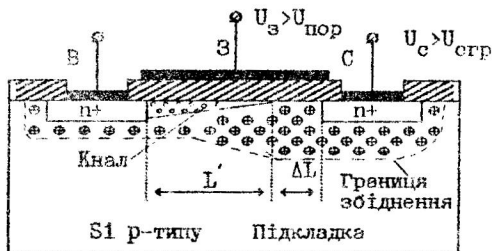
Виведем аналітичне співвідношення, яке описує основні характеристики МОН-транзистора, при наступних допущеннях: 1) МОН-структура ідеальна, тобто в діелектрику відсутні об'ємні заряди, рівні роботи виходу із металу і напівпровідника, відсутні поверхневі стани у напівпровіднику; 2) враховується лише дрейфова компонента струму  $I_c$ ; 3) рухливість електронів в інверсному шарі не залежить від напруги  $U_c$ ; 4) концентрація легуючої домішки в каналі однакова; 5) поперечне електричне поле  $E_y$ , направлене перпендикулярно границі поділу (по осі  $y$  на мал. 8.3а), набагато більше електричного поля  $E_x$ , направленого вздовж поверхні (по осі  $x$ ). Останню умову називають наближенням плавного каналу.



а)



б)



в)

Мал. 8.3. МОН-транзистор з індукованим каналом п-типу в лінійному режимі (а), на початку перекриття каналу (перекриття каналу на границі зі стоком  $x=L$ ) (б) і в режимі насичення (показане зменшення ефективної довжини каналу) (в).

Питома провідність каналу, тобто провідність одиниці площі каналу ( $x=1$  і  $z=1$ ), може бути записана у вигляді:

$$g(x) = q \int_0^w n(x) \mu_n dy = q \mu_n Q_n(x), \quad (8.6)$$

де  $Q_n(x) = \int_0^w n(x) dy$  - поверхнева густина індукованих електронів в каналі товщиною  $w$  ( $y = w$ ) в точці з координатою  $x$  (див. мал. 8.3а). Опір елементарної ділянки каналу довжиною  $dx$  рівний:

$$dR = \frac{dx}{Z \mu_n Q_n(x)}.$$

Тоді спад напруги на цій ділянці каналу

$$dU = I_o dR = \frac{I_o dx}{Z \mu_n Q_n(x)}, \quad (8.7)$$

де струм стоку  $I_o$  - постійна величина, яка не залежить від  $x$ . Поверхнева густина електронів  $Q_n(x)$  може бути визначена із співвідношень (8.4) та (8.5):

$$Q_n(x) = C_3 [(U_3 - U_{пор}) - U(x)]. \quad (8.8)$$

В (8.7) враховано, що вздовж каналу виникає спад напруги  $U(x)$  і для точки з координатою  $x$  напруга на структурі метал-діелектрик-напівпровідник рівна різниці  $U_3 - U(x)$ .

Із (8.7) та (8.8) одержуємо

$$I_o \int_0^L dx = \mu_n Z C_3 \int_0^U [(U_3 - U_{пор}) - U(x)] dU.$$

Тоді для лінійної області

$$I_o = \frac{\mu_n Z C_3}{L} [(U_3 - U_{пор}) U_o - \frac{U_o^2}{2}]. \quad (8.9)$$

Щоб одержати значення струму стоку для області насичення слід врахувати, що біля стоку, коли  $U(L) > U_{cgr}$  відбувається перекриття каналу (мал. 8.3б). При цьому вільних електронів в перекритій частині каналу майже немає  $Q_n(L) = 0$ . Електрони, які в результаті дрейфу вздовж каналу, підійшли до точки  $x=L$  проходять перекриту частину каналу під дією великої горизонтальної (на мал. 8.3б) складової

напруженності електричного поля із швидкістю, яка рівна швидкості насичення. Тоді із (8.8) одержуємо

$$Q_n(L) = C_s [(U_s - U_{пор}) - U_{сгр}] = 0,$$

звідки

$$U_{сгр} = U_s - U_{пор}. \quad (8.10)$$

Струм стоку  $I_c$  в області насичення одержується із (8.9) + (8.10) при умові, що  $U_c = U_{сгр}$ , тоді

$$I_{огр} = \frac{\mu_n Z C_s}{2L} (U_s - U_{пор})^2 \quad (8.11)$$

Із (8.9) та (8.11) слідує, що при постійній напрузі на затворі і при малій напрузі на стокові (коли другим доданком в (8.9) можна знехтувати)  $I_c$  лінійно наростає при збільшенні  $U_c$ . По мірі зростання  $U_c$  залежність  $I_c(U_c)$  стає нелінійною. Можна показати, що  $I_c(U_c)$  має максимум при  $U_c = U_{сгр} = U_s - U_{пор}$ . При напругах на стокові, які більші напруги  $U_{сгр}$ , струм стоку не залежить від напруги між стоком і витокком, а його значення  $I_{сгр}$  може бути вираховане із (8.11). Сукупність вихідних характеристик  $I_c(U_c)$  ідеального МОН-транзистора приведено на мал. 8.4.



Мал. 8.4. Вихідні (стокові) характеристики ідеального МОН-транзистора

В реальних МОН-транзисторах має місце збільшення струму стоку в

області насичення (цю область ще називають активно областю роботи транзистора), що обумовлено зменшенням довжини каналу (див. мал. 8.3б) і залежністю рухливості носіїв заряду в каналі від напруженості електричного поля. Вихідну характеристику в цьому випадку можна змодельувати використовуючи параметр транзистора - внутрішній опір  $r_o$

$$r_o = \left. \frac{dU_o}{dI_o} \right|_{U_3 = \text{const}} \quad (8.12)$$

Враховуючи (8.12) рівняння (8.11) для активної області МОН-транзистора можна записати так:

$$I_o(U_o) = \frac{b}{2}(U_3 - U_{\text{пор}})^2 + \frac{U_o - U_{\text{сгр}}}{r_o}, \quad (8.13)$$

де  $b = (\mu_n Z C_3)/L$ .

Залежність вихідного струму  $I_o$  від напруги на затворі  $U_3$  при постійній нарузі на стокові називають передавальною характеристикою або характеристикою вхід-вихід польового транзистора. Як слідує з рівняння (8.9) передавальна характеристика при малих значеннях  $U_o$  буде лінійна

$$I_o = bU_o(U_3 - U_{\text{пор}}).$$

Характеристики починаються в точці  $U_3 = U_{\text{пор}}$ . При  $U_3 > U_{\text{пор}}$  утворюється провідний канал і з'являється вихідний струм. Передавальні характеристики в активній області ( $U_o > U_{\text{сгр}}$ ) добре описуються рівнянням (8.11).

Крутість передавальної характеристики в області насичення

$$S = \left. \frac{dI_o}{dU_3} \right|_{U_o = \text{const}} = b(U_3 - U_{\text{пор}}). \quad (8.14)$$

Крутість сток-затворної характеристики залежить від струму стоку

$$S = \sqrt{2bI_o}.$$

#### 1.4. МОН-транзистори з заготовленим каналом

В МОН-транзисторах з заготовленим каналом (мал.8.26) біля поверхні напівпровідника під затвором при нульовій напрузі на затворі відносно витoku існує інверсний шар - канал, який з'єднує витік і стік.

Наявність заготовленого каналу в такому МОН-транзисторі приводить до того, що поперечний переріз і провідність каналу будуть змінюватися при зміні напруги на затворі як від'ємної, так і додатньої полярності. Це означає, що МОН-транзистор може працювати як в режимі збіднення ( $U_3 < 0$  для каналу p-типу), так і в режимі збагачення ( $U_3 > 0$ ) каналу носіями заряду.

Передавальні характеристики МОН-транзистора із заготовленим каналом виходять з точки, яка відповідає напрузі перекриття  $U_{зпр}$ . Напруга перекриття - це напруга між затвором і витоком МОН-транзистора з заготовленим каналом, який працює в режимі збіднення, при якій струм стоку стає рівний нулеві.

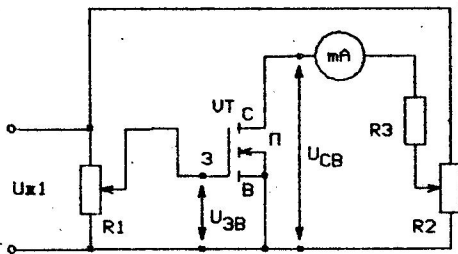
## 2. Порядок виконання роботи

### 2.1. Підготовка до роботи

Користуючись рекомендованою літературою вивчити принцип дії, позначення на електричних схемах та способи вмикання польових транзисторів структури метал-діелектрик-напівпровідник (метал-окисел-напівпровідник) з індукованим та заготовленим каналами p- і n-типів. Навчитись виводити рівняння, які описують ВАХ МДН-транзисторів. Ознайомитися з основними параметрами МДН-транзисторів. Намалювати схему для дослідження ВАХ МДН-транзисторів.

## 2.2. Проведення досліджень

2.2.1. Дослідження передавальних характеристик МОН-транзистора в індукованим каналом. Для дослідження передавальних характеристик  $I_C(U_{ЗВ})$  при різних значеннях напруги між стоком і витокom  $U_{СВ}$  збирається схема, зображена на мал. 8.5. В цій схемі  $U_{Ж}=15$  В, опір резистора  $R_3$  вибрати в межах 100-500 Ом. При дослідженні транзисторів з каналом n-типу (як зображено на мал. 8.5) із спільним проводом з'єднати "-" джерела живлення, а при дослідженні р-канальних транзисторів із спільним проводом з'єднати "+" джерела живлення. Напруга  $U_{ЗВ}$  та  $U_{СВ}$  вимірюються одним вольтметром шляхом перемикавання входу вольтметра із затвора на стік і навпаки. Передавальні характеристики знімаються при постійних напругах між стоком і витокom  $U_{СВ}=0,2; 0,5; 1,0; 10$  В і з'єднаних між собою виводах витoku і підкладки. Струм стоку змінюйте в межах від 0 до 10 мА.



Мал. 8.5. Схема для дослідження ВАХ МОН-транзисторів

При дослідженні характеристик слідкуйте за напругою на стоковій і підтримуйте задане її значення з допомогою потенціометра  $R_3$ .

2.2.2. Дослідження вихідних характеристик МДН-транзистора з індукованим каналом. Вихідні характеристики  $I_C(U_{СВ})$  досліджуються при різних напругах на затворі, починаючи з  $U_{ЗВ} = U_{пор}$ . Струм стоку змінюйте в межах від 0 до 10 мА. Вивід підкладки з'єднайте з ви-

водом витоку.

2.2.3. Дослідження впливу напруги на підкладці на параметри МДН-транзистора. В схемі мал. 8.5 від'єднайте вивід підкладки від витоку і подейте на вивід підкладки додатню напругу  $U_n$  відносно витоку (для р-канального транзистора - від'ємну напругу). Зніміть передавальні характеристики при  $U_n = 1; 3; 5$  В для  $U_{св} = 10$  В.

### 2.3. Обробка та аналіз одержаних результатів

2.3.1. Побудувати передавальні характеристики транзистора в однаковому масштабі, як для  $U_n = 0$  так і для  $U_n = 1; 3; 5$  В.

2.3.2. Побудувати вихідні характеристики транзистора в однаковому масштабі.

2.3.3. Користуючись методикою, описаною в Л. 2 (п. 6.4.1, стор. 483), та програмою "Моделювання МОН-транзистора" визначити параметри моделі та перевірити узгодження експериментальних ВАХ з теоретичними.

2.3.4. Із передавальних та вихідних характеристик визначити основні параметри транзистора: порогову напругу та її залежність від напруги між витоком і підкладкою; крутість сток-затворної характеристики; вихідний диференціальний опір  $r_c = dU_{св}/dI_c$ .

2.3.5. Порівняти одержані експериментальні результати з теоретичними і зробити висновки.

### 3. Запитання до лабораторної роботи

3.1. Намалюйте структуру метал-діелектрик-напівпровідник та поясніть її властивості.

3.2. Які характеристики польового транзистора називають передавальними? Поясніть їх.

3.3. Намалюйте та поясніть структуру польового транзистора з



ізолюванням затвором і каналом n-типу.

3.4. Розкажіть процеси перенесення носіїв заряду в МОП-транзисторі.

3.5. Що називають пороговою напругою польового транзистора? Як вона залежить від параметрів структури МДН?

3.6. Які різновидності польових транзисторів Ви знаєте?

3.7. Намалюйте вихідні характеристики МДН-транзистора з каналом p-типу. Запишіть рівняння, які описують вихідні характеристики.

3.8. Що називають ефектом модуляції довжини каналу? Як це явище проявляється на ВАХ-транзисторах?

3.9. Намалюйте вхідні характеристики польового транзистора.

3.10. Якими фізичними процесами обмежується діапазон частот, на яких може працювати МДН-транзистор?

3.11. Як позначаються на схемах і маркуються польові транзистори.

## Додаток 1

## ПРОГРАМА "МОДЕЛЮВАННЯ НАПІВПРОВІДНИКОВОГО ДІОДА"

```

10 SCREEN 2,1
20 WINDOW (0,200)-(600,0)
30 GOSUB 530
40 DIM W(20),D(20)
50 INPUT"введіть число вимірів N=";N
60 IF N<=20 THEN 100
70 PRINT"число N<=20"
80 PRINT"повторіть введення N"
90 GOTO 50
100 A=0;B=0;C=0;D=0
110 FOR K=1 TO N
120 INPUT"струм, мА; I=";D(K)
130 INPUT"напруга, В; U=";W(K)
140 Y=LOG(D(K)*.001)
150 A=A+W(K);B=B+Y;C=C+W(K)^2
160 D=D+W(K)*Y;NEXT K
170 B1=(A*B-N*D)/(A^2-N*C)
180 B0=(B-B1*A)/N
190 CLS
200 PRINT"LOG I=";B0;"+";B1;"*U"
210 I0=1000*EXP(B0);F=1/B1
220 PRINT
230 PRINT
240 PRINT"параметри моделі: I=I0*(EXP(U/Ф)-1)"
250 PRINT
260 PRINT
270 PRINT"I0=";I0;" ,мА"
280 PRINT
290 PRINT
300 PRINT"Ф=";F;" ,В"
310 PRINT"Графік будувати? (Y/N)"
320 C$=INKEY$: IF C$="" THEN 320
330 IF C$="Y" OR C$="y" OR C$="H" OR C$="h" THEN 350
340 GOTO 480
350 GOSUB 960
360 GOSUB 800
370 FOR U=0 TO 1 STEP .01
380 P=EXP(U/F)
390 I=I0*P
400 IF I>14 THEN I=0
410 PRESET (32+(U*100),54+(I*10)),1
420 NEXT U
430 FOR K=1 TO N
440 X=32+(W(K)*100)
450 Y=54+(D(K)*10)
460 CIRCLE (X,Y),3
470 NEXT K
480 LOCATE 23,1
490 PRINT"Будете ще працювати з програмою? (Y/N)"
500 C$=INKEY$: IF C$="" THEN 500
510 IF C$="N" OR C$="n" OR C$="T" OR C$="t" THEN 520
514 CLS
516 GOTO 50

```

```

520 END
530 CLS
540 PRINT
550 PRINT
560 PRINT"                                П Р О Г Р А М А"
570 PRINT
580 PRINT"                                моделювання напівпровідникового діода"
590 PRINT
600 PRINT
610 PRINT
620 LOCATE 13,1
630 PRINT"(С),1994. Кафедра фізики напівпровідників. "
640 PRINT"Доц. Ю.Наконечний"
650 LOCATE 23,1
660 PRINT"Для продовження тисніть лямбу клавішу"
670 СХ=INKEY$: IF СХ="" THEN 670
680 CLS
690 PRINT"Програма вираховує параметри"
700 PRINT"Іо та φ для моделі діода:"
710 PRINT
720 PRINT
730 PRINT
740 PRINT"  I = Іо * [EXP(U/φ) - 1]"
750 PRINT
760 PRINT
770 PRINT
780 PRINT"із експериментальних ВАХ діода"
790 RETURN
800 PRINT TAB(3); "I,мА"
810 FOR I=0 TO 15
820 IF I=5 THEN PRINT TAB(2); "10"
830 IF I=10 THEN PRINT TAB(2); "5"
840 PRINT
850 NEXT I
860 PRINT TAB(4); "0";TAB(13); "0.5";TAB(21); "1.0";TAB(25); "Uе, В"
870 RETURN
880 PRINT TAB(3); "I,мА"
890 FOR I=0 TO 15
900 IF I=5 THEN PRINT TAB(3); "1"
910 IF I=10 THEN PRINT TAB(1); "0.5"
920 PRINT
930 NEXT I
940 PRINT TAB(4); "0";TAB(13); "0.5";TAB(21); "1.0";TAB(25); "Uс, В"
950 RETURN
960 CLS
970 PRESET (32,54),1: LINE -(199,54)
980 PRESET (82,54),1: LINE -(82,59)
990 PRESET (132,54),1: LINE -(132,59)
1000 PRESET (182,54),1: LINE -(182,59)
1010 PRESET (32,54),1: LINE -(32,199)
1020 PRESET (32,104),1: LINE -(36,104)
1030 PRESET (32,154),1: LINE -(36,154)
1040 RETURN

```

## Додаток 1

## ПРОГРАМА "МОДЕЛЮВАННЯ ТУНЕЛЬНОГО ДІОДА"

```

10 GOSUB 3530
15 GOSUB 2000
20 GOSUB 2350
30 GOSUB 2400
40 GOSUB 2770
45 D=52: R=10: D1=23: R1=7
47 GOSUB 2970
50 LOCATE 23,1: INPUT "Код ", Q
60 IF NOT (Q=1 OR Q=3) THEN 50
65 LOCATE 23,1: PRINT "
70 IF Q=1 THEN X=30: Y=130
80 IF Q=3 THEN X=52: Y=130
90 GOSUB 3190
100 GOSUB 3450
110 LOCATE 23,1: INPUT "Струм In, mA ", I1
112 LOCATE 23,1: PRINT "
114 IF I1<=0 OR I1>20 THEN 3870
120 LOCATE 23,1: INPUT "Напруження Un, В ", U1
122 LOCATE 23,1: PRINT "
123 IF U1<=0 OR U1>.5 THEN 4300
125 LOCATE 23,1: INPUT "Напруження Up, В ", U3
130 LOCATE 23,1: PRINT "
132 IF U3<=0 OR U3>1.5 THEN 4300
135 T=I1/U1
140 GOSUB 3280
150 IF Q=1 THEN X=132: Y=44
160 IF Q=3 THEN X=248: Y=24
170 GOSUB 3190
180 GOSUB 3370
190 GOSUB 2560
200 CLS
202 SCREEN 1
204 GOSUB 4080
210 GOSUB 2000
220 IF Q=1 THEN GOSUB 2320
230 IF Q=3 THEN GOSUB 2400
240 GOSUB 3810
250 GOSUB 2860
300 LOCATE 19,18: PRINT "I=";
310 PRINT USING "###.#"; T;
320 PRINT "*U*(exp(1-U/Un))+";
330 PRINT USING "###.##^"; I0;
340 PRINT "*{exp(U/";
350 PRINT USING "#.###"; F;
360 PRINT ")-1}, mA"
415 GOTO 4180
420 END
2000 CLS
2010 SCREEN 2,2
2020 WINDOW (-28,164)-(612,-36)
2030 LINE (0,0)-(612,0)
2040 LINE (0,0)-(0,164)
2050 FOR I=72 TO 576 STEP 72

```

```

2060 LINE (I,0)-(I,5)
2070 NEXT
2080 FOR I=32 TO 160 STEP 32
2090 LINE (0,I)-(8,I)
2100 NEXT
2110 RETURN
2120 LOCATE 1,6: PRINT "I, mA"
2130 LOCATE 5,2: PRINT "4"
2140 LOCATE 13,2: PRINT "2"
2150 K1=32
2160 RETURN
2170 LOCATE 1,6: PRINT "I, mA"
2180 LOCATE 5,2: PRINT "8"
2190 LOCATE 13,2: PRINT "4"
2200 K1=16
2210 RETURN
2220 LOCATE 1,6: PRINT "I, mA"
2230 LOCATE 5,2: PRINT "16"
2240 LOCATE 13,2: PRINT "8"
2250 K1=8
2260 RETURN
2270 LOCATE 1,6: PRINT "I, mA"
2280 LOCATE 5,2: PRINT "2"
2290 LOCATE 13,2: PRINT "1"
2300 K1=64
2310 RETURN
2320 LOCATE 22,4: PRINT "0";TAB(21);"200";TAB(39);"400";
TAB(57);"600";TAB(72);"U, mB"
2330 K2=720
2340 RETURN
2350 LOCATE 1,6: PRINT "I/In"
2360 LOCATE 5,1: PRINT "1,0"
2370 LOCATE 13,1: PRINT "0,5"
2380 K1=128
2390 RETURN
2400 LOCATE 22,4: PRINT "0";TAB(21);"400";TAB(39);"800";
TAB(57);"1200";TAB(72);"U, mB"
2410 K2=360
2420 RETURN
2430 F=(U3-U2)/LOG(K3)
2440 Y3=1/EXP(U3/F)
2450 U=0
2460 Y=0
2470 WHILE Y<=160
2480 Y1=EXP(1-(U/U1))
2490 Y2=EXP(U/F)-1
2500 Y=K1*((U/U1)*Y1+Y3*Y2)
2510 X=U*K2
2520 PRESET (X,Y),1
2530 U=U+.005
2540 WEND
2550 RETURN
2560 A=0: B=0: C=0: L=0
2570 N=0: U=0
2590 WHILE U<=U3
2600 LOCATE 23,1: INPUT "Ступь I, mA "; S
2605 IF S<=0 OR S>20 THEN 4500

```

```

2610 E=LOG(S/1000)
2620 LOCATE 23,1: PRINT "
2630 LOCATE 23,1: INPUT "Напруга U, В "; U
2635 LOCATE 23,1:PRINT "
2640 IF U<=0 OR U>1.5 THEN 4500
2650 A=A+U: B=B+E: C=C+(U^2): L=L+(U*E)
2660 X=K2*U
2670 Y=K1*(S/I1)
2680 PSET (X,Y),1
2690 LINE (X,Y-2)-(X,Y+2): LINE (X-4,Y)-(X+4,Y)
2700 N=N+1
2710 WEND
2720 LOCATE 23,1: PRINT "
2730 B1=(A*B-N*L)/(A^2-N*C)
2740 I0=EXP((B-B1*A)/N)
2750 F=1/B1
2760 RETURN
2770 K3=8
2780 U1=9.000001E-02: U2=.36: U3=.55
2790 GOSUB 2430
2800 K3=18
2810 U1=.14: U2=.66: U3=1!
2820 GOSUB 2430
2830 LOCATE 7,26: PRINT "Ge"
2840 LOCATE 10,42: PRINT "GaAs"
2850 RETURN
2860 U=0
2870 Y3=I0*1000
2880 WHILE NOT(Y>160 OR U>1.2)
2890 Y1=I1*EXP(1-(U/U1))
2900 Y2=EXP(U/F)-1
2910 Y=K1*(U/U1)*Y1+Y3*Y2
2920 X=U*K2
2930 CIRCLE (X, Y), 2
2940 U=U+.005
2950 WEND
2960 RETURN
2970 X1=(D-1)*8-32: Y1=(21-(R-1))*8
2980 X2=(D+D1)*8-32: Y2=(21-(R+R1))*8
2990 LINE (X1,Y1)-(X2,Y2),1,B
3000 LINE (X1+2,Y1-2)-(X2-2,Y2+2),1,B
3010 LOCATE R,D: PRINT "
3020 LOCATE R+1,D: PRINT " Уведить "
3030 LOCATE R+2,D: PRINT "код матеріалу, з якого "
3040 LOCATE R+3,D: PRINT " виготовлений діод "
3050 LOCATE R+4,D: PRINT " Ge - 1 "
3060 LOCATE R+5,D: PRINT " GaAs - 3 "
3070 LOCATE R+6,D: PRINT "
3080 RETURN
3090 LINE (X1,Y1)-(X2,Y2),0,B
3100 LINE (X1+2,Y1-2)-(X2-2,Y2+2),0,B
3110 LOCATE R,D: PRINT "
3120 LOCATE R+1,D: PRINT "
3130 LOCATE R+2,D: PRINT "
3140 LOCATE R+3,D: PRINT "
3150 LOCATE R+4,D: PRINT "
3160 LOCATE R+5,D: PRINT "

```

```

3170 LOCATE R+6,D: PRINT "
3180 RETURN
3190 PSET (X,Y),1
3200 LINE (X,Y)-(X+5,Y+5)
3210 PSET (X,Y),1
3220 LINE (X,Y)-(X-5,Y+5)
3230 PSET (X-2,Y+2),1
3240 LINE (X-2,Y+2)-(X-2,Y+16)
3250 LINE (X-2,Y+16)-(X+2,Y+16)
3260 LINE (X+2,Y+16)-(X+2,Y+2)
3270 RETURN
3280 PSET (X,Y),0
3290 LINE (X,Y)-(X+5,Y+5),0
3300 PSET (X,Y),0
3310 LINE (X,Y)-(X-5,Y+5),0
3320 PSET (X-2,Y+2),0
3330 LINE (X-2,Y+2)-(X-2,Y+16),0
3340 LINE (X-2,Y+16)-(X+2,Y+16),0
3350 LINE (X+2,Y+16)-(X+2,Y+2),0
3360 RETURN
3370 LOCATE R,D: PRINT "          Уведіть      "
3380 LOCATE R+1,D: PRINT " результати вимірювань "
3390 LOCATE R+2,D: PRINT "          ВАХ          "
3400 LOCATE R+3,D: PRINT " для діапазону напруги "
3410 LOCATE R+4,D: PRINT " починаючи з долини Uв "
3420 LOCATE R+5,D: PRINT " до напруги більших    "
3430 LOCATE R+6,D: PRINT " напруги розкилу Up   "
3440 RETURN
3450 LOCATE R,D: PRINT "          Уведіть      "
3460 LOCATE R+1,D: PRINT " результати вимірювань "
3470 LOCATE R+2,D: PRINT "          ВАХ          "
3480 LOCATE R+3,D: PRINT " для положення вершини "
3490 LOCATE R+4,D: PRINT " струм In і напругу Un "
3500 LOCATE R+5,D: PRINT "          та          "
3510 LOCATE R+6,D: PRINT " напругу розкилу Up   "
3520 RETURN
3530 KEY OFF
3540 SCREEN 1
3550 PRINT "*****"
3560 PRINT "*"
3570 PRINT "*"
3580 PRINT "*"
3590 PRINT "*"
3600 PRINT "*"
3610 PRINT "*"
3620 PRINT "*"
3630 PRINT "*" (C), 1994, УЖДУ. Доц. Ю.Наконечний "*"
3640 PRINT "*****"
3650 PRINT
3660 PRINT
3670 PRINT "   Ця навчальна програма дозволяє моде-"
3680 PRINT "лювати експериментальну вольт-амперну "
3690 PRINT "характеристику тунельного діода "
3700 PRINT "функцією:"
3710 PRINT
3720 PRINT "    $I=A*U(\exp(1-U/U_n))+I_0*(\exp(U/\Phi_T)-1)$  "
3730 PRINT

```

```

3740 PRINT "де      A=In/Un;"
3750 PRINT "      In - струм вершини;"
3760 PRINT "      Un - напруга вершини."
3770 CX=INKEY$: IF CX="" THEN 3770
3780 SCREEN 2
3790 SCREEN 0
3800 RETURN
3810 IF I1>=10 AND I1<20 THEN GOSUB 2220
3820 IF I1>=5 AND I1<10 THEN GOSUB 2170
3830 IF I1>=2.5 AND I1<5 THEN GOSUB 2120
3840 IF I1>0 AND I1<2.5 THEN GOSUB 2270
3850 RETURN
3860 BEEP
3870 GOSUB 3280
3880 GOSUB 4000
3890 LOCATE 23,1: PRINT "Для продовження тисніть будь-яку кнопку."
3900 CX=INKEY$: IF CX="" THEN 3900
3910 LOCATE 23,1: PRINT "
3920 GOTO 90
4000 LOCATE R,D: PRINT "
4010 LOCATE R+1,D: PRINT " УВАГА!
4020 LOCATE R+2,D: PRINT " Програма обробляє ВАХ,
4030 LOCATE R+3,D: PRINT " для яких
4040 LOCATE R+4,D: PRINT " In приймає значення
4050 LOCATE R+5,D: PRINT " більше 0 і менше 20 мА
4060 LOCATE R+6,D: PRINT "
4070 RETURN
4080 PRINT: PRINT
4090 PRINT "Параметри моделі:"
4095 PRINT
4100 PRINT " I=A*U*(exp(1-U/Un))+Io*(exp(U/Фт)-1) "
4110 PRINT
4120 PRINT " A=In/Un=";
4125 PRINT USING "###.#";T
4130 PRINT USING " Un=#.###";U1
4140 PRINT " Io=";
4145 PRINT USING "#.###^";I0
4150 PRINT " Фт=";
4152 PRINT USING "#.###";F
4155 PRINT "Графік будувати? Y/N"
4160 CX=INKEY$: IF CX="" THEN 4160
4167 IF CX="Y" OR CX="y" OR CX="H" OR CX="h" THEN RETURN
4180 LOCATE 23,1
4190 PRINT "Будете працювати ще з програмою? (Y/N)"
4200 CX=INKEY$: IF CX="" THEN 4200
4210 IF CX="Y" OR CX="y" OR CX="H" OR CX="h" THEN 10
4220 END
4300 BEEP
4310 GOSUB 3280
4320 GOSUB 4400
4330 LOCATE 23,1: PRINT "Для продовження тисніть будь-яку кнопку."
4340 CX=INKEY$: IF CX="" THEN 4340
4350 LOCATE 23,1: PRINT "
4360 GOTO 90
4400 LOCATE R,D: PRINT "
4410 LOCATE R+1,D: PRINT " УВАГА!
4420 LOCATE R+2,D: PRINT " Помилка при введенні "

```



```
4430 LOCATE R+3,D: PRINT "          даних,          "  
4440 LOCATE R+4,D: PRINT "      або результати      "  
4450 LOCATE R+5,D: PRINT "  вимірювань хибні  "  
4460 LOCATE R+6,D: PRINT "          "  
4470 RETURN  
4500 BEEP  
4520 GOSUB 4400  
4530 LOCATE 23,1: PRINT "Для продовження тисніть будь-яку кнопку."  
4540 C$=INKEY$: IF C$="" THEN 4540  
4550 LOCATE 23,1: PRINT "  
4560 GOSUB 3370  
4570 GOTO 2560
```

## Додаток 1

## ПРОГРАМА "МОДЕЛЮВАННЯ БІПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА"

```

10 DIM V(5),I(10),Z(10,2),U(10,2)
20 SCREEN 2,1
30 WINDOW (0,200)-(600,0)
40 GOSUB 4510
150 CLS
160 PRINT"моделювання транзистора:"
170 PRINT
180 PRINT
190 PRINT
200 PRINT"в схемі з спільною базою      - 1"
210 PRINT"в схемі з спільним емітером   - 2"
220 INPUT"уведіть код:";X
230 IF X=1 GOTO 370
240 IF X=2 GOTO 1460
250 CLS: GOTO 200
370 CLS
380 PRINT"      моделювання транзистора,"
390 PRINT"      увімкненого по схемі"
400 PRINT"      з спільною базою"
410 PRINT
420 PRINT
430 PRINT
440 PRINT"Які характеристики будете"
450 PRINT"моделювати?"
460 PRINT
470 PRINT
480 PRINT"вхідні   - 1"
490 PRINT"вихідні   - 2"
500 INPUT N
510 IF N=1 GOTO 540
520 IF N=2 GOTO 700
530 CLS: GOTO 440
540 GOTO 3280
550 CLS
560 GOSUB 3850
570 GOSUB 3120
580 S=6
590 FOR K=1 TO N
600 FOR U=0 TO 1 STEP .01
610 C1=U/F1: P1=I1*(EXP(C1)-1)
620 C2=V(K)/F2: P2=I2*(EXP(-C2)-1)
630 I=(1+V(K)/S)*P1-A1*P2
640 IF I>14 THEN I=0
650 PRESET (32+(U*100),54+(I*10)),1
660 NEXT U
670 NEXT K
680 RETURN
690 GOTO 4402
700 GOTO 1230
710 CLS
720 PRINT"Уведіть параметри моделі:"
730 INPUT"коефіцієнт передачі струму емітера, a=";A
740 INPUT"інверсн. коефіц. передачі струму емітер a1=";A1

```

```

750 INPUT"зворотній струм колектора, mA; Iк0=";B
760 INPUT"коефіцієнт Фк, B; Фк=";F2
770 B=(1-A*A1)
780 RETURN
790 CLS
800 PRINT"для скількох струмів емітера"
810 RETURN
820 PRINT"знімались характеристики? N=";INPUT N
830 RETURN
840 IF N<=10 GOTO 880
850 PRINT"число N <=10"
860 PRINT"повторіть введення N"
870 GOTO 790
880 CLS
890 FOR K=1 TO N
900 INPUT"струм емітера, mA; Iе=";V(K)
910 NEXT K
920 RETURN
930 CLS
940 PRINT"уведіть значення струмів"
950 PRINT"колектора (по два значення"
960 PRINT"для кожного струму емітера)"
970 FOR K=1 TO N
980 FOR L=0 TO 1
990 PRINT"струм емітера Iе=";V(K)
1000 INPUT"струм колектора, mA; Iк=";Z(K,L)
1010 INPUT"напруга колектора, B; Uк=";U(K,L)
1020 NEXT L
1030 NEXT K
1040 RETURN
1050 CLS
1060 GOSUB 3850
1070 GOSUB 2160
1080 D=.01
1090 FOR K=1 TO N
1100 FOR U=-1 TO 15 STEP .1
1110 C1=U/F2; P1=EXP(-C1)-1
1120 B1=A*V(K)*(1+D*U)
1130 I=B1-(G*B*P1)
1140 IF I<-10 THEN I=0
1150 IF I>70 THEN I=0
1160 PRESET (32+(U*10),54+(I*2)),1
1170 NEXT U
1180 NEXT K
1190 RETURN
1200 PRINT"Бажаєте будувати характеристики?"
1210 INPUT "N=";N
1220 RETURN
1230 GOSUB 710
1240 GOSUB 3740
1250 IF X=1 GOTO 1280
1260 IF X=0 GOTO 1350
1270 GOTO 1240
1280 GOSUB 790
1290 GOSUB 820
1300 GOSUB 840
1310 GOSUB 930

```

```

1320 GOSUB 1050
1330 GOSUB 2050
1340 GOTO 4402
1350 GOSUB 790
1360 GOSUB 1200
1370 GOSUB 840
1380 GOSUB 1050
1390 GOTO 4402
1400 IF N<=10 GOTO 1440
1410 PRINT"Число N виберіть <=10"
1420 PRINT"Повторіть увведення N"
1430 INPUT"N=";N
1440 RETURN
1460 CLS
1470 PRINT"    моделювання транзистора,"
1480 PRINT"    увімкненого по схемі"
1490 PRINT"    з спільним емітером"
1500 PRINT
1510 PRINT
1520 PRINT"Які характеристики будете"
1530 PRINT"моделювати?"
1540 PRINT"вхідні    - 1"
1550 PRINT"вихідні    - 2"
1560 INPUT H
1570 IF H=1 GOTO 2440
1580 IF H=2 GOTO 2240
1590 CLS: GOTO 1520
1600 CLS
1610 PRINT"Уведіть параметри моделі:"
1620 INPUT"коефіцієнт передачі струму бази b=";B
1630 INPUT"інверсний коефіцієнт пер. струму емітера a1=";A1
1640 B1=A1/(1-A1)
1650 INPUT"коефіцієнт  $\Phi_k$ , B;  $\Phi_k$ =";F
1660 RETURN
1670 CLS
1680 PRINT"Для скількох струмів бази"
1690 RETURN
1700 PRINT"анімались характеристики? N=";INPUT N
1710 RETURN
1720 CLS
1730 FOR K=1 TO N
1740 INPUT"Струм бази, mA; Ib=";I(K)
1750 NEXT K
1760 RETURN
1770 CLS
1780 PRINT"Уведіть значення струмів"
1790 PRINT"колектора (по два значення"
1800 PRINT"для кожного струму бази)"
1810 FOR K=1 TO N
1820 FOR L=0 TO 1
1830 PRINT"Струм бази Ib=";I(K); "mA"
1840 INPUT"Струм колектора , mA; Ik=";Z(K,L)
1850 INPUT"Напруга колектора , B; Uk=";U(K,L)
1860 IF Z(K,L) >50 THEN Z(K,L)=0
1870 NEXT L
1880 NEXT K
1890 RETURN

```

```

1900 CLS
1910 D=.015
1920 GOSUB 3850
1930 GOSUB 2160
1940 FOR K=1 TO N
1950 FOR U=0 TO 15 STEP .1
1960 P=EXP(-U/F)
1970 I1=1-P/A1; I2=1+(B/B1)*P
1980 I=I(K)*B*(I1/I2)
1990 I=I*(1+D*U)
2000 IF I>70 THEN I=0
2010 PRESET (32+(U*10),54+(I*2)),1
2020 NEXT U
2030 NEXT K
2040 RETURN
2050 FOR K=1 TO N
2060 FOR L=0 TO 1
2070 X=32+(U(K,L)*10)
2080 Y=54+(Z(K,L)*2)
2090 GOSUB 2130
2100 NEXT L
2110 NEXT K
2120 RETURN
2130 CIRCLE (X,Y),3
2150 RETURN
2160 PRINT TAB(3); "I,MA"
2170 FOR I=0 TO 15
2180 IF I=5 THEN PRINT TAB(2); "50"
2190 IF I=10 THEN PRINT TAB(2); "25"
2200 PRINT
2210 NEXT I
2220 PRINT TAB(4); "0"; TAB(13); "5"; TAB(21); "10"; TAB(25); "Uk, B"
2230 RETURN
2240 GOSUB 1600
2250 GOSUB 3740
2260 IF X=1 GOTO 2290
2270 IF X=0 GOTO 2370
2280 GOTO 2250
2290 GOSUB 1670
2300 GOSUB 1700
2310 GOSUB 1400
2320 GOSUB 1720
2330 GOSUB 1770
2340 GOSUB 1900
2350 GOSUB 2050
2360 GOTO 4402
2370 GOSUB 1670
2380 GOSUB 1200
2390 GOSUB 1400
2400 GOSUB 1720
2410 GOSUB 1900
2420 GOTO 4402
2440 GOTO 3540
2450 PRINT "Уведіть параметри моделі:"
2460 INPUT "коефіцієнт передачі струму емітера, a="; A
2470 INPUT "інверсний коефіцієнт перед. струму емітера, A1="; A1
2480 INPUT "зворотній струм емітера, Ieo="; I1

```

```

2490 INPUT"зворотній струм колектора, Iкo=";I2
2500 INPUT"коефіцієнт Фe, B; Фe=";F1
2510 INPUT"коефіцієнт Фк, B; Фк=";F2
2520 RETURN
2530 J=I1*(1-A);G=I2*(1-A1)
2540 RETURN
2550 CLS:PRINT"Для скількох напруг на"
2560 RETURN
2570 PRINT"колекторі змінались вхідні"
2580 RETURN
2590 PRINT"характеристики? N=":INPUT N
2600 IF N<=5 GOTO 2640
2610 PRINT"число N задайте <=5"
2620 PRINT"повторить уведення N"
2630 GOTO 2570
2640 FOR K=1 TO N
2650 INPUT"Напруга колектора, B; Uк=";V(K)
2660 NEXT K
2670 RETURN
2680 CLS
2690 PRINT"Уведіть значення струмів"
2700 RETURN
2710 PRINT"бази (по два значення"
2720 RETURN
2730 PRINT"для кожної напруги колект.)"
2740 RETURN
2750 FOR K=1 TO N
2760 FOR L=0 TO 1
2770 PRINT"напруга колектора, Uк=";V(K);"B"
2780 INPUT"струм бази, mA; Iб=";Z(K,L)
2790 INPUT"напруга база-емітер Uбе=";U(K,L)
2800 IF Z(K,L) >10 THEN Z(K,L)=0
2810 NEXT L
2820 NEXT K
2830 RETURN
2840 GOSUB 2450
2850 CLS
2860 GOSUB 3850
2870 GOSUB 3200
2880 S=6
2890 J=I1*(1-A)
2900 G=I2*(1-A1)
2910 FOR K=1 TO N
2920 FOR U=0 TO 1: STEP .01
2930 C1=U/F1:P1=EXP(C1)-1
2940 R=U-V(K)
2950 C2=R/F2:P2=EXP(C2)-1
2960 I=(J*P1)+(G*P2)
2970 I=I*10
2980 IF I>14 THEN I=0
2990 PRESET (32+(U*100),54+(I*10)),1
3000 NEXT U
3010 NEXT K
3020 RETURN
3030 GOTO 4402
3040 FOR K=1 TO N
3050 FOR L=0 TO 1

```

```

3060 X=32+(U(K,L)*100)
3070 Y=54+(Z(K,L)*10)
3080 GOSUB 2130
3090 NEXT L
3100 NEXT K
3110 RETURN
3120 PRINT TAB(3); "I, mA"
3130 FOR I=0 TO 15
3140 IF I=5 THEN PRINT TAB(2); "10"
3150 IF I=10 THEN PRINT TAB(2); "5"
3160 PRINT
3170 NEXT I
3180 PRINT TAB(4); "0"; TAB(13); "0.5"; TAB(21); "1.0"; TAB(25); "Uс, В"
3190 RETURN
3200 PRINT TAB(3); "I, mA"
3210 FOR I=0 TO 15
3220 IF I=5 THEN PRINT TAB(3); "1"
3230 IF I=10 THEN PRINT TAB(1); "0.5"
3240 PRINT
3250 NEXT I
3260 PRINT TAB(4); "0"; TAB(13); "0.5"; TAB(21); "1.0"; TAB(25); "Uс, В"
3270 RETURN
3280 CLS:GOSUB 2450
3290 GOSUB 3740
3300 IF X=1 GOTO 3330
3310 IF X=0 GOTO 3490
3320 GOTO 3290
3330 GOSUB 2550
3340 GOSUB 2570
3350 GOSUB 2590
3360 GOSUB 2680
3370 GOSUB 3830
3380 GOSUB 2730
3390 FOR K=1 TO N
3400 FOR L=0 TO 1
3410 PRINT "Напряга колектора, Uк="; V(K); "В"
3420 INPUT "Струм емітера, mA; Iе="; Z(K,L)
3430 INPUT "напряга емітер-база Uеб="; U(K,L)
3440 IF Z(K,L) > 10 THEN Z(K,L) = 0
3450 NEXT L: NEXT K
3460 GOSUB 550
3470 GOSUB 3040
3480 GOTO 4402
3490 GOSUB 2550
3500 GOSUB 3810
3510 GOSUB 2590
3520 GOSUB 550
3530 GOTO 4402
3540 CLS:GOSUB 2450
3550 GOSUB 3740
3560 IF X=1 GOTO 3590
3570 IF X=0 GOTO 3690
3580 GOTO 3550
3590 GOSUB 2550
3600 GOSUB 2570
3610 GOSUB 2590
3620 GOSUB 2680

```

```

3630 GOSUB 2710
3640 GOSUB 2730
3650 GOSUB 2750
3660 GOSUB 2850
3670 GOSUB 3040
3680 GOTO 4402
3690 GOSUB 2550
3700 GOSUB 3810
3710 GOSUB 2590
3720 GOSUB 2850
3730 GOTO 4402
3740 CLS
3750 PRINT"експериментально характеристики"
3760 PRINT"знімались?      так - 1"
3770 PRINT
3780 PRINT"                ні - 0"
3790 INPUT X
3800 RETURN
3810 PRINT"колекторі бажаєте будувати"
3820 RETURN
3830 PRINT"емітера (по два значення)"
3840 RETURN
3850 CLS
3860 PRESET (32,54),1: LINE -(199,54)
3870 PRESET (82,54),1: LINE -(82,59)
3880 PRESET (132,54),1: LINE -(132,59)
3890 PRESET (182,54),1: LINE -(182,59)
3900 PRESET (32,54),1: LINE -(32,199)
3910 PRESET (32,104),1: LINE -(36,104)
3920 PRESET (32,154),1: LINE -(36,154)
3930 RETURN
4402 LOCATE 23,1
4404 PRINT"Для продовження тисніть любую клавішу"
4406 C$=INKEY$: IF C$="" THEN 4406
4410 LOCATE 23,1
4420 PRINT "Бажаєте закінчити роботу з програмою? (Y/N)"
4430 C$=INKEY$: IF C$="" THEN 4430
4440 IF C$="N" OR C$="n" OR C$="T" OR C$="t" THEN 20
4450 END
4510 CLS
4520 PRINT
4530 PRINT
4540 PRINT"
4550 PRINT
4570 PRINT"                П Р О Г Р А М А"
4580 PRINT"                моделювання статичних характеристик"
4590 PRINT"                біполярного транзистора"
4595 PRINT
4600 PRINT
4605 PRINT
4610 PRINT"(С),1994. Кафедра фізики чіпівпровідників."
4615 PRINT" Доц. Ю.Наконечний"
4620 LOCATE 23,1
4630 PRINT"Для продовження тисніть любую клавішу"
4640 C$=INKEY$: IF C$="" THEN 4640
4650 RETURN

```



## ПРОГРАМА "МОДЕЛЮВАННЯ МОН-ТРАНЗИСТОРА"

```

1 DIM J(15),V(15),E(15),O(15)
3 DIM V(10),U(10,3),Z(10,3)
5 SCREEN 2,1
7 WINDOW (0,200)-(600,0)
8 GOTO 1300
20 CLS
21 PRINT"уведіть параметри:"
22 PRINT
23 PRINT
24 INPUT"порогова напруга, В; Uo=";U0
25 PRINT
26 INPUT"коефіцієнт В, см/В; В=";В
27 PRINT
28 INPUT"коефіцієнт L, 1/В; L=";L
29 GOSUB 958
30 PRINT"передавальні характеристики - 1"
31 PRINT
32 PRINT"вихідні характеристики - 2"
34 INPUT H
36 IF H=1 GOTO 50
38 IF H=2 GOTO 150
40 GOTO 29
50 CLS
52 PRINT"Вимірювали вхідні характеристики?"
53 PRINT
54 PRINT"так - 1"
55 PRINT
56 PRINT"ні - 0"
57 INPUT H
58 IF H=1 GOTO 63
60 IF H=0 GOTO 96
62 GOTO 50
63 CLS
64 GOSUB 900
66 GOSUB 906
68 GOSUB 914
69 INPUT"N=";N
70 FOR K=1 TO N
72 GOSUB 950
73 NEXT K
74 CLS
75 GOSUB 922
77 FOR K=1 TO N
78 FOR L=0 TO 2
79 GOSUB 930
80 GOSUB 938
81 GOSUB 946
82 PRINT
83 NEXT L:NEXT K
84 GOSUB 1000
86 GOSUB 1020
88 GOSUB 1033
90 GOSUB 800

```

```

92 GOSUB 1046
93 GOSUB 1600
94 GOTO 1640
96 GOSUB 900
98 GOSUB 906
100 GOSUB 918
102 INPUT "N=";N
104 FOR K=1 TO N
106 GOSUB 950
108 NEXT K
110 GOSUB 1000
112 GOSUB 1020
114 GOSUB 1033
116 GOSUB 800
117 GOSUB 1600
118 GOTO 1640
150 CLS
152 PRINT"вимірювали вихідні "
153 PRINT"характеристики?      так - 1"
154 PRINT
155 PRINT"                        ні - 0"
157 INPUT H
158 IF H=1 GOTO 163
160 IF H=0 GOTO 250
162 GOTO 150
163 GOSUB 900
164 GOSUB 910
166 GOSUB 914
167 INPUT "N=";N
168 CLS
172 FOR K=1 TO N
174 GOSUB 954
176 NEXT K
177 CLS
178 GOSUB 922
180 FOR K=1 TO N
181 FOR L=0 TO 2
182 PRINT
184 GOSUB 934
186 GOSUB 938
188 GOSUB 942
190 NEXT L;NEXT K
192 GOSUB 1000
194 GOSUB 1020
196 GOSUB 1031
198 GOSUB 826
199 GOSUB 1046
200 GOSUB 1600
210 GOTO 1640
250 CLS
252 GOSUB 900
254 GOSUB 910
256 GOSUB 918
258 INPUT "N=";N
260 FOR K=1 TO N
262 GOSUB 954
264 NEXT K

```

```

266 GOSUB 1000
268 GOSUB 1020
270 GOSUB 1031
272 GOSUB B26
274 GOSUB 1600
276 GOTO 1640
800 FOR K=1 TO N
802 FOR U=0 TO 15 STEP .1
804 U4=U-U0
806 IF U4<0 GOTO B21
808 IF U4>V(K) GOTO B16
810 I=B*U4^2*(1+L*(V(K)-U4))
812 IF I*1E3>14 THEN I=0
814 GOTO B22
816 I=B*(2*U4*V(K)-V(K)^2)
818 IF I*1E3>14 THEN I=0
819 GOTO B22
821 I=0
822 PRESET (32+U*10,54+I*1E4),1
823 NEXT U:NEXT K
824 RETURN
826 FOR K=1 TO N
828 FOR U=0 TO 15 STEP .1
830 U4=V(K)-U0
832 IF U>U4 GOTO B40
834 I=B*(2*U4*U-U^2)
836 IF I*1E3>14 THEN I=0
838 GOTO B44
840 I=B*U4^2*(1+L*(U-U4))
842 IF I*1E3>14 THEN I=0
844 PRESET (32+U*10,54+I*1E4),1
846 NEXT U:NEXT K
848 RETURN
900 PRINT"Для скількох напруг між"
904 RETURN
906 PRINT"стоком і витокон,"
908 RETURN
910 PRINT"затвором I витокон,"
912 RETURN
914 PRINT"знімались характеристики?"
916 RETURN
918 PRINT"Хочете будувати характеристики?"
920 RETURN
922 PRINT"уведіть експериментальні значення (по три точки для кожної"
924 PRINT"характеристики)."

```

```

950 INPUT "Напруга стоку, В; Uс=";V(K)
952 RETURN
954 INPUT "Напруга отвору, В; Uо=";V(K)
956 RETURN
958 CLS
959 PRINT "Які характеристики бажаєте"
960 PRINT "моделювати?"
962 PRINT
964 RETURN
1000 CLS
1004 PRESET (32,54),1: LINE -(199,54)
1006 PRESET (82,54),1: LINE -(82,59)
1008 PRESET (132,54),1: LINE -(132,59)
1010 PRESET (182,54),1: LINE -(182,59)
1012 PRESET (32,54),1: LINE -(32,199)
1014 PRESET (32,104),1: LINE -(36,104)
1016 PRESET (32,154),1: LINE -(36,154)
1017 RETURN
1020 PRINT TAB(3); "I, mA"
1022 FOR I=0 TO 15
1024 IF I=5 THEN PRINT TAB(2); "10"
1026 IF I=10 THEN PRINT TAB(2); "5"
1028 PRINT
1029 NEXT I
1030 RETURN
1031 PRINT TAB(4); "0"; TAB(13); "5"; TAB(21); "10"; TAB(25); "Uс, В"
1032 RETURN
1033 PRINT TAB(4); "0"; TAB(13); "5"; TAB(21); "10"; TAB(25); "Uо, В"
1034 RETURN
1035 FOR K=1 TO N
1036 X=32+(V(K)*10)
1038 Y=54+(J(K)*10)
1040 GOSUB 1062
1042 NEXT K
1044 RETURN
1046 FOR K=1 TO N
1048 FOR L=0 TO 2
1050 X=32+(U(K,L)*10)
1052 Y=54+(Z(K,L)*10)
1054 GOSUB 1062
1056 NEXT L
1058 NEXT K
1060 RETURN
1062 CIRCLE (X,Y),3
1066 RETURN
1068 FOR K=1 TO N
1069 X=32+(D(K)*10)
1070 Y=54+(E(K)*10)
1072 GOSUB 1062
1074 NEXT K
1076 RETURN
1101 CLS
1102 PRINT
1104 PRINT
1105 PRINT
1106 PRINT "      П Р О Г Р А М А"
1107 PRINT

```

```

1108 PRINT" для обчислення параметрів"
1109 PRINT" моделі. МОН-транзистора"
1110 PRINT
1112 PRINT
1113 PRINT
1114 PRINT"I=В*(2*(Uз-Uо)*U-U^2); U<Uн"
1115 PRINT
1116 PRINT"I=In*(1+L*(Uн-U)); U>Uн"
1118 PRINT
1119 PRINT
1120 PRINT
1121 PRINT"Параметри В та L обчислюються"
1122 PRINT"із вихідної характеристики"
1123 PRINT
1124 PRINT"Уведіть параметри транзистора:"
1125 INPUT"порогова напруга, вольт Uо=";U0
1127 INPUT"напруга насич., вольт Uн=";U4
1132 CLS
1134 PRINT"Уведіть число вимірювань для"
1136 PRINT"діапазону напруг стока,"
1138 PRINT"які менші напруги насичення"
1140 INPUT"N=";N
1142 C=0;F=0;R=0;M=0;S=0
1144 FOR K=1 TO N
1146 INPUT"Струм стока, мА; Ic=";J(K)
1148 INPUT"Напруга стока, В; Uc=";V(K)
1149 IF V(K)>U4 THEN GOTO 1176
1150 X=V(K)
1151 Y=J(K)*1E-3
1152 C=C+X^2;F=F+X^3;M=M+X^4
1153 R=R+X*Y;S=S+Y*X^2
1155 NEXT K
1157 W=(C*M)-F^2
1159 P=(C*S)-(R*F)
1160 B2=P/W
1161 D=R-(B2*F)
1162 B1=D/C
1163 B=ABS(B2);U4=B1/(2*B);I2=(B1^2)/(4*B)
1164 CLS
1166 PRINT"Ic=";B1;"*U";B2;"*U^2"
1168 PRINT"Параметр B=";B;"сін/B"
1169 PRINT
1170 PRINT
1172 PRINT
1173 GOTO 1184
1175 CLS
1176 PRINT"Панове! Будьте уважні!"
1178 PRINT"Задавайте значення напруги"
1180 PRINT"стока, які менші напруги насичення"
1182 GOTO 1134
1184 PRINT"Уведіть число вимірювань для"
1186 PRINT"діапазону напруг стока, які"
1188 PRINT"більші напруги насичення"
1190 INPUT"N=";N
1192 A=0;F=0;C=0;D=0
1194 FOR K=1 TO N
1196 INPUT"Струм стока, мА; Ic=";E(K)

```

```

1198 INPUT "Напруга стока, В; Uс=";O(K)
1200 X=O(K)
1202 Y=E(K)+1E-3
1204 A=A+X;F=F+Y;C=C+X^2
1206 D=D+(X*Y)
1208 NEXT K
1210 B1=(A*F-N*D)/(A^2-N*C)
1212 B0=(F-B1*A)/N
1214 L=B1/I2
1216 CLS
1218 PRINT "Iс=";B0;"+";B1;"*U"
1220 PRINT
1221 PRINT
1222 PRINT "Параметр L=";L
1223 PRINT
1224 PRINT
1225 PRINT
1226 PRINT "Параметри моделі МОН-транзистора:"
1227 PRINT
1228 PRINT
1229 PRINT "порогова напруга, В; Uо=";UO
1230 PRINT
1231 PRINT "В=";B;"сін/В"
1232 PRINT
1233 PRINT "L=";L;"1/В"
1234 PRINT
1235 PRINT "Графік будувати? так - 1"
1236 PRINT "ні - 0"
1238 INPUT H
1240 IF H=1 GOTO 1250
1242 IF H=0 GOTO 1246
1244 CLS;GOTO 1235
1246 GOTO 1640
1250 GOSUB 1000
1252 GOSUB 1020
1254 GOSUB 1031
1256 FOR U=0 TO 15 STEP .1
1257 IF U>U4 GOTO 1264
1258 I3=1
1259 I4=B*(2*U4*U-U^2)
1260 I=I3*I4
1261 IF I*1E3 >14 THEN I=0
1262 GOTO 1266
1264 I=I2*(1+L*(U-U4))
1265 IF I*1E3 >14 THEN I=0
1266 PRESET (32+(U*10),54+I*1E4),1
1268 NEXT U
1270 GOSUB 1035
1272 GOSUB 1068
1274 GOSUB 1600
1276 GOTO 1640
1300 CLS
1310 LOCATE 3,1: PRINT " П Р О Г Р А М А "
1320 PRINT
1330 PRINT " моделювання МОН-транзистора"
1340 PRINT
1350 PRINT " з індукованим каналом п-типу"

```

```

1360 LOCATE 11,1: PRINT" Програма складається із двох частин:
1370 PRINT"в першій частині визначаються параметри В і L моделі"
1380 PRINT
1390 PRINT" $I_c = B * [2 * (U_0 - U_0) * U_c - U_c^2]$ ; для  $U_c < U_{нас}$ "
1400 PRINT
1410 PRINT" $I_c = I_n * (1 + L * (U_c - U_{нас}))$ ; для  $U_c > U_{нас}$ "
1420 PRINT
1430 PRINT"в другій частині розраховуються ВАХ транзистора."
1440 LOCATE 20,1:PRINT" (C), 1993. Кафедра фізики напівпровідників,"
1445 PRINT" доц. Ю.Наконечний"
1450 GOSUB 1600
1480 CLS
1490 PRINT"Виберіть код:
1500 PRINT
1510 PRINT"визначення параметрів - 0"
1520 PRINT
1530 PRINT"розрахунок ВАХ - 1"
1540 PRINT
1550 INPUT"Уведіть код";COD
1560 IF COD=0 THEN 1101
1570 IF COD=1 THEN 20
1580 GOTO 1480
1600 LOCATE 23,1: PRINT"Для продовження тисніть любую клавішу"
1610 CX=INKEY$: IF CX="" THEN 1610
1620 RETURN
1640 PRINT "Бажаєте закінчити роботу в програмі? (Y/N)"
1650 CX=INKEY$: IF CX="" THEN 1650
1660 IF CX="N" OR CX="n" OR CX="T" OR CX="t" THEN 5
1670 END

```

## ДОТРИМАННЯ ПРАВИЛ І ЗАХОДІВ ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ ПРИ ВИКОНАНІ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

Виконуючи лабораторні роботи студенти мають справу з обладнанням, приладами, електричними схемами, в яких проходить електричний струм. Слід пам'ятати, що легковажність, неакуратність в користуванні ними можуть призвести до нещасних випадків, пошкоджень вимірювальних приладів, виникнення пожежі.

Перед початком лабораторних занять керівник проводить інструктаж з техніки безпеки. Про це робиться відповідний запис у спеціальному лабораторному журналі. При проведенні інструктивного заняття і в дальнішому при виконанні лабораторних робіт слід керуватись вимогами Правил, які твердять, що особи, які навчаються в лабораторії, можуть виконувати вмикання, перемикання, огляд і інші роботи з обладнанням лише з дозволу і під наглядом особи, яка проводить навчання (викладача). Відповідальність за дотримання вимог Правил і належне їх виконання несуть викладач і сам студент.

На першому занятті потрібно особливо відмітити, що на кожному робочому місці студентів є небезпечні місця з напругою 220 В змінного струму. Ця напруга підводиться до вимірювальних приладів.

Крім конкретних вказівок про небезпечні точки на робочому місці слід познайомити студентів з загальними рекомендаціями по додержанню ними Правил техніки безпеки в процесі виконання лабораторних робіт. Примірний зміст таких рекомендацій може бути такий.

### ВКАЗІВКИ ПО ДОТРИМАННЮ ПРАВИЛ ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ ПРИ РОБОТІ В ЛАБОРАТОРІЇ.

Перед вмиканням вимірювальних приладів, лабораторних макетів необхідно:



- перевірити наявність і надійність заземлення;
- перевірити правильність приєднання провідників, якими підводиться живлення;

- органи управління вимірвальних приладів та вторинних джерел живлення слід перевести у вихідне положення (найбільший діапазон вимірювань, найнижча вихідна напруга).

Вмикання джерел живлення на робочому місці, всіх вимірвальних приладів проводиться керівником занять, або лише з його дозволу.

#### ЗАБОРОНЯЄТЬСЯ:

- самостійно вмикати живлення лабораторії на щитку силової мережі;
- самостійно (без дозволу викладача) вмикати, або вимикати живлення робочих місць;
- переміщувати лабораторний макет, усувати виявлені неполадки електричних схем макету;
- проводити заміну запобіжників, елементів конструкції, ремонт увімкнених приладів;
- залишати без нагляду прилади і лабораторний макет, до яких підведене живлення.

## СПИСОК

## РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Пасынков В. В., Чиркин Л. К. Полупроводниковые приборы: Учеб. для вузов. - 4-е изд., перераб. и доп. - М.: Высш. шк., 1987.
2. Тугов Н. М. и др. Полупроводниковые приборы: Учеб. для вузов /Н. М. Тугов, Б. А. Глебов, Н. А. Чарыков; Под ред. В. А. Лабунцова. - М.: Энергоатомиздат, 1990.
3. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: В 2-х книгах. Пер. с англ. - 2-е перераб. и доп. изд. - М.: Мир, 1984.
4. Викулин И. М., Стафеев В. И. Физика полупроводниковых приборов. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Радио и связь, 1990. -264 с.

## ЗМІСТ

Передмова . . . . .	3
Розділ перший. Загальні відомості . . . . .	5
1. Лабораторне обладнання . . . . .	5
2. Методика проведення лабораторних занять . . . . .	7
3. Навчальні програми . . . . .	9
Розділ другий. Лабораторні роботи . . . . .	11
<i>Лабораторна робота № 1. Дослідження випрямних діодів . . . . .</i>	<i>11</i>
<i>Лабораторна робота № 2. Дослідження стабілітронів та варикапів . . . . .</i>	<i>26</i>
<i>Лабораторна робота № 3. Дослідження статичних характеристик біполярного транзистора . . . . .</i>	<i>35</i>
<i>Лабораторна робота № 4. Вимірювання параметрів біполярного транзистора та перевірка моделі Молля-Еберса . . . . .</i>	<i>43</i>
<i>Лабораторна робота № 5. Залежність параметрів біполярного транзистора від режиму роботи . . . . .</i>	<i>53</i>
<i>Лабораторна робота № 6. Дослідження статичних характеристик напівпровідникових приладів з від'ємним опором . . . . .</i>	<i>61</i>
<i>Лабораторна робота № 7. Дослідження статичних характеристик польових транзисторів з р-п переходом . . . . .</i>	<i>75</i>
<i>Лабораторна робота № 8. Дослідження статичних характеристик МДН-транзисторів . . . . .</i>	<i>83</i>
Додаток 1.	
Програма "Моделювання напівпровідникового діода" . . . . .	97
Програма "Моделювання тунельного діода" . . . . .	99
Програма "Моделювання біполярного транзистора" . . . . .	105
Програма "Моделювання МОН-транзистора" . . . . .	112
Додаток 2. Дотримання правил і заходів техніки безпеки при виконанні лабораторних робіт . . . . .	119
Список рекомендованої літератури . . . . .	121

**Навчальний посібник**

**Наконечний Юрій Сергійович**

**Феделеш Василь Іванович**

**Молнар Олександр Олександрович**

**НАПІВПРОВІДНИКОВІ ПРИБАДИ**

**Лабораторний практикум**

Віддруковано на виробничо-видавничому комбінаті "Патент"  
294013, м.Ужгород, вул. Гагаріна, 101.