

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КІЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ імені
ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

Охріменко Г.М.

ЗВІТ

Дослідження ВАХ транзисторів

Київ. КНУ ім. Т. Шевченка, 2021

УДК 004.005 (003.21)

ББК 73Ц

I-72

Укладачі: Г. М. Охріменко

I-72 Звіт. Дослідження ВАХ транзисторів./ укл. Г. М. Охріменко. – К. :
КНУ ім. Т. Шевченка, 2021. – 14 с. (Укр. мов.)

Наведено загальний звіт виконання роботи з моделювання електронних
схем у програмі LTspiceTM.

УДК 004.005 (003.21)

ББК 73Ц

© Київський Національний
Університет імені Тараса Шевченка,
2021

РЕФЕРАТ

Звіт про дослідження ВАХ діодів: 19 с., 19 рис.

Мета роботи – дослідити вихідні характеристики транзисторів різних типів.

Об'єкт дослідження – транзистори: біполярний, польовий.

Предмет дослідження – теоретичні основи, принципи роботи, фізичний зміст і застосування діодів.

Методи дослідження – 1) одержання зображення ВАХ транзисторів на екрані двоканального осцилографа, що працює в режимі характеристографа, 2) побудова сімейства ВАХ шляхом вимірювання певної кількості значень сили струму I_K , що відповідають певним значенням напруги U_{ke} (для певної сили струму бази I_B або напруги U_{be}) для біполярного транзистора та певної кількості значень сили струму стоку I_C , що відповідають певним значенням напруги U_{cv} (для певних значень напруги між затвором і витоком U_{zb}) для польового транзистора, подання результатів вимірювань у вигляді графіків.

TRANZISTORI, P-N ПЕРЕХІД, БІПОЛЯРНИЙ ТРАНЗИСТОР, ПОЛЬОВИЙ ТРАНЗИСТОР, ВАХ ТРАНЗИСТОРІВ, LTSPICE.

Зміст

1. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ.....	5
2. ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА	7
ВИСНОВКИ.....	13
ВІДПОВІДІ НА КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ.....	13
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	19

1. Теоретичні відомості

Біполярний транзистор – це напівпровідниковий прилад з двома р-п-переходами, що взаємодіють між собою, та трьома виводами, підсилюальні властивості якого зумовлені явищами інжекції (введення) та екстракції (вилучення) неосновних носіїв заряду.

Вихідна вольт-амперна характеристика (ВАХ) біполярного транзистора – це залежність сили струму колектора I_K від напруги між колектором та емітером U_{ke} при певному значенні струму бази I_B (або напруги між базою та емітером U_{be}) в схемі зі спільним емітером.

Польовий (уніполярний) транзистор – це напівпровідниковий прилад, підсилюальні властивості якого зумовлені струмом основних носіїв, що течуть по провідному каналу, провідність якого керується зовнішнім електричним полем.

Польовий транзистор з керувальним електродом – це польовий транзистор, керування струмом основних носіїв у якому здійснюється за допомогою р-п-переходу, зміщеного у зворотному напрямі.

Вихідна вольт-амперна характеристика (ВАХ) польового транзистора – це залежність сили струму стоку I_S від напруги між стоком та витоком U_{cv} при певному значенні напруги між затвором та витоком U_{zv} .

Основна функція, яку виконує транзистор (від англ. transfer – переносити і resistor – опір), подібна до функції звичайного водогінного крана: невеликим зусиллям руки керувати сильним напором води у трубі. Існує два найпоширеніших різновиди транзисторів – біполярні та уніполярні (або польові) транзистори.

Роботу біполярного транзистора (наприклад, типу р-п-р) зручно розглядати при включені його за так званою схемою зі спільною базою (Рис. 1а), коли вивід бази є спільним для входного струму (вхідної напруги) та вихідного струму (вихідної напруги). Вихідним струмом транзистора в такій схемі є струм колектора I_K . Цей струм є нічим іншим як струмом неосновних носіїв, що протікає через р-п-перехід, увімкнений у зворотному напрямку (для транзистора типу р-п-р це струм дірок). При нульовій різниці потенціалів між емітером і базою (закороченому вході транзистора) вихідна ВАХ збігається з ВАХ напівпровідникового діода, до якого прикладено напругу у зворотному напрямку. Характерною є слабка залежність струму колектора I_K від різниці потенціалів U_{kb} .

При цьому в базу підтягаються електрони зі спільного вивода бази, тобто з бази витікає струм бази I_b (нагадаємо, що напрямок струму протилежний напрямку руху електронів). Таким чином, величина струму бази I_b є показником темпу рекомбінації в базовій області.

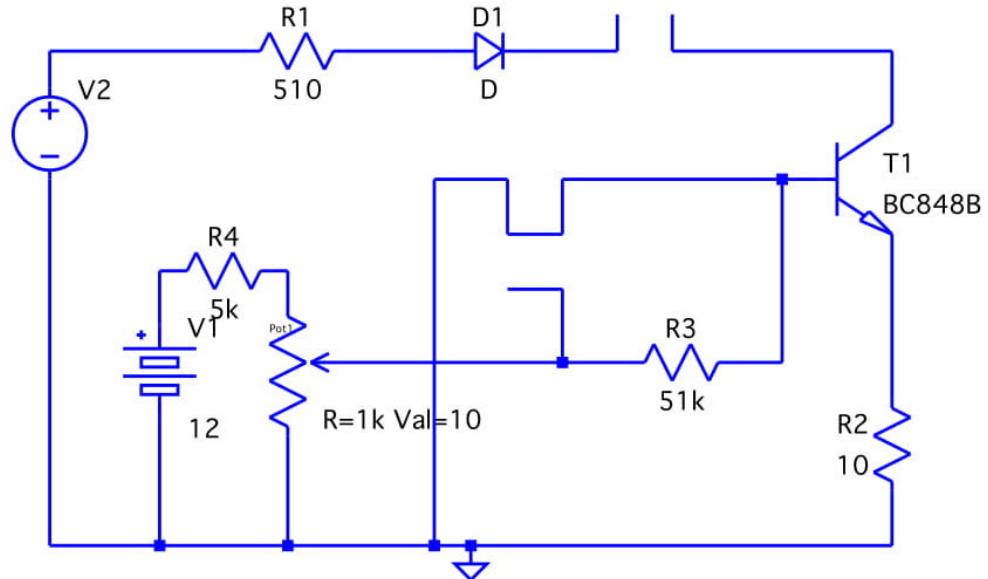
Конструкція польових транзисторів з p-n-переходом і схеми їх включення. Тонкий шар напівпровідника n-типу (або p-типу), обмежений з обох боків p-n-переходами, називають каналом (англ. channel). Канал включають в електричне коло за допомогою двох електродів, один з яких називають витоком (рос. исток, англ. source), а другий – стоком (англ. drain). Електрод, який приєднується в поперечному напрямку до областей p-типу (або n-типу), відповідно, є керувальним і носить назву затвора (англ. gate). Величина струму в каналі (за відсутності керувальної дії затвора) залежить від напруги, прикладеної між стоком і витоком, та від опору напівпровідникової пластинки між цими виводами. Якщо для транзистора з p-каналом до затвора прикласти позитивну відносно витока напругу, то це призведе до збільшення товщини p-n-переходу і, відповідно, до зменшення площи перерізу каналу. Зі зменшенням перерізу каналу збільшується опір між стоком та витоком, що призводить до зменшення величини струму крізь канал.

Таким чином, керування струмом каналу здійснюється напругою на затворі, яка відповідає зворотній напрузі на керувальному p-n-переході. Оскільки керувальний струм дуже малий, то потужність керування буде мізерною. В той же час струм каналу може бути досить великим, а керувальний вплив може знижувати його до нуля. Напруга на затворі, при якій струм крізь канал припиняється, називають напругою відсічки.

Польові транзистори з ізольованим затвором мають структуру метал-діелектрик-напівпровідник (МДН-транзистори, англ. MIS transistors). Як діелектрик може використовуватись плівка двоокису кремнію SiO_2 і тому такі транзистори ще називають транзисторами зі структурою метал-оксид-напівпровідник (МОН-транзистори, англ. MOS transistors). Основою приладу є пластинка (підкладка) з монокристалічного кремнію p-типу. Області стоку та витоку являють собою ділянки кремнію, сильнолеговані домішками n-типу (такі області позначають символом n^+). Відстань між стоком та витоком – близько 1 мкм.

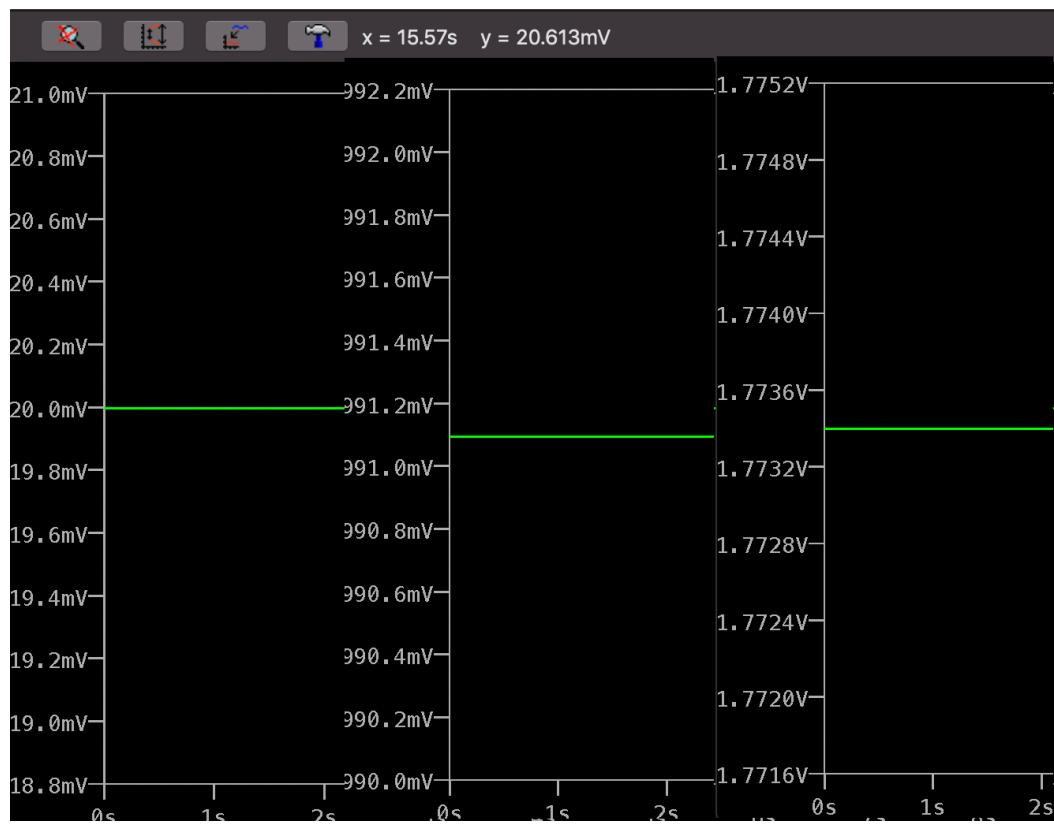
2. Практична частина

Біполярний транзистор



.tran 10s

Рис. 1 Схема установки з увімкненим Transient режимом (ключі на вимірювання напруги бази)



7
Рис. 2 Напруга на базі транзистора (потенціометр: 99%, 50%, 10%)

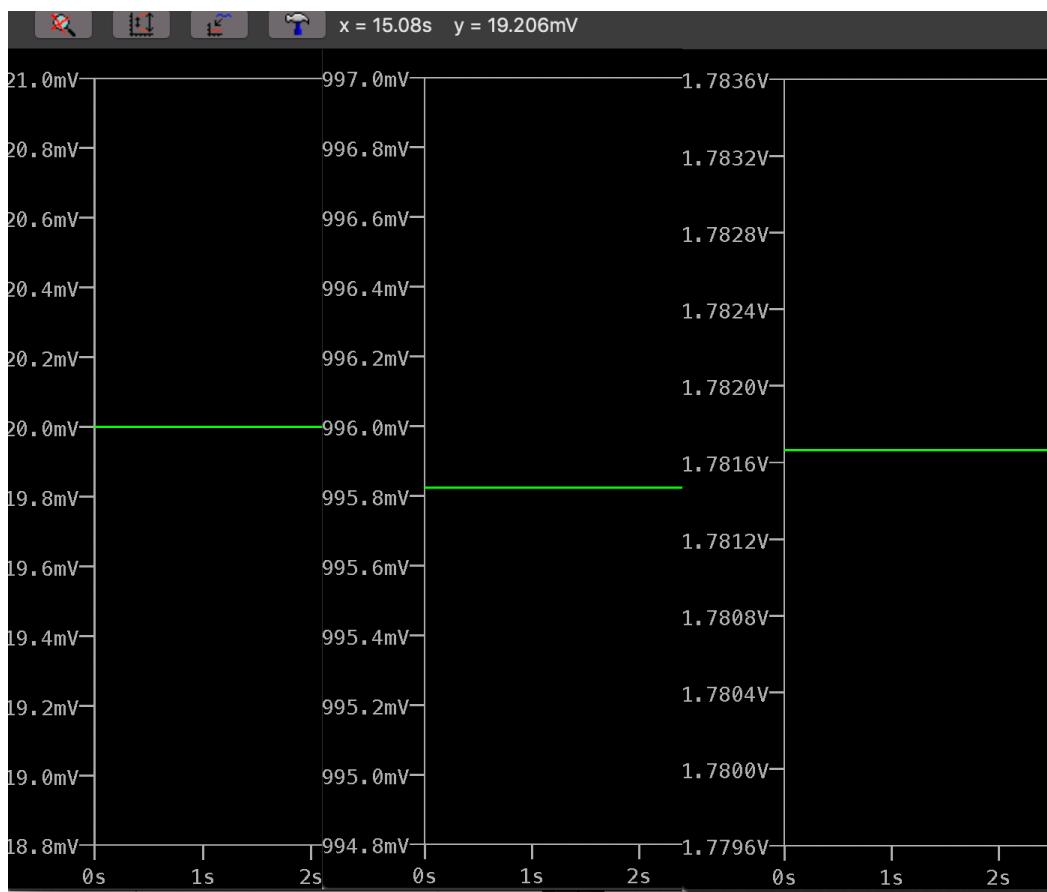


Рис. 3 Напруга на базі транзистора + резистор (потенціометр: 99%, 50%, 10%)

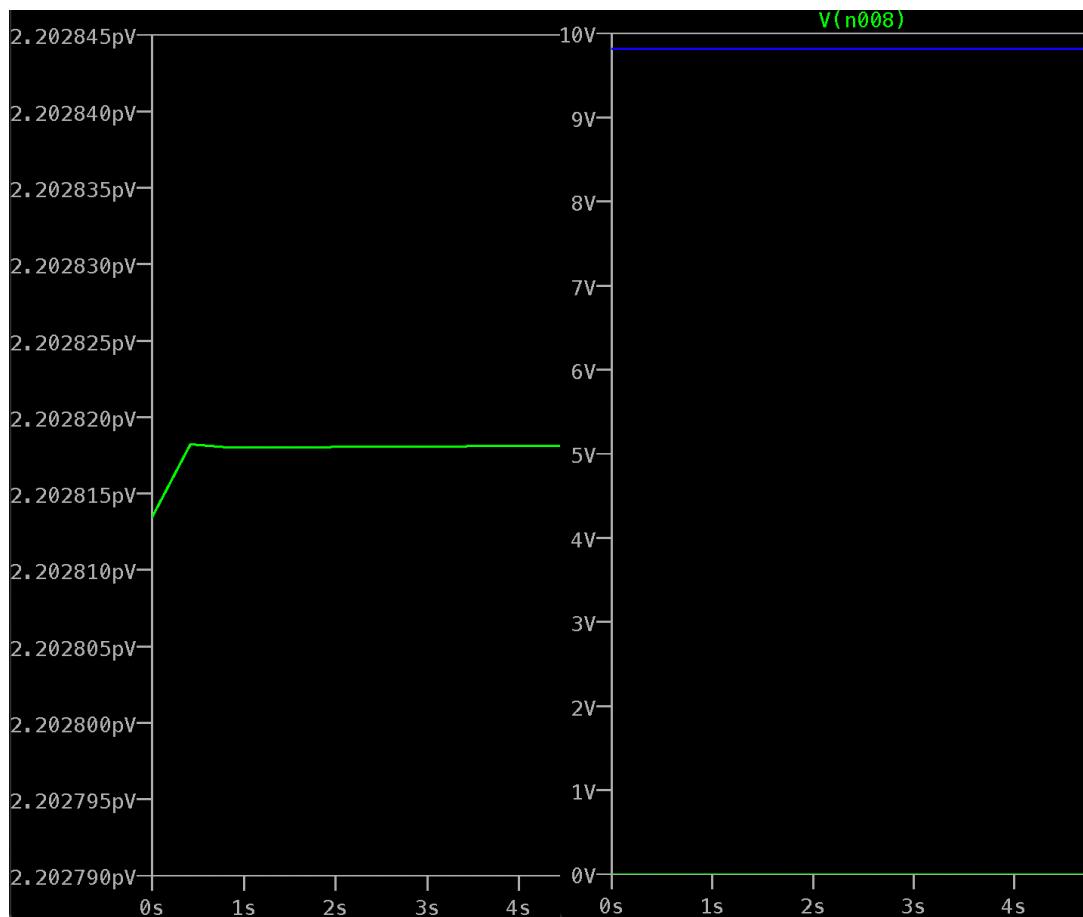


Рис. 4 ВАХ U_e та U_k двічі (для порівняння масштабу) потенціометр 99%

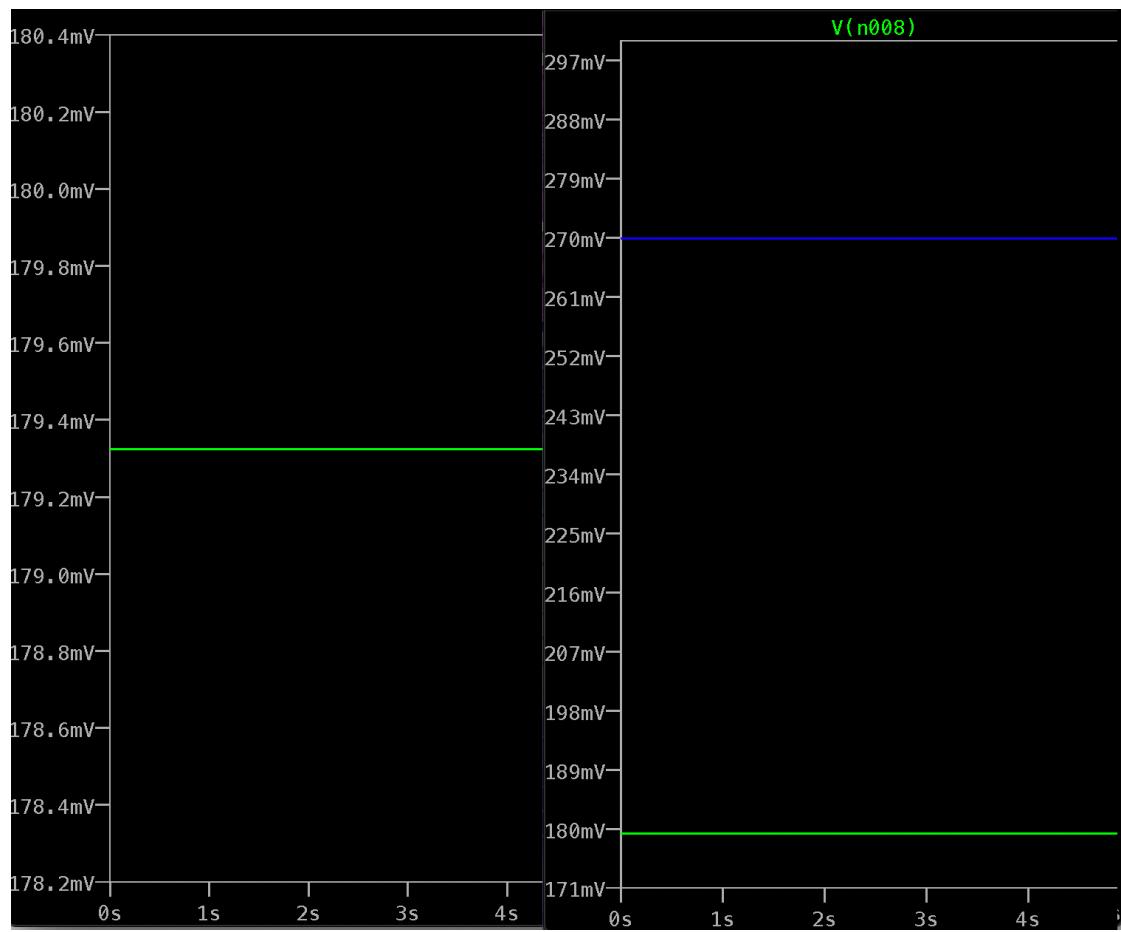


Рис. 5 ВАХ U_e та U_k двічі (для порівняння масштабу) потенціометр 50%

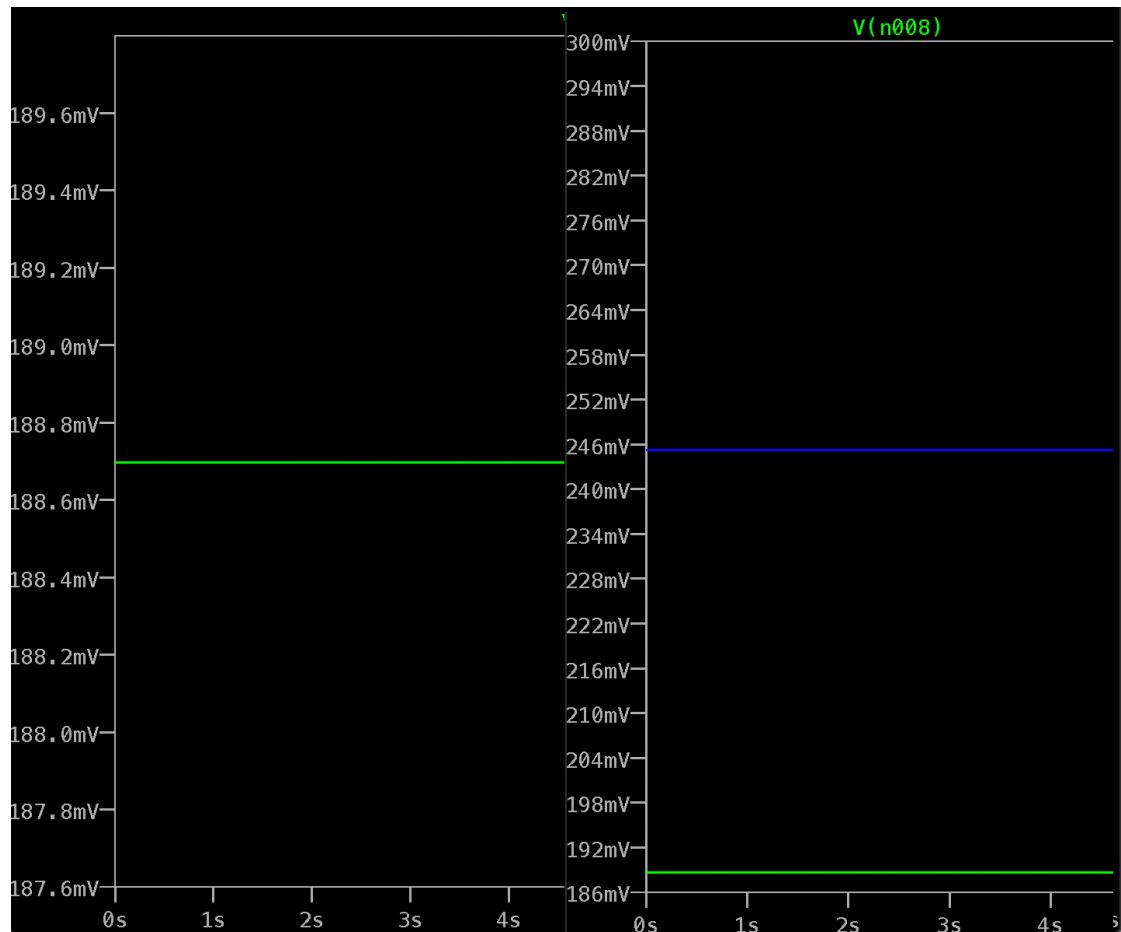
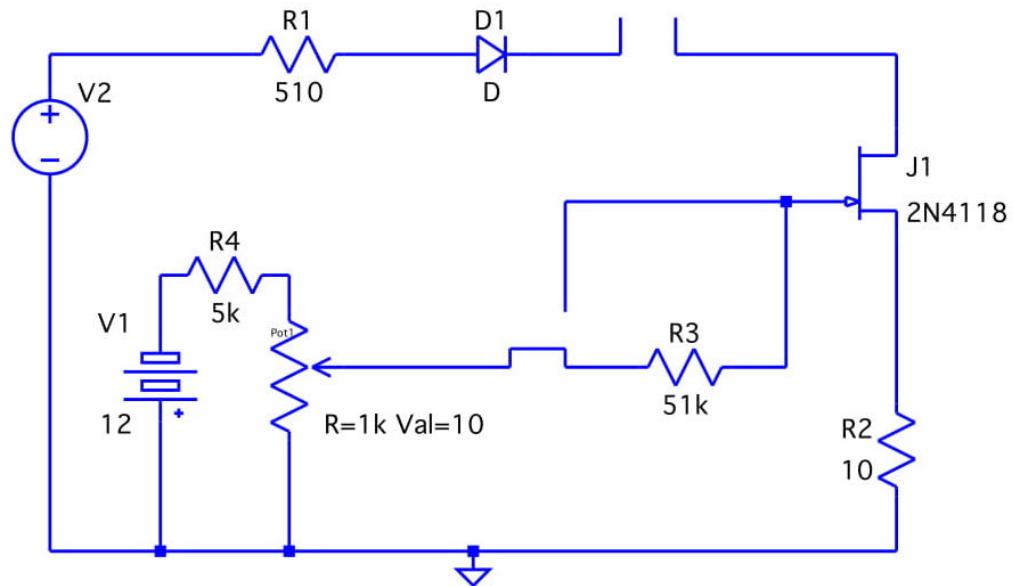


Рис. 6 ВАХ U_e та U_k двічі (для порівняння масштабу) потенціометр 10%

Польовий транзистор



.tran 10s

Рис. 7 Схема установки з увімкненим Transient режимом (ключі на вимірювання напруги бази + резистор)

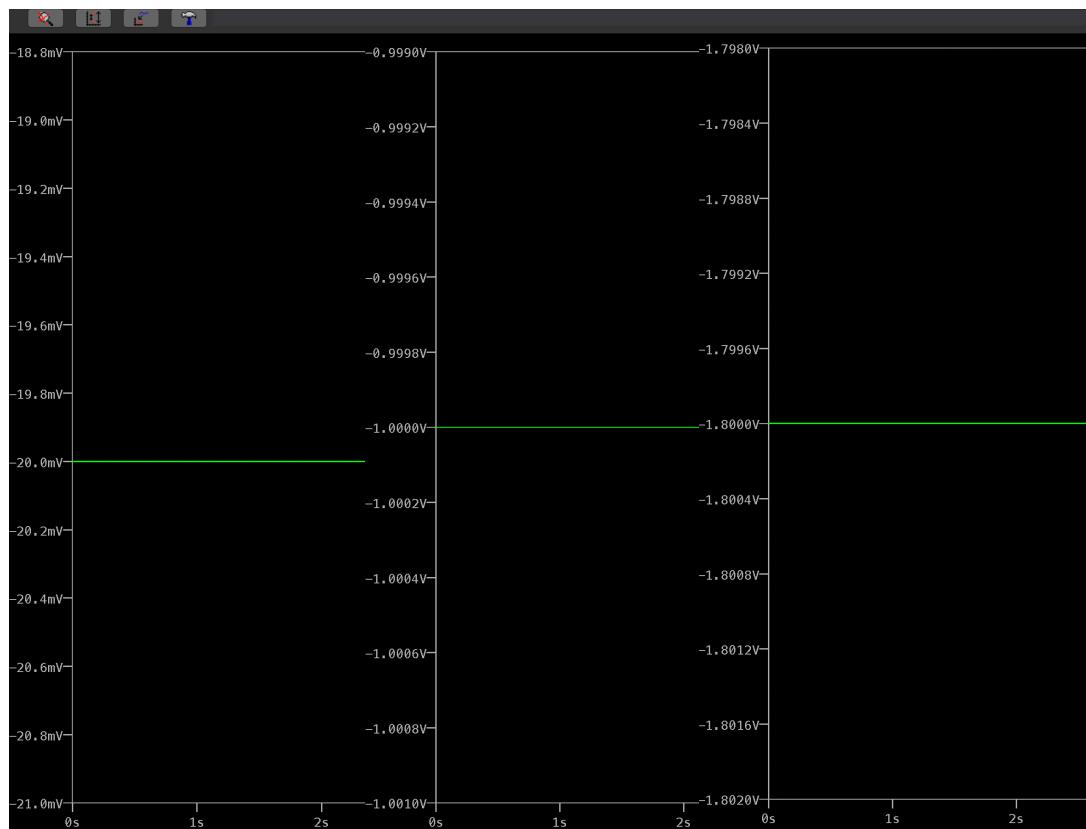


Рис. 8 Напруга на базі транзистора (потенціометр: 99%, 50%, 10%)

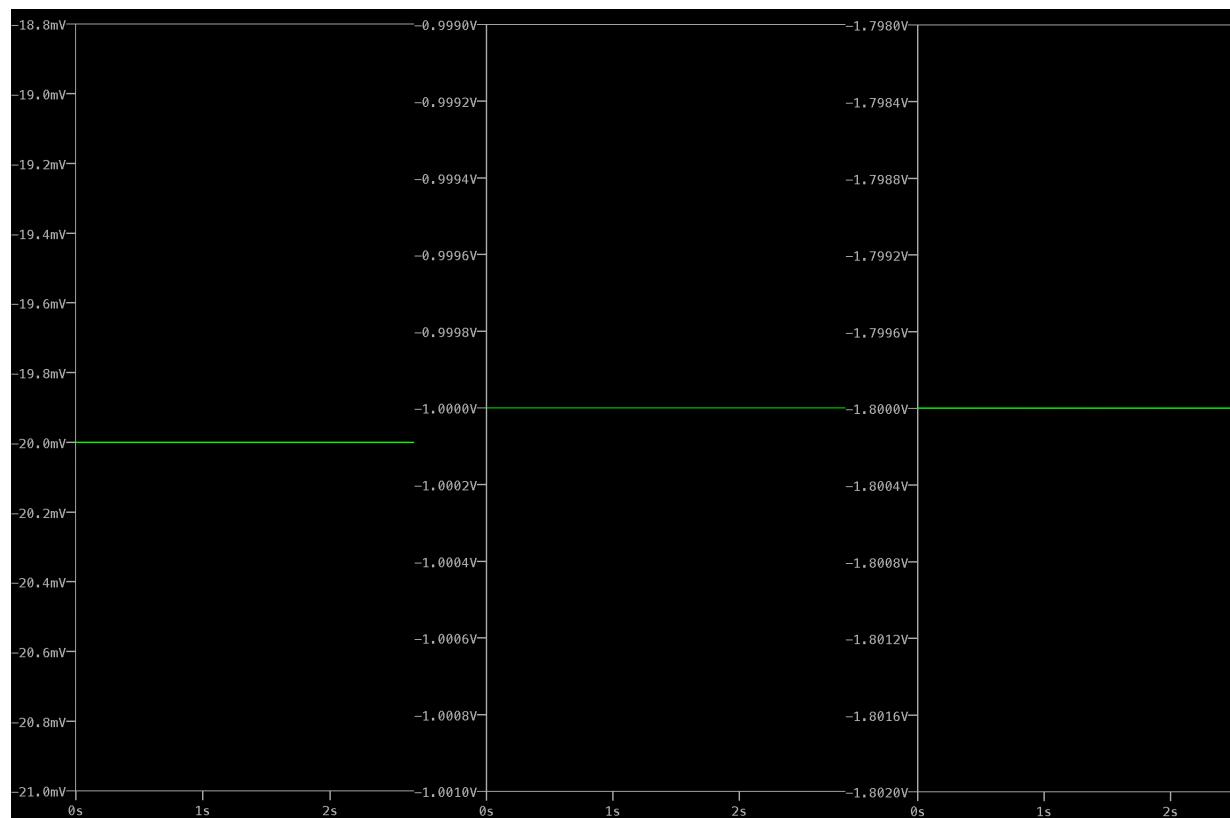


Рис. 9 Напруга на базі транзистора + резистор (потенціометр: 99%, 50%, 10%)

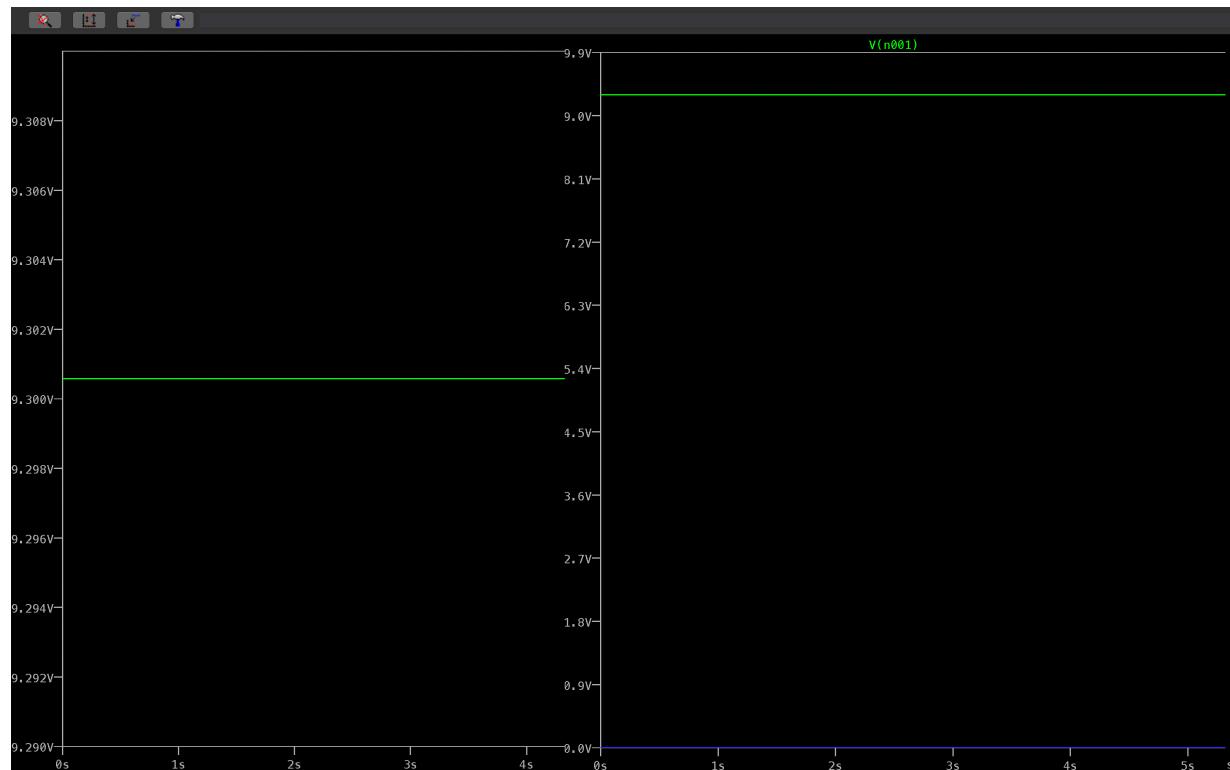


Рис. 10 ВАХ U_e та U_k двічі (для порівняння масштабу) потенціометр 99%

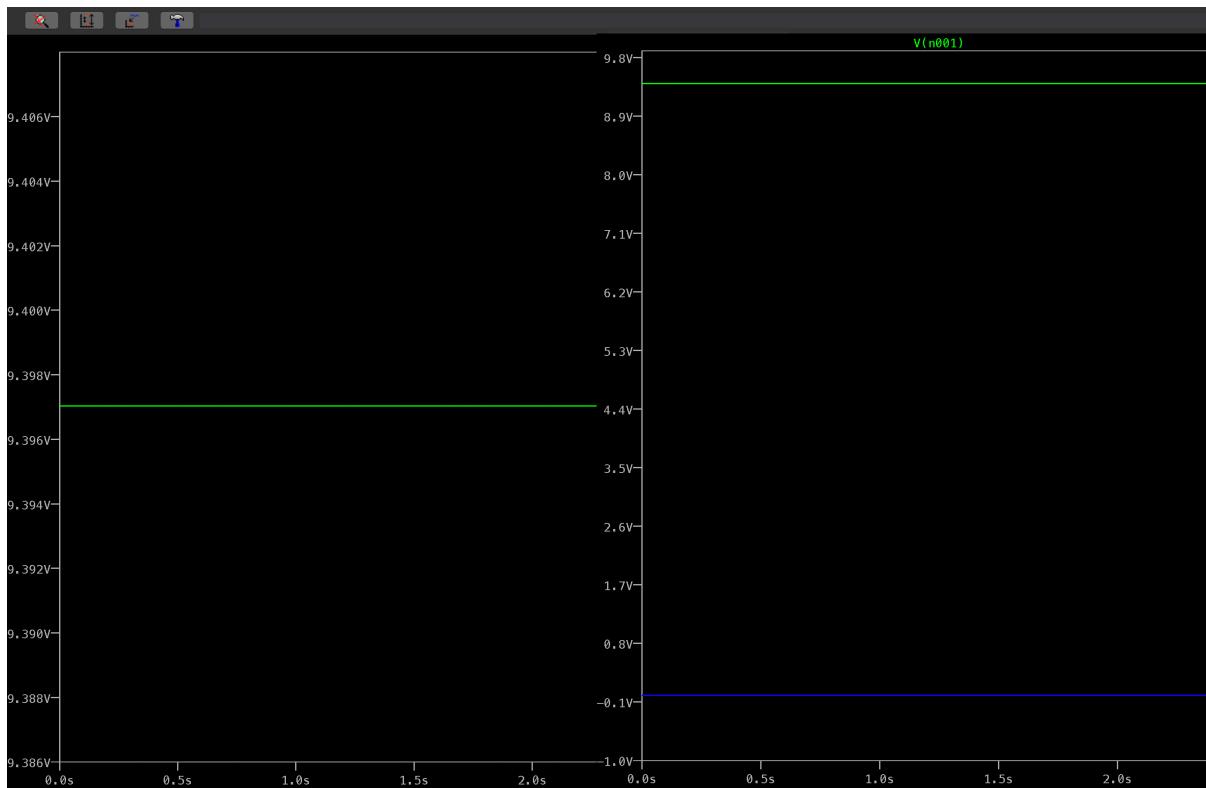


Рис. 11 ВАХ U_e та U_k двічі (для порівняння масштабу) потенціометр 50%

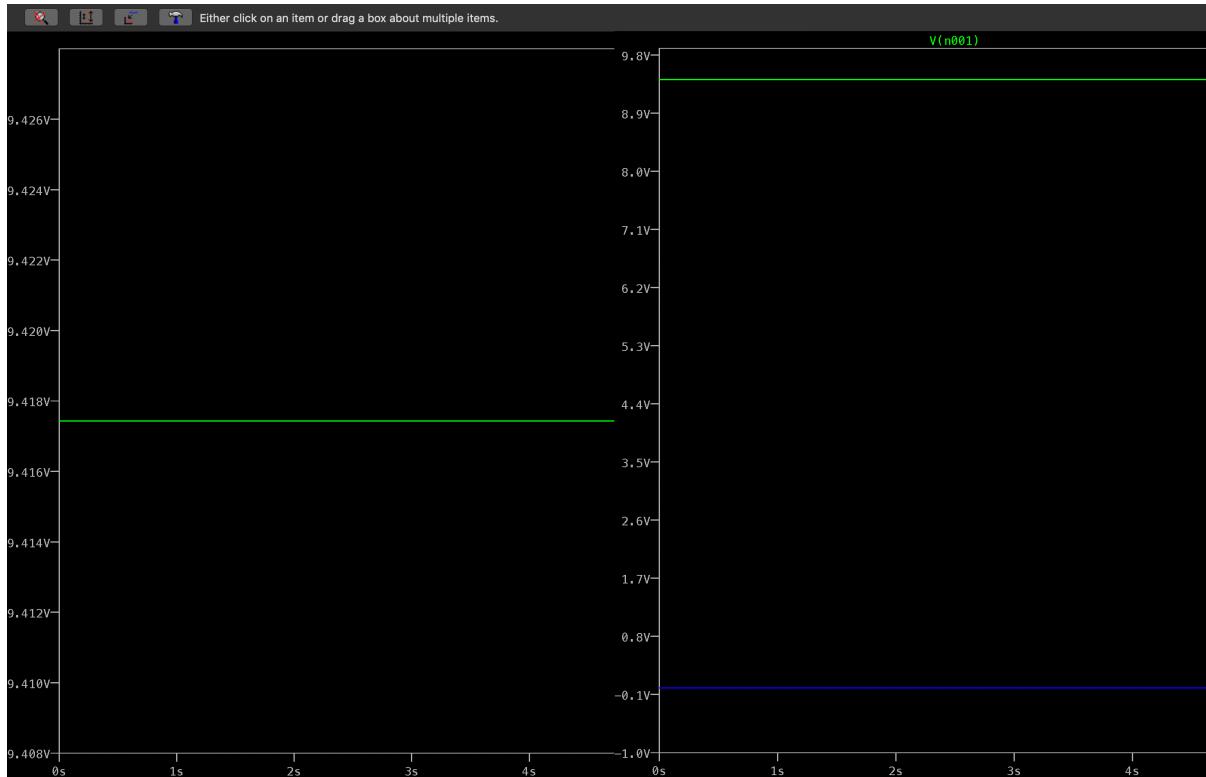


Рис. 12 ВАХ U_e та U_k двічі (для порівняння масштабу) потенціометр 10%



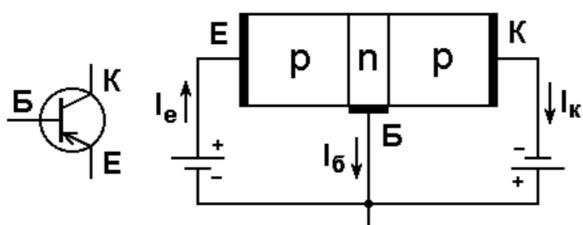
Рис. 13 ВАХ $I_k(t)$ потенціометр 10%

Висновки

У ході даної лабораторної роботи ми дослідити вихідні характеристики транзисторів різних типів. Ми одержали зображення ВАХ транзисторів на екрані двоканального осцилографа, який працює в режимі характеристографа, а також на екрані вольтметра, що дає уявлення про їх властивості та можливе застосування (див. контрольні запитання).

Відповіді на контрольні запитання

- Будова, типи та умовні позначення біполярних транзисторів.



емітера (від англ. *emit* – випускати, випромінювати), а інша – колектора (від англ. *collect* – збирати), середню область називають базою. База-емітерний (або просто емітерний) р-п-перехід включають у прямому

Біполярний транзистор являє собою сукупність двох р-п-переходів, складених з двох р-областей і однієї н-області (структуря типу р-п-р) або з двох н-областей і однієї р-області (структуря типу н-р-н). Одна з крайніх областей носить назву

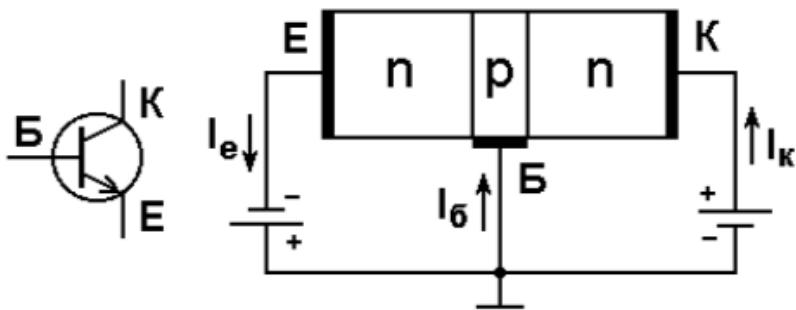
напрямку, а база-колекторний (або просто колекторний) р-п-перехід – у зворотному.

2. Принцип роботи біполярного транзистора. Зв'язок між величинами струмів емітера, бази та колектора.

Роботу біполярного транзистора (наприклад, типу р-п-р) зручно розглядати при включені його за так званою схемою зі спільною базою, коли вивід бази є спільним для вхідного струму (вхідної напруги) та вихідного струму (вихідної напруги). Вихідним струмом транзистора в такій схемі є струм колектора I_k . Цей струм є нічим іншим як струмом неосновних носіїв, що протікає через р-п-перехід, увімкнений у зворотному напрямку (для транзистора типу р-п-р це струм дірок). При нульовій різниці потенціалів між емітером і базою (закороченому вході транзистора) вихідна ВАХ збігається з ВАХ напівпровідникового діода, до якого прикладено напругу у зворотному напрямку. Характерною є слабка залежність струму колектора I_k від різниці потенціалів U_{kb} . Оскільки струм I_k залежить виключно від концентрації неосновних носіїв у базі поблизу колекторного переходу, то змінюючи цю концентрацію можна змінювати струм колектора I_k . Зміна концентрації неосновних носіїв у базі і, зокрема, біля колекторного переходу досягається їх введенням (емісією) в базу через емітерний перехід. Не всі введені в базу з боку емітерного переходу неосновні носії заряду (дірки) досягають колекторного переходу, оскільки в базовій області вони можуть рекомбінувати з основними носіями (електронами). При цьому в базу підтягаються електрони зі спільного вивода бази, тобто з бази витікає струм бази I_b . Таким чином, струм через емітер транзистора I_e дорівнює $I_e = I_k + I_b$. В хороших транзисторах $I_b \ll I_k$ і тому в багатьох випадках можна вважати, що $I_k \approx I_e$. Таким чином, величина струму бази I_b є показником темпу рекомбінації в базовій області. Для зменшення цієї рекомбінації вживають спеціальних заходів, наприклад, зменшують товщину бази. Збільшення концентрації неосновних носіїв поблизу колекторного переходу призводить до зростання струму колектора I_k , не змінюючи суттєво характеру його залежності від колекторної напруги U_{bc} : колекторний струм стає більшим, але в області насиження, як і раніше, слабо залежить від U_{bc} . Оскільки спад напруги U_{be} на переході емітер-база, включенному в пряму напрямку, є незначним ($0,2\text{--}0,7$ В для різних типів транзисторів), а зворотна напруга U_{bk} на переході база-колектор може становити десятки вольт і струм $I_k \approx I_e$, то маємо підсилення електричної потужності в десятки разів.

3. Схеми включення біполярних транзисторів зі спільною базою та зі спільним емітером. Яка з цих схем забезпечує підсилення струму? Статичний та диференціальний коефіцієнти підсилення транзистора за струмом.

Схема зі спільною базою наведена вище. Схема зі спільним емітером:



У схемі зі спільною базою, оскільки спад напруги U_{be} на переході емітер-база, включенному в пряму напрямку, є незначним (0,2–0,7 В для різних типів транзисторів), а зворотна напруга

U_{bk} на переході база-колектор може становити десятки вольт і струм $I_k \approx I_e$, то маємо підсилення електричної потужності в десятки разів. Принцип дії транзисторів типу n-p-n не відрізняється від розглянутого вище, лише в область бази вводяться з емітера не дірки, а електрони. Полярність прикладеної до переходів напруги є також протилежною. На рисунку також показані умовні позначення біполярних транзисторів на електричних схемах. Стрілка в позначеннях емітера вказує напрямок прямого струму через база-емітерний переход. Коефіцієнт пропорційності $B = I_k / I_b$ називають статичним коефіцієнтом підсилення за струмом. Однак пропорційність має місце тільки в обмеженій області струму, тому що B залежить від I_k . Ця залежність показана на Рис. 7. Диференціальний коефіцієнт підсилення за струмом при фіксованій напрузі між колектором і емітером визначається виразом: $\beta = dI_k / dI_b$ при $U_{ke} = \text{const}$.

4. Вхідні та вихідні характеристики біполярного транзистора в схемі зі спільним емітером. Пояснити форму вихідних характеристик транзистора для такої схеми.

Однією з найпоширеніших схем включення є схема зі спільним емітером (а). Вхідною характеристикою в цьому випадку є функція струму бази від напруги між базою та емітером при постійній напрузі колектор-емітер (б), а вихідною – зв'язок між струмом колектора і напругою між колектором та емітером при фіксованій напрузі база-емітер (в). Вхідна характеристика подібна до ВАХ p-n-переходу, включенного у пряму напрямку. Іноді замість вхідної характеристики користуються так званою передавальною – залежністю струму колектора від база-емітерної напруги при постійній напрузі колектор-емітер – як більш інформативною (г).

Однією з особливостей біполярного транзистора є те, що колекторний струм на вихідній характеристиці мало змінюється після досягнення певного значення, яке називають струмом насиження I_{cas} . Напруга, при якій характеристика має вигин і колекторний струм досягає насиження, називається напругою насиження U_{cas} (див. Рис. 6в).

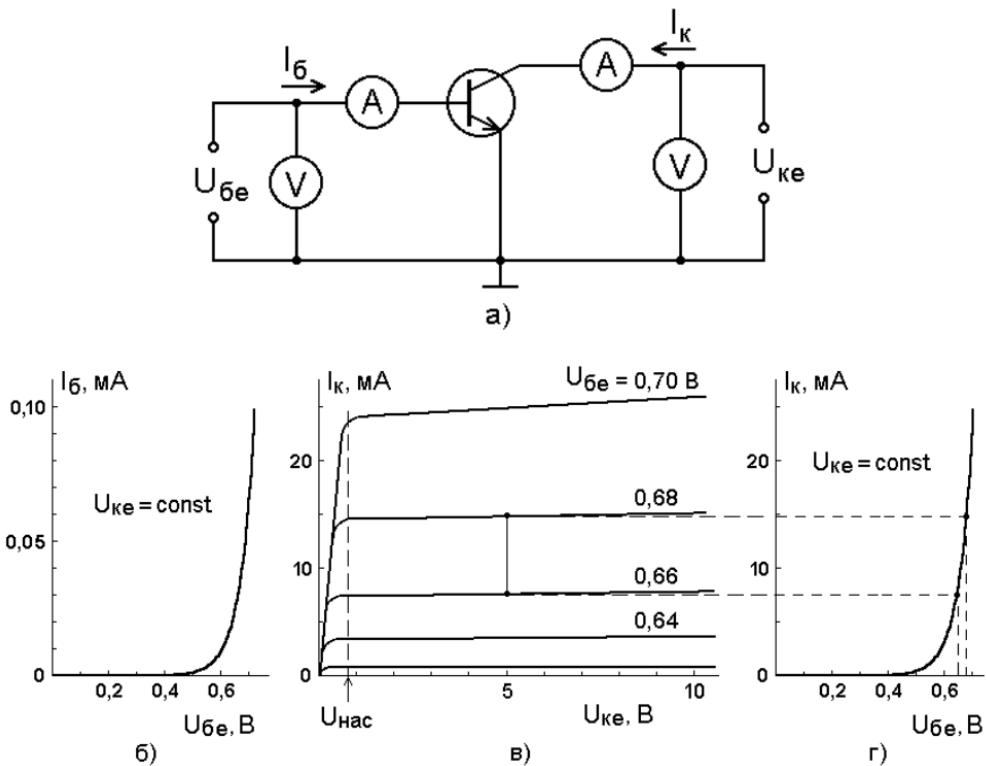


Рис. 6. Схема вимірювання (а) вольт-амперних характеристик кремнієвого біполярного транзистора, включенного за схемою зі спільним емітером: вхідної (б), вихідної (в), передавальної (г).

Іншою

особливістю є те, що малої зміни вхідної напруги виявляється достатньо, щоб викликати відносно великі зміни колекторного струму. Це досить добре видно з передавальної характеристики, яка подібна до вхідної характеристики.

Якщо через транзистор тече великий вихідний струм (в схемі зі спільним емітером це струм I_K), то кажуть, що транзистор відкритий, якщо ж вихідний струм малий, то кажуть, що транзистор закритий (цим двом випадкам відповідають, наприклад, верхня і нижня криві на Рис. 6в при $U_{ke} > U_{nas}$). У кожному з цих двох станів транзистор може перебувати нескінченно довго (якщо не відключати напругу живлення). Перевести транзистор із закритого стану у відкритий і навпаки можна лише за рахунок зовнішнього впливу, наприклад шляхом подачі на вход транзистора імпульса напруги позитивної чи негативної полярності. Отже, транзистор може перебувати у двох різних стійких станах (тобто він являє собою бістабільний елемент), що забезпечує йому широке застосування як швидкодійного елемента безконтактних переключальних пристрій.

5. Принцип роботи польового транзистора з ізольованим затвором. Стокові та стокозатворні характеристики такого транзистора.

Польові транзистори з ізольованим затвором мають структуру метал-діелектрик-напівпровідник (МДН-транзистори, англ. MIS transistors). Як

діелектрик може використовуватись плівка двоокису кремнію SiO_2 і тому такі транзистори ще називають транзисторами зі структурою метал-оксид-напівпровідник (МОН-транзистори, англ. MOS transistors). Основою приладу є пластинка (підкладка) з монокристалічного кремнію р-типу. Області стоку та витоку являють собою ділянки кремнію, сильнолеговані домішками п-типу (такі області позначають символом n^+). Наявність діелектрика знімає обмеження на полярність прикладеної до затвора напруги: вона може бути як позитивною, так і негативною, причому в обох випадках струм затвора відсутній. На рисунку

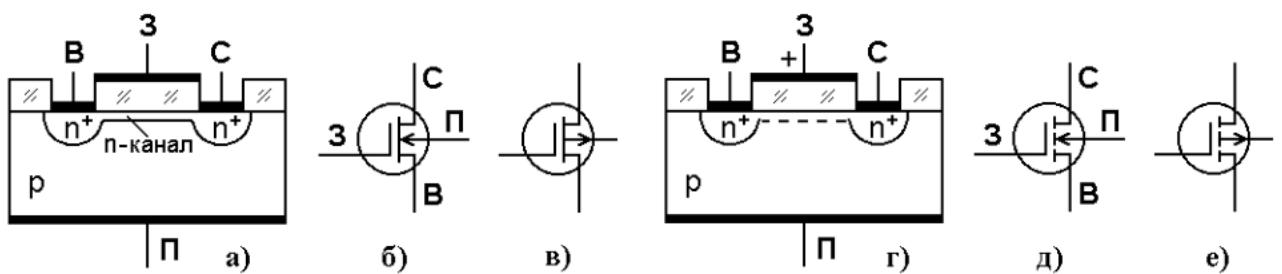


Рис. 4. Будова та умовні позначення польових транзисторів з ізольованим затвором і вбудованим каналом *n*-типу (а, б) і *p*-типу (в) та польових транзисторів з ізольованим затвором й індуктованим каналом *n*-типу (г, д) і *p*-типу (е).

показані два основні різновиди МДН-транзисторів. У першому з них між сильнолегованими областями витоку і стоку є спеціально створений канал того ж типу провідності, що й області витоку й стоку (вбудований канал) (а). Провідність такого каналу регулюється напругою на затворі відносно витоку. У випадку вбудованого каналу п-типу негативна напруга на затворі «виштовхує» електрони з каналу і його провідність зменшується (режим збідення), а позитивна напруга – «притягує» електрони і провідність каналу зростає (режим збагачення). У другому різновиді МДН-транзисторів канал спеціально не створюється (Рис. 4г). Тому при нульовій напрузі на затворі провідність між витоком і стоком практично відсутня. Однак при достатньо великій позитивній напрузі на затворі відносно витоку і підкладки у приповерхневий шар напівпровідника між витоком і стоком під дією електричного поля втягаються електрони з підкладки р-типу (де вони є неосновними носіями) та з сильнолегованих n^+ -областей витоку й стоку (де вони є основними носіями). Таким чином, між витоком і стоком утворюється індуктований канал (зображені пунктиром на (г), по якому може протікати струм. Зрозуміло, що МДН-транзистори з індуктованим каналом можуть працювати лише в режимі збагачення.

6. Схема включення та принцип дії польового транзистора з р–п-переходом. Є у попередньому пункті. Транзистор в схемах включення можна розглядати як активний чотириполюсник.

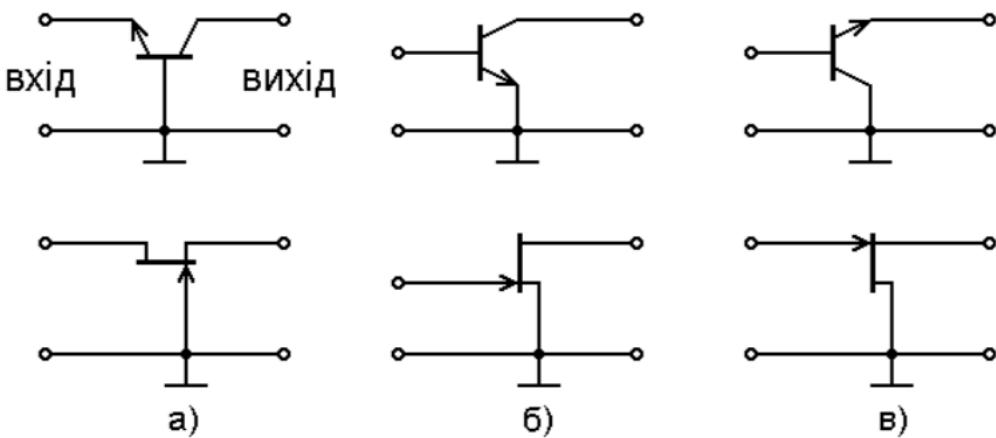


Рис. 5. Схеми включення транзисторів: а) зі спільною базою (затвором), б) зі спільним емітером (витоком), в) зі спільним колектором (стоком).

7. Вихідні (стокові) та стокозатворна характеристики польового транзистора з р–п-переходом. Напруга насиження, напруга відсічки. Крутизна характеристики.

На рисунку зображене сімейство характеристик типового польового транзистора з керувальним р–п-переходом. Вигляд цих характеристик подібний до характеристик біполярних транзисторів. При цьому стік відповідає колектору, витік – емітеру, а затвор – базі біполярного транзистора. Відмінність полягає в діапазоні напруг між затвором і витоком U_{3B} . Напруга, при якій струм стоку I_C сягає мінімального значення, називається напругою відсічки. При напругах затвор-витік, більших за $U_{відс}$, передавальна характеристика польового транзистора, представлена на (а), описується рівнянням:

$$I_C = I_{C0} \left(1 - \frac{U_{3B}}{U_{відс}}\right)^2$$

тут I_{C0} – струм стоку при $U_{3B} = 0$. На практиці ця величина струму стоку для польового транзистора з керувальним р–п-переходом є граничною, тому що позитивних напруг затвор-витік намагаються уникати, щоб не втрачати переваг, зумовлених малим струмом затвора.

За передавальною характеристикою польового транзистора можна визначити такий його параметр, як крутизна

$S = dI_C / dU_{CB}$ при $U_{CB} = \text{const}$. Максимального значення крутизна досягає при $I_C = I_{C0}$.

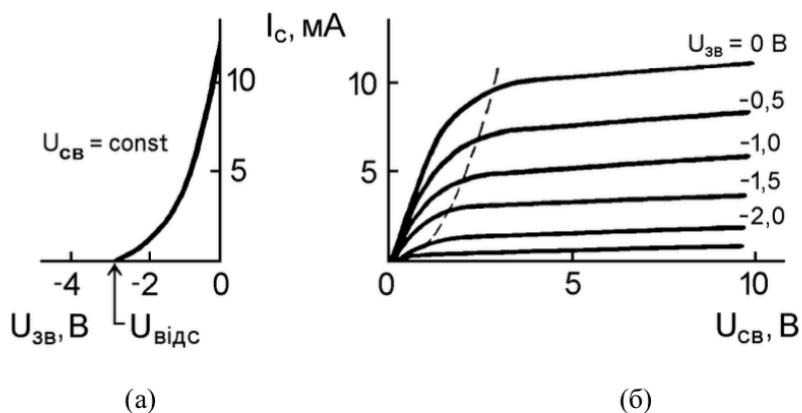


Рис. 8. Вольт-амперні характеристики польового транзистора з $p-n$ -переходом:
а) передавальна, б) вихідна. Пунктиром відокремлено область насищення.

8. Будова, типи та умовні позначення польових транзисторів.

Принцип роботи польових транзисторів простіший за принцип дії біполярних транзисторів. Польовий транзистор являє собою триелектродний прилад, в якому струм створюють основні носії заряду під дією повзувального електричного поля, а керування величиною цього струму здійснюється поперечним електричним полем, що створюється напругою, прикладеною до керувального електрода. За конструктивними особливостями всі польові транзистори (англ. field-effect transistor, FET) поділяються на дві групи: 1) польові транзистори з $p-n$ -переходом та 2) польові транзистори з ізольованим затвором. Позначення наведені вище.

Список використаної літератури

1. Методичні вказівки до практикуму «Основи радіоелектроніки» для студентів фізичного факультету / Упоряд. О.В.Слободянюк,
2. Ю.О.Мягченко, В.М.Кравченко.- К.: Поліграфічний центр «Принт лайн», 2007.- 120 с.
3. Ю.О. Мягченко, Ю.М. Дулич, А.В.Хачатрян “Вивчення радіоелектронних схем методом комп’ютерного моделювання” : Методичне видання. – К.: 2006.- с.