

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра електроніки, загальної та
прикладної фізики

Кваліфікаційна робота магістра
**ТЕМПЕРАТУРНА ЗАЛЕЖНІСТЬ ПАРАМЕТРІВ БІПОЛЯРНИХ
ТРАНЗИСТОРІВ ЯК ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРОННИХ СХЕМ**

Виконав
студент гр.ЕПм-92

В.В. Ганжа

Науковий керівник,
д.ф.-м.н., професор

Л.В. Однодворець

Завідувач кафедри електроніки,
загальної та прикладної фізики,
д.ф.-м.н., професор

І.Ю.Проценко

Суми 2020

РЕФЕРАТ

Мета кваліфікаційної роботи магістра полягала у дослідженні статичних і динамічних робочих характеристик біполярних транзисторних структур різних типів та їх залежності від температури.

Показано, що вплив температури на роботу транзисторів обумовлений трьома фізичними факторами: зменшенням потенційних бар'єрів у переходах, збільшенням теплових струмів переходів і збільшенням коефіцієнтів передачі струмів з ростом температури.

Температурна залежність робочих характеристик $I_k = f(U_{к-е})$ не значна: при зростанні температури від 5 до 40 °С кут нахилу характеристик змінюється в середньому на 2 градуси. Установлено, що при зростанні температури від 5 до 30 °С відбувається зменшення величини колекторного струму: для транзисторів типу 2N2925 від 87,0 до 80,5 мА (приблизно на 7,5% або 0,26 мА/град) та BC547 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.

Робота викладена на 27 сторінках, у тому числі включає 14 рисунків, використано 16 літературних джерел.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: БІПОЛЯРНИЙ ТРАНЗИСТОР, КОЛЕКТОР, ЕМІТЕР, БАЗА, ВІРТУАЛЬНЕ СЕРЕДОВИЩЕ NI Multisim, ТЕМПЕРАТУРНА ЗАЛЕЖНІСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК.

ЗМІСТ

ВСТУП	3
РОЗДІЛ 1. ФІЗИЧНІ ПРИНЦИПИ ДІЇ, КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ І РОБОЧІ ХАРАКТЕРИСТИКИ БІПОЛЯРНИХ ТРАНЗИСТОРІВ З ПРЯМОЮ ПРОВІДНІСТЮ	4
1.1 Фізичні основи роботи біполярних транзисторів.....	4
1.2 Конструктивно-технологічні особливості біполярних транзисторів.....	8
1.2.1 Конструкція р-п-р-транзисторів.....	8
1.2.2 Конструкції n^+ -р-п-транзисторів.....	9
1.3 Вплив температури на робочі характеристики біполярного транзистора...15	
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ВИМІРЮВАННЯ І РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	17
2.1 Методика і техніка віртуального експерименту	17
2.2 Результати вимірювань робочих характеристик	20
2.3 Дослідження температурної залежності параметрів біполярних транзисторів.....	21
ВИСНОВКИ	25
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	26

ВСТУП

Основними факторами, що обумовлюють розвиток мікроелектроніки, є розроблення надчистих матеріалів, досконалої технології, підготовка висококваліфікованих кадрів. Для формування активних і пасивних елементів інтегрованих мікросхем (ІМС) широко застосовуються напівпровідникові матеріали, багатокомпонентні та багат шарові плівкові матеріали на основі металів і напівпровідників, гетерогенні системи, сплави, діелектричні з'єднання, фоторезисти. На даний час номенклатура матеріалів мікро- і нанoeлектроніки перевищує 500 найменувань [1-3]. При виготовленні ІМС застосовуються три основних класи фізико-технологічних процесів: конденсація металевих та напівпровідникових шарів і плівок на поверхню твердої фази - підкладки; видалення речовини з поверхні твердої фази - підкладки; перерозподіл атомів (іонів) домішок між зовнішнім середовищем та твердою фазою або в об'ємі твердої фази - підкладки. У перших двох класах процесів змінюється геометрія підкладки, у третьому класі - склад, властивості та структура внутрішніх областей без суттєвої зміни геометричних розмірів.

Біполярні транзистори як одні із основних елементів напівпровідникових та гібридних інтегрованих мікросхем широко використовуються у мікроприладобудуванні як керовані джерела, підсилювачі та перемикачі постійного, змінного або імпульсного струму [2]. 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 кваліфікаційної роботи магістра полягала у дослідженні статичних і динамічних робочих характеристик біполярних транзисторних структур різних типів та їх залежності від температури.

РОЗДІЛ 1

ФІЗИЧНІ ПРИНЦИПИ ДІЇ, КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ І РОБОЧІ ХАРАКТЕРИСТИКИ БІПОЛЯРНИХ ТРАНЗИСТОРІВ З ПРЯМОЮ ПРОВІДНІСТЮ

1.1 Фізичні основи роботи біполярних транзисторів

Властивість підсилювати електричні сигнали постійного, змінного та імпульсного струму – це важлива особливість біполярних транзисторів (*transfer resistor*) незалежно від частотного і температурного робочих діапазонів [1-3]. У біполярного транзистора вихідний опір відрізняється від вхідного. Підсилення в транзисторі відбувається оскільки відносно невеликі зміни струму бази або напруги між базою та емітером можуть спричинити значні зміни струму між емітером і колектором.

Сучасні біполярні інтегровані транзистори є напівпровідниковими приладами, що широко використовуються в інтегрованій мікроелектроніці як керовані джерела або перемикачі струму. Біполярні транзистори є, як мінімум, триполюсниками, що містять три напівпровідникові шари з різним типом електропровідності - *n-p-n* або *p-n-p* (рис.1.1) [4]. Середній шар транзистора називають базою (Б), а зовнішні шари - емітером (Е) та колектором (К). Шари з'єднуються із зовнішніми електродами через омичні контакти. Залежно від вибраної послідовності шарів з різним типом електропровідності розрізняють *n-p-n*- та *p-n-p*-транзистори. Перша літера в позначенні транзистора означає тип електропровідності емітера, друга - бази, а третя - колектора; стрілка на емітері вказує умовний напрям струму. Області, що контактують, утворюють два *p-n*- переходи, які називають так само, як і області, між якими вони розташовані (рис. 1.2): *p-n*-перехід база-емітер (ВЕ) (керувальний перехід); *p-n*-перехід база-колектор (ВС). Слово «біполярний» означає, що у фізичних процесах, які відбуваються в транзисторі, беруть участь як електрони, так і дірки [4].

В ІМС використовують переважно силіцієві n^+p-n -транзистори, оскільки в них неосновними носіями заряду в області бази є електрони, які більш рухливі, ніж дірки, тому такі транзистори мають кращі електричні параметри - вищі граничні частоти і швидкодію. Транзистори n^+p-n технологічніші, ніж транзистори $p-n-p$. Підвищену концентрацію домішки в області емітера позначають n^+ . Щоб забезпечити максимальне значення коефіцієнта інжекції емітера, як легуючу речовину для нього використовують фосфор, що має максимальну розчинність у силіції і є донорною домішкою. Сучасні біполярні $p-n-p$ -транзистори використовують в одній схемі $n-p-n$ - і $p-n-p$ -транзистори. На їх основі розроблені логічні схеми з інжекційним живленням і двотактні підсилювачі з доповнювальною симетрією. Сучасні $p-n-p$ -транзистори з тонкою базою за параметрами не відрізняються від $n-p-n$ -транзисторів [5]. Усі виводи від областей транзистора розміщують в одній площині на поверхні кристала. Така структура біполярного транзистора (рис. 1.2) називається планарною і дає можливість з'єднувати транзистори між собою та з іншими елементами напівпровідникової інтегрованої мікросхеми плівковими металевими провідниками.

На основі емітерної, базової та колекторної областей або їх з'єднань в інтегрованих мікросхемах одночасно із транзисторами формують діоди, резистори, конденсатори, котушки індуктивності, RC-фільтри та інші елементи. Біполярні транзистори використовують як елементи цифрових і аналогових електронних систем в широкому діапазоні частот, температури і рівнів потужностей [6].

Планарно-епітаксійний n^+p-n -транзистор із заглибленим n^+ -шаром (рис.1.2) створюють за допомогою двох дифузій, базової та емітерної, в рівномірно леговану область колектора n -типу. Концентраційні профілі домішок можуть мати вигляд, наведений на рис. 1.3 а. Концентраційні профілі домішок, які були введені у напівпровідникову пластину двома дифузіями показані на рисунку тонкими пунктирними лініями [6].

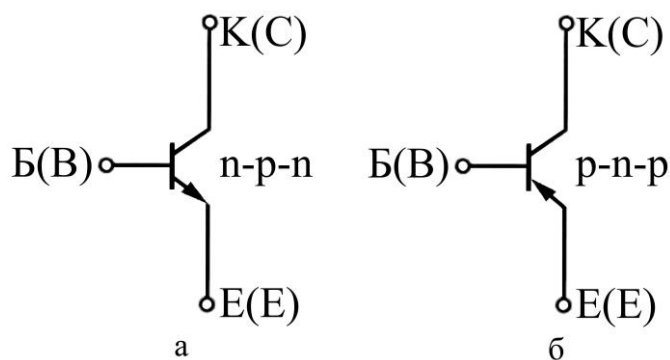


Рис. 1.1. Графічне позначення БТ [3]

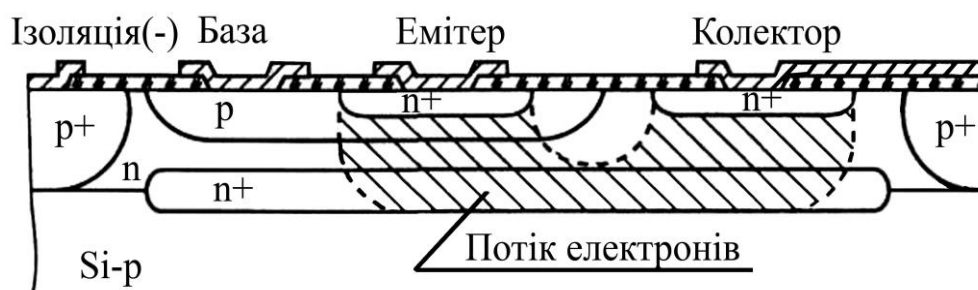


Рис.1.2. Структура біполярного транзистора, виконаного за планарно-епітаксійною технологією із заглибленим n⁺-шаром та ізоляцією p-n-переходом. Адаптований із роботи [1]

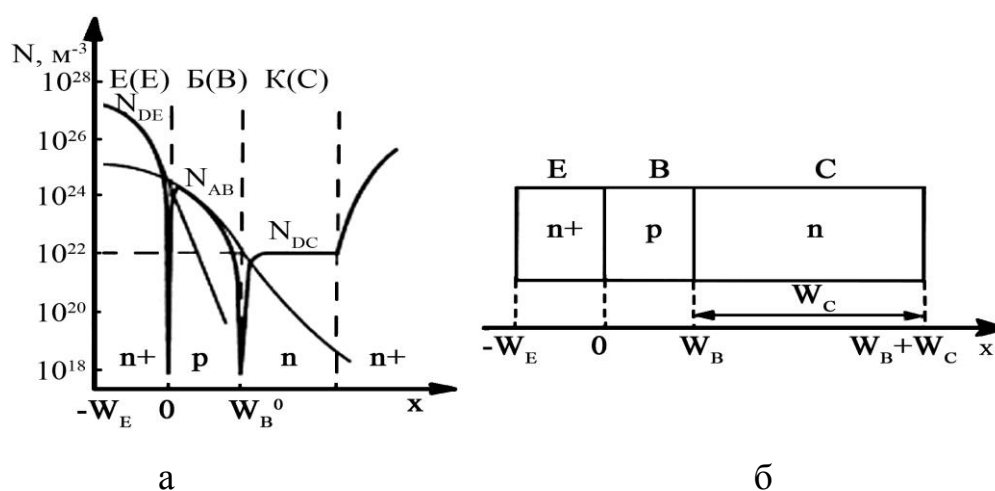


Рис.1.3. Концентраційні профілі домішок в основних областях біполярного n⁺-p-n-транзистора (а); ідеалізована одновимірна модель (б). Адаптований із роботи [4]

Крива, зображена товстою лінією, є результуючим концентраційним профілем домішок у кожній з трьох областей транзистора (Е, Б, К).

Найбільш леговоною є область емітера, найменш - область колектора. Підсилення в БТ відбувається завдяки тому, що незначні зміни напруги між базою та емітером спричинюють великі зміни струму між емітером і колектором. Якщо $p-n$ -перехід база-емітер поляризувати у прямому напрямі (на базу відносно емітера подати позитивну напругу), то висота потенціального бар'єра знизиться, і з області емітера в область бази буде інжектровано електрони. Більша частина електронного потоку з області емітера перетне базову область p -типу, епітаксійний шар p -типу, заглиблений шар n^+ -типу, знову епітаксійний шар n -типу і область n^+ -типу колектора. Шлях носіїв заряду показано на рис. 1.2.

Основною областю транзистора буде область під емітером, тому вертикальний потік електронів від n^+ -емітера до заглибленого n^+ -шару у відповідних областях зображують ідеалізованою одновимірною моделлю транзистора (рис. 1.2). Напруги U_{BE} та U_{BC} створюють пряме та зворотне зміщення на $p-n$ -переходах БЕ(ВЕ) та БК(ВС). Залежно від полярності напруг U_{BE} та U_{BC} транзистор може працювати в одному з чотирьох режимів: пряме зміщення переходів ВЕ та ВС - режим насичення; зворотне зміщення переходів ВЕ та ВС - режим блокування; пряме зміщення переходу ВЕ та зворотне зміщення переходу ВС - активний режим; зворотне зміщення переходу ВЕ та пряме зміщення переходу ВС - зворотно-активний режим [1,5-7].

В активному режимі БТ діє як підсилювач сигналу, який подають на перехід база-емітер (рис. 1.3). За прямого зміщення $p-n$ -переходу база-емітер в область бази дифундують електрони. Концентрація електронів значно менша, ніж концентрація дірок у базі; взаємним відштовхуванням електронів у базі нехтують. Оскільки товщина області бази набагато менша за дифузійну довжину електронів, вони дифундують крізь область бази майже без рекомбінації, тому майже всі електрони досягають збідненої області $p-n$ -переходу база - колектор і втягуються туди електричним полем. Ці електрони створюють струм колектора I_c . Струм бази

I_B створюється в результаті рекомбінації дірок та електронів в ОПЗ між емітером і базою й струму основних носіїв заряду бази-дірок, які інжектують з бази в емітер. Струм бази буде малим порівняно зі струмом колектора, оскільки швидкість рекомбінації в базі дуже мала і концентрація домішки у ній набагато менша, ніж відповідна концентрація домішки в емітері. Струм емітера I_E складається зі струмів бази і колектора. Співвідношення між струмами колектора й емітера визначається статичним коефіцієнтом передавання емітерного струму α_F , а підсилювальні властивості БТ визначаються статичним коефіцієнтом підсилення транзистора β_F .

1.2 Конструктивно-технологічні особливості біполярних транзисторів

1.2.1 Конструкція р-п-р-транзисторів [1, 7]

На рис. 1.4, *а* зображено ізопланарний р-п-р-транзистор. Базова область 4 створена в епітаксійному шарі *и*-типу. Емітерну 6 і колекторну 5 області *р*-типу формують одночасно з базовою областю n^+ -*р*-*р*-транзистора [8]. Порівняно з вертикальним n^+ -*р*-*р*-транзистором горизонтальний *р*-*п*-*р*-транзистор є бездрейфовим; активна область бази розміщена поблизу поверхні, де термін життя і рухливість дірок менша, ніж у глибині; товщина бази W_B залежить від роздільної здатності літографії; дірки з області емітера інжектуються також через дно, де вони можуть рекомбінувати з електронами, не досягаючи області колектора, і завдяки цьому зменшується R_F . Для горизонтального *р*-*п*-*р*-транзистора коефіцієнт β_F дорівнює 2-20, а гранична частота - 20-120 мГц.

Горизонтальна структура дає можливість формувати багатоклекторні *р*-*п*-*р*-транзистори (БКТ) [9]. Для цього колекторну область розділяють на кілька частин і від кожної роблять окремий вивід (рис. 1.4, *а, б*). Колекторні струми I_{C1} , I_{C2} (рис. 1.4, *б*) пропорційні площі колекторів. Якщо вивід бази з'єднати з джерелом постійного струму, то кожен із виводів колекторів ($C1$, $C2$) можна розглядати як окреме джерело постійного струму. Якщо один із колекторів з'єднати з базою, то коефіцієнт підсилення транзистора $\beta_F = I_{C1}/I_{C2}$ або $\beta_F =$

S_{C1}/S_{C2} (рис. 1.4, *в*). Це призводить до зменшення β_F , але покращує частотні властивості. БКТ використовують у логічних елементах інтегрованої інжекційної логіки. Найефективніший спосіб покращити параметри біполярного р-п-р-транзистора - це використовувати вертикальну структуру. Вона подібна до зображеної на рис. 1.4, *е* за умови відповідної зміни типу електропровідності областей. Розробка вертикального р⁺-п-р-транзистора із самосумщеною структурою надала можливість виготовляти швидкодійні комплементарні аналогові ІМС з малою або нульовою потужністю спокою.

1.2.2 Конструкції п⁺-р-п-транзисторів

На відміну від дискретних транзисторів БТ НІМС мають особливу конструкцію і додаткові області, які ізолюють їх від спільної напівпровідникової основи. Конструкції БТ (рис. 1.5) різняться способами їх ізоляції: р-п-переходом, шаром діелектрика та їх комбінацією [1,10-12].

У перших розробках ІМС найпоширенішими були епітаксійно-планарні транзистори із заглибленим п⁺-шаром та ізоляцією р-п-переходом (ЕПТ) (рис.1.5,а). Транзистор виконано на пластині 1 р-типу провідності у високоомному епітаксійному шарі 3 п-типу з поверхневим опором 1500-1700 Ом/п і товщиною 2-15 мкм. Локальною дифузією в пластину арсену або стибію створюють заглиблений шар 4 п⁺-типу з низьким питомим опором [10].

Дифузією бору на глибину, що перевищує товщину епітаксійного шару 3, формують ізоляційну область 2 р⁺-типу, яка оточує колекторну область. Бічні поверхні області 2 та нижня поверхня області 4 є межами колекторної області. На основу 1 і з'єднану з нею ізоляційну область 2 подають негативну напругу, яка зміщує ізоляційні переходи у зворотному напрямі. Оскільки зворотний струм ізоляційного переходу малий, забезпечується задовільна ізоляція транзистора від основи. Області, оточені з усіх боків ізоляційними р-п-переходами, називають кишнями, або ізольованими областями [11,12].

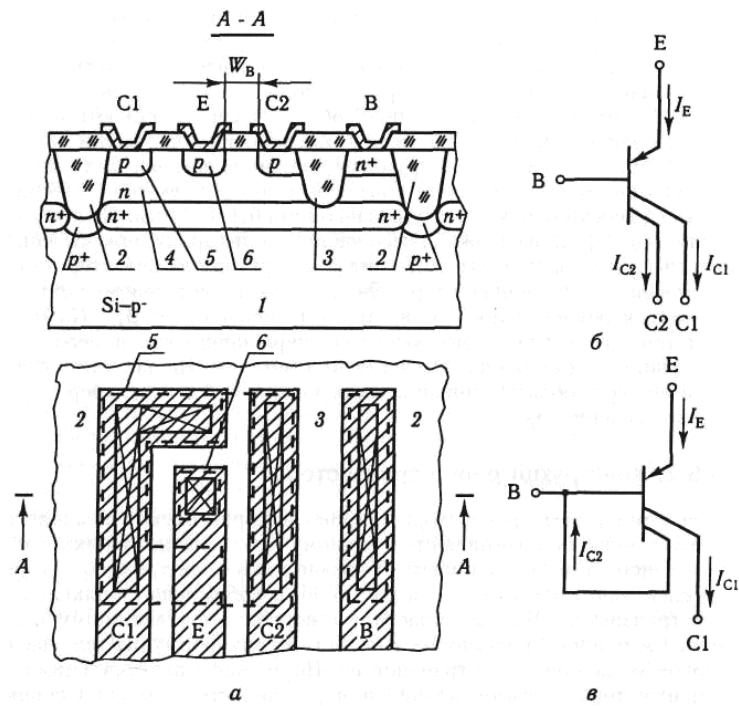


Рис. 1.4 Конструкція багатоколекторного біполярного р-п-р-транзистора. Адаптовано із роботи [1]

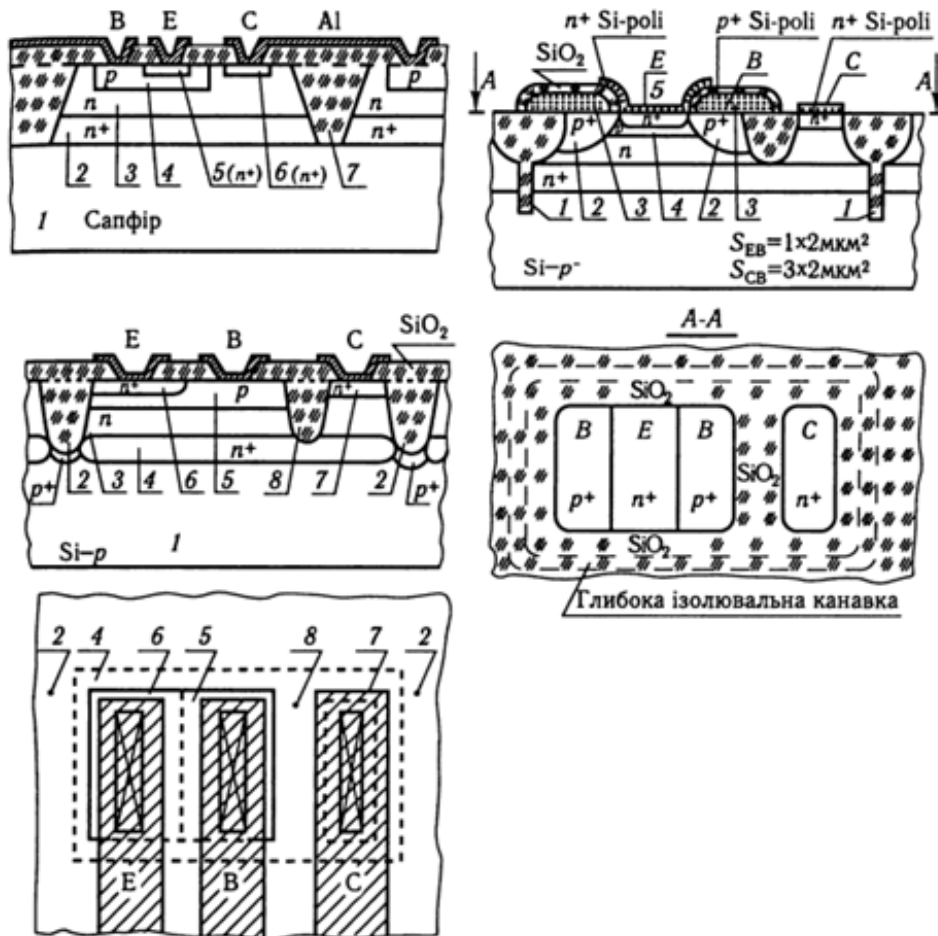


Рис. 1.5. Конструкції біполярних n^+ -р-п-транзисторів. Адаптовано із [16]

У них розміщують не тільки БТ, а й інші елементи ІМС. Базову область 5 формують локальною дифузією бору на глибину 2-3 мкм, а емітерну область 6 - локальною дифузією фосфору на глибину 1,5-2 мкм. Область 7 p^+ -типу формують разом з областю емітера 6. Вона призначена для створення омичних контактів до високоомної колекторної області 3. Низькоомний заглиблений шар 4 шунтує розміщений над ним високоомний шар 3, зменшуючи опір колекторної області. Це дає можливість поліпшити частотні властивості транзистора та знизити напругу низького рівня цифрових ІМС, в яких транзистори увімкнені за схемою СЕ і працюють у режимі насичення [13]. ЕПТ використовують для ІМС малого та середнього ступеня інтегрованості. Перевагою цього методу ізоляції та конструкції БТ є проста технологія, однак ізоляція p - n -переходом не досконала: ізоляційні області p^+ -типу займають значну площу кристала; ізоляційний перехід утворює бар'єрну ємність, яка збільшує затримку перемикання цифрових ІМС і знижує граничну частоту аналогових ІМС; при підвищенні температури і йонізуючому опроміненні збільшується зворотний струм, погіршуючи ізоляцію. У структурі транзистора, ізольованого p - n -переходом, крім основного p^+ - p - n -транзистора є паразитний p - n - p -транзистор [14, 15].

Структури біполярних епітаксійно-планарних транзисторів з ізоляцією зворотно зміщеними колекторними областями 2, 4 (КІД-технологія) зображено на рис. 1.5, б, з ізоляцією спеціальними областями 2, створеними разом з областю бази 4 (БІД-технологія), на які подають негативну напругу від окремого джерела живлення, - на рис. 1.5, в. Колектор (ізоляційна область 2) БТ з ізоляцією зворотно зміщеною колекторною областю (рис. 1.5, б) створюють дифузією домішки n -типу крізь тонкий (1-2 мкм) епітаксійний шар 3 p -типу до зімкнення із заглибленим шаром 4 p^+ -типу. Створені замкнені області 2,4 г колектором, а розміщена всередині p -область 3 - базою БТ. Емітер 5 створюють локальною дифузією домішки n -типу в базову область. Внаслідок вилучення спеціальних ізоляційних областей зменшено площу транзистора, підвищено

ступінь інтегрованості, збільшено частоту перемикання, зменшено напругу насичення U_{CEsat} , спрощено технологією виготовлення [14, 15].

Структура БІД транзистора (рис. 1.5, в) ще простіша. На пластині 1 силіцію р-типу провідності нарощують епітаксійний шар и-типу провідності, в якому одночасно дифузією формують роздільні області 2 та області бази 4 р-типу. Потім дифузією домішки n-типу формують емітер 5 та контакт 6 до області колектора 3. Ізоляція транзисторів здійснюється функціонально за допомогою подання на основу 1 та спеціальний електрод 7, з'єднаний з роздільними областями 2, негативної напруги [16].

Область просторового заряду роздільних областей 2 під час роботи ІМС досягає області просторового заряду основи. Зімкнувшись, вони утворюють ізольовану область колектора 3.

Конструкції біполярних транзисторів з діелектричною ізоляцією відрізняються від конструкцій планарно-епітаксійних тим, що транзистори розміщують у кишнях, ізольованих з усіх боків від основи діелектричним шаром [16]. Якість такої ізоляції значно вища. Струми просочування крізь діелектрик набагато менші, ніж крізь р-n-перехід при його зворотному зміщенні. Оскільки діелектрична проникність оксиду силіцію втричі менша, ніж діелектрична проникність силіцію, питома ємність діелектричної ізоляції буде нижчою.

Однак біполярні мікросхеми з діелектричною ізоляцією не набули широкого застосування через складність технології, малий ступінь інтегрованості та велику вартість. Використовують їх у спеціальних системах і в системах з підвищеною радіаційною стійкістю. Перспективними слід вважати інтегровані мікросхеми з діелектричною ізоляцією, виготовлені за технологією «силіцій на сапфірі» (СНС). На сапфірову основу 1 (рис. 1.5, г) епітаксією наносять шар 2 n^+ -типу та шар 3 n-типу. Товщина шарів не перевищує 1-2 мкм. Локальним оксидуванням на всю глибину епітаксійних плівок формують ізоляційні області 7, які разом із сапфіровою основою 1 створюють повністю

ізолювані кишені. Методами дифузії або йонного легування формують області бази 4 та емітера 5 [16].

Основним методом ізоляції елементів сучасних ІМС є метод комбінованої ізоляції, який поєднує ізоляцію діелектриком і р-n-переходом. У такій структурі значно зменшено площу транзистора та виключено паразитний транзистор, який виникає в структурі епітаксійно-пла-нарного транзистора з ізоляцією зворотно зміщеним р-n-переходом. Структуру ізопланарного транзистора (ІТ) з комбінованою ізоляцією зображено на рис. 1.5, д. Бічну поверхню БТ ізолюють шаром діоксиду силіцію 2, а дно - зворотно зміщеним р-n-переходом. Для ізоляції одного БТ від інших під зовнішньою ізоляційною областю 2 по периметру транзистора створюють протиканальні області р-типу. Селективне оксидування силіцію виконують так, щоб нижня межа областей 2, 8 досягла заглибленого шару 4, а верхня - відновила плоску поверхню пластини [16].

Внутрішня ізоляційна область 8 відокремлює контакт 7 до області колектора від бази, чим забезпечує самосуміщення області бази 5 з областю колектора 3. Бічні межі бази 5 суміщені з межами ізоляційних областей із діоксиду силіцію 2, 8 і база формується по всій площині колектора 3 без створення спеціальної маски перед цією технологічною операцією. Три сторони емітерної області 6 самосуміщені з базовою областю. Области бази й емітера створюють дифузією або йонним легуванням. Перевагою ізопланарних транзисторів є те, що за однакової площі емітерних областей ЕПТ і ІТ, загальна площа транзистора з урахуванням ізоляційної області становить 200-500 мкм² і на порядок менша за площу ЕПТ. Значно зменшені площі колекторного та ізоляційного переходів і, відповідно, їх бар'єрні ємності [16]. ІТ відрізняються конструкціями бічних ізоляційних областей, які можуть бути V- або U- подібними із заповненням полікристалічним Si. У сучасних конструкціях БТ виділяють три особливості: самосуміщення, ізоляцію глибокими канавками, полісиліцієві емітерний і базовий контакти.

Структуру перспективного БТ з одномікронними топологічними нормами зображено на рис. 1.5,е [16]. Завдяки самосуміщеній структурі та ізоляції глибокими канавками зменшено площу і роботу перемикачів транзистора,

збільшено ступінь інтегрованості, а використання полі-силіцієвих контактів 3 і 5 зменшило вертикальні розміри БТ за високого коефіцієнта передавання струму. Зменшення вертикальних розмірів інтегрованих транзисторних структур пов'язане з певними проблемами. Основна проблема полягає в тому, що в розглянутих раніше конструкціях пасивна та активна області бази формувались однією операцією.

За глибини бази меншої ніж 0,5 мкм і використання відомих технологічних операцій поверхневий опір бази буде 1 кОм/□, що є надто великим для швидкодійних ІМС. У структурі перспективного БТ глибина бази 4 менша за 0,5 мкм, а емітера - за 0,1 мкм. В активній області бази 4 (під емітером) концентрація домішки низька. У пасивну область 2 проводять додаткову імплантацію бору, зменшуючи поверхневий опір до 100-200 Ом/□. Контакт до пасивної області бази здійснюють симетричними полісиліцієвими областями 3, які є також додатковим джерелом легування. Інші елементи структури подібні до розглянутих раніше.

Якщо використовують металеві контакти до області емітера, глибина емітерного переходу обмежується значеннями 0,1-0,2 мкм. Це пов'язано з тим, що дифузійна довжина неосновних носіїв заряду, інжекттованих в область емітера за прямого зміщення р-п-переходу база-емітер, може бути більша, ніж товщина емітера. Як наслідок, на металевому контакті відбувається рекомбінація носіїв заряду і зменшується β_F . На межі полісиліцієвого контакту до області емітера швидкість поверхневої рекомбінації значно нижча, ніж на межі з металом. Це дає змогу створювати емітерні області, товщина яких менша за 0,1 мкм, зберігаючи потрібне значення β_F .

1.3 Вплив температури на робочі характеристики біполярного транзистора: фізика процесів

Вплив температури на роботу біполярного транзистора обумовлений трьома фізичними факторами: зменшенням потенційних бар'єрів у переходах,

збільшенням теплових струмів переходів і збільшенням коефіцієнтів передачі струмів з ростом температури [2, 8, 9, 15]. Зменшення потенційного бар'єра з ростом температури також, як і в ізольованому переході, приводить до посилення інжекції, у результаті чого збільшується вхідний струм транзистора.

Останній часом все більшого поширення при вимірюванні температури набувають напівпровідникові вимірювальні перетворювачі і, зокрема, напівпровідникові прилади з р-n переходом. Це пов'язано з такими їх перевагами, як: висока чутливість, мала інерційність, стабільність, порівняно невеликі габарити і вага, простота апаратної реалізації [9]. Провідні фірми (наприклад, Motorola, Analog Devices, Texas Instruments, National Semiconductor і ін.) випускають різні типи напівпровідникових датчиків температури. Як датчики температури можуть використовуватися і серійно випускаються напівпровідникові прилади з р-n переходом, у т.ч. і біполярні транзистори. Основним недоліком температурних датчиків на р-n-р переході є досить велика похибка (1-2%), що пов'язано з одного боку, зі значним розкидом характеристик від вимірювання до вимірювання, з іншого - з не лінійністю характеристик. Тому перспективи питання підвищення точності вимірювання температури напівпровідниковими приладами пов'язане, в першу чергу, з необхідністю побудови температурних моделей р-n переходу, які дозволять прогнозувати вплив температури на робочі параметри і характеристики інтегрованих приладів і систем.

РОЗДІЛ 2

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Методика і техніка віртуального експерименту

Для дослідження параметрів і характеристик транзисторів було використовуватися віртуальне середовище NI Multisim 14. Як досліджувані транзистори обрано 2N2925 (аналог КТ315Б) та BC547B (аналог КТ3102Б), які є біполярними транзисторами n-p-n типу. При дослідженні їх характеристик вони будуть ввімкнені в схемі зі спільним емітером.

- В NI Multisim по замовчуванню робоча температура для всіх елементів становить 27 °С. Щоб задати необхідні 20 °С необхідно в меню Simulate робочого вікна обрати пункт Analyses and Simulation, де на вкладці налаштування симуляції обрати вкладку Analysis options та задати параметр SPICE options як Use custom settings. Після цього необхідно натиснути кнопку Customize, знайти параметр TEMP та присвоїти йому значення 20, після чого закриваємо вікно кнопкою ОК та зберігаємо зміни налаштувань симуляції кнопкою Save.

- Для дослідження БПТ можна використати інструмент IV Analyzer або зібрати схему з керованими потенціометрами, джерелами живлення та віртуальними щупами. В нашому випадку для отримання необхідних характеристик достатньо інструменту IV Analyzer - він дозволяє отримувати ВАХ $I_K = f(U_K)$ при змінному значенні I_B для біполярних транзисторів різного типу у схемі включенні зі спільним емітером(рис.2.1).

- Для отримання ВАХ необхідно у меню Components обрати BJT NPN, після чого відкрити налаштування аналізу кнопкою Simulate param. У відкритому вікні заповнити поля необхідного результату і натиснути ОК. Підключаємо транзистор до віртуального приладу і запускаємо симуляцію на деякий час. Можна проводити зняття характеристик одразу з декількох транзисторів – для цього копіюємо віртуальну схему і замінюємо транзистор на інший.

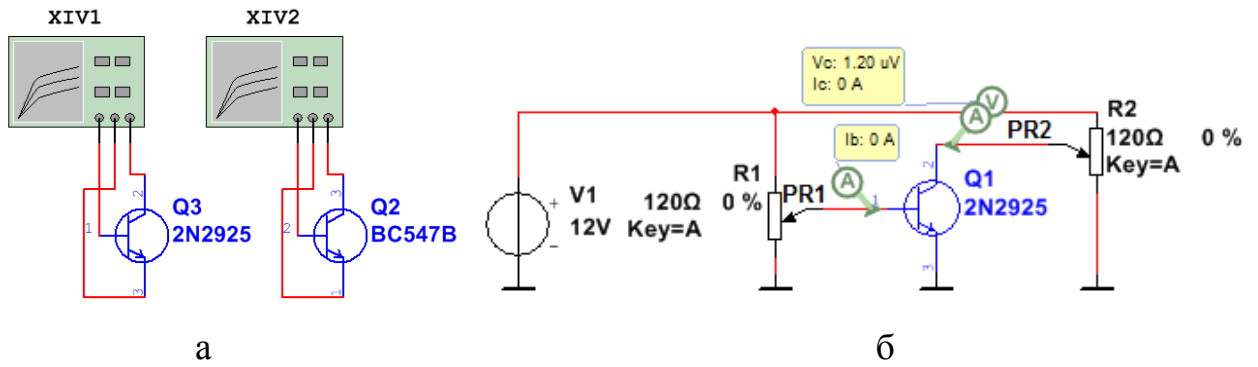


Рис.2.1. Схеми для зняття характеристик БПТ: а – за допомогою IV Analyzer; б – з віртуальними щупами та керованими елементами

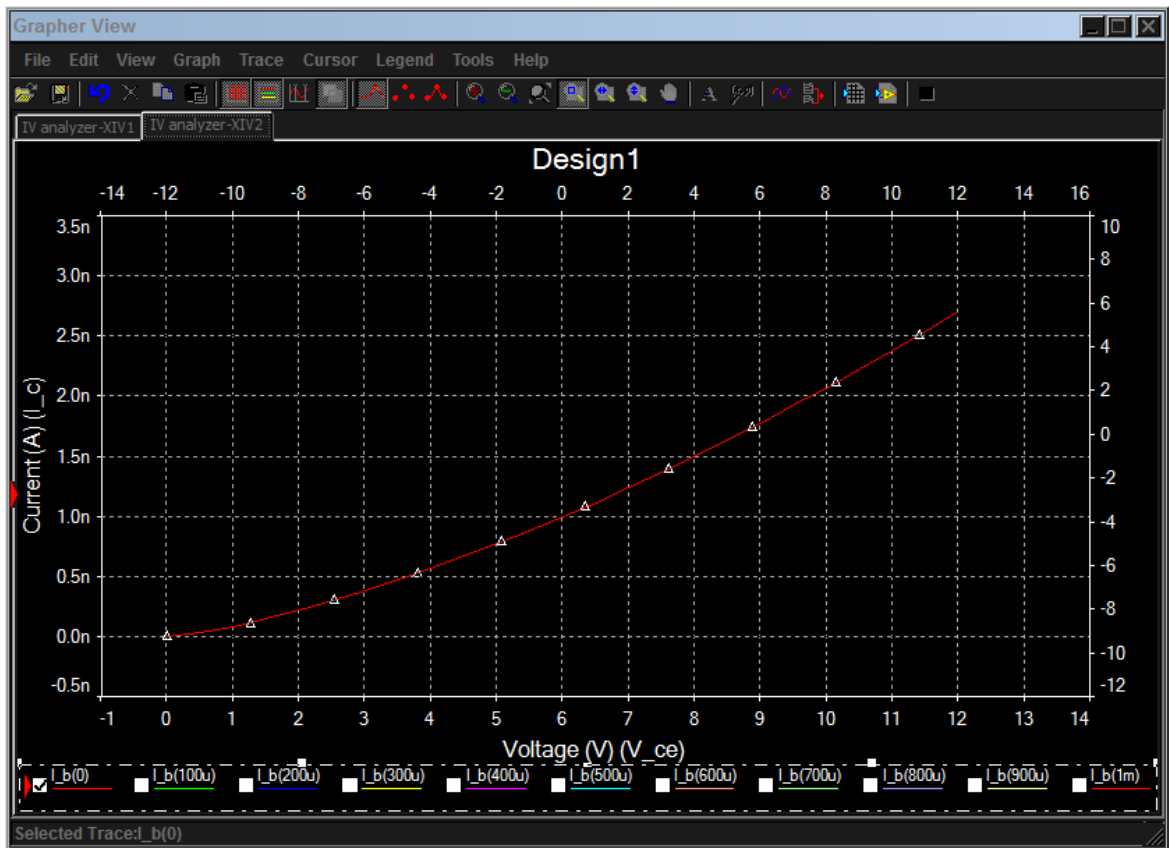


Рис.2.2. Вікно утиліти Grapher з отриманими ВАХ БПТ

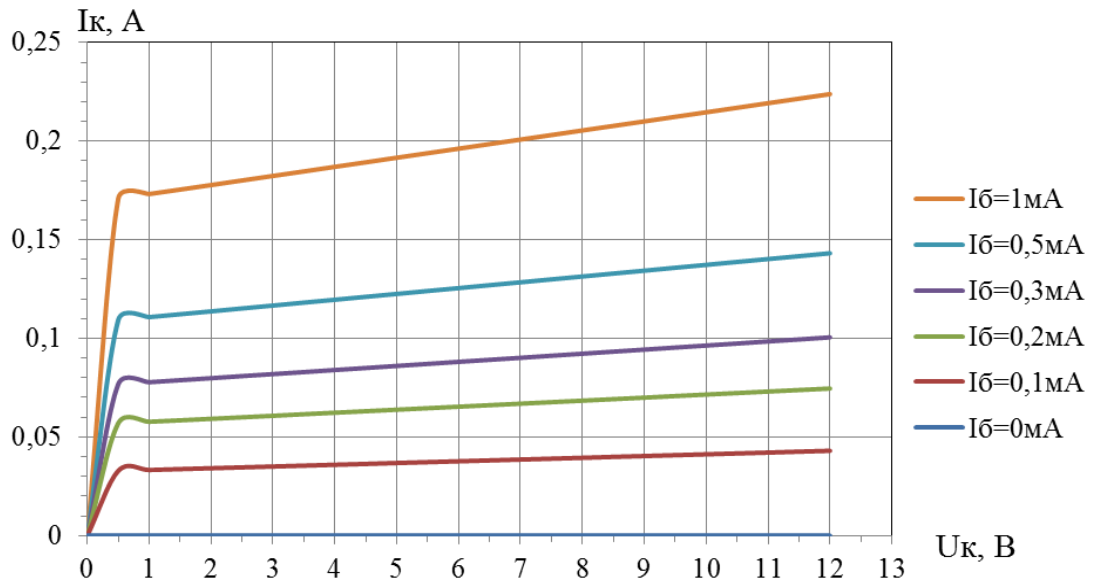


Рис.2.3. Сімейство кривих ВАХ для БПТ 2N2925

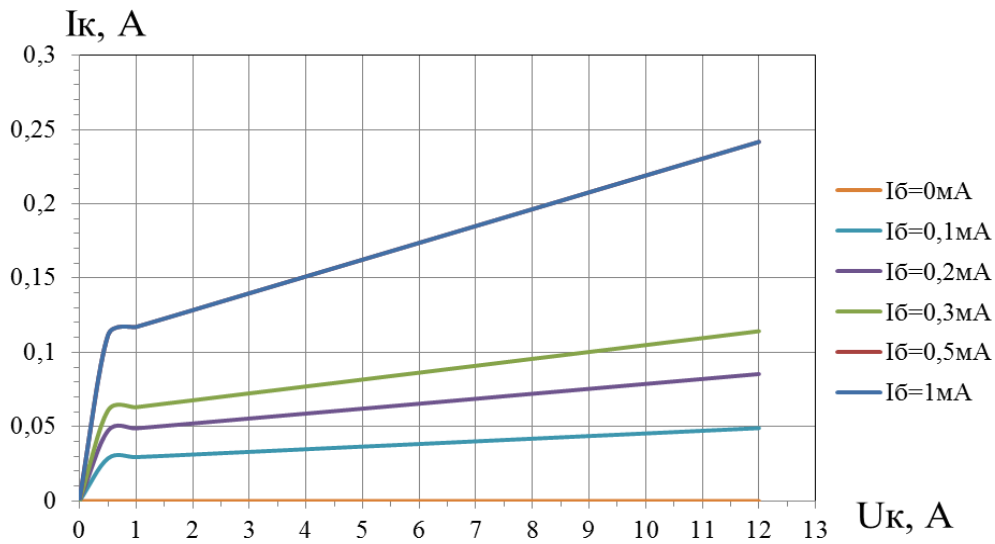


Рис.2.4. Сімейство кривих ВАХ для БПТ BC547B

Для отримання сімейства кривих необхідно задати діапазон для I_B і кількість кроків в цьому діапазоні. При експортуванні необхідно обирати які криві потрібно відобразити, а які ні. Отримані ВАХ наведені на рис.2.3 і 2.4.

2.2 Результати вимірювань робочих характеристик

Для розрахунку коефіцієнту підсилення на основі результатів вимірювань для схеми з спільним емітером скористаємося співвідношенням:

$$\beta = K_I = \frac{I_{\text{вих}}}{I_{\text{вх}}} = \frac{I_K}{I_B}; K_U = \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{U_{\text{КЕ}}}{U_{\text{БЕ}}}; K_P = K_I \cdot K_U.$$

Для розрахунку коефіцієнту підсилення візьмемо відрізки між двома значеннями I_K та I_B для однакового значення U_K на рівній ділянці ВАХ.

Для 2N2925 при $U_K = 5,5$ В коефіцієнт підсилення β становить:

$$K_I = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B} = \frac{(0,084 - 0,0638) \cdot 10^3}{0,3 - 0,2} = 202,25.$$

Для BC547B при $U_K = 5,5$ В коефіцієнт підсилення β становить:

$$K_I = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B} = \frac{(0,0871 - 0,0646) \cdot 10^3}{0,3 - 0,2} = 224,67.$$

Для визначення похибки вимірювань скористаємося співвідношенням:

$$\delta = \frac{x - x_d}{x} \cdot 100\%,$$

де x – виміряне значення; x_d – еталонне значення.

Як еталон використовуємо характеристики з даташиту BC547B для аналогічних значень напруг та струмів і порівнюємо їх з отриманими даними під час вимірів:

$$K_I = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B} = \frac{65,932 - 48,255}{0,3 - 0,2} = 176,77; \delta = \frac{224,67 - 176,77}{224,67} \cdot 100\% = 21,32$$

2.3 Дослідження температурної залежності параметрів біполярних транзисторів

Для отримання температурного коефіцієнту візьмемо БПТ 2N2925. В якості програми для дослідження також буде використано віртуальне середовище NI Multisim. Схема підключення БПТ для їх дослідження наведено на рис.2.5.

Транзистор 2N2925 – біполярний кремнієвий високочастотний ($30 \text{ МГц} > F_{GP} < 300 \text{ МГц}$) транзистор типа n-p-n, середньої потужності ($300 \text{ мВт} > P < 1,5 \text{ Вт}$). Інтервал робочих температур $-70 - (+60)^\circ\text{C}$.

Транзистор BC547 – біполярний кремнієвий високочастотний ($30 \text{ МГц} > F_{GP} < 300 \text{ МГц}$) транзистор типа n-p-n, малої потужності ($P < 300 \text{ мВт}$). Інтервал робочих температур $-70 - (+150)^\circ\text{C}$.

Для зняття ВАХ зі зміною температури буде використано режим дослідження схеми "Temperature Sweep"(діапазон робочої температури) у поєднанні з "DC Sweep"(діапазон напруг для обраного одного чи двох джерел постійної напруги). Як параметр для аналізу обираємо I для PR1. Таким чином на графіку будуть криві $I_K = f(U_{KE})$ для різних значень температури T.

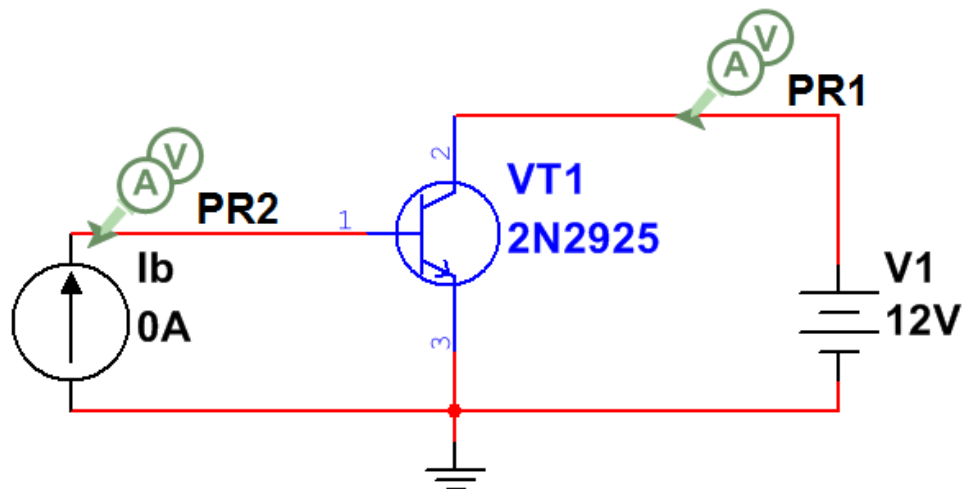


Рис.2.5. Скріншот робочої області Multisim з урахуванням температурних факторів

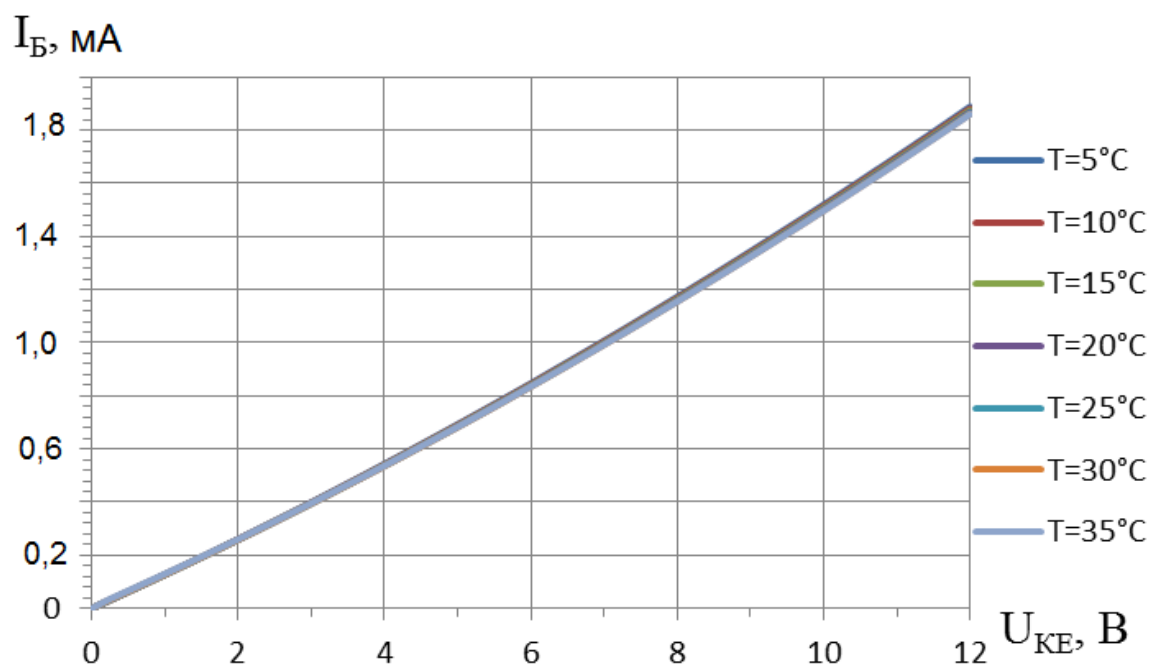


Рис.2.6. Сімейство робочих характеристик високочастотного транзистора 2N2925 для різних температур

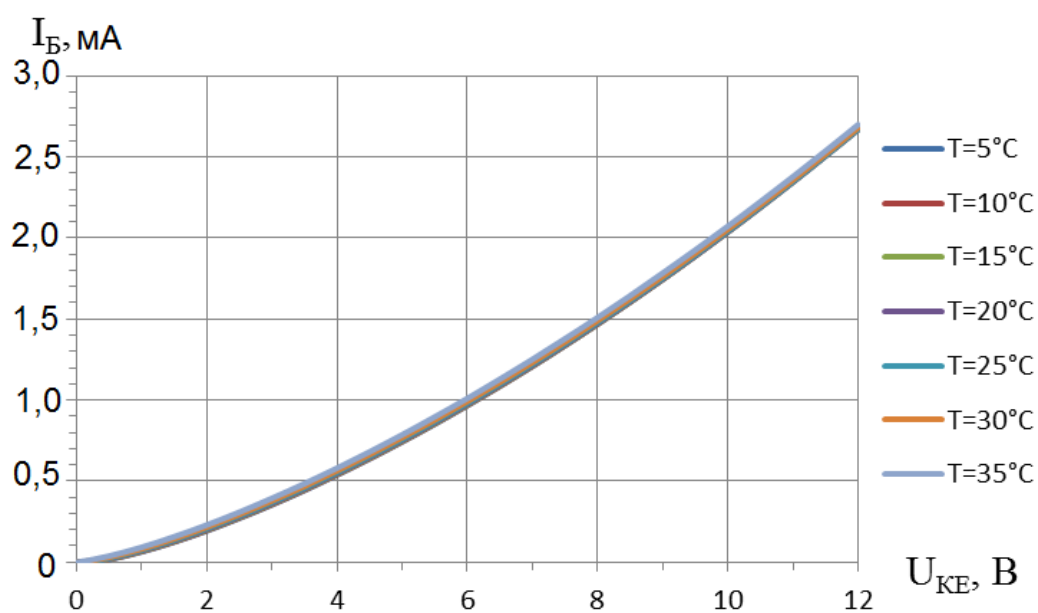


Рис.2.7. Сімейство робочих характеристик високочастотного транзистора BC547 для різних температур

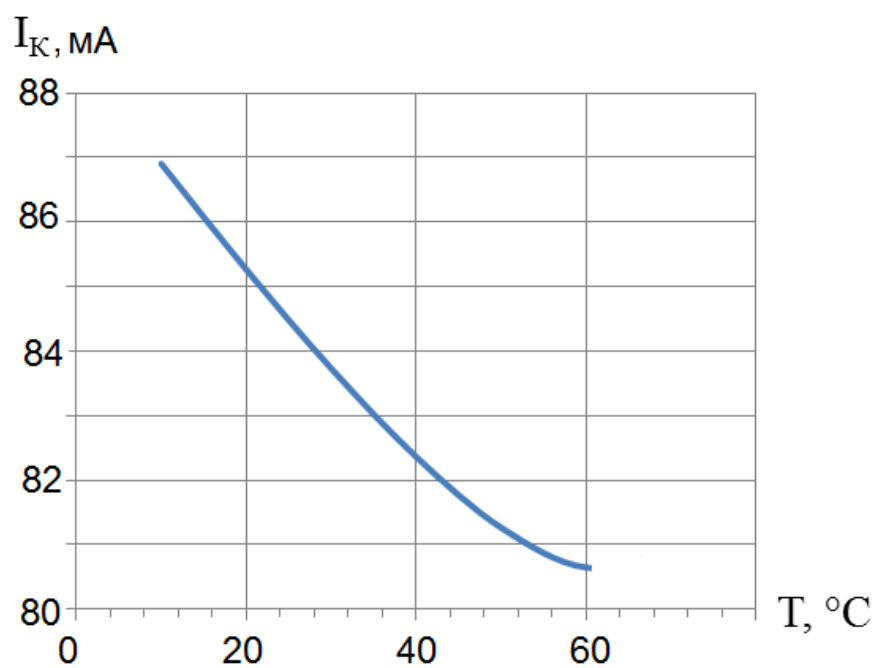


Рис.2.8. Температурна залежність колекторного струму транзистора 2N2925

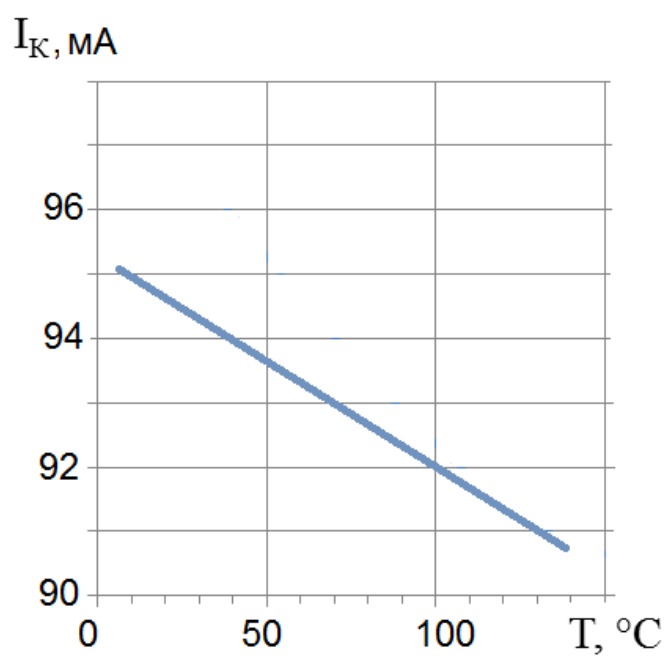


Рис.2.9. Температурна залежність колекторного струму транзистора BC547

На рис.2 6 і 2.7 наведені сімейства робочих характеристик високочастотних транзисторів 2N2925 і BC547 різної потужності в діапазоні напруг емітер-колектор від 0 до 12 В та діапазоні робочих температур від 5 до 40 °С. Результати вимірювань вказують на те, що залежність робочих характеристик $I_k = f(U_{k-e})$ практично не залежить від температури: при зростанні температури від 5 до 40 °С кут нахилу характеристик змінюється в середньому на 2 градуси.

Стосовно температурної залежності колекторного струму, то при зростанні температури від 5 до 30 °С відбувалось зменшення величини колекторного струму: для транзисторів типу 2N2925 від 87,0 до 80,5 мА (приблизно на 7,5% або 0,26 мА/град) та BC547 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.

ВИСНОВКИ

1. У ході виконання кваліфікаційної роботи вивчені питання щодо впливу температури на експлуатаційні параметри та робочі характеристики біполярних транзисторів з прямою провідністю. Показано, що вплив температури на роботу транзисторів обумовлений трьома фізичними факторами: зменшенням потенційних бар'єрів у переходах, збільшенням теплових струмів переходів і збільшенням коефіцієнтів передачі струмів з ростом температури.

2. Аналіз вхідних та вихідних характеристик біполярних транзисторів типів транзисторів 2N2925 і BC547B вказує на те, 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.

3. Показано, що характер впливу температури на вольт-амперні характеристики залежить від матеріалу і конструкції біполярних транзисторів.

4. Температурна залежність робочих характеристик $I_k = f(U_{k-e})$ незначна: при зростанні температури від 5 до 40 °С кут нахилу характеристик змінюється в середньому на 2 градуси.

5. Установлено, що при зростанні температури від 5 до 60 °С та від 5 до 130 °С відповідно відбувається зменшення величини колекторного струму: для транзисторів типу 2N2925 від 87,0 до 80,5 мА (приблизно на 7,5% або 0,26 мА/град) та BC547 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.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Прищепя М.М., Погребняк В.П. Мікроелектроніка. Частина І. Елементи електроніки. – Київ: Вища школа, 2004. – 431 с.
2. Давиденко О.П., Григоренко І.В., Мигущенко Г.П., Давиденко О.П. Електроніка у вимірювальній техніці. – Харків: Вид-во «Підручник НТУ «ХПІ», 2015. – 428 с.
3. Tooley M. Electronic Circuits: Fundamentals and Applications. – Elsevier: Taylor and Francis, 2013. – 320 p.
4. Turner, L.W. Electronics Engineer's Reference Book. – London: Butterworth Heinemann, 2013. – 115 p.
5. Матеріали і компоненти функціональної електроніки: навчальний посібник (електронне видання) / Л. В. Однодворець, І. М. Пазуха. – Суми: Сумський державний університет, 2020. – 196 с.
6. Матвієнко М.П. Основи електроніки: підручник. – Київ: Видавництво Ліра-К, 2017. – 364 с.
7. Матвійків М.Д., Когут В.М., Матвійків О.В. Елементна база електронних апаратів – Львів: Вид-во НТУ «Львівська політехніка», 2018. – 428 с.
8. Панфілов І.П., Савицька М.П., Флейта Ю.В. Компонентна база радіоелектронної апаратури: навч. посібник. – Одеса: ОНАЗ, 2016. – 188 с.
9. Кожем'яко В. П. Сучасні методи та засоби відображення інформації. Частина І. Дискретні системи відображення інформації / Кожем'яко В. П., Васюра А. С, Дорощенко Г. Д. – Вінниця : ВДТУ, 2015. – 106 с.
10. Crecraft D., Gergely S. Analog Electronics: Circuits, Systems and Signal Processing. – San Diego: Butterworth-Heinemann, 2002. – 425 p.
11. Крилик Л.В., Селецька О.О. Матеріали електронної техніки: навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2017. – 120 с.
12. Швець Є.Я., Червоний І.Ф., Головка Ю.В. Матеріали і компоненти електроніки: навч. посібник. – Запоріжжя: ЗДІА, 2011. – 278 с.

13. Болюх В. Ф., Данько В. Г. Основи електроніки і мікропроцесорної техніки: навч. посібник. – Харків: НТУ «ХПІ», 2011. – 257 с.
14. Сенько В.І., Панасенко М.В., Сенько Є.В. Електроніка і мікросхемотехніка. – Т.1. Елементна база електронних пристроїв. – Київ: Обереги, 2000. – 300 с.
15. Стахів П. Г., Коруд В. І., Гамола О. Є., Чернівчан В. Я., Мусихіна Н. П. Основи електроніки з елементами мікроелектроніки. – Львів: «Магнолія 2006», 2010. – 225 с.
16. Проценко І.Ю., Однодворець Л.В. Технологія одержання і фізичні властивості плівкових матеріалів та основи мікроелектроніки (практикуми). – Суми: Сумський державний університет, 2011. – 231 с.