

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Сумський державний університет

Факультет електроніки та інформаційних технологій

Кафедра електроніки, загальної та прикладної фізики

«До захисту допущено»

Завідувачка кафедри

_____ Лариса ОДНОДВОРЕЦЬ

17 травня 2024 року

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня магістр

зі спеціальності 171 – Електроніка

освітньо-наукової програми «Електронні інформаційні системи»

на тему: **ІНТЕГРАЛЬНІ БІПОЛЯРНІ ТРАНЗИСТОРИ: СТРУКТУРА І**

ТЕМПЕРАТУРНА ЗАЛЕЖНІСТЬ ПАРАМЕТРІВ

Здобувача групи ЕП.м-21н Кудрявцева Дениса Валерійовича

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

_____ Денис КУДРЯВЦЕВ

Керівник завдувачка кафедри електроніки, загальної та прикладної фізики, докт.фіз-мат.наук, професор Лариса ОДНОДВОРЕЦЬ _____

Суми – 2024

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Кафедра електроніки, загальної та прикладної фізики
Спеціальність 171 – Електроніка, освітньо-наукова програма
«Електронні інформаційні системи»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри ЕЗПФ

Л.В.Ододворець

«01» травня 2024 року

ІНДИВІДУАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Кудрявцева Дениса Валерійовича

Тема роботи: **ІНТЕГРАЛЬНІ БІПОЛЯРНІ ТРАНЗИСТОРИ: СТРУКТУРА І ТЕМПЕРАТУРНА ЗАЛЕЖНІСТЬ ПАРАМЕТРІВ**

затверджена наказом по університету від «16» квітня 2024 р., № 0394-VI

2. Термін здачі студентом закінченої роботи 16 травня 2024 року

3. Вихідні дані до роботи (актуальність, мета)

Біполярні транзистори (БТ) як одні із основних елементів напівпровідникових інтегрованих мікросхем широко використовуються у мікроприладобудуванні як керованих джерел, підсилювачів та перемикачів постійного, змінного або імпульсного струму. Структура біполярного транзистора відрізняється від структури дискретного тим, що має спеціальні ізоляційні області для забезпечення умов його нормального функціонування в одному кристалі, який може налічувати порядку 10^6 біполярних транзисторів.

Мета роботи полягала в огляді сучасних літературних даних стосовно конструктивно-технологічних особливостей та робочих характеристик біполярних транзисторів різних типоміналів і функціонального призначення.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що належить їх розробити)

1. Фізичні принципи та конструктивно-технологічні особливості біполярних транзисторів.

2. Вплив температури на параметри і характеристики.

3. Вимірювання робочих характеристик біполярних транзисторів на основі віртуального експерименту.

4. Галузі застосування біполярних транзисторів.

4. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Слайди № 1-2. Актуальність і мета роботи.

Слайди № 4-6. Фізичні принципи та конструктивно-технологічні особливості БТ.

Слайди № 7-9. Конструкція та структура транзисторів. Вертикальні, горизонтальні БТ та транзистори з переходом Шотткі.

Слайди № 10. Методика вимірювань характеристик.

Слайди № 11-12. Дослідження температурної залежності робочих характеристик.

Слайд №13. Висновки.

Слайд №14. Публікації.

6. Дата видачі завдання 01.05.2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Аналіз літературних даних	до 04.05.2024 р.	<i>вик.</i>
2.	Проведення експерименту, моделювання, розрахунків, обробка результатів	до 14.05.2023 р.	<i>вик.</i>
3.	Оформлення тексту кваліфікаційної роботи.	до 16.05.2023 р.	<i>вик.</i>
4.	Попередній захист роботи	17.05.2024 р., онлайн	<i>вик.</i>
5.	Захист кваліфікаційної роботи	23.05.2024 р., 11-40 онлайн	

Здобувач вищої освіти

Кудрявцев Д.В.

Науковий керівник

Однодворець Л.В.

АНОТАЦІЯ

Обсяг роботи: 30 сторінок, 7 рисунків, 4 таблиці, 17 використаних джерел.

Актуальність теми роботи:

Значну кількість аналогових і аналогово-цифрових схем реалізують на біполярних транзисторах (БТ), причому при визначенні конфігурації і параметрів схеми заміщення БТ використовують два підходи. Перший, полягає в тому, що БТ розглядається як прилад, яким керує напруга. У цьому випадку використовують такий параметр як крутість вхідної або передатної характеристики, який суттєво залежить від режиму по постійному струму. Другий підхід полягає в тому, що БТ розглядається як прилад, що керується струмом. Проте, застосування відомих схем заміщення у рамках моделі Еберса-Мола, призведе до результатів, що відрізняються від отриманих комп'ютерним моделюванням у рамках першого підходу. Крім того БТ мають широке практичне застосування, а саме використовуються в таких галузях як: автомобільна електроніка; енергоефективні системи; медична техніка; мережеве обладнання; аудіо- та відеоапаратура.

Мета роботи полягала у вивченні конструктивно-технологічних особливостей біполярних транзисторів як компонентів електронних систем та моделювання їх параметрів, а також статичних і динамічних робочих характеристик з використанням віртуальних програм-симуляторів.

Методи: моделювання статичних і динамічних характеристик біполярних транзисторів з використанням віртуальної програми-симулятора Multisim.

Отримані результати:

1. Вивчені питання щодо впливу температури на експлуатаційні параметри і робочі характеристики біполярних транзисторів n-p-n типу, який обумовлений фізичними процесами в p-n переходах при підвищенні температури, такими як зменшення висоти потенційних бар'єрів, зростанням теплових струмів та збільшенням коефіцієнтів передачі струмів.

2. Аналіз вольт-амперних характеристик був проведений для транзисторів MPSA12 і BC547B на основі як літературних даних, так і результатів вимірювань.

Показано, що при роботі в схемі в загальним емітером зміна колекторної напруги від 0 до 15 В призводить до збільшення величини колекторного струму від 0 до 0,25А, що характерно для високочастотних транзисторів, а характер впливу температури на робочі входні та вихідні характеристики залежить від матеріалу і конструктивно-технологічних особливостей біполярних транзисторів.

3. Температурна залежність робочих характеристик $I_k = f(U_{k-e})$ незначна: при зростанні температури від 5 до 60 °С кут нахилу характеристик змінюється в середньому на 2 градуси.

4. Установлено, що при зростанні температури від 5 до 60 °С спостерігається зменшення величини колекторного струму: для транзисторів типу MPSA12 від 87,0 до 80,5 мА (приблизно на 7,5% або 0,26 мА/град) та 2SC828 від 95,2 до 90,8 мА (приблизно на 4,7% або 0,18 мА/град), що пов'язано із зменшенням потенційних бар'єрів у переходах, збільшенням теплових струмів переходів та більш інтенсивними процесами інжекції носіїв заряду.

Рекомендації щодо використання: врахування впливу зовнішніх факторів (температури) на зміну параметрів, характеристик та загальне функціонування біполярних транзисторів та схем на їх основі.

Ключові слова: біполярний транзистор; емітер; база; колектор; р-п – перехід; температурна залежність параметрів.

ЗМІСТ

РОЗДІЛ 1 ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ПРИНЦИПУ РОБОТИ БІПОЛЯРНИХ	
ТРАНЗИСТОРІВ.....	7
1.1 Конструкція та принцип роботи.....	7
1.2 Особливості технології виготовлення	11
1.3 Вплив температури на статистичні характеристики транзистора.	17
1.4 Області застосування.....	20
РОЗДІЛ 2 ТЕМПЕРАТУРНА ЗАЛЕЖНІСТЬ ПАРАМЕТРІВ	
БІПОЛЯРНИХ ТРАНЗИСТОРІВ.....	23
2.1 Методика вимірювань з використанням віртуального середовища NI Multisim 14.....	23 24
2.2 Вивчення температурної залежності параметрів
ВИСНОВКИ.....	28
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	29

РОЗДІЛ 1 ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ПРИНЦИПУ РОБОТИ БІПОЛЯРНИХ ТРАНЗИСТОРІВ

Біполярний транзистор (зазвичай його називають просто транзистором) - це напівпровідниковий прилад з двома або більше взаємодіючими випрямляючих електричними переходами, призначений для підсилення і генерування електричних сигналів. Транзистор (напівпровідниковий тріод) був створений американськими вченими Дж. Бардіном, В. Браттейном і У. Шоклі в 1948 році [1]. Визначення «біполярний» вказує на те, що робота транзистора пов'язана з процесами, до яких беруть участь носії заряду, як електрони, так і дірки.

Біполярний транзистор є поширеним активним елементом у сучасних інтегральних мікросхемах. Конструкція та технологія виготовлення біполярних транзисторів дають можливість одночасного створення діодів, резисторів, конденсаторів та інших елементів, які формують на основі емітерної, базової та колекторної областей [1].

Область транзистора, основним призначенням якої є інжекція носіїв у базу, називають емітером (Е), а р-п-перехід між базою і емітером - емітерний (ЕП). Область транзистора, основним призначенням якої є збирання, екстракція носіїв заряду з бази, називають колектором (К), а р-п-перехід між базою і колектором - колекторним (КП). Залежно від типу електропровідності крайніх шарів (емітера і колектора) розрізняють транзистори р-п-р і п-р-п типу. В обох типах транзисторів фізичні процеси аналогічні, вони розрізняються тільки типом носіїв, що інжектуються або екстрагуються, і мають однаково широке застосування

1.1 Конструкція та принцип роботи

У даний час виготовляються і застосовуються виключно транзистори з площинними р-п-переходами. Пристрій площинного біполярного транзистора показано схематично на рисунку 1.1.

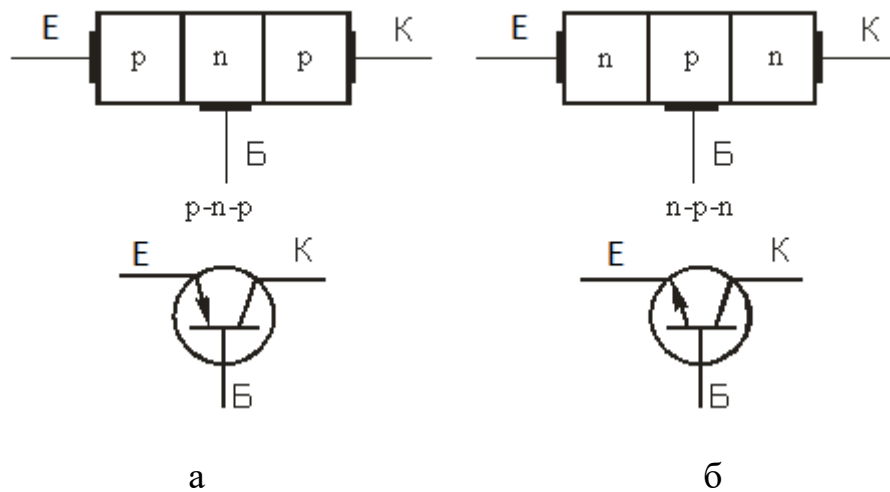


Рис. 1.1. Схематичне позначення біполярних транзисторів p-n-p (а) та n-p-n (б) структур [1]

Він являє собою пластину германію або кремнію, в якій створені три області з різною електропровідністю. У транзистора типу n-p-n середня область має дірковий, а крайні області – електронну електропровідність. Транзистори типу p-n-p мають середню область з електронною, а крайні області з діркової електропровідністю. Середня область називається базою транзистора, одна крайня область – емітером, інша – колектором.

Таким чином в транзисторі є два p-n-переходи: емітерний (між емітером і базою); колекторний (між базою і колектором).

Площа емітерного переходу менше площі колекторного переходу. Емітером називається область транзистора призначенням якої є інжекція носіїв заряду в базу. Колектором називають область, призначенням якої є екстракція носіїв заряду з бази. Базою є область, в яку інжектуються емітером неосновні для цієї області носії заряду.

Концентрація основних носіїв заряду у емітері у багато разів більше концентрації основних носіїв заряду в базі, а їх концентрація в колекторі дещо менше концентрації у емітері. Тому провідність емітера на кілька порядків вище

провідності бази, а провідність колектора дещо менше провідності емітера. Від бази, емітера і колектора зроблені виводи. У залежності від того, який з виводів є спільним для вхідний і вихідний ланцюгів, розрізняють три схеми включення транзистора:

- із спільною базою (СБ);
- спільним емітером (СЕ);
- спільним колектором (СК).

Вхідне, або керуюче, коло служить для управління роботою транзистора. У вихідне, чи кероване, коло виходять посилені коливання. Джерело підсилюються коливань включається у вхідне колі, а у вихідне включається навантаження. Розглянемо принцип дії транзистора на прикладі транзистора р-п-р-типу, включеного за схемою зі спільною базою (рис. 1.2).

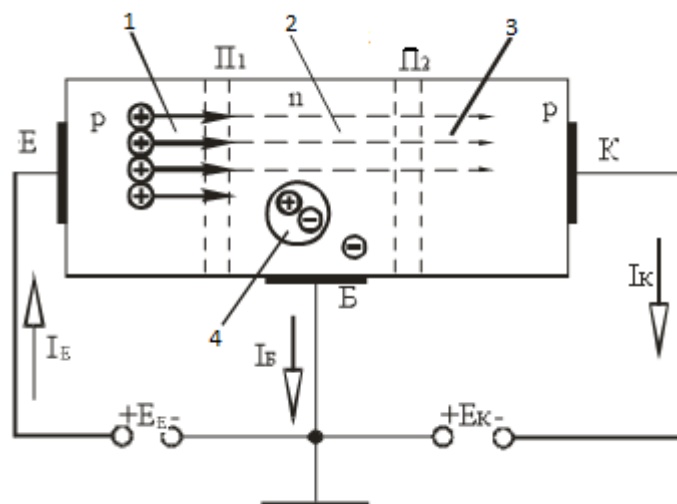


Рис. 1.2. Принцип дії біполярного транзистора (р-п-р-типу) [2]:
1 – область інжекції; 2 – область дифузії; 3 – область рекомбінації; 4 – область екстракції

У транзисторі протікає три струми: струм емітера, колектора і бази. У проводі, що є виводом бази, струми емітера і колектора спрямовані зустрічно. Отже, струм бази дорівнює різниці струмів емітера і колектора: $I_B = I_E - I_K$.

Фізичні процеси в транзисторі типу n-p-n протікають аналогічно процесам в транзисторі типу p-n-p. Повний струм емітера I_E визначається кількістю інжекттованих емітером основних носіїв заряду. Основна частина цих носіїв заряду досягаючи колектора, створює колекторний струм I_K . Незначна частина інжекттованих в базу носіїв заряду рекомбінують в базі, створюючи струм бази I_B . Отже, струм емітера розділяється на струми бази і колектора, тобто $I_E = I_B + I_K$. Струм емітера є вхідним струмом, струм колектора – вихідним [3]. Вихідний струм складає частину вхідного, тобто

$$\Delta I_K = \alpha \Delta I_E, \quad (1.1)$$

де $\alpha = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_E}$ - коефіцієнт передачі струму для схеми спільною базою;

Оскільки вихідний струм менше вхідного, то коефіцієнт $\alpha < 1$. Він показує, яка частина інжекттованих в базу носіїв заряду досягає колектора. Коефіцієнт підсилення по струму для схеми СЕ становить десятки одиниць. Вихідний струм транзистора залежить від вхідного струму. Тому транзистор-прилад, керований струмом.

Зміни струму емітера, викликані зміною напруги емітерного переходу, повністю передаються у колекторне коло, викликаючи зміну струму колектора. А тому напруга джерела колекторного живлення E_K значно більше, ніж емітерного E_E , то і потужність, споживана в колі колектора P_K , буде значно більше потужності в колі емітера P_E . Таким чином, забезпечується можливість управління великою потужністю в колекторному ланцюзі транзистора малою потужністю, що витрачається в емітерному колі, тобто має місце підсилення потужності [6].

Транзистор може працювати в трьох режимах залежно від напруги на його переходах. При роботі в активному режимі на емітерний перехід напруга пряма, а на колекторному - зворотня. Режим відсічення, або замикання, досягається подачею зворотної напруги на обидва переходи (обидва p-n-переходу закриті).

Якщо ж на обох переходах напруга пряма (обидва р-n-переходу відкриті), то транзистор працює в режимі насичення. У режимі відсічення і режимі насичення управління транзистором майже відсутня. В активному режимі таке управління здійснюється найбільш ефективно, причому транзистор може виконувати функції активного елемента електричної схеми (підсилення, генерування і т.п.) [7].

1.2 Особливості технології виготовлення

Структура біполярного транзистора в інтегральних мікросхемах відрізняється від структури дискретного транзистора ізоляцією від підкладки.

Біполярні транзистори мікросхем формуються на напівпровідниковій підкладці р-типу в ізольованих від неї областях n-типу, званих кишнями. Ізоляція кишень від підкладки може бути виконана кількома способами. Найідеальніший спосіб ізоляції за допомогою діоксиду кремнію, проте, він є технологічно складним (рис. 1.3а). Найбільш простий спосіб ізоляції за допомогою зворотномішаного р-n-переходу, але він недосконалий через наявність зворотного струму (рис. 1.3б). Основним методом ізоляції при виробництві інтегральних мікросхем є створення комбінованої ізоляції, що поєднує два попередні (рис. 1.3в).

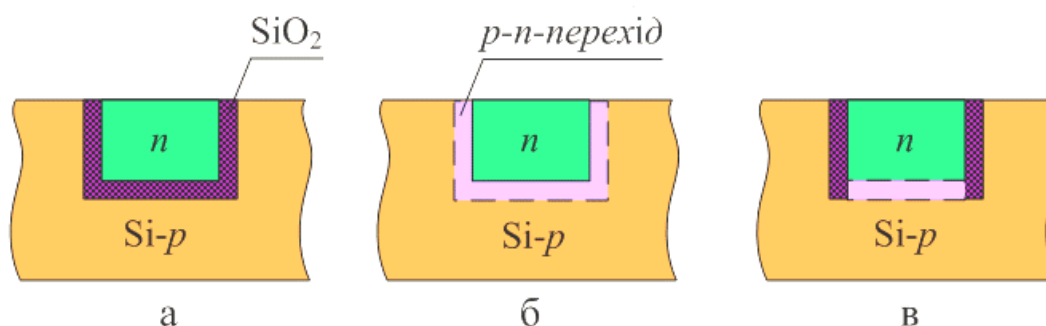


Рис. 1.3. Способи ізоляція кишень від підкладки [5]: а – ізоляція за допомогою діоксиду кремнію; б – ізоляції за допомогою зворотномішаного р-n-переходу; в – комбінація попередніх

Найбільшого поширення набули транзистори, які мають вертикальну структуру, в якій всі виводи від областей транзистора розташовані в одній площині на поверхні підкладки (рис. 1.4). Така структура називається планарною. Структура складається з емітерної, базової і колекторної областей. Під колекторною областю розташований прихований n^+ -шар. Від зовнішніх впливів структура захищена діоксидом кремнію, в якому є вікна для приєднання металевих виводів до відповідних областей структури.

Особливістю даної структури є те, що вивід від колекторної області інтегрального транзистора здійснюється на верхній поверхні кристала. Тому для зменшення об'ємного опору області колектора створюється прихований n^+ -шар. Однак навіть при наявності прихованого n^+ -шару опір колекторної області інтегрального транзистора виявляється більше аналогічного опору

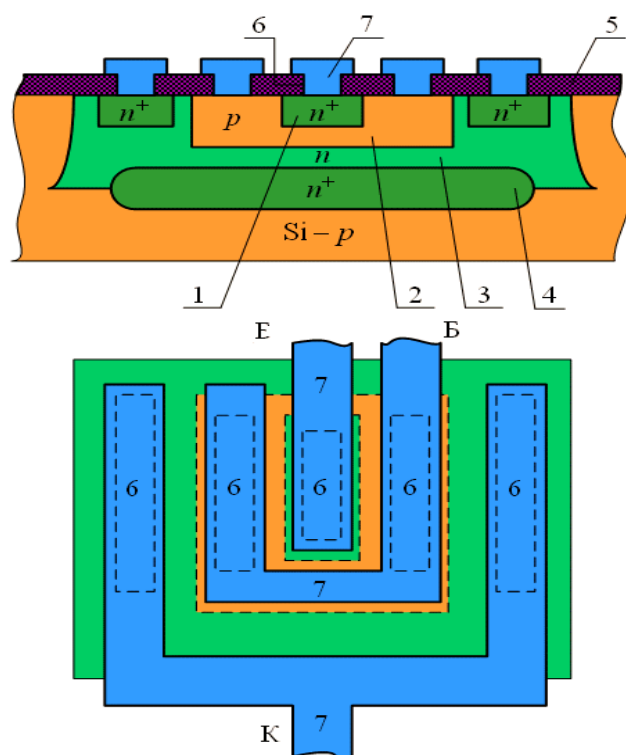


Рис.1.4. Структура біполярного транзистора з прихованим n^+ -шаром [5]: 1 – емітерна область; 2 – базова область; 3 – колекторна область; 4 – прихований n^+ -шар; 5 – діоксид кремнію; 6 – вікна для приєднання металевих виводів; 7 – металеві виводи

дискретного транзистора, тому що прихований n^+ -шар відокремлений від колекторного електрода високоомним шаром колекторної області. Це призводить до деякого погіршення частотних властивостей інтегрального транзистора у зв'язку зі збільшенням постійної часу ланцюга колектора (часу перезарядження бар'єрної ємності колектора). Тому граничні частоти біполярних транзисторів в інтегральних мікросхемах зазвичай не перевищують 500 МГц. При цьому необхідно також врахувати, що вихідна ємність інтегрального транзистора складається не тільки з бар'єрної ємності колекторного переходу, але і з бар'єрного транзистора ті іншою частиною кристала. Основу біполярних інтегральних мікросхем становлять транзистори n - p - n -типу, це викликано зручностями формування саме n - p - n -структур і дещо кращими параметрами інтегральних n - p - n -транзисторів у порівнянні з параметрами інтегральних транзисторів p - n - p -типу [2].

Справа в тому, що для формування сильнолегованих емітерних областей транзисторів n - p - n -типу зазвичай використовують дифузію фосфору, який має велику розчинність в кремнії і відносно малий коефіцієнт дифузії. Таким чином, для формування p - n - p -транзистора в інтегральній мікросхемі, яка містить n - p - n -транзистори, необхідно ще провести додаткову дифузію якогось акцептора з граничною розчинністю, що перевищує граничну розчинність фосфору. А такі акцептори практично відсутні.

Тому основним прийнятим варіантом інтегрального транзистора p - n - p -типу є так званий горизонтальний або бічний транзистор (рис 1.5). Для його формування не треба вводити додаткових технологічних операцій, так як p -область його емітера і колектора виходять одночасно при створенні p -області бази транзистора n - p - n -типа. Однак горизонтальний p - n - p -транзистор виявляється бездрейфовим через однорідне легування його базової області епітаксійного шару. Все це призводить до посередніх частотних властивостей горизонтального транзистора: його гранична частота не перевищує декількох десятків мегагерц.

У горизонтального транзистора повинні бути однаковими пробивні напруги емітерного і колекторного переходів. Близькими повинні бути і коефіцієнти передачі струму емітера при нормальному і інверсному включенні такого транзистора, оскільки області емітера і колектора однакові за властивостями.

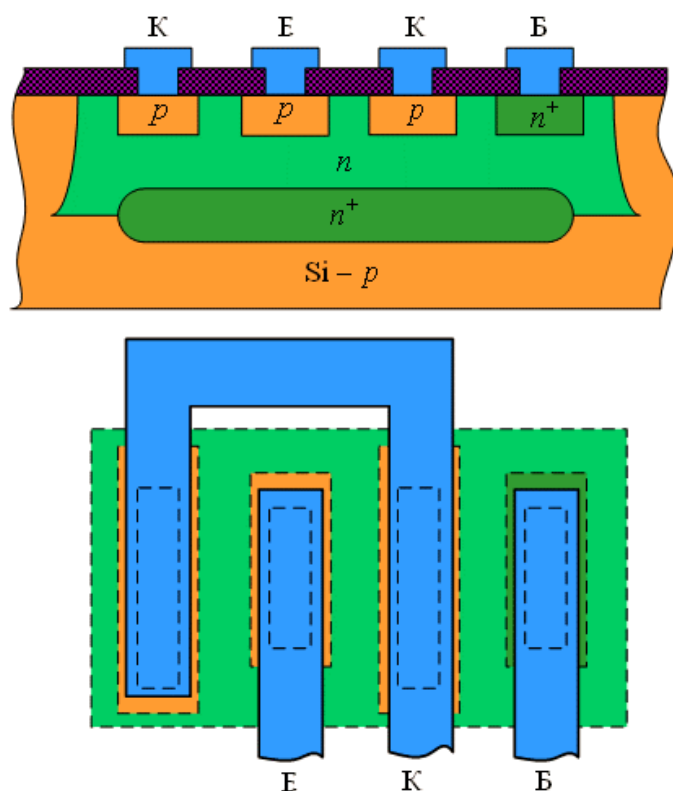


Рис.1.5. Структура горизонтального транзистора [5]

Горизонтальна структура дозволяє легко здійснити багатоклекторний транзистор, який ефективно працює в цифрових інтегральних мікросхемах [2].

Біполярний транзистор в цифрових інтегральних мікросхемах зазвичай виконує функцію ключа, і весь час працює або в режимі насичення, або в режимі відсічки. У режимі насичення відбувається накопичення неосновних носіїв заряду в базі транзистора, а також в колекторній області. Процеси накопичення неосновних носіїв і їх подальшого розсмоктування при переході транзистора в режим відсічення пов'язані з відносно повільним процесом дифузії неосновних носіїв заряду. Інерційність цих процесів визначає швидкість перемикування

транзистора з включеного стану у вимкнений і назад, тобто швидкість спрацьовування схеми. Для прискорення процесу накопичення та розсмоктування неосновних носіїв заряду доцільно обмежити їх накопичення. Досягти цього можна шляхом шунтування колекторного переходу транзистора діодом Шоткі, тобто діодом з випрямляючим електричним переходом між металом і напівпровідником. Структура такого інтегрального транзистора показана на рисунку 1.6.

Алюмінієвий електрод утворює з р-областю бази оммічний перехід, а перехід між алюмінієвим електродом і відносно високоомною n-областю

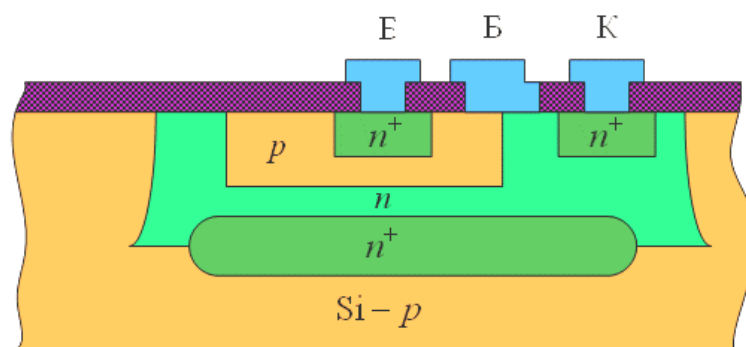


Рис.1.6. Структура транзистора з діодом Шоткі [5]

колектора виходить випрямляючим. При прямому зміщенні колекторного переходу і відповідно при прямому зміщенні діода Шоткі основна частина прямого струму колектора буде проходити через діод. Цей струм пов'язаний з рухом електронів з n-області колектора в металевий електрод і не супроводжується інжекцією дірок в n-область колектора. Таким чином, в високоомній області колектора практично не відбувається накопичення неосновних носіїв заряду. Виготовлення інтегрального транзистора з діодом Шоткі не вимагає введення додаткових технологічних операцій. Необхідно лише змінити відповідним чином фотошаблон, який застосовується при проведенні фотолітографії для зняття діоксиду кремнію під контакти, і розширити шар алюмінію за металургійну межу колекторного переходу. Однак при знятті

діоксиду кремнію в місці виходу колекторного переходу на поверхню монокристала кремнію і при обробці цієї поверхні перед нанесенням алюмінієвої металізації слід запобігти можливості забруднення р-п-переходу колектора неконтрольованими домішками [5].

Швидкість перемикання транзисторів, що працюють в ключовому режимі, обмежена часом, надмірного об'ємного заряду, що накопичується в областях бази і колектора. Для зменшення цього часу в інтегральних транзисторах використовують транзистори з діодом Шоткі. В цьому випадку діод Шоткі шунтують колекторний перехід транзистора. Існують різні конструкції транзисторів з діодом Шоткі. У цих конструкціях алюмінієва металізація забезпечує контакт з р-областю бази і п-областю колекторного шару. На перший погляд, колектор виявляється закороченим на базу. Насправді алюміній утворює з р-областю бази непрямокутний контакт, а з п-шаром колектора прямокутний контакт Шоткі. Аналогічні конструкції можна застосовувати для багатошарових транзисторів. У цих випадках збільшується ступінь інтеграції мікросхем, і зменшується час перемикання транзистора з відкритого в закритому стані в 1,5-2 рази, в порівнянні із звичайними транзисторами.

В електричне коло транзистор включають таким чином, що один з його виводів (електрод) є вхідним, другий - вихідним, а третій - спільним для вхідний і вихідний ланцюгів. У залежності від того, який електрод є загальним, розрізняють три схеми включення транзисторів: зі спільною базою (СБ), спільним емітером (СЕ) і спільним колектором (СК). Ці схеми для транзистора типу р-п-р наведено на рис. 1.7.

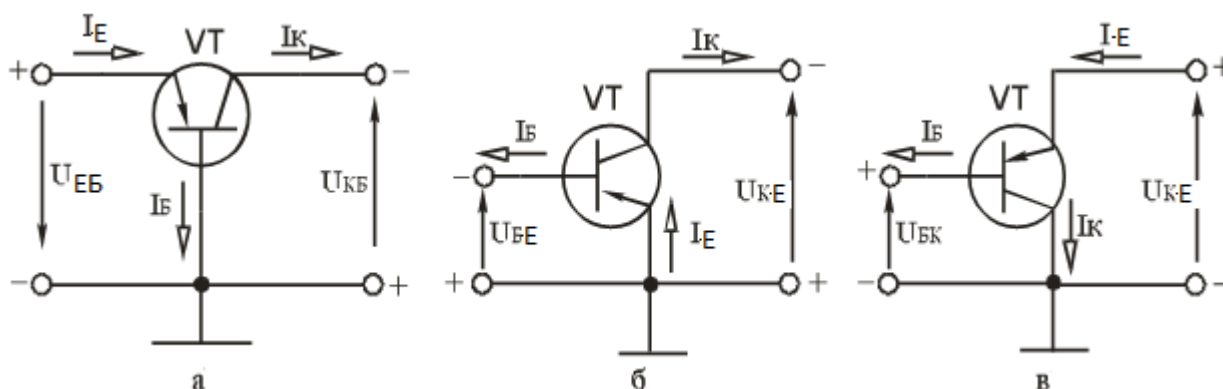


Рис. 1.7. Схеми включення біполярних транзисторів [8]:
а – зі спільною базою; б – зі спільним емітером; в – зі спільним колектором

Для транзистора п-р-п в схемах включення змінюються лише полярності напруг і напрям струмів. При будь-якій схемі включення транзистора (в активному режимі) полярність включення джерел живлення повинна бути обрана так, щоб емітерний перехід був включений в прямому напрямку, а колекторний - у зворотному.

1.3 Вплив температури на статистичні характеристики транзистора

Вплив температури на роботу біполярного транзистора обумовлений трьома фізичними чинниками [13,14]:

- зменшенням потенційних бар'єрів в переходах;

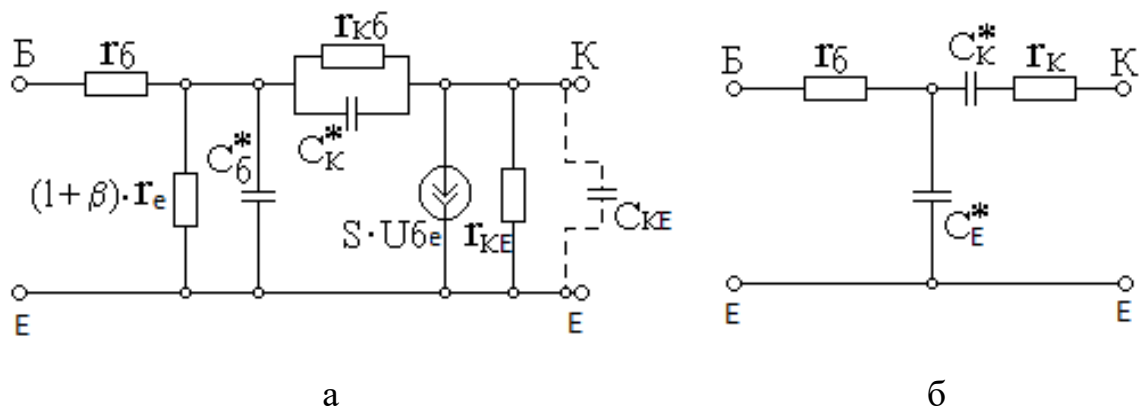


Рис.1.8. Еквівалентні схеми для активного режиму (а) і режиму відсічки (б) [16]

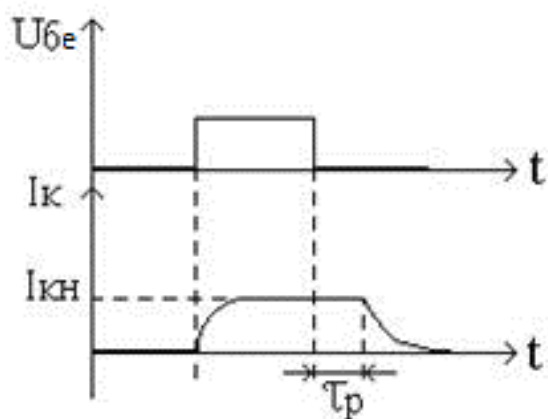


Рис. 1.9. Залежності контактної різниці потенціалів переходу Б-Е [17]

- збільшенням теплових струмів переходів;
- збільшенням коефіцієнтів передачі струмів із зростанням температури.

Зменшення потенційного бар'єру із зростанням температури також, як і в ізольованому переході, наводить до підсилення інжекції, внаслідок чого збільшується вхідний струм транзистора. Збільшення вхідного струму із зростанням температури еквівалентно зсуву характеристики у бік меншої вхідної напруги. Цей зсув описується температурним коефіцієнтом напруги $\varepsilon = \Delta U / \Delta t$, який складає для кремнієвих транзисторів $\varepsilon = - 3$ мВ/град.

Збільшення теплових струмів переходів із зростанням температури, описується температурними залежностями струмів, що наводяться в довідниках.

Динамічні параметри – це параметри, які спільно з такими ж параметрами інших компонентів схеми визначають вид АЧХ лінійної схеми або характер перехідних процесів у ключових схемах. Частотні властивості транзистора в активному режимі визначаються [15]:

- інерційністю процесів поширення рухливих носіїв у транзисторної структурі (в основному на базі);
- наявністю ємностей переходів (зокрема бар'єрної ємністю колекторного переходу) і кінцевим значенням внутрішніх опорів;
- ефектами накопичення і розсіювання зарядів.

Зазвичай, для спрощення аналізів динамічних процесів, велику частину джерел інерційності процесів у транзисторі зводяться до еквівалентних ємностей (залежних, в загальному випадку, від напруги і частоти). За рахунок цього отримують досить прості еквівалентні схеми транзистора на змінному струмі, наведені на рис.1.8, залежності контактної різниці потенціалів переходу Б-Е – на рис.1.9.

Коефіцієнт передачі по струму може бути представлений характеристикою ФНЧ першого порядку [16]

$$\beta(j\omega) = \beta / (1 + j\omega/\omega_\beta),$$

де ω_β - частота зрізу.

1.4 Области застосування

Біполярні транзистори - це напівпровідникові прилади універсального призначення, які широко застосовуються в підсилювачах, генераторах, імпульсних і ключових пристроях [14, 16-18, 22]. Найбільше застосування знаходить схема включення транзистора по схемі з загальним емітером (рис. 3.1). Основними елементами схеми є джерело живлення E_k , керований елемент – транзистор VT і резистор R_k .

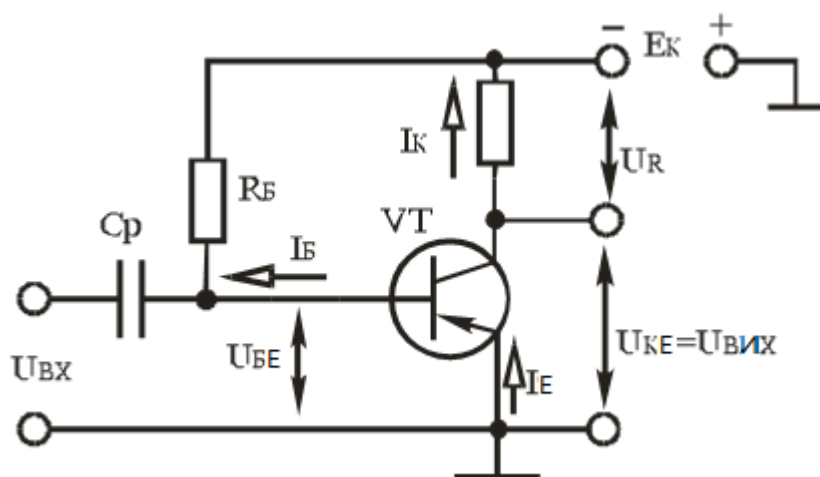


Рис.1.10. Схема найпростішого підсилювального каскаду на біполярному транзисторі за схемою з загальним емітером [18]

Резистор R_B , включений в ланцюг бази, забезпечує роботу транзистора за відсутності вхідного сигналу. Режим спокою забезпечується струмом бази спокою $I_B \gg E_k / R_B$. За допомогою резистора R_k створюється вихідна напруга, тобто R_k виконує функцію створення змінної напруги у вихідному ланцюзі за рахунок протікання в ньому струму, керованого по ланцюгу бази. Для колекторному ланцюга підсилювального каскаду можна записати наступне рівняння електричного стану [18]:

$$E_k = U_{ke} + I_k R_k, \quad (3.1)$$

тобто сума падіння напруги на резисторі R_K і напруги колектор-емітер U_{KE} транзистора завжди дорівнює постійній величині - ЕРС джерела живлення E_K . Процес підсилення ґрунтується на перетворенні енергії джерела постійної напруги E_K в енергію змінного напруги у вихідному ланцюзі за рахунок зміни опору керованого елемента (транзистора) згідно із законом, що задається вхідним сигналом.

Для колекторного кола підсилювального каскаду (рис. 3.1) у відповідності з другим законом Кірхгофа справедливе рівняння (3.1). Вольт - амперна характеристика колекторного резистора R_K є лінійною, а вольт - амперні характеристики транзистора представляють собою нелінійні колекторні характеристики транзистора (рис. 3.2 а), включеного за схемою СЕ. Розрахунок такого нелінійного ланцюга можна провести графічно. Для цього на сімействі колекторних характеристик (рис. 3.2 а) необхідно провести з точки ЄК на осі абсцис ВАХ резистора R_K [19]:

$$U_{KE} = E_K - R_K I_K. \quad (3.2)$$

Дану характеристику будують за двома точками: $U_{KE} = E_K$ при $I_K = 0$ на осі абсцис і $I_K = E_K / R_K$ при $U_{KE} = 0$ на осі ординат. Побудовану таким чином ВАХ колекторного резистора R_K називають лінією навантаження. Точки перетину її з колекторними характеристиками дають графічне рішення рівняння (3.2) для даного опору R_K і різних значень струму бази I_B . За цим точкам можна визначити колекторний струм I_K , однаковий для транзистора і резистора R_K , а також напруга U_{KE} і U_{RK} . Точка перетину лінії навантаження з однієї із статичних ВАХ називається робочою точкою транзистора.

У довідниках зазвичай не наводиться сімейство вхідних характеристик, а даються лише характеристики для $U_{KE} = 0$ і для деякого $U_{KE} > 0$. Вхідні характеристики для різних U_{KE} , що перевищують 1В, розташовуються дуже близько один до одного. Тому розрахунок вхідних струмів і напруг можна

наближено робити по вхідній характеристиці при $U_{KE} > 0$, взятої з довідника. На цю криву переносяться точки А, T_0 і Б вихідної робочої характеристики, і виходять точки A_1 , T_1 і B_1 (рис. 3.2 б). Робоча точка T_1 визначає постійну напругу бази $U_{BEП}$ і постійний струм бази $I_{БП}$. Опір резистора R_B (забезпечує роботу транзистора в режимі спокою), через який від джерела E_K буде подаватися постійна напруга на базу [21]:

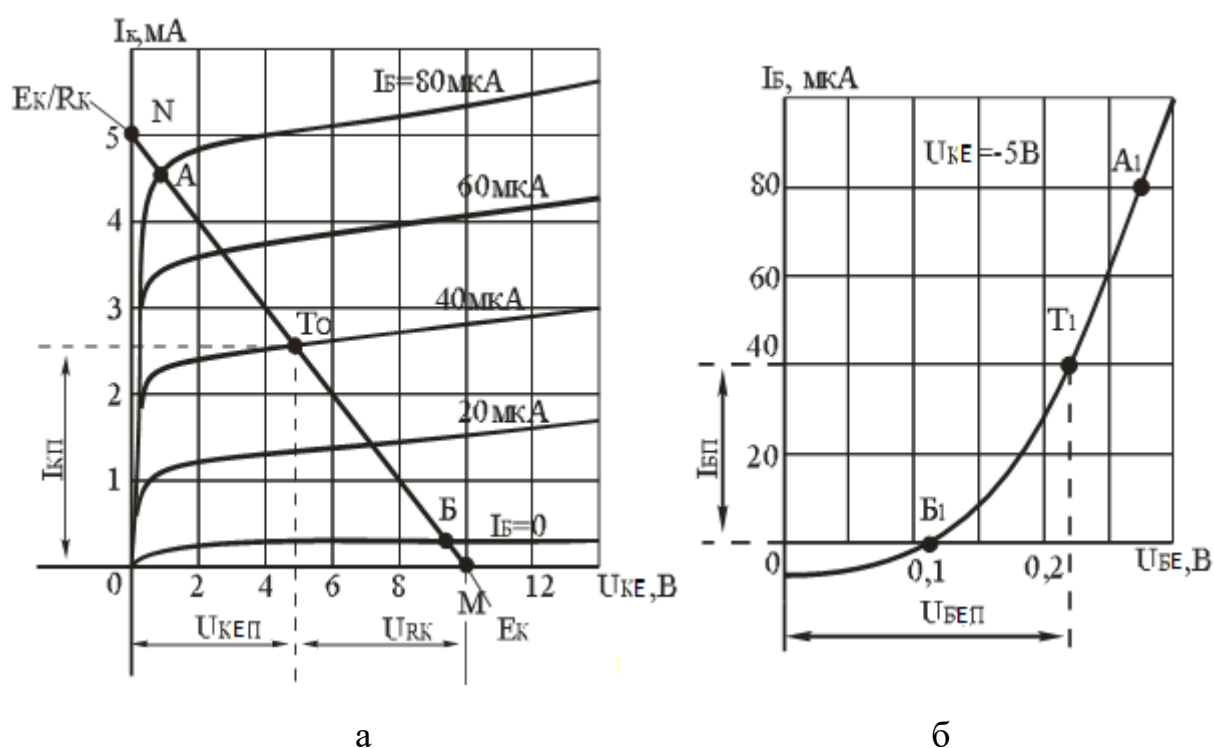


Рис.1.11. Графоаналітичний розрахунок режиму транзистора за допомогою вхідних (а) і вихідних (б) характеристик [21]

$$R_B = \frac{E_K - U_{BEП}}{I_{БП}}. \quad (3.3)$$

В активному (підсилювача) режимі точка спокою транзистора T_e знаходиться приблизно посередині ділянки лінії навантаження АБ, а робоча точка не виходить за межі ділянки АБ.

Розділ 2. ТЕМПЕРАТУРНА ЗАЛЕЖНІСТЬ ПАРАМЕТРІВ БІПОЛЯРНИХ ТРАНЗИСТОРІВ

4.1 Методика вимірювань з використанням віртуального середовища NI Multisim 14

Параметри і характеристики біполярних транзисторів n-p-n типу MPSA12 (аналог КТ315Б) та BC547В (аналог КТ3102Б) досліджувались з використанням віртуального середовища NI Multisim 14 та були ввімкнені в схему зі спільним емітером.

Робоча температура для всіх елементів була встановлена по замовчуванню 27 °С, а потім за допомогою інструментів Analyses and Simulation заданий параметр SPICE options як Use custom settings.

Для вивчення робочих характеристик БТ ВАХ $I_K = f(U_K)$ при змінному значенні I_B використовувався інструмент IV Analyzer, який дозволив отримати ВАХ для біполярних транзисторів різного типу у схемі включенні зі спільним емітером (рис.2.1). У меню Components обрати ВJT NPN, після чого відкрити налаштування аналізу кнопкою Simulate param, заповнити поля необхідного результату і натиснути ОК. Підключаємо транзистор до віртуального приладу і запускаємо симуляцію на деякий час.

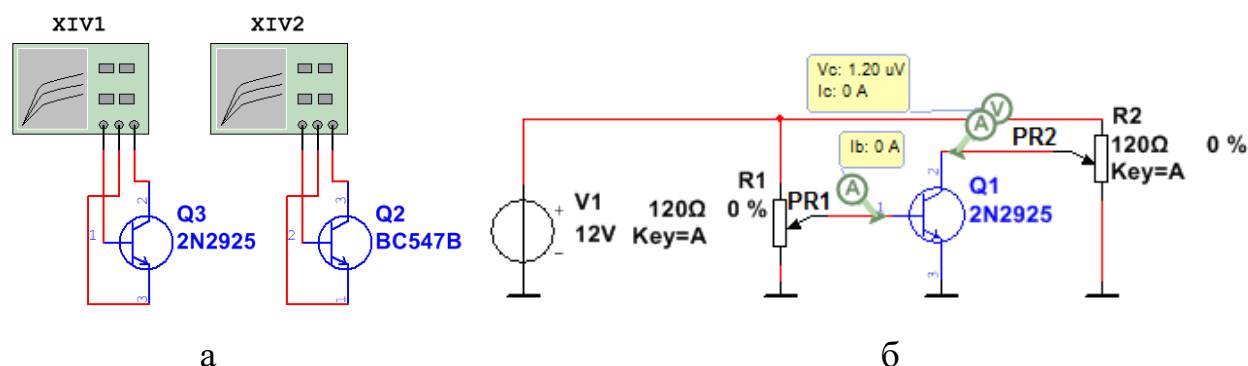


Рис.2.1. Схеми, що використовувались для вивчення характеристик біполярних транзисторів у віртуальному форматі: а – за допомогою IV Analyzer; б – з віртуальними щупами та керованими елементами

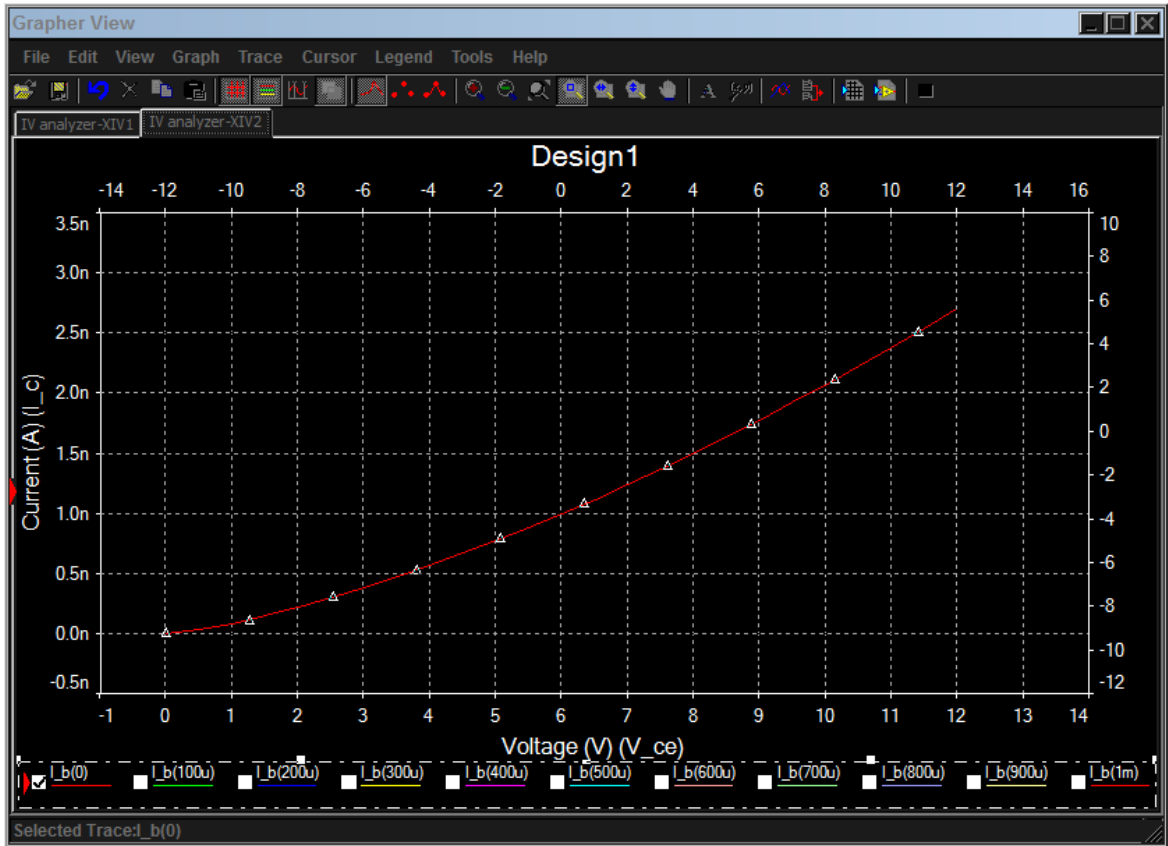


Рис.2.2. Вікно утиліти Grapher

2.2 Вивчення температурної залежності параметрів

Схема підключення БПТ для вимірювання температурних залежностей параметрів показана на рис.2.5.

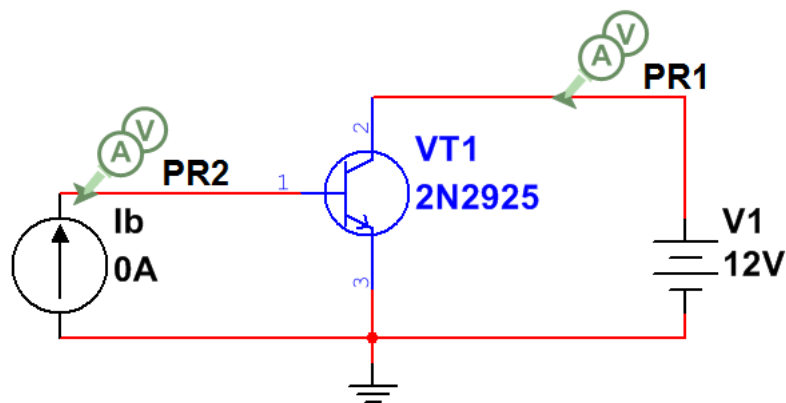


Рис.2.5. Схема для дослідження температурної залежності параметрів БПТ в Multisim

Транзистори MPSA12 і 2SC828 – біполярні кремнієві ($30 \text{ МГц} > F_{TP} < 300 \text{ МГц}$) транзистори типу n-p-n, малої потужності ($P < 300 \text{ мВт}$) та середньої потужності ($300 \text{ мВт} > P < 1,5 \text{ Вт}$) відповідно.

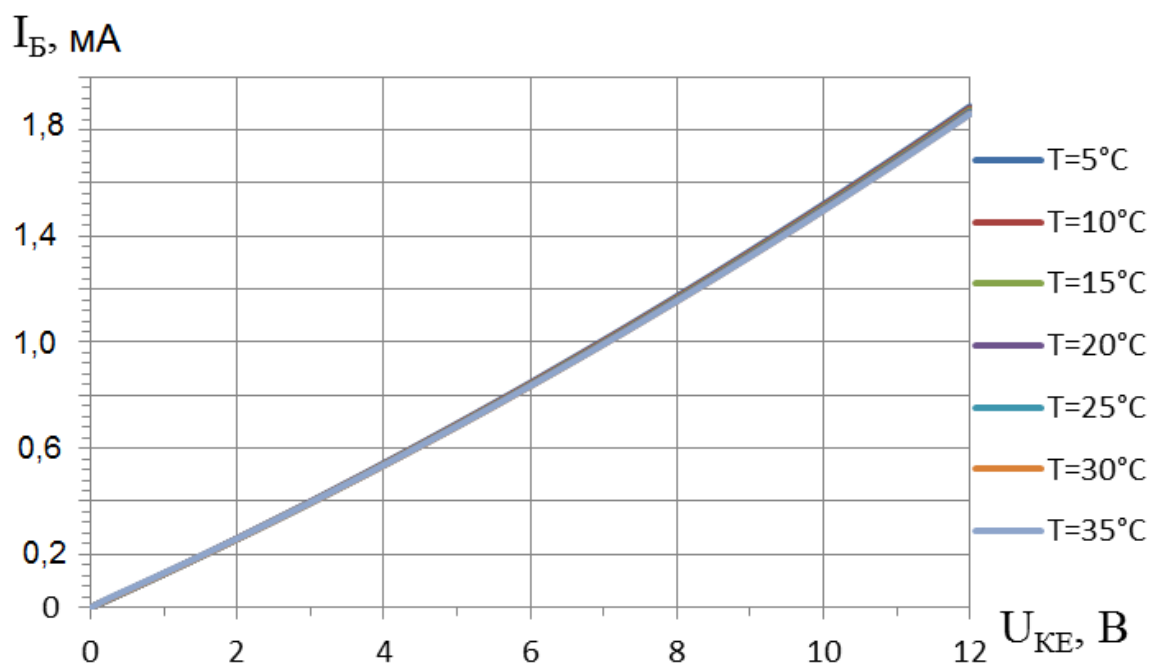


Рис.2.6. Температурна залежність ВАХ для високочастотного транзистора MPSA12

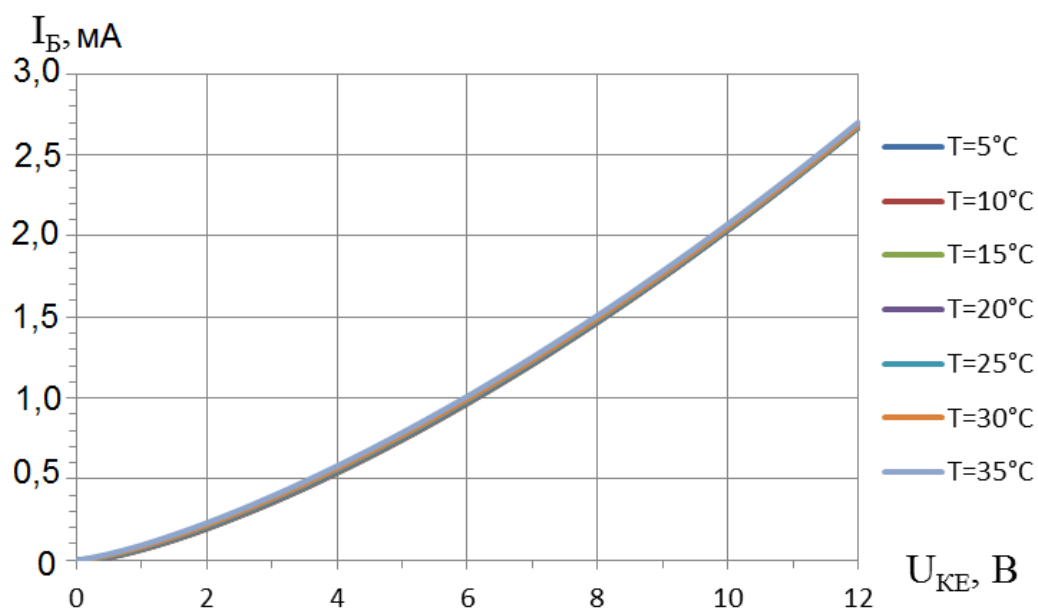


Рис.2.7. Температурна залежність ВАХ для високочастотного транзистора 2SC828

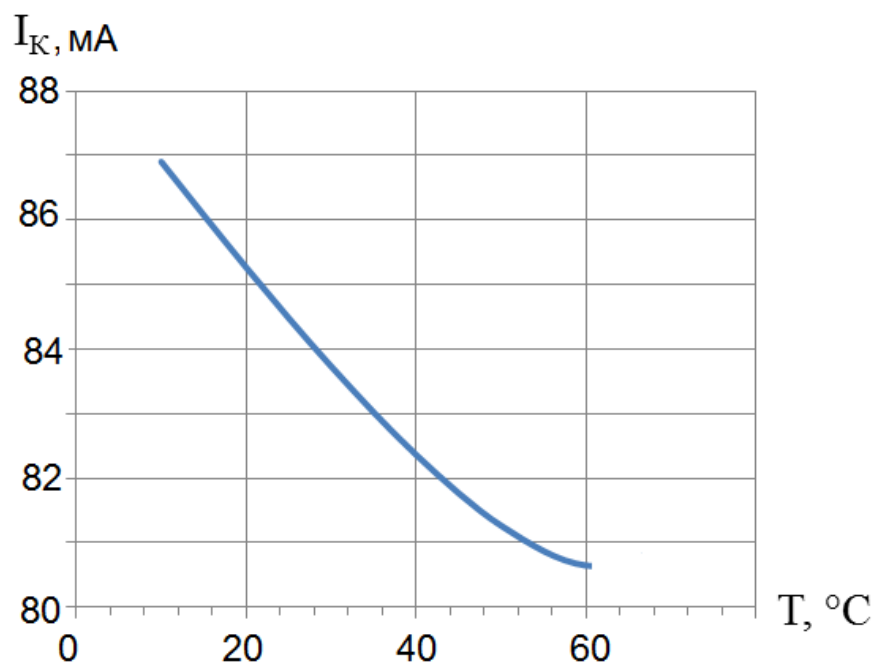


Рис.2.8. Температурна залежність колекторного струму транзистора MPSA12

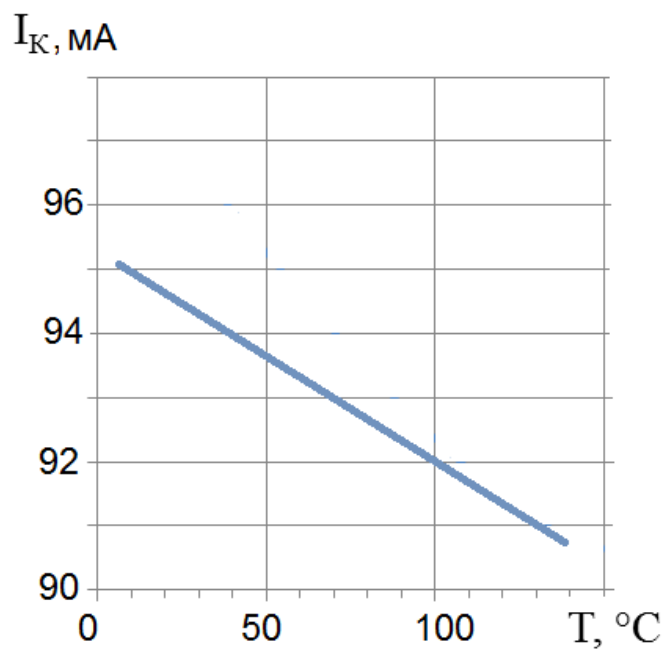


Рис.2.9. Температурна залежність колекторного струму транзистора 2SC828

Результати вимірювань сімейства робочих характеристик транзисторів MPSA12 і 2SC828 в діапазоні напруг емітер-колектор від 0 до 12 В при температурі 5 – 40 °С. показані на рис. 2.5 і 2.6. Отримані залежності вказують на те, робочі характеристики $I_k = f(U_{k-e})$ практично не залежать від температури: при зростанні температури від 5 до 40 °С кут нахилу характеристик змінюється в середньому на 2 градуси.

Температурна залежність колекторного струму вказує на наступне. При зростанні температури від 5 до 60 °С величини колекторного струму зменшуються: для транзисторів типу MPSA12 від 88,0 до 81,0 мА (приблизно на 8% або 0,3 мА/град) та 2SC828 від 95,2 до 91,0 мА (приблизно на 4,5% або 0,2 мА/град), що пов'язано із зменшенням потенційних бар'єрів у переходах, збільшенням теплових струмів переходів та більш інтенсивними інжекційними процесами.

ВИСНОВКИ

1. При виконанні кваліфікаційної роботи магістра вивчені питання щодо впливу температури на експлуатаційні параметри і робочі характеристики біполярних транзисторів n-p-n типу, який обумовлений фізичними процесами в p-n переходах при підвищенні температури, такими як зменшення висоти потенційних бар'єрів, зростанням теплових струмів та збільшенням коефіцієнтів передачі струмів.

2. Аналіз вольт-амперних характеристик був проведений для транзисторів MPSA12 і BC547B на основі як літературних даних, так і результатів вимірювань. Показано, що при роботі в схемі в загальним емітером зміна колекторної напруги від 0 до 15 В призводить до збільшення величини колекторного струму від 0 до 0,25 А, що характерно для високочастотних транзисторів, а характер впливу температури на робочі вхідні та вихідні характеристики залежить від матеріалу і конструктивно-технологічних особливостей приладів.

3. Установлено, що температурна залежність робочих характеристик $I_k = f(U_{k-e})$ незначна: при зростанні температури на 50-60 °С кут нахилу ВАХ змінюється в середньому на 2-3 градуси.

4. Показано, що зменшення величини колекторного струму: для транзисторів типу MPSA12 від 87,0 до 80,5 мА та 2SC828 від 95,2 до 90,8 мА спостерігається при зростанні температури від 5 до 60 °С, що з фізичної точки зору пояснюється процесами генерації та рекомбінації носіїв заряду під впливом температури, зниженням потенційних бар'єрів у переходах, зростанням теплових та інжекційних струмів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Прищепя М.М. Мікроелектроніка. Частина І. Елементи електроніки / М.М. Прищепя., В.П. Погребняк. – Київ: Вища школа, 2004. – 431 с.
2. Мазора Ю.Л. Радіотехніка: Енциклопедичний навчальний довідник/ Ю.Л. Мазора, Е.А. Мачуського, В.І. Правда.– Київ: Вища школа, 1999. – 838 с.
3. Матвієнко М.П. Основи електроніки: підручник.– К.: Видавництво Ліра-К, 2017. – 364 с.
4. Стахів П. Г., Коруд В. І., Гамола О. Є., Чернівчан В. Я., Мусихіна Н. П. Основи електроніки з елементами мікроелектроніки: Навчальний посібник. - Львів: «Магнолія 2006», 2010. – 225 с.
5. Борисов О.В., Якименко Ю.І. Твердотільна електроніка: підручник за заг. ред. Ю. І. Якименка. – К.: НТУУ «КПІ», 2015. – 484 с.
6. Закалик Л.У., Ткачук Р.А. Основи мікроелектроніки.- Тернопіль, 1998. – 186 с.
7. Хоружний В.А., Письмецький В.О. Функціональна мікроелектроніка, опто- та акустоелектроніка. – Харків, 1995. – 186 с.
8. Сенько В.І., Панасенко М.В., Сенько Є.В. Електроніка і мікросхемотехніка. - Т.1. Елементна база електронних пристроїв. - Київ: Обереги, 2000. – 300 с.
9. Tooley M. Electronic Circuits: Fundamentals and Applications. – Elsevier: Taylor and Francis, 2013. – 320 p.
10. Turner L.W. Electronics Engineer's Reference Book. – London: Butterworth Heinemann, 2013. – 115 p.
11. Матеріали і компоненти функціональної електроніки: навчальний посібник (електронне видання)/ Л. В. Одноворець, І. М. Пазуха. – Суми: Сумський державний університет, 2020. – 196 с.
12. Матвієнко М.П. Основи електроніки: підручник. – Київ: Видавництво Ліра-К, 2017. – 364 с.

13. Матвійків М.Д., Когут В.М., Матвійків О.В. Елементна база електронних апаратів – Львів: Вид-во НТУ «Львівська політехніка», 2018. – 428 с.

14. Панфілов І.П., Савицька М.П., Флейта Ю.В. Компонентна база радіоелектронної апаратури: навч. посібник. – Одеса: ОНАЗ, 2016. – 188 с.

15. Кожем'яко В. П. Сучасні методи та засоби відображення інформації. Частина I. Дискретні системи відображення інформації / Кожем'яко В. П, Васюра А. С, Дорощенко Г. Д. – Вінниця : ВДТУ, 2015. – 106 с.

16. Crecraft D., Gergely S. Analog Electronics: Circuits, Systems and Signal Processing. – San Diego: Butterworth-Heinemann, 2002. – 425 p.

17. Крилик Л.В., Селецька О.О. Матеріали електронної техніки: навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2017. – 120 с.