

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Державний вищий навчальний заклад
Донецький національний технічний університет

Методичні вказівки
до виконання лабораторних робіт
з курсу "Твердотіла електроніка"

(Для студентів спеціальності 6.05080202
"Електронні пристрої та системи",
напряму підготовки 6.050802 «Електронні пристрої
та системи», 0508 «Електроніка»)

Затверджено на засіданні
кафедри "Електронна техніка"
протокол № 6 від 26.01.2011 р.

Донецьк
ДонНТУ 2011

УДК 621.382

Методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу «Твердотельная электроника»/ Сост. Н.Г. Винниченко, В.Ф. Сенько, А.А. Штепа, С.В. Авраменко - Донецьк, 2011. - С. – Укр. язык/.

Приведены цели и задачи лабораторных работ, порядок их выполнения, требования к содержанию и оформлению отчетов, задания на лабораторные работы, методические указания к их выполнению, а также основные теоритические положения.

Составители: Н.Г. Винниченко, канд. техн. наук, доцент
В.Ф. Сенько, канд. техн. наук, доцент
А.А. Штепа, ассистент
С.В. Авраменко, магистр

Відповідальний за випуск: А. А. Зорі д.т.н., професор

Рецензент: О. Г. Ворнцов, доктор техн. наук, професор

Уведення

Методичні вказівки призначені для студентів спеціальності "Електронні пристрої та системи" (6.05080202) і є керівництвом до лабораторних робіт з курсу "Твердотіла електроніка". Мета цього курсу - вивчити фізичні принципи напівпровідникових приладів, їх побудову, основні характеристики та параметри.

Лабораторні роботи починаються з вивчення теоретичних основ роботи пристрою, методики виконання лабораторних робіт і аналізу отриманих результатів, передбачають вирішення студентом ряду завдань, що містять елементи НДРС.

Підготовка до лабораторних робіт повинна здійснюватися по лекційному матеріалу і рекомендованій літературі. При підготовці до лабораторних занять студент повинен твердо усвідомити мету і порядок виконання роботи, теоретичні основи досліджуваного пристрою, його призначення, характеристики та параметри.

Лабораторні заняття по всьому циклу проводяться фронтальним методом, паралельно з лекційним курсом на універсальному лабораторному стенді.

При виконанні лабораторних робіт необхідно суворо дотримуватися правил техніки безпеки. Якість підготовки до лабораторних занять перевіряється викладачем шляхом опитування студентів перед лабораторними роботами. Згідно з наведеними в описі лабораторних робіт вимогами кожен студент складає звіти за роботами. Звіти студентами захищаються в устанвленном в лабораторії порядку.

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ДІОДІВ

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

Дослідження германієвого діода

Мета роботи: вивчити конструкцію і принцип дії напівпровідникового германієвого діоду, зняти вольт-амперні характеристики діода, експериментально визначити параметри.

Напівпровідниковим діодом називають напівпровідниковий прилад з одним електричним випрямним р-n-переходом і двома выводами.

За функціональним призначенням діоди ділять на випрямляючі, універсальні, імпульсні, детекторні, перемикаючі, стабілітрони (опорні), тунельні, фотодіоди та ін.

Більшість напівпровідникових діодів виготовляють на основі несиметричних р-n-переходів. Низькоомну область діодів називають емітером, а високоомну - базою. Для створення переходів з вентильними властивостями використовують р-n-, р-i-, n-i-переходи, а також переходи метал-напівпровідник.

У рівноважному стані через р-n-перехід протікає струм, що має дві складові. Одна обумовлена дифузією основних носіїв заряду в область, де вони є неосновними, інша - дрейфом неосновних носіїв заряду теплового походження. Ідеалізована вольт-амперна характеристика діода при прямому включенні описується рівнянням:

$$I_{np} = I'_T - I_T = I_T \cdot (e^{\frac{u}{\varphi_T}} - 1)$$

де I_T - струм, що протікає в одному напрямку через р-n-перехід та перебуває в рівноважному стані, називають тепловим чи зворотним струмом насичення;

$I'_T = I_T \cdot e^{\frac{u}{\varphi_T}}$ - струм дифузії основних носіїв заряду. I_T за рахунок зниження потенційного бар'єру збільшується у $e^{\frac{u}{\varphi_T}}$ разів і є функцією прикладеної напруги (рисунок 1.1а).

При зворотному включенні діода загальний потенційний бар'єр підвищується. Рух основних носіїв через р-n-перехід зменшується і при деякому значенні напруги зовсім припиниться, тобто в цьому випадку електрони і дірки почнуть рухатися від р-n-переходу і дефіцит вільних носіїв заряду в р-n-переході збільшиться.

При малих значеннях зворотної напруги через перехід рухаються основні носії заряду, викликаючи протилежно спрямований струм:

$$I_T = I_T \cdot e^{\frac{-u}{\varphi_T}}$$

В результаті струм р-п-переходу:

$$I = I_T - I_T = I_T \cdot (e^{\frac{u}{\varphi_T}} - 1)$$

Тепловий струм, викликаний рухом неосновних носіїв заряду залишається незмінним, а струм, викликаний дифузією основних носіїв заряду, зменшується за експоненціальним законом.

У реальних діодах пряма і зворотні гілки вольт-амперної характеристики відрізняються від ідеалізованої. Це обумовлено тим, що тепловий струм I_T при зворотному відкритті становить лише частину зворотного струму діода, а при прямому включенні впливає падіння напруги на опір бази діода (рисунок 1.1а).

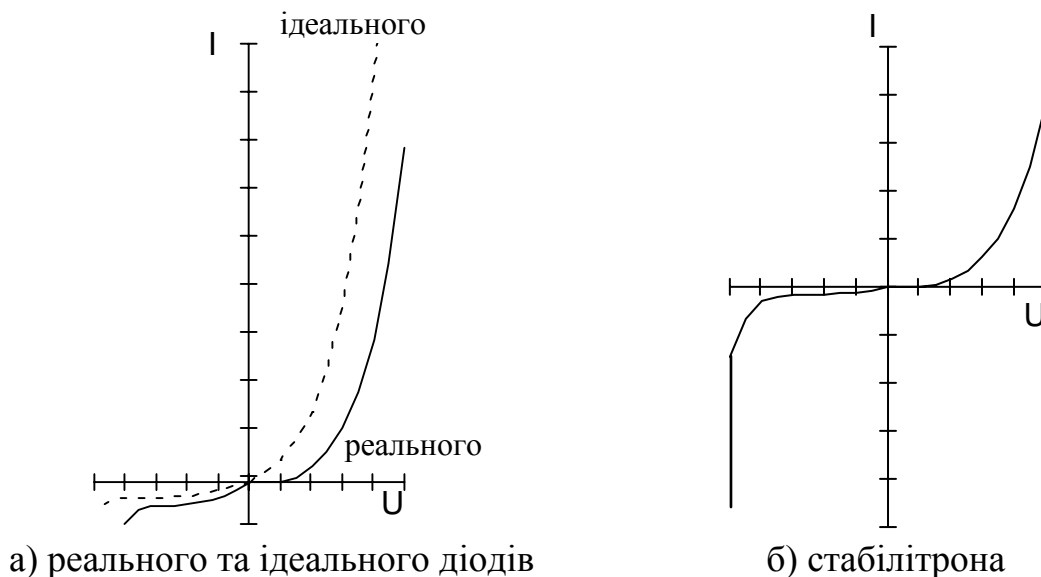


Рисунок 1.1-Вольт-амперні характеристики діодів

З урахуванням падіння напруги на базі діода рівняння прямої гілки вольт-амперної характеристики буде:

$$I = I_T \cdot (e^{\frac{u - I r_b}{\varphi_T}} - 1)$$

де r_b - омичний опір бази діода.

При збільшенні зворотної напруги може статися пробій р-п-переходу діода. Під пробієм р-п-переходу розуміють значне зменшення зворотного опору, при цьому зростає зворотний струм при збільшенні зворотної напруги.

Розрізняють три види пробіїв: тунельний, лавиний і тепловий.

В основі тунельного пробою лежить тунельний ефект, тобто перехід електронів крізь потенціальний бар'єр, висота якого більше, ніж енергія носіїв заряду.

Тепловий пробій виникає в результаті розігріву р-п-переходу, коли кількість теплоти, що виділяється струмом в р-п-переході, більше кількості теплоти, що відводиться від нього.

Лавиний пробій викликається ударною іонізацією, яка відбувається тоді, коли напруженість електричного поля, що викликана зворотною напругою, є досить великою. При лавинному пробіі напруга на р-п-переході залишається постійною, і при обмеженні струму та знятті напруги перехід відновлює свої властивості.

Тепловий пробій р-п-переходу незворотний і призводить до руйнування переходу.

Тунельний і лавиний пробіі використовуються в напівпровідникових стабілітронах (опорних діодах), призначених для стабілізації напруги.

Механізм пробою може бути тунельним, лавинним або змішаним.

У низьковольтних стабілітронів (з низьким опором бази) більш ймовірний тунельний пробій. У стабілітронів з високоомною базою пробій носить лавинний характер.

Матеріали, використовувані для створення р-п-переходів стабілітронів, мають високу концентрацію домішок, а тому, напруженість електричного поля в р-п-переході значно вище ніж у звичайних.

При відносно невеликих зворотних напругах в р-п-переході виникає сильне електричне поле, яке викликає електричний пробій. Струм через перехід змінюється в значних межах, а значення напруги на р-п-переході залишається майже постійним (рисунок 1.1б).

Порядок виконання роботи.

1. На лабораторнім стенді зібрати схему для зняття вольт-амперних характеристик германієвого діода, ввікненому в прямому (рисунок 1.2а) та зворотному (рисунок 1.2б) напрямках.

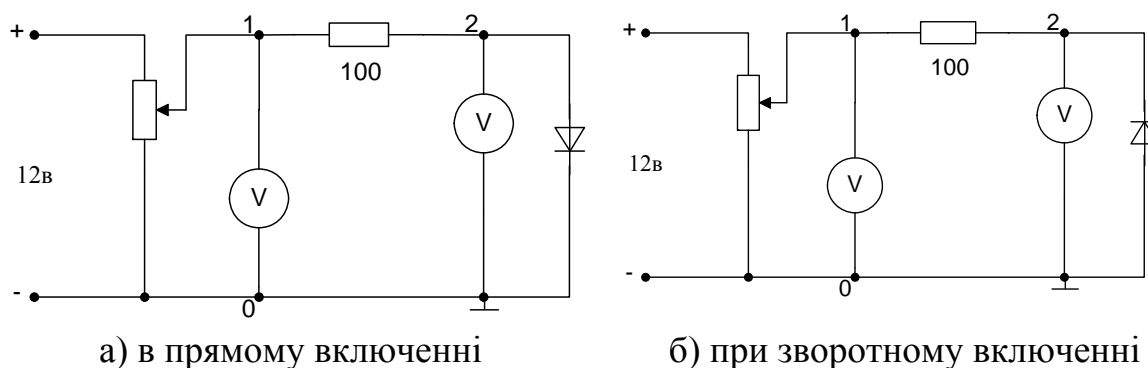


Рисунок 1.2- Схеми для зняття ВАХ діодів.

2. Змінюючи напругу з допомогою потенціометра від 0 до 5 В зняти вольт-амперну характеристику діода, включеного в прямому напрямку. Величину струму визначати непрямим шляхом, для чого необхідно знайти падіння напруги на резисторі 100 Ом.

U_{01}						
$U_{02} = U_d$						
$\Delta U = U_{01} \cdot U_{02}$						
$I_d = \Delta U / R$						

3. Зняти вольт-амперну характеристику діода, відкненого в зворотному напрямку.

Зміст звіту.

1. Схеми, данні експерименту, побудовані вольт-амперні характеристики діода.
2. Визначені за даними експерименту параметри еквівалентних схем заміщення для діода. Побудувати еквівалентні схеми заміщення.

Контрольні питання.

1. Як змінюються характеристики діодів від температури?
2. В чому відмінність вольт-амперних характеристик діодів на основі кремнію та германію?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

Дослідження кремнієвого діода

Мета роботи: вивчити конструкцію і принцип дії напівпровідникового кремнієвого діоду, зняти вольт-амперні характеристики діода, експериментально визначити параметри.

Порядок виконання

1. На лабораторнім стенді зібрати схему для зняття вольт-амперних характеристик кремнієвого діода, відкненому в прямім, (рисунок 1.2а) та зворотному (рисунок 1.2б) напрямках, для цього в схемах замінити германієвий діод на кремнієвий.
2. За даними викладача визначити напругу на вході U_{01} для германієвого діоду, який має пряме падіння напруги 0,75 В і максимальний струм 50 мА. Змінюючи напругу за допомогою потенціометра від 0 до 5В зняти вольт-

амперну характеристику діода, включеного в прямім напрямку. Величину струму визначати непрямим шляхом, для чого необхідно знайти падіння напруги на резисторі 100 Ом.

U_{01}						
$U_{02} = U_d$						
$\Delta U = U_{01} - U_{02}$						
$I_d = \Delta U / R$						

3. Зняти вольт-амперну характеристику діода, відкненого в зворотному напрямку.

4. Відкнути звуковий генератор на вхід схеми, установити частоту порядку 1000 Гц і напругу, задану викладачем, та зняти осцилограми напруг і струмів на діоді та опорі.

Зміст звіту.

1. Схеми, данні експерименту, побудовані вольт-амперні характеристики діода.
2. Визначені за даними експерименту параметри еквівалентних схем заміщення для діода. Побудувати еквівалентні схеми заміщення.
3. Для змінних струмів і напруг визначити середнє значення струму і напруги в колі, діюче значення струму та напруги.

Контрольні питання.

1. Як змінюються характеристики діодів при зміні температури?
2. В чому відмінність вольт-амперних характеристик діодів на основі кремнію та германію?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

Дослідження стабілітрону

Мета роботи: вивчити конструкцію і принцип дії напівпровідникового стабілітрону, зняти вольт-амперні характеристики стабілітрону, експериментально визначити параметри.

Порядок виконання

1. На лабораторнім стенді зібрати схему для зняття вольт-амперних характеристик стабілітрона, відкненому в зворотному, (рисунок 1.2а).

Замінити діод на стабілітрон. Дані стабілітрона задаються викладачем відповідно до даних в довіднику.

2. Змінюючи напругу за допомогою потенціометра від 0В до максимальної зняти вольт-амперну характеристику стабілітрона. Величину струму визначати непрямим шляхом, для чого необхідно знайти падіння напруги на резисторі 100 Ом.

U_{01}						
$U_{02} = U_d$						
$\Delta U = U_{01} - U_{02}$						
$I_d = \Delta U / R$						

Зміст звіту.

1. Схеми, данні експерименту, побудовані вольт-амперні характеристики стабілітрона.
2. Визначені за даними експерименту параметри еквівалентних схем заміщення для стабілітрона. Побудувати еквівалентні схеми заміщення.
3. За даними, виданими викладачем, визначити коефіцієнти стабілізації напруги в заданих межах.

Контрольні питання.

1. Як змінюються характеристики діодів від зміни температури?
2. В чому відмінність вольт-амперних характеристик діодів на основі кремнію та германію?

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ТРАНЗИСТОРІВ

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4

Дослідження кремнієвого біполярного транзистора

Мета роботи: познайомитись з конструкцією і принципом дії кремнієвого біполярного транзистора, експериментально зняти вольт-амперні характеристики і визначити параметри еквівалентної схеми заміщення транзистору.

Біполярний транзистор (БПТ) - це трьохелектродний напівпровідниковий прилад, що має два взаємодіючих р-n-переходи. Біполярними ці прилади називаються тому, що для забезпечення їх нормальної роботи потрібно два типи носіїв зарядів: основні і неосновні, позитивні та негативні. У транзисторі є три області напівпровідника, що

чергуються за типом електропровідності. Залежно від порядку чергування областей розрізняють транзистори типів р-п-р та п-р-п (рисунок 4.1).

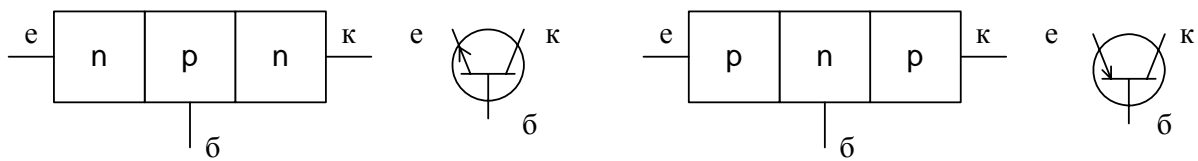


Рисунок 4.1- Типи біполярних транзисторів.

Одну з крайніх областей легують сильніше, її використовують в режимі інжекції і називають емітером, проміжну - базою, іншу крайню область легують слабо і називають колектором. Основним назначенням колектора є екстракція носіїв заряду з області бази, тому розміри колектора значно більше, ніж емітера.

Частина бази, що знаходиться між колектором і емітером, через яку проходять носії заряду в активному режимі, називають активною шириною бази. Взаємодія між двома р-п-переходами буде існувати тільки тоді, коли активна ширина бази буде багато менше дифузійної довжини неосновних носіїв. У цьому випадку основна частина носіїв пролітає від емітера до колектора. Перший перехід називається емітерним (емітер - база), другий перехід (база-колектор) - колекторним. Кожен з переходів може бути зміщеним в прямім, або в зворотному напрямку. Залежно від цього розрізняють такі три режими роботи транзистора.

1. Основний активний режим, при якому емітерний перехід зміщений у прямім напрямку, а колекторний у зворотному. Це відкнення називається також нормальним. У цьому режимі транзистор використовується в більшості схем (підсилювальні, перемикаючі).

Інверсне відкнення транзистора (емітерний перехід - зворотний напрямком, колекторний - пряме) використовується рідко, в деяких перемикаючих схемах.

2. Режим відсічення - обидва переходи зміщені у зворотному напрямі, через транзистор проходять невеликі струми.

3. Режим насичення - обидва переходи зміщені в прямім напрямку, при цьому через транзистор проходять великі струми.

В активному режимі здійснюється ефективне управління транзистором, в режимах відсічення і насичення управління транзистором практично відсутнє. Основні показники транзистора визначаються процесами, що відбуваються в базі. У залежності від розподілу домішок в базі може існувати або бути відсутнім електричне поле. При відсутності струму в базі існує електричне поле, яке сприяє руху неосновних носіїв заряду від емітера до колектору, то транзистор називається дрейфовий, а якщо поле в базі відсутнє - то бездрейфовим.

Транзистор має три електроди. При використанні його як підсилювального пристрою з двома входними і двома вихідними затисками, один з електродів повинен бути спільним для входного та вихідного кола. В залежності від того, який електрод є спільним для входного та вихідного ланцюгів (по змінній складовій), розрізняють три основні схеми вимкнення транзистора: із спільною базою (СБ), з спільним емітером (СЕ), із спільним колектором (СК).

На рисунку 4.2 схематично показано розподіл струмів транзистора (типу р-п-р) при вимкненні його в схему із спільною базою. Вхідний ланцюг транзистора складається з джерела постійного струму E_e та змінного джерела входного сигналу $U_{вх}$ емітерного переходу. Вихідний ланцюг складається з джерела постійного сигналу E_n , навантажувального опору R і колекторного переходу.

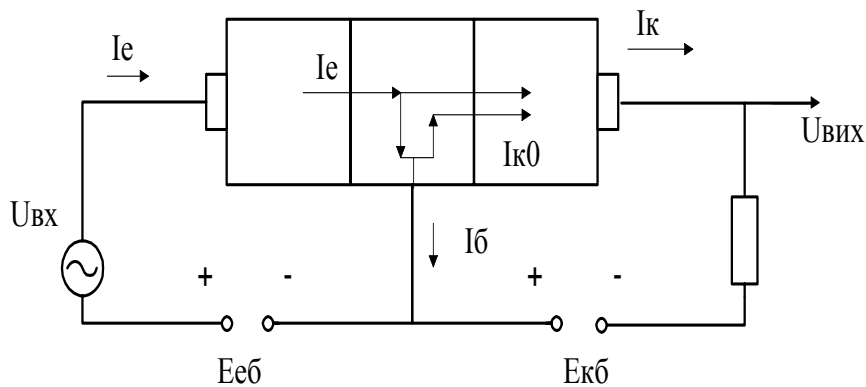


Рисунок 4.2- Схема вимкнення транзистора в активному режимі та розподіл струмів у транзисторі.

Для нормального вимкнення транзистора емітерний перехід вмикають в прямій напрямку, колекторний - у зворотному, а база є загальним електродом для входного та вихідного ланцюгів.

При відсутності входного сигналу ($U_{вх}=0$) в емітерному та колекторному ланцюгах протікають постійні струми - I_e , I_k , а також струм бази I_b .

При зсуві емітерного переходу в прямій напрямку буде відбуватися інжекція дірок в базу, де вони стають неосновними нерівноважними носіями заряду. У базі інжектвані дірки рекомбінують з електронами - основними носіями бази.

Для зменшення витрат дірок в базі застосовують ряд заходів: зменшують товщину бази, виводи бази розміщують далеко від емітера, збільшують площу колектора і т.д. Тоді основна частина дірок, що інжектується до бази, досягає колекторного переходу, відбувається екстракція дірок в колекторний ланцюг: $I_k = \alpha I_e$, де α - коефіцієнт передачі струму емітером. Ця складова частина колекторного струму залежить від струму емітера.

При зворотному відкритті колекторного переходу через нього ще протікає власний зворотний струм $I_{кбз}$. Зворотний струм колекторного переходу складається з струму екстракції, термоструму та струму поверхневої провідності. Тоді колекторний і базовий струми будуть рівні:

$$\begin{aligned} I_k &= \alpha I_e + I_{кбз}; & I_{кб} &\ll \alpha I_e; \\ I_k &\approx \alpha I_e & I_k &= I_e \\ I_b &= (1 - \alpha) I_e + I_{кбз} \end{aligned}$$

Де α - коефіцієнт передачі емітерного струму ($\alpha < 1$).

Таким чином, транзистор являє собою керований прилад, його колекторний струм залежить від струму емітера. Потужність, яка витрачається для створення емітерного струму, мала, а потужність, що розсіюється в колекторному ланцюзі, значна внаслідок великого опору переходу, транзистор може керувати значною потужністю в колекторному ланцюзі за допомогою невеликих потужностей емітерного ланцюга.

У схемі з спільною базою залежність між струмами і напругами транзистора може бути виражена різними системами рівнянь, які будуть характеризувати вхідні і вихідні характеристики, що найбільш часто застосовуються, характеристики передачі струму і зворотного зв'язку, які застосовуються рідко. Найбільш часто застосовується наступна система рівнянь:

$$I_e = f(U_{еб}; U_{кб});$$

У декартовій системі координат ці рівняння характеризують вхідні характеристики:

$$I_e = f(U_{еб}) \quad U_{кб} = \text{const};$$

і вихідні характеристики (рисунок 4.3):

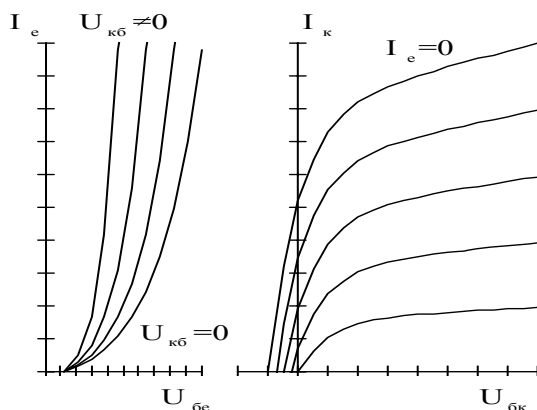


Рисунок 4.3 - Вхідні та вихідні

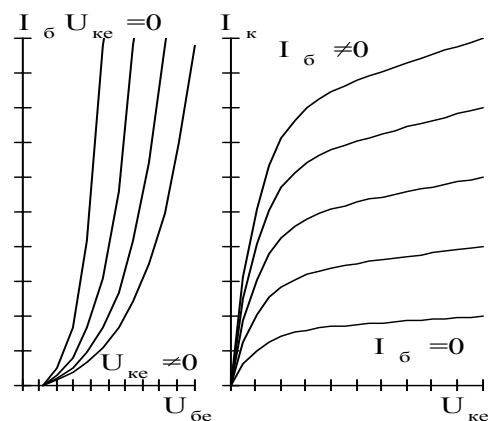


Рисунок 4.4 - Вхідні та вихідні

характеристики транзистора для
схеми з СБ.

характеристики транзистора для
схеми з СЕ.

$$I_k = f(U_{кб}) U_{еб} = \text{const} \text{ або } I_e = \text{const};$$

Для схеми з СЕ транзистор описується іншою системою рівнянь:

$$I_б = f(U_{бе}; U_{ке}) \quad I_k = f(U_{бе}; U_{ке});$$

Відповідно змінюються як вхідні характеристики

$$I_б = f(U_{бе}) U_{ке} = \text{const};$$

так і вихідні (рисунок 4.4):

$$I_k = f(U_{ке}) U_{бе} = \text{const} \text{ або } I_б = \text{const};$$

У схемі з СК система рівнянь має вигляд:

$$\begin{aligned} I_б &= f(U_{бк}; U_{ек}); \\ I_e &= f(U_{бк}; U_{ек}); \end{aligned}$$

З ряду причин для схеми з СК використовують характеристики з СЕ.

У розгляді принципу дії транзистора в схемі (рисунок 4.2) впливає, що при певних умовах напруги та струми транзистора можна представити у вигляді:

$$\begin{aligned} U_{еб} &= U_{ебн} + U_{вхм} \sin(\omega t); \\ I_б &= I_{бн} + I_{бм} \sin(\omega t); \\ I_k &= I_{кн} + I_{км} \sin(\omega t); \end{aligned}$$

тобто як суму постійної і змінної складових. При роботі транзистору в різних схемах особливе значення мають співвідношення між змінними складовими напруг і струмів транзистора.

При досить малому вхідному сигналі $U_{вхм}$ для змінних складових транзистор можна представити чотирьохполюсником, який можна описати системою з двох рівнянь. У транзисторній техніці застосовуються три основні способи запису системи рівнянь:

1) Система z-параметрів:

$$\begin{aligned} U_1 &= Z_{11}I_1 + Z_{12}I_2 \\ U_2 &= Z_{21}I_1 + Z_{22}I_2 \end{aligned}$$

2) Система Н-параметрів:

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

$$I_2 = H_{21}I_1 + H_{22}U_2$$

3) Система Y- параметрів:

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

$$I_2 = Y_{21}U_1 + Y_{22}U_2$$

Найбільш часто застосовуються система Н-параметрів, тому що вона легко визначається експериментальним шляхом і має конкретний фізичний зміст. Значення Н-параметрів залежать від схеми вимкнення транзистора.

Поряд зі схемами заміщення в Z, Y і Н-параметрах широко застосовується й фізична схема заміщення, параметри якої безпосередньо визначити неможливо, тому їх визначають шляхом перерахунку за відомими. Між усіма параметрами можна встановити взаємозв'язок, використовуючи еквівалентність чотириполісників моделюючих транзистор для різних схем вимкнення.

Порядок виконання роботи.

1. На лабораторнім стенді зібрати схему (рисунок 4.5) для зняття вольт - амперних характеристик транзистора, вимкненого за схемою з спільним емітером.

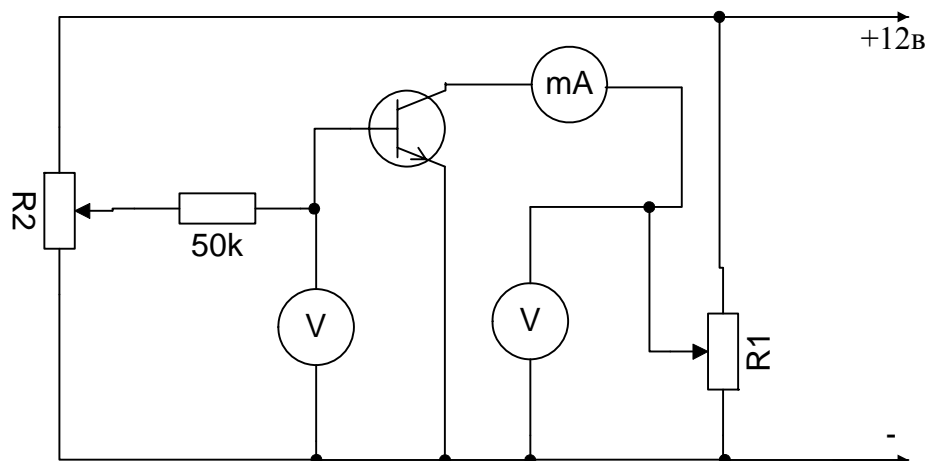


Рисунок 4.5 - Схема зняття ВАХ транзистора

2. Зняти сімейство входних характеристик транзистора за схемою з спільним емітером

$$I_b = f(U_{be}) \text{ при } U_{ce} = 0\text{В}; +2\text{В}; +5\text{В}; +10\text{В};$$

3. Зняти сімейство вихідних характеристик у схемі з СЕ

$$I_k = f(U_{ке}) \text{ при } I_b = 0, 50, 100, 150, 200 \text{ [мкА]}$$

4. Встановити режим роботи транзистора $I_b = 100 \text{ [мкА]}$; $U_{ке} = 4\text{В}$ визначити напругу $U_{бе}$ і струм I_k . Занести дані в таблицю 4.1 рядок 1.

Таблиця 4.1 Дані для визначення h-параметрів.

№	I_b	$U_{бе}$	$U_{ке}$	I_k
1				
2				
3				

5. Дати прирощення напруги E_k . Встановити за допомогою резистора значення струму бази, отримане в п. 3, зняти показання приладів, заповнити таблицю 2.1 рядок 2.

6. Встановити за допомогою резистора R значення напруги $U_{ке}$, отримане в п. 4, зняти показання приладів і заповнити таблицю 2.1 рядок 3.

7. Визначити збільшення ΔI_b , $\Delta U_{бе}$, $\Delta U_{ке}$, ΔI_k і розрахувати h-параметри транзистора за результатами вимірювань у п.п. 3, 4, 5.

Зміст звіту

1. Представити умовне позначення, цоколювку і параметри досліджуваного транзистора, що взято з довідника.
2. Представити схему (рисунок 4.5), результати вимірювань п.п. 1, 2 і побудовані по ним характеристики біполярного транзистора.
3. Представити таблицю, заповнену результатами вимірювань у п.п. 3, 4, 5.
4. Визначити h-параметри за результатами експерименту.
5. За вхідним і вихідним характеристикам в робочій точці визначити h-параметри графічно.
6. Представити схему заміщення транзистора в h-параметрах.
7. Привести фізичну схему заміщення транзистора і визначити її параметри через h-параметри.

Контрольні питання

1. Що таке транзистор і для чого він використовується?
2. Назвіть схеми включення транзистора і приведіть загальний вигляд вхідних і вихідних характеристик для кожної зі схем включення.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5

Дослідження германієвого біполярного транзистора

Мета роботи: познайомитись з конструкцією і принципом дії германієвого біполярного транзистора, експериментально зняти вольт-амперні характеристики і визначити параметри еквівалентної схеми заміщення транзистору.

Порядок виконання роботи.

1. На лабораторнім стенді замінити кремнієвий транзистор на германієвий і зібрати схему (рисунок 4.5) для зняття вольт - амперних характеристик транзистора, відкритого за схемою з спільним емітером.
2. Зняти сімейство входних характеристик транзистора за схемою з спільним емітером

$$I_b = f(U_{be}) \text{ при } U_{ce} = 0V; +2V; +5V; +10V;$$

3. Зняти сімейство вихідних характеристик у схемі з СЕ

$$I_c = f(U_{ce}) \text{ при } I_b = 0, 10, 20, 30, 40 \text{ [мкА]}$$

4. Встановити режим роботи транзистора $I_b = 20 \text{ [мкА]}$; $U_{ce} = 5V$ визначити напругу U_{be} і струм I_c . Занести дані в таблицю 5.1 рядок 1.

Таблиця 5.1 Дані для визначення h-параметрів.

№	I _b	U _{be}	U _{ce}	I _c
1				
2				
3				

5. Дати прирощення напруги E_k . Встановити за допомогою резистора значення струму бази, отримане в п. 4, зняти показання приладів, заповнити таблицю 5.1 рядок 2.
6. Встановити за допомогою резистора R значення напруги U_{ce} , отримане в п. 4, дати прирощення струму бази зняти показання приладів і заповнити таблицю 5.1 рядок 3.
7. Визначити збільшення ΔI_b , ΔU_{be} , ΔU_{ce} , ΔI_c і розрахувати h-параметри транзистора за результатами вимірювань у п.п. 3, 4, 5.

Зміст звіту

1. Представити умовне позначення, цоколювку і параметри досліджуваного транзистора, що взято з довідника.
2. Представити схему (рисунок 4.5), результати вимірювань п.п. 1, 2 і побудовані по ним характеристики германієвого біполярного транзистора.
3. Представити таблицю, заповнену результатами вимірювань у п.п. 3, 4, 5.
4. Визначити h -параметри за результатами експерименту.
5. За вхідним і вихідним характеристикам в робочій точці визначити h -параметри графічно.
6. Представити схему заміщення транзистора в h -параметрах.
7. Привести фізичну схему заміщення транзистора і визначити її параметри через h -параметри.

Контрольні питання

1. Що таке транзистор і для чого він використовується?
2. Назвіть схеми включення транзистора і приведіть загальний вигляд вхідних і вихідних характеристик для кожної зі схем включення

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6

Дослідження польового транзистора з керованим р-п переходом

Мета роботи: Експериментально зняти статичні характеристики польових транзисторів і визначити їх основні параметри.

Лабораторна робота виконується на універсальному лабораторному стенді. Зібрати схему для зняття статичних вольт-амперних характеристик польового транзистора з каналом n-типу.

Напівпровідникові прилади, робота яких заснована на модуляції опору напівпровідникового матеріалу поперечним електричним полем, називаються польовими транзисторами.

У них при створенні електричного струму беруть участь носії заряду тільки одного типу: електрони чи дірки.

Польові (уніполярні) транзистори бувають двох типів: з керуючим р-п-переходом і зі структурою метал-діелектрик-напівпровідник (МДН-транзистори). Відмінністю польового транзистора від біполярного транзистора є те, що він керується електричним полем, що створюється вхідною напругою.

Транзистор з керуючим р-п-переходом являє собою пластину з напівпровідникового матеріалу, що має електропровідність типу n або p, від кінців якого зроблені два виводи - електроди стоку і виток. Уздовж пластини виконаний електричний перехід р-п, від якого зроблено третій вивод - затвор. Зовнішня напруга прикладається між стоком і витком так, щоб проходив електричний струм, а напруга, прикладена до затвора, зміщує електричний перехід у зворотному напрямку.

Область напівпровідника, що розташована між переходами називається каналом, і її опір залежить від напруги на затворі. Розміри переходу збільшуються з підвищенням прикладеної до нього зворотної напруги, а збільшення області, збідненої носіями заряду, призводить до підвищення електричного опору каналу. Електрод, від якого починають рух основні носії заряду в каналі, називають витком, а електрод, до якого рухаються - стоком.

Канал польового транзистора може бути виконаний з напівпровідника з провідністю типу n або p, відповідно і напруга, прикладена до затвора буде різнополярною.

Основними характеристиками польового транзистора будуть:

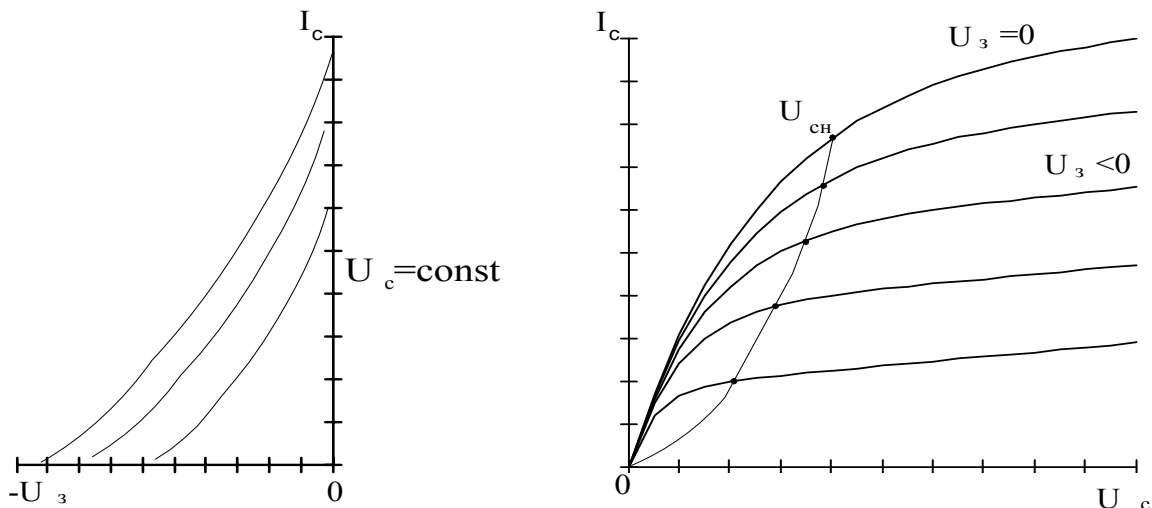


Рисунок 6.1-ВАХ польового транзистора з керованим р-п-переходом

1. Стокова вольт-амперна характеристика:

$$I_c = f(U_c) \text{ при } U_3 = \text{const};$$

2. Стокозатворні - $I_c = f(U_3)$ при $U_c = \text{const}$ (див. рис. 6.1)

Напруга між затвором і стоком, при якому струм стоку досягає заданого низького значення ($I_c \Rightarrow 0$) називають напругою відсічення польового транзистора $U_{зв}$ відс. При малих напругах $U_{св}$ і малому струмі I_c транзистор веде себе як лінійний опір. При зростанні $U_{св}$ характеристика $I_c = f(U_c)$ все сильніше відхиляється від лінійної, що пов'язано зі звуженням каналу стокового кінця. При певному значенні струму настає режим насичення,

при якому I_c дещо змінюється зі збільшенням U_c . Напруга, при якій настає режим насичення, називається напругою насичення. Вплив $U_{зв}$ і $U_{св}$ на ширину каналу практично однаковий, то

$$U_{зв\ відс} | U_{сн} < U_{с\ нас} = U_{св\ нас} | U_{зв} = 0;$$

$$U_{нс\ нас} | U_{зн} \neq 0 | U_{зн\ відс} | - | U_{зн} |;$$

Отже, насичення буде наступати при меншій напрузі $U_{св}$. Так як управління польовим транзистором здійснюється напругою на затворі, то для кількісної оцінки керуючої дії затвора використовують крутизну характеристики.

$$S = \frac{dI_c}{dU_{зв}} | U_{св} = const ;$$

Посилувальні властивості ПТ характеризують коефіцієнтом посилення:

$$r_i = \frac{dU_{св}}{dI_c} | U_{з} = const ; \quad \mu = - \frac{dU_{св}}{dU_{з}} | I_{с-} = const ;$$

Параметри транзистора, що наведені вище пов'язані між собою:

$$\mu = S \cdot r_i$$

Порядок виконання роботи

1. Змінюючи напругу на стоці від 0 до 10В зняти ВАХ польового транзистору:

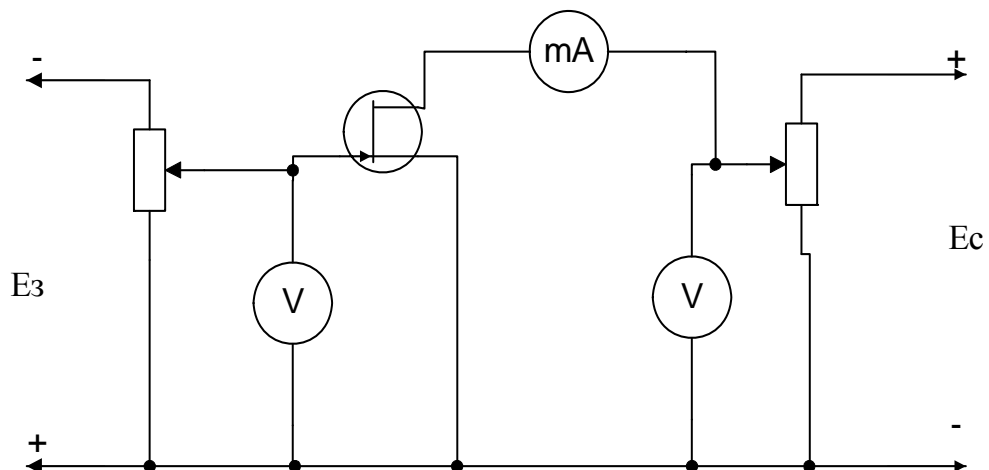


Рисунок 6.2 - Схема для зняття ВАХ польового транзистора з керованим р-п-переходом

- а) сімейство вихідних (стокових) ВАХ транзистора з каналом n-типу при різних значеннях $U_{зв}$.
- б) сімейство ВАХ передачі (стокозатворні) транзистора для різних значень $U_{св}$.
2. Заповнити таблицю 6.1 вимірювань для кожної ВАХ.

Таблиця 6.1 Дані вимірювань для побудови ВАХ транзистора.

№	$U_3 = 0$		$U_3 = -0.5$		$U_3 = -1.5$		$U_3 = 0.5$	
	I_c	U_c	I_c	U_c	I_c	U_c	I_c	U_c
1								
2								

	$U_c = 2$		$U_c = 5$		$U_c = 7$		$U_c = 10$	
	I_c	U_3	I_c	U_3	I_c	U_3	I_c	U_3
1								
2								

3. Побудувати графіки сімейств вихідних та передавальних ВАХ.
4. Визначити параметри польового транзистора дослідним шляхом, дані вимірювань занести в таблицю 6.2.

Таблиця 6.2 Дані для визначення параметрів транзистора.

№	U_3	U_c	I_c
1			
2			
3			

5. За статичними ВАХ польового транзистора визначити малосигнальні параметри:

- а) крутизну характеристики:

$$S = \left. \frac{\Delta I_c}{\Delta U_3} \right|_{U_c = const};$$

- б) вихідний (внутрішній) опір:

$$r_i = \left. \frac{\Delta U_c}{\Delta I_c} \right|_{U_3 = const};$$

- в) статичний коефіцієнт посилення по напрузі:

$$\mu = - \left. \frac{\Delta U_c}{\Delta U_3} \right|_{I_c = const}.$$

Зміст звіту

1. Довідкові дані досліджуваних транзисторів і цоколювання.
2. Принципові схеми для зняття всіх ВАХ транзисторів.
3. Таблиці та графіки відповідних ВАХ транзисторів.
4. Розрахунок параметрів транзисторів, що визначені експериментально і графоаналітичним методом, схеми заміщення.
5. Висновки.

Контрольні питання

1. Представте структури польових транзисторів з каналами n-типу і р-типу.
2. Які схеми включення польового транзистора Ви знаєте?
3. Перерахуйте основні параметри польових транзисторів.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 7

Дослідження польових транзисторів з ізолюваним затвором.

Мета роботи: познайомитись з конструкцією і принципом дії польового транзистора з ізолюваним затвором, експериментально зняти вольт-амперні характеристики та визначити їх основні параметри.

Польові транзистори з ізолюваним затвором (МДН-транзистори, МОП-транзистори) можуть бути двох типів: транзистори з вбудованими каналами (канал створюється при виготовленні) і транзистори з індукованими каналами (канал виникає під дією напруги, прикладеної до керуючих електродів).

У МДН-транзисторів на відміну від транзисторів з керуючим р-n-переходом металевий затвор ізолюваний від напівпровідника шаром діелектрика і є додатковий вивід від кристала, на якому виконаний прилад, що називається підкладкою.

У МДН-транзисторах з вбудованим каналом між витоком і стоком створено тонкий поверхневий канал, тип електропровідності якого збігається з типом електропровідності областей витоку і стоку. При підключенні джерела живлення в ланцюзі навантаження такого транзистора струм протікає навіть при нульовому зсуві на затворі. Сімейство вихідних вольт-

амерних характеристик МОН-транзистора з вбудованим каналом типу р - наведено на (рисунку 7.1).

При подачі на затвор негативного щодо витоку зміщення в каналі зростає концентрація рухливих носіїв заряду, підвищується питома електропровідність каналу, а отже і струм стоку. Такий режим роботи МОН-транзистора називають режимом збагачення. Подача на затвір позитивного зсуву призводить до зменшення концентрації рухливих носіїв заряду і, отже до зменшення струму. Такий режим роботи МОН-транзистора називається режимом збідніння.

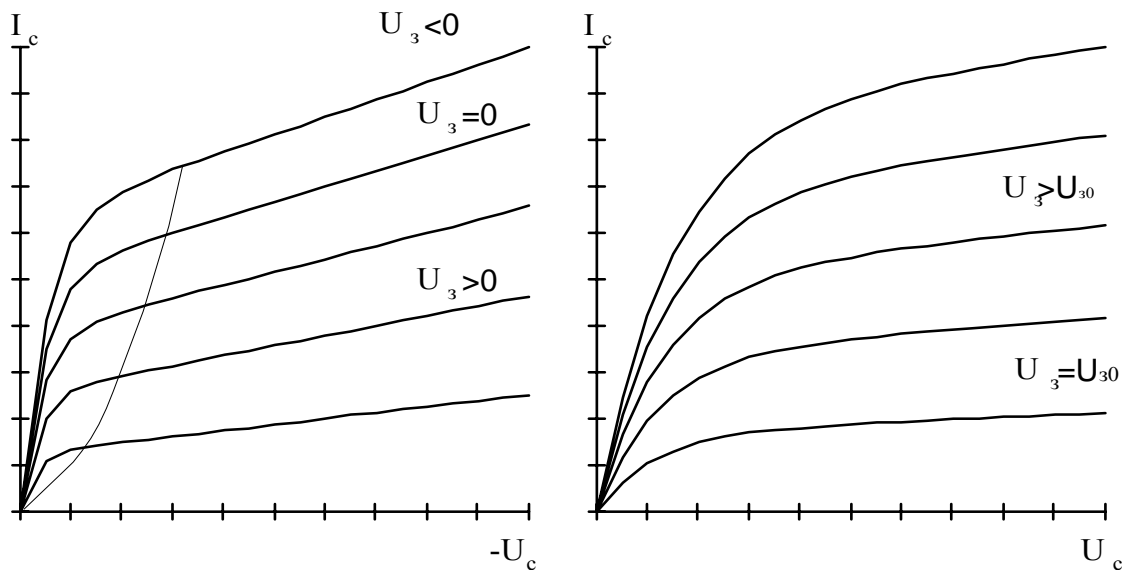


Рисунок 7.1- Сімейство ВАХ МОН-транзисторів

МОН-транзистори можуть працювати як в режимі збагачення, так і в режимі збідніння. Напруга на затворі U_{30} при якому припиняється протікання струму стоку, носить назву граничної напруги, а напруга на стоці $U_{св}$, починаючи з якої припиняється зростання струму стоку, називають напругою насичення.

У МОН-транзисторах з індукованим каналом при нульовій різниці потенціалів витік-затвор відсутній поверхневий шар, тип електропровідності якого збігається з типом електропровідності областей витоку і стоку. При цьому МОН-транзистор являє собою два діоди, вимкнені назустріч один іншому, і струм стоку надзвичайно малий. Якщо збільшити позитивний зсув напруги затвора (підкладка з напівпровідника типу р), то при деякій величині зсуву напруги U_{30} на поверхні напівпровідника виникне інверсний шар з електропровідністю типу n. Джерело та сток виявляються з'єднаними тонким струмопровідним шаром, і між ними потече струм. Утворився інверсний шар з провідністю типу n, він називається каналом.

Шляхом зміни напруги на затворі можна розширювати або звужувати канал і тим самим збільшувати або зменшувати струм стоку (див. рис. 7.1).

Ширину каналу можна змінити за рахунок подачі на підкладку додаткової напруги щодо електродів стоку і витоку транзистору. Отже,

струмом стоку можна управляти не тільки шляхом змінення напруги на затворі, але і за рахунок зміни напруги на підкладці.

Важливою перевагою МОН-транзисторів перед біполярними є мале падіння напруги на них при комутації малих сигналів. У БПТ в режимі насичення напруга становить кілька десятків-сотень мВ, то у МОН-транзисторах при малих струмах стоку I_c , коли транзистор працює в крутій області, визначається струмом I_c і опором:

$$U_{св} = I_c R_{св};$$

При зменшенні струму стоку I_c напруга може бути зведена до значення націленого до нуля.

Польовий транзистор з ізольованим затвором характеризується тими ж параметрами, що і польовий транзистор з керуючим р-п-переходом:

Крутизна характеристики:

$$S = \left. \frac{dI_c}{dU_3} \right|_{U_c = const};$$

Статичний коефіцієнт підсилення:

$$\mu = - \left. \frac{dU_c}{dU_3} \right|_{I_c = const};$$

Внутрішній опір:

$$r_i = \left. \frac{dU_c}{dI_c} \right|_{U_3 = const};$$

Внутрішнє рівняння транзистора:

$$\mu = S \cdot r_i.$$

Порядок виконання роботи

1. Зібрати схему (рисунок 7.2) для зняття статичних вольт-амперних характеристик польового транзистора з ізольованим затвором і вбудованим каналом.

2. Змінюючи напругу на стоці, зняти вольт-амперні характеристики польового транзистора:

а) сімейство вихідних вольт-амперних характеристик транзистора з вбудованим каналом у режимі збідніння та збагачення при різних значеннях напруги на затворі U_3 ;

б) сімейство вольт-амперних характеристик передачі (стокзатворних) при різних $U_{зв}$.

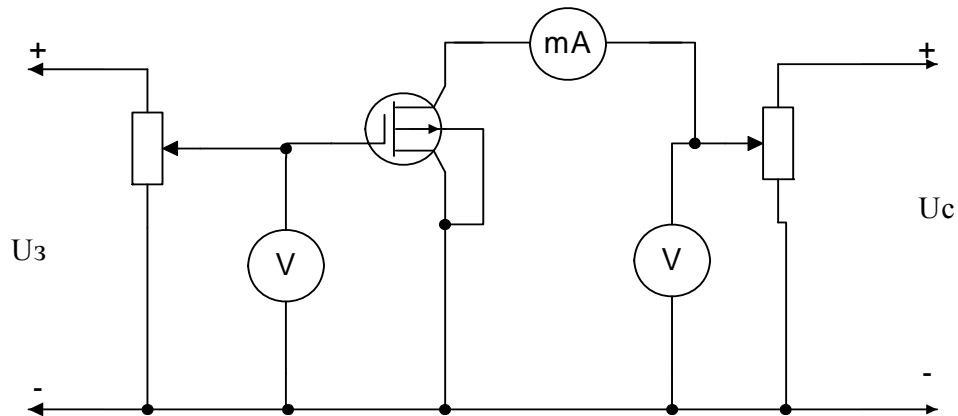


Рисунок 7.2-Схема для зняття ВАХ МОН- транзистора

3. Заповнити таблицю 7.1 вимірювань для кожної ВАХ.

Таблиця 7.1 Дані для побудови стічних ВАХ

№	$U_3 = 0B$		$U_3 = 0.5B$		$U_3 = 1B$		$U_3 = 1.5B$	
	I_c	U_c	I_c	U_c	I_c	U_c	I_c	U_c
1								
2								

Таблиця 7.2 Дані для побудови стокзатворних ВАХ

№	$U_c = 2$		$U_c = 5$		$U_c = 7$		$U_c = 10$	
	I_c	U_3	I_c	U_3	I_c	U_3	I_c	U_3
1								
2								

4. Побудувати графіки сімейств вихідних та передавальних ВАХ.

5. Визначити параметри польового транзистора дослідним шляхом, дані вимірювань занести в таблицю 7.2.

Таблиця 7.3 Дані для визначення параметрів транзистора

№	$U_{зв}$	$U_{св}$	I_c
1			
2			
3			

6. За статичними ВАХ польового транзистора визначити малосигнальні параметри: S , μ , r_i .

7. Аналогічні досліди провести для транзистора з ізольованим затвором і індуктованим каналом.

Зміст звіту

1. Довідкові дані досліджуваних транзисторів і цоколювку.
2. Принципові схеми для зняття ВАХ транзисторів.
3. Таблиці та графіки відповідних ВАХ транзисторів.
4. Розрахунок параметрів транзисторів визначених експериментально і графоаналітично, схеми заміщення.
5. Висновки.

Контрольні питання

1. Що значить порогова напруга на затворі?
2. Чим відрізняються польові транзистори від біполярних?
3. Від чого залежить ширина каналу в транзисторах з ізольованим затвором?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 8

Дослідження тиристорів

Мета роботи: познайомитись з конструкцією і принципом дії тиристорів, експериментально зняти вольт-амперні характеристики.

Тиристорами називаються напівпровідникові прилади з трьома (і більше) р-n-переходами, призначені для використання в якості електронних ключів у схемах перемикачів електричних струмів.

Залежно від конструктивних особливостей і властивостей тиристори ділять на діодні та тріодні.

У діодних тиристорах розрізняють тиристори замикаються у зворотному напрямку, які проводять в зворотному напрямку, і симетричні. Тріодні тиристори підрозділяють на ті, що замикаються у зворотному напрямку з керуванням у аноді чи катоді, які проводять в зворотному напрямку з керуванням у аноді чи катоді, симетричні (двонаправлені).

Структура діодного тиристора (диністора) наведена на рисунку 8.1. Область p_1 , в яку потрапляє струм із зовнішнього ланцюга називають анодом, область n_2 - катодом, області p_1, p_2 - базами.

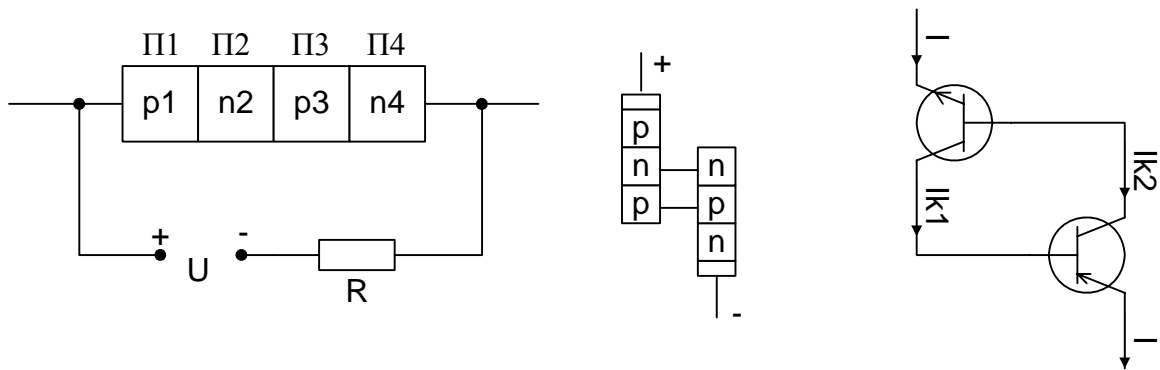


Рисунок 8.1- Структура діодного тиристора

Якщо до анода p_1 підключити плюс джерела напруги, а до катода n_2 - мінус, то переходи П1 і П3 будуть включені в прямому напрямку і будуть відкритими, а П2 - закритим.

Так як колекторний перехід П2 включено у зворотному напрямку, то до певного значення напруги майже вся прикладена напруга падає на ньому і струм у зовнішньому ланцюзі визначається зворотним струмом колекторного переходу. Цей струм однозначно залежить від потоку дірок $\alpha_1 I$ з емітера транзистора n-p-n, а також від зворотного струму p-n-переходу.

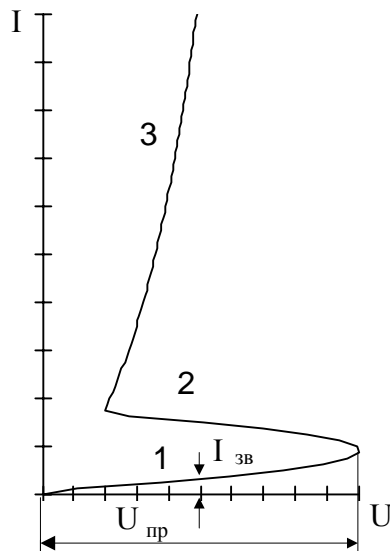


Рисунок 8.2 - Вольт-амперна характеристика диністора

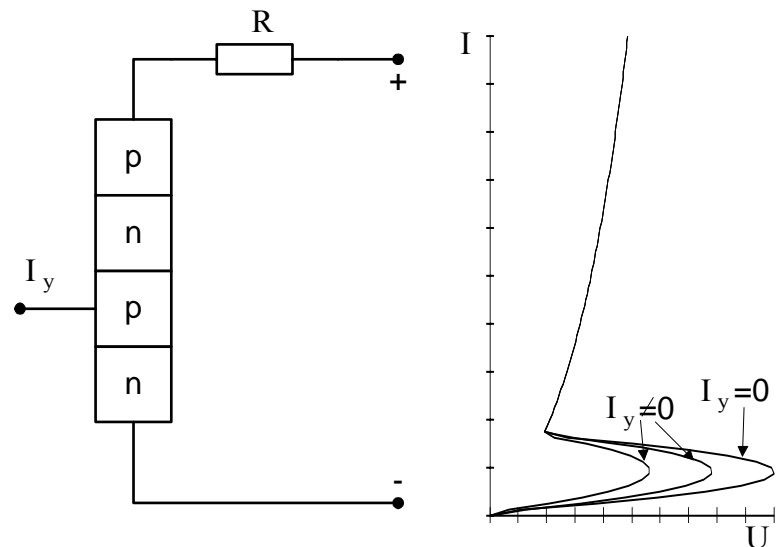


Рисунок 8.3 - Структура та ВАХ тиристора.

При малих значеннях зовнішньої напруги вся вона практично падає на колекторному переході П2. Тому до переходів П1 і П3, що включені в прямому напрямку і мають малий опір, прикладено малу різницю потенціалів і інжекція носіїв заряду невелика. При збільшенні зовнішньої напруги струм у ланцюзі спочатку змінюється не значно (рисунок 8.2) і дорівнює $I_{зв}$ (ділянка 1). При подальшому зростанні напруги, у міру збільшення ширини переходу П2 все більшу роль починають грати носії заряду, що утворилися внаслідок

ударної іонізації, викликаючи лавинне розмноження носіїв заряду. Дірки, що утворилися при цьому, під впливом електричного поля переходять в область p_2 , а електрони - в область n_1 . Струм збільшується через перехід П2, а його опір і падіння напруги на ньому зменшується. Це призводить до підвищення напруги, прикладеної до переходів П1 і П2, і збільшення інжекції носіїв зарядів через них. Процес протікає лавиноподібно і опір переходу П2 стає малим. На вольт-амперній характеристиці цьому процесу відповідає ділянка 2 з негативним диференціальним опором. Після перемикавання вольт-амперна характеристика аналогічна гілці характеристики діода, зміщеного в прямому напрямку.

Для визначення струму, що протікає через тиристор, розглянемо його модель, що складається з двох транзисторів (рисунок 8.1). Струми колекторів транзисторів n_2 - p_2 - n_1 і p_1 - n_1 - p_2 -типів рівні:

$$I_{k2} = \alpha_2 I + I_{k\beta 02}; \quad I_{k1} = \alpha_1 I + I_{k\beta 01};$$

де $I_{k\beta 01}$, $I_{k\beta 02}$ - зворотні струми колекторних переходів транзисторів VT_1 і VT_2 . α_1 і α_2 - коефіцієнти передачі емітерного струму.

Так як $I = I_{k1} + I_{k2}$, то отримаємо:

$$I = \alpha_1 I + I_{k\beta 01} + \alpha_2 I + I_{k\beta 02};$$

З урахуванням коефіцієнта лавинного множення M , який можна прийняти однаковим для дірок і електронів в переході П2 отримаємо:

$$I = M [I(\alpha_1 + \alpha_2) + I_{k\beta 01} + I_{k\beta 02}];$$

$$I = \frac{M \cdot I_{k0}}{1 - M \cdot \alpha};$$

де $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2$, а $I_{k0} = I_{k\beta 01} + I_{k\beta 02}$ - зворотний струм переходу П2, рівний сумі теплового струму, струму термогенерації і струму витоку. Таким чином тиристор перемикається, коли $M \cdot \alpha = 1$ і струм обмежується опором зовнішнього ланцюга.

Триодні тиристори (рисунок 8.3) відрізняються від діодних тим, що одна з баз має зовнішній вивід, який називають керуючим електродом.

При подачі в ланцюг керуючого електрода струму управління I_y , струм через p_2 - n_2 -перехід збільшується. Додаткова інжекція носіїв заряду через p - n -перехід призводить до збільшення струму I_k на величину $\alpha_2 I_y$:27

$$I = M [I(\alpha_1 + \alpha_2) + I_{k0} + \alpha_2 I_y] = (M I_{k0} + M \alpha_2 I_y) / (1 - M \cdot \alpha);$$

Таким чином, змінюючи струм керування можна змінювати напругу, при якій відбувається перемикавання тиристора, і тим самим керувати

моментом його включення. Сімейство вольт-амперних характеристик тиристора показано на рисунку 8.3.

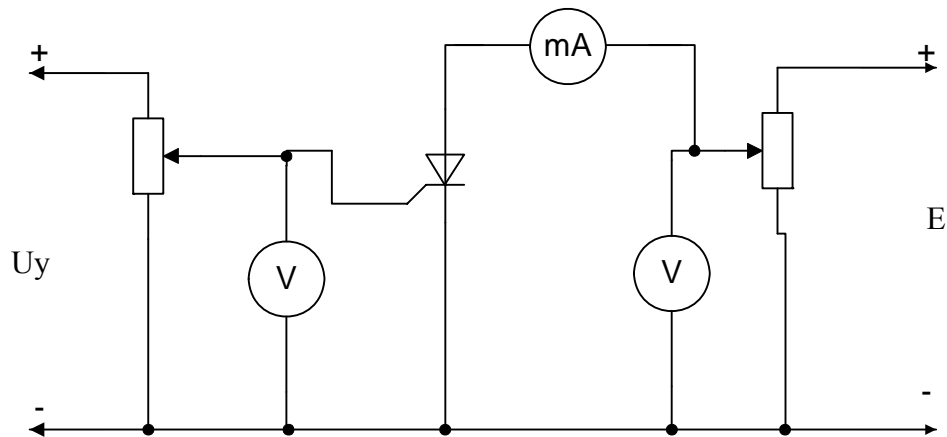


Рисунок 8.4- Схема для зняття ВАХ тиристора

Порядок виконання роботи

1. На універсальному стенді зібрати схему (рисунок 8.4) для зняття вольт-амперних характеристик тиристора.
2. Задаючись струмом керування (за вказівкою викладача) зняти сімейство вольт-амперних характеристик і заповнити таблицю.
3. Побудувати графіки вольт-амперних характеристик і визначити основні параметри тиристора.

Зміст звіту

1. Довідкові дані досліджуваного тиристора і цоколювку.
2. Принципова схема для зняття ВАХ тиристора.
3. Таблиці та графіки відповідних ВАХ тиристора.
4. Основні параметри тиристора визначені експериментально.
5. Висновки.

Контрольні питання

1. Що характеризує зворотня напруга?
2. Що таке ток утримання?
3. Що характеризує час включення тиристора?

Рекомендована література.

1. Руденко В.С., Ромашко В.Я., Трифонюк В.В. Промислова електроніка. - К.: Либідь, 1993. - 432 с.
2. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника. - М.: Высшая школа, 1991. - 622 с.
3. Пасынков В.В., и др. . . Полупроводниковые приборы. - М.: Высшая школа, 1987. - 428 с.
4. Батушев В.А. Электронные приборы. - М.: Высшая школа, 1980. - 532 с.
5. Степаненко И.П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем. - М.: Энергия, 1967. - 616 с.
6. Скаржепа В.А., Луценко А.Н. Электроника и микросхемотехника. - К.: Вища школа 1989. - 431 с.
7. Бойко В.І., Багрій В.В. Твердотіла електроніка.-К.: НМЦВО 2003. 303 с.
8. Васильєва Л.Д., Медведенко Б.І. Напівпровідникові прилади. Підручник.- К.: Політехніка, 2003. – 338 с.

Зміст

Уведення.....	3
Лабораторна робота № 1 Дослідження германієвого діода	4
Лабораторна робота № 2 Дослідження кремнієвого діода.....	7
Лабораторна робота № 3 Дослідження стабілітрону.	8
Лабораторна робота № 4 Дослідження кремнієвго біполярного транзистора	9
Лабораторна робота № 5 Дослідження германієвого біполярного транзистора	16
Лабораторна робота № 6 Дослідження польового транзистора з керованим р-n переходом.....	17
Лабораторна робота № 7 Дослідження польових транзисторів з ізольованим затвором.....	21
Лабораторна робота № 8 Дослідження тиристорів	25
Рекомендована література	29
Зміст	30

Методичні вказівки з виконання лабораторних робіт з курсу "Твердотіла електроніка". (Для студентів спеціальності 6.05080202 Електронні пристрої та системи)

Укладачі: Микола Григорович Винниченко, доцент
Віктор Федорович Сенько, доцент
Олександр Анатолійович Штепа, асистент
Світлана Вікторівна Авраменко, магістр