

3. Біполярний транзистор (принцип дії та характеристики)

3.1. Принцип дії.

При запертій полярності струм $p-n$ переходу I_0 визначається неосновними носіями наявними в напівпровіднику праворуч і ліворуч від переходу

Якби ми мали змогу змінювати концентрацію цих неосновних носіїв, ми одержали б засіб

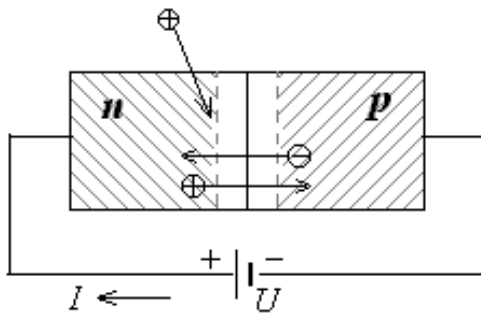


Рис.3.1.

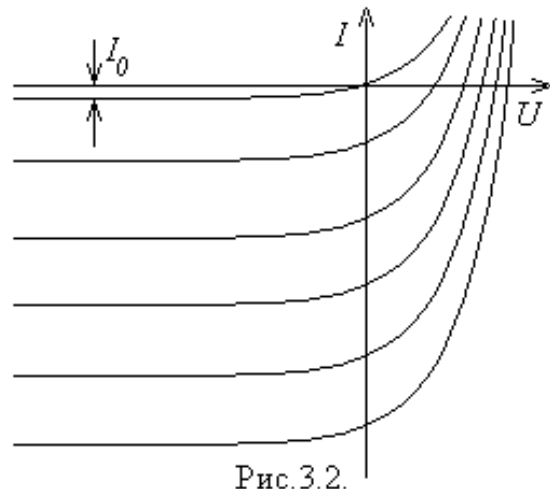


Рис.3.2.

керування величиною струму через запертий перехід. Так, наприклад, вводючи ззовні дірки в електронну область n (рис.3.1) можна було б збільшувати струм через закритий перехід. При цьому, в міру зростання кількості інжектованих дірок, струм насичення ставав би все більшим і більшим (рис.3.2).

Таку інжекцію можна реалізувати в системі, зображеній на рис.3.3. Система ця має назву *біполярного транзистора*.

Такий транзистор складається з двох $p-n$ переходів, причому по кінцях знаходяться P -області, а в середині - N -область. Полярність джерел живлення є такою, щоб лівий (1)

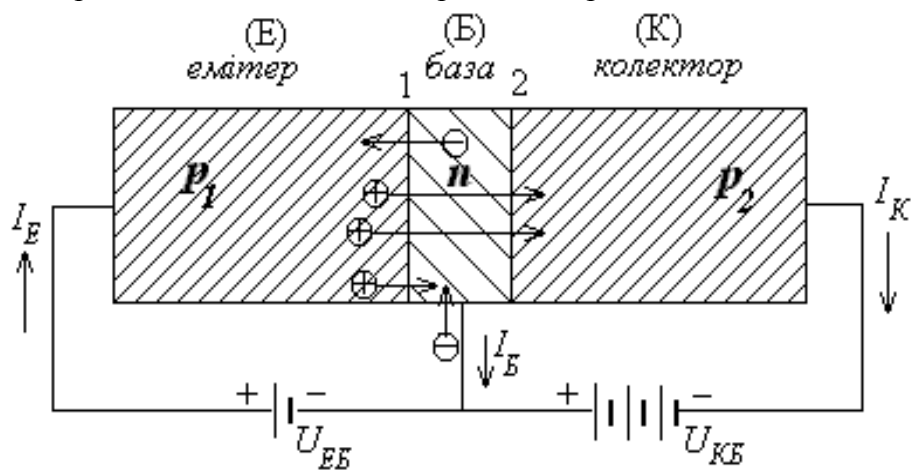


Рис.3.3.

перехід був відкритий, а правий (2) - закритий. Будемо вважати, що діркові області леговані досить сильно, значно

сильніше за електронну, так що остання є базою по відношенню до області p_1 , яку надалі називатимемо емітером. Область p_2 має назву колектора.

Дірки, що інjektуються з емітера у базу будуть там неосновними носіями і концентрація їх залежить від величини емітерного струму I_E . Тим самим реалізується бажаний для нас спосіб керування концентрацією неосновних носіїв в базі. Дірки, що

потрапили у базу, дифундують у напрямі до правого, базово-колекторного переходу і досягнувши його, екстрагуються у колектор, утворюючи колекторний струм I_K .

Колекторний струм тепер складається з двох компонент:

- некерованого струму I_{KB0} , який завжди притаманний закритому $p - n$ переходу і існує також у відсутності емітерного струму.

- керованої компоненти колекторного струму, яка пропорційна струму емітера, отже

$$I_K = I_{KB0} + \alpha I_E \quad (3.1).$$

Оскільки потік дірок, що екстрагуються з бази, не може перевищувати потік дірок інжектованих до неї, то коефіцієнт α буде завжди меншим від одиниці, хоча й може наближатися до неї. Ясна річ, що для ефективного керування колекторним струмом бажано, щоб коефіцієнт α був за величиною можливо більшим. Для цього потрібне виконання двох умов:

1) При своєму русі через базу дірка може зустрітися з вільним електроном і прорекомбінувати з ним. Для зменшення втрати дірок на шляху до колектора потрібно, щоб середній час їх дифузії через базу був значно менший середнього часу їх рекомбінації. Досягти цього можна зменшенням товщини бази та зниженням в ній концентрації основних носіїв (електронів). У сучасних транзисторах товщина бази становить частки мікрона, а легування створює в ній електронну провідність, яка лише ненабагато перевищує її власну.

В результаті лише мала частка дірок, які дифундують крізь базу, зазнають на своєму шляху рекомбінацію. Відповідно малим буде і базовий струм I_B , оскільки він створюється електронами, які надходять у базу на заміну тих, що прорекомбінували з дірками. Цілком очевидно, що струм бази є

$$I_B = I_E - I_K \quad (3.2)$$

2) Струм через емітерний перехід повинен складатися переважно з дірок, які йдуть з емітера, а не з електронів, які йдуть з бази. Дійсно, електронна компонента емітерного струму не приймає участі в створенні колекторного струму, а лише зменшує величину α .

Зменшити відносний внесок електронної компоненти у емітерний струм можна збільшенням легування емітера та зниженням ступеню легування бази.

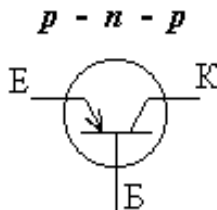


Рис.3.4.

Виконавши обидві ці вимоги, тобто зробивши базу тонкою та слабколегованою, а емітер сильнолегованим, можна досягти значень α близьких до одиниці. У більшості сучасних транзисторів значення α лежать в межах від 0.9 до 0.995.

Описаний транзистор має назву *біполярного*, оскільки в проходженні струму приймають участь області з двома типами провідності. Умовне позначення біполярного $p - n - p$ транзистора зображено на рис.3.4.

3.2. Характеристики транзистора, увімкненого за схемою із спільною базою (СБ).

Основні, найбільш важливі для практики співвідношення струмів та напруг в транзисторі описуються сім'єю характеристик - вхідних та вихідних. Нижче ми розглянемо характеристики транзистора, увімкненого за схемою, зображеною на рис.3.3, коли напруги на колекторі та емітері відраховуються від бази, потенціал якої вважається рівним нулю.

Таке увімкнення називається увімкненням із спільною базою і скорочено позначається аббревіатурою СБ.

Сім'я вихідних характеристик зображає залежність колекторного струму I_K від колекторної напруги U_{KB} для ряду значень емітерного струму I_E (рис.3.5). За виглядом та за змістом ця сім'я подібна до зображеної на рис.3.2. Різниця лише в тому, що відповідно з загальноприйнятими правилами ці криві побудовані не в третьому, а в першому квадранті, а під величинами I_K та U_{KB} розуміють їх абсолютні значення.

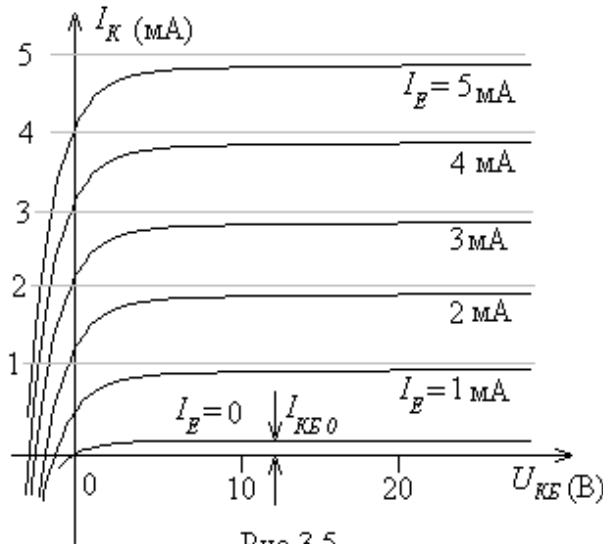


Рис.3.5.

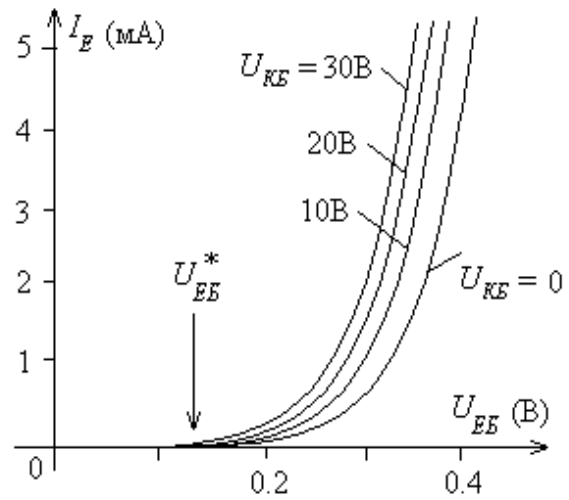


Рис.3.6.

У відсутності емітерного струму через колекторний перехід тече малий струм I_{KB0} який не залежить від напруги U_{KB} і відповідав струму I_0 на рис.3.2 або рис.1.5. При наявності емітерного струму струм колектора майже дорівнює йому, залишаючись, однак завжди трохи меншим від I_E . З першого погляду здається ніби характеристики йдуть горизонтально, насправді ж, із збільшенням колекторної напруги, вони мають слабкий приріст. Справа в тому, що із збільшенням колекторної напруги товстішає збіднений шар на колекторному переході. Це потовщення відбувається в основному в бік, слабше легованої бази, так що ефективна товщина бази - від емітерного переходу до краю збідненого шару - дещо зменшується (рис.3.7). Це явище зветься модуляцією товщини бази або ефектом Ерлі. В результаті цього ефекту дірки, які дифузійно рухаються в бік колектора, досягають його за

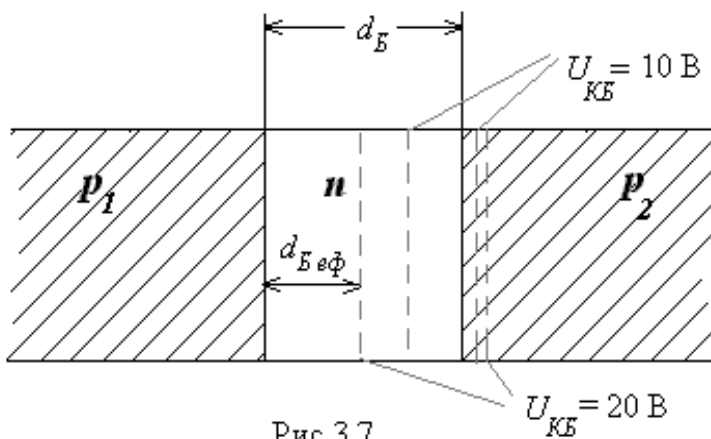


Рис.3.7.

менший час і частка дірок, що зазнали рекомбінації, зменшується. Наслідком є деяке зменшення базового струму і відповідне збільшення струму колектора. Через виниклу залежність $I_K(U_{KB})$ диференціальний опір

переходу $\frac{\partial U_{KB}}{\partial I_K}$ в робочій області

колекторних струмів виходить хоч і великим (порядку 10^5 - 10^6 Ом), проте скінченним. Омічний опір

$\frac{U_{KB}}{I_B}$ менший від

диференціального - для характеристик, зображених на рис. 3.5 омичний опір складає кілька кілоомів.

Вхідна характеристика для $U_{KB}=0$ (рис.3.6) зображає просто вольтамперну характеристику відкритого $p-n$ переходу. Починається вона не з нульового значення U_{EB} , а з деякої початкової напруги U_{EB}^* , яка дорівнює 0.1-0.2 В для германієвих транзисторів та 0,5-0,7 В для кремнієвих. Далі емітерний струм зростає майже експоненціально.

Вхідні характеристики для $U_{KB} > 0$ розташовані лівіше від нульової. Причина тому - знову ж таки модуляція товщини бази. Дійсно, із зростанням колекторної напруги та скороченням ефективної товщини бази, збільшується градієнт концентрації неосновних носіїв у базі, що спричиняє більш інтенсивне "витягування" їх на колектор. Із зростанням U_{KB} вхідні характеристики густішають, зливаючись до купи для великих U_{KB} . Ось чому в довідниках наводять звичайно дві криві: одну для $U_{KB} = 0$, а другу - граничну - для великих значень колекторної напруги; всі інші характеристики лежать між ними. Вхідний опір транзистора, увімкненого за схемою СБ - це диференціальний опір відкритого $p-n$ переходу. Вхідний опір визначається формулою (1.4) і за порядком величини знаходиться в межах одиниць або десятків Ом.

▪

3.3. Підсилення сигналів за допомогою транзистора.

Сам транзистор, увімкнений за схемою СБ є не підсилювачем, а лише *повторювачем* струму: прирости струму у колекторному колі не можуть перевищувати відповідних приростів струму у колі емітера:

$$\Delta I_K = \alpha \Delta I_E, \quad \text{де} \quad \alpha < 1.$$

Але транзистор здатний бути підсилювачем напруги та потужності. Для цього його

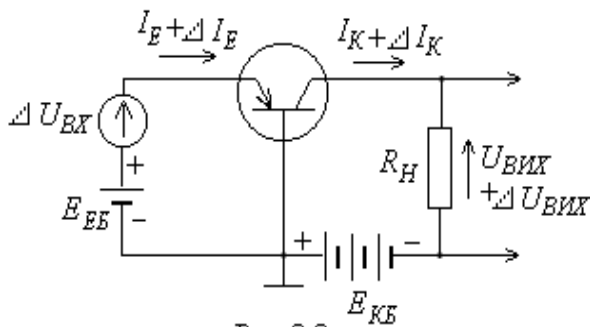


Рис.3.8.

потрібно навантажити, тобто увімкнути в його вихідне коло навантажувальний опір R_H (рис.3.8). Оскільки як диференціальний, так і омичний опір колекторного переходу звичайно досить великі, то і навантажувальний опір також може бути значної величини. Приріст вихідної напруги на ньому виявляється рівним

$$\Delta U_{вих} = \Delta I_K R_H$$

У свою чергу, приріст емітерного струму можна записати так:

$$\Delta I_E = \frac{\Delta U_{ex}}{R_{ex}}$$

де: ΔU_{ex} - приріст вхідної (емітерної) напруги, R_{ex} - диференціальний вхідний опір транзистора.

Відношення $\Delta U_{вих}$ до ΔU_{ex} є коефіцієнтом підсилення напруги і дорівнює

$$k_U = \frac{\Delta U_{вих}}{\Delta U_{ex}} = \frac{\Delta I_K R_H}{\Delta I_E R_{ex}} = \alpha \frac{R_H}{R_{ex}} \approx \frac{R_H}{R_{ex}} \quad (3.3)$$

Для прикладу припустимо, що $R_H = 2 \text{ кОм}$, $R_{ex} = 20 \text{ Ом}$. Тоді коефіцієнт підсилення дорівнюватиме 100. Таким же буде і коефіцієнт підсилення по потужності, оскільки $\Delta I_K \approx \Delta I_E$.

3.4. *n - p - n* транзистор.

Так само, як і розглянутий вище *p - n - p* транзистор може працювати і біполярний *n - p - n* транзистор, схематично зображений на рис.3.9а. Тут емітером і колектором є *n* області, а базою - *p*-область. Полярність джерел живлення, напруги

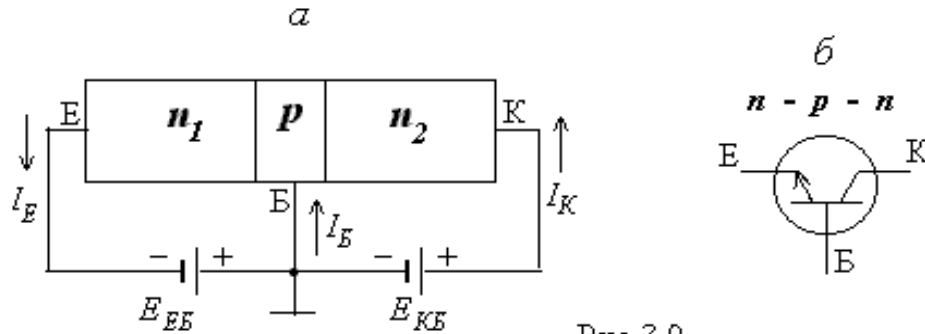


Рис.3.9.

і струмів відповідно змінюються на протилежні. Всі фізичні процеси, характеристики та параметри в *p - n - p* та *n - p - n* транзисторах подібні одні одним.

Істотною перевагою *n - p - n* транзисторів є їх мала інерційність порівняно з *p - n - p* транзисторами, бо за всіх інших умов коефіцієнт дифузії електронів є більшим, аніж у дірок, і вони швидше дифундують крізь базу. Промисловістю випускаються як *p - n - p*, так і *n - p - n* транзистори, хоч останнім часом виявилась тенденція на користь *n - p - n* транзисторів. Тому надалі ми розглядатимемо роботу радіоелектронних схем тільки на *n - p - n* транзисторах. Однак, всі наші міркування будуть цілком справедливими і для схем на *p - n - p* транзисторах. Умовне позначення *n - p - n* транзистора дано на рис. 3.9б.

Слід зауважити, що деякі типи транзисторів виготовляються у вигляді *комплементарних пар*, які складаються з *n - p - n* та *p - n - p* транзисторів, що мають однакові режими, характеристики і параметри. Такі пари використовують у ряді спеціальних радіоелектронних схем.

3.5. Увімкнення транзистора за схемою із спільним емітером (СЕ/)

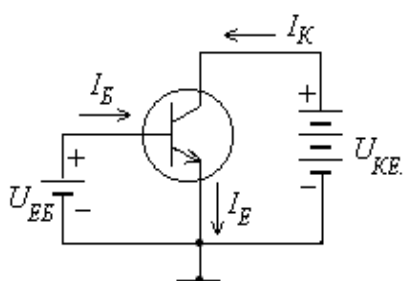


Рис.3.10.

Вище ми розглянули увімкнення транзистора за схемою зі спільною базою. Іншим способом увімкнення транзистора, який більш часто використовують у практиці, є увімкнення за схемою із спільним (СЕ), коли емітер вважають заземленим і потенціали на базі та колекторі відраховуються від нього (рис.3.10).

При такому увімкненні входом транзистора стає база, а входними струмом і напругою - відповідно I_B та U_{BE} . Застосувавши вираз (3.1) та нехтуючи в ньому покищо некерованою

компонентою колекторного струму I_{KB0} , можна знайти зв'язок між I_K та I_B . Дійсно, змінивши в (3.2) I_K через близьке до нього за величиною значення I_E , дістанемо

$$\frac{I_K}{\alpha} = I_K + I_B.$$

Виразимо тепер у явному вигляді колекторний струм через базовий

$$I_K = \frac{\alpha}{1 - \alpha} I_B = \beta I_B \quad \beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \gg 1 \quad (3.4)$$

Коефіцієнт β , який зв'язує ці струми, може набувати вельми високих значень, оскільки α близьке до одиниці. Так, наприклад, при $\alpha = 0,98$ маємо $\beta = 50$. Таким чином, транзистор, увімкнений за схемою СЕ, є підсилювачем струму, що надає цій схемі значні переваги порівняно зі схемою СБ.

Хоча фізичні процеси у самому транзисторі від способу його увімкнення не змінюються, однак, вигляд вхідних та вихідних характеристик для транзистора, що працює в режимі схеми СЕ істотно відрізняються від характеристик при роботі в режимі схеми СБ. Типовий вигляд вихідних характеристик для випадку увімкнення за схемою із спільним емітером показаний на рис.3.11.

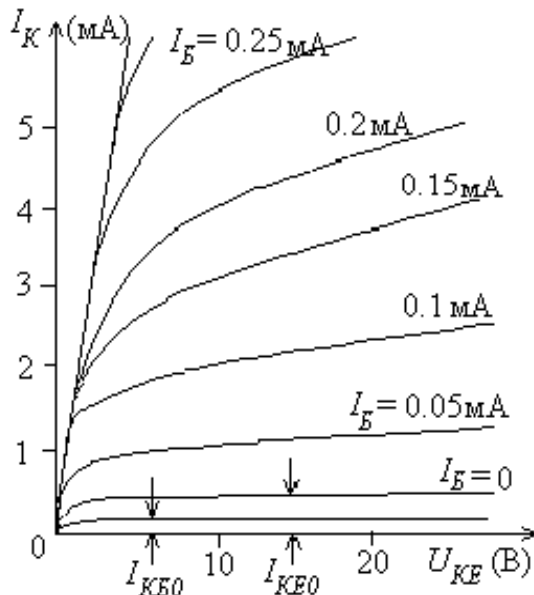


Рис.3.11.

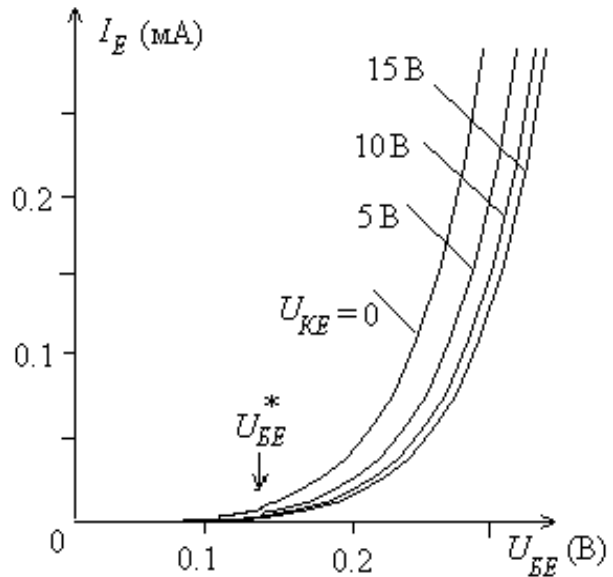


Рис.3.12.

Основні відмінності цих характеристик від вихідних характеристик схеми зі спільною базою такі:

- Керований колекторний струм I_K значно більший від керуючого базового струму I_B .
- При малих значеннях U_{KE} всі характеристики зливаються до купи і струм колектора стає незалежним від струму та напруги бази (втрачається керуюча дія бази). Таке відбувається в режимах, коли напруга на колекторі стає меншою від напруги на базі. Тоді колекторний перехід відкривається і нормальна робота транзистора стає неможливою. Подібний режим роботи називають *режимом насичення*.
- В робочій частині колекторних струмів вихідні характеристики мають помітний нахил, який зростає із збільшенням I_B . Це означає, що диференціальний вихідний опір

$R_{вх} = \frac{\partial U_{KE}}{\partial I_K}$ не дуже великий і має тенденцію до зниження із збільшенням I_B . Звичайно

$R_{вх}$ для транзисторів, увімкнених за схемою зі спільним емітером становить $10^3 - 10^4$ Ом.

г) При $I_B = 0$ транзистор не закривається цілком колекторний струм залишається досить великим, хоч у відповідності із формулою (3.4) він повинен був би стати рівним нулю. Зрозуміти це допоможе рис.3.13.

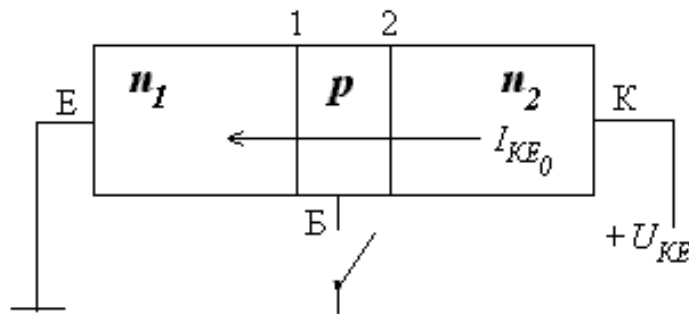


Рис.3.13.

У відсутності базового струму, коли базу можна вважати вимкненою, колекторна напруга U_{KE} розподіляється між переходами 1 і 2 пропорційно їх опорам. При цьому полярність на базово-емітерному переході 1 виходить такою, що цей перехід стає відкритим. Інжекція неосновних носіїв у базу спричиняє появу струму через закритий

базово-колекторний перехід 2, і через транзистор тече наскрізний струм $I_K = I_E = I_{KE0}$. Якщо підставити сюди замість I_K вираз (3.1) і прийняти до уваги, що в данному випадку I_{KB0} дорівнює також I_E , дістанемо

$$I_{KE0} = \frac{I_{KB0}}{1 - \alpha} \approx I_{KB0} \beta \quad (3.5)$$

Оскільки, звичайно, $\beta \gg 1$, то вихідний струм при вимкненій базі ($I_B = 0$) в схемі СЕ виявляється значно більшим за вихідний струм в схемі СБ при закритому (чи вимкненому) емітері. Для того щоб дійсно закрити $n-p-n$ транзистор потрібно подати на його базу від'ємну напругу порядку вольт, яка закрила б емітерно-базовий перехід. Тоді струм колектора стане рівним I_{KB0} ; таким же, але з протилежним знаком, буде і струм бази.

Вхідні характеристики зображені на рис.3.12. Так само, як і подібні їм характеристики, зображені на рис.3.6, вони починаються при відмінній від нуля напрузі U_{BE}^* , яка становить 0,1-0,2 В для германієвих та 0,5-0,7 В для кремнієвих транзисторів. В міру того як зростає колекторна напруга, струм бази, внаслідок ефекту модуляції її товщини, зменшується і вхідні характеристики зсуваються праворуч. Причина тут досить ясна - при меншій ефективній товщині бази зменшується кількість активів рекомбінації неосновних носіїв і отже, зменшується базовий струм.

Звичайно у довідниках наводяться лише дві вхідні характеристики: одна для $U_{KE} = 0$ і друга - для досить великого значення U_{KE} ; ця характеристика є граничною для всієї сім'ї.

Диференціальний вхідний опір транзисторів, увімкнених за схемою СЕ має порядок $10^2 - 10^3$ Ом.

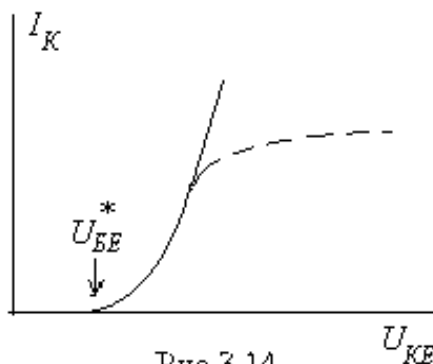


Рис.3.14.

Окрім вхідних та вихідних характеристик для аналізу роботи і розрахунку радіоелектронних схем часто буває корисною прохідна (передавальна) характеристика, яку можна визначити як залежність колекторного струму від вхідної напруги при заданій колекторній напрузі $I_K = f(U_{BE})$ (рис.3.14). Вона будується на основі вхідних та вихідних характеристик шляхом включення базового струму.

За виглядом прохідна характеристика подібна до вхідної: вона починається при напрузі U_{BE}^* і далі зростає майже експоненціально. Коли напруга U_{KE} не дуже велика, зростаюча ділянка прохідної характеристики може змінитися горизонтальною (пунктир), що відповідає режиму насичення транзистора.

Похідна $S = \frac{\partial I_K}{\partial U_{BE}}$ має назву крутості транзистора і показує ефективність керуючої дії вхідної напруги U_{BE} .

3.6. Вплив температури на характеристики транзистора.

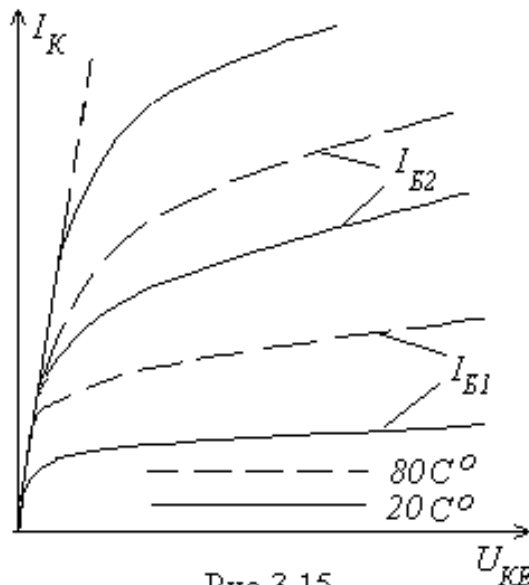


Рис.3.15.

Зворотний струм через закритий $p-n$ перехід дуже сильно залежить від температури і подвоюється через кожні 5 - 10°C. Наслідком цього є те, що малий при кімнатній температурі член I_{KB0} у формулі (3.1) при високих температурах може стати сумірним з керованою компонентою αI_E , і вся сім'я вихідних характеристик зміститься вгору. До такого ж зсуву може привести і зростання α з підвищенням температури.

Для транзистора, увімкненого за схемою СЕ, ці ефекти виражені ще сильніше, оскільки тут роль некерованого струму відіграв величина I_{KE0} , яка у β разів більша за I_{KB0} :

$$I_K = I_{KE0} + \beta I_B \quad (3.6)$$

Підвищення температури на кілька десятків градусів може істотно змінити вигляд сім'ї вихідних характеристик транзистора (рис. 3.15).

Із зростанням температури змінюється також і U_{BE}^* , так що вхідні характеристики зсуваються трохи праворуч. Зсуви вхідних та вихідних характеристик викликають істотні зміни режимів роботи напівпровідникових приладів в радіоелектронних схемах. Це обмежує можливість застосування транзисторів в умовах, коли температура навколишнього середовища може зазнавати значних змін.

**Контрольні питання до розділу
"Біполярний транзистор".**

1. Як у біполярному транзисторі вдається керувати величиною струму колектора?
2. Яким повинен бути в pnp -транзисторі знак потенціалу бази відносно емітера?
3. Як відбивається степінь легування емітера та бази на величині коефіцієнта α ?
4. З яких міркувань бажано робити товщину бази якомога тоншою?
5. Чому вихідні характеристики біполярного транзистору, увімкненого за схемою СБ, мають невеликий позитивний нахил?
6. В чому полягав ефект Ерлі (ефект модуляції товщини бази)? Як він впливав на хід вхідних характеристик для транзистора, увімкненого за схемою СЕ?
7. Чому вхідні характеристики транзистора, увімкненого за схемою СБ з підвищенням потенціалу колектора зсуваються вліво, а увімкненого за схемою СЕ - вправо?
8. Чому в довідниках для транзистора, увімкненого за схемою СЕ. Наводяться лише дві вхідні характеристики - одна для $U_{KE}=0$ а друга для великих значень U_{KE} ?
9. Намалюйте вхідні характеристики транзистора, увімкненого за схемою СБ - германійового та кремнійового. Котрі з них лежатимуть правіше?
10. Коефіцієнт підсилення за напругою для схеми, зображеної на рис.3.8, зростає із збільшенням R_H . До якої величини, на Ваш погляд, доцільно збільшувати опір R_H ?
11. Чи має якісь переваги nnp -транзистор порівняно з pnp -транзистором?
12. Що таке комплементарна пара транзисторів?
13. Чому в режимі насичення транзистора, увімкненого за схемою СЕ, колекторний струм стає незалежним від струму бази?
14. Чому в транзисторі, увімкненому за схемою СЕ, при $I_B=0$ колекторний струм залишається значно більшим I_{KB0} - зворотного струму колекторного переходу?
15. Яку напругу U_{BE} треба прикласти, щоб струм колектора у схемі СБ став рівним I_{KB0} ?
16. Що таке прохідна характеристика транзистора, увімкненого за схемою СЕ? Яка величина є параметром цих характеристик?
17. Які зміни відбуваються у сім'ї вихідних характеристик з підвищенням температури транзистора?
18. Чому при увімкненні транзистора за схемою СЕ вплив температури сильніший, ніж при його увімкненні за схемою СБ?

Задачі до розділу.

1. За рис.3.6 оцінити величину диференціального та омичного вхідних опорів транзистора в робочій точці $U_{EB} = 0,3$ В та $U_{KB} = 10$ В.
2. Для транзистора, увімкненого за схемою СЕ, складіть схему для підсилення сигналів (подібну зображеній на рис.3.8). Вхідний опір транзистора 500 Ом; $\beta = 40$, навантажувальним опір $R_H = 2$ кОм. Визначте коефіцієнт підсилення за напругою.
3. У схемі, зображеній на рис.3.8, напруга джерела живлення в колі колектора $E_{KB} = 16$ В. Постійна складова струму колектора 5 мА, $R_H = 2$ кОм. Якою буде постійна напруга U_{KB} , прикладена безпосередньо між колектором та базою транзистора?
4. За характеристиками, зображеними на рис.3.11, визначте вихідний опір транзистора в робочій точці $U_{KE} = 15$ В; $I_B = 15$ мА. Визначте в цій же точці величину β .
5. На підставі характеристик, зображених на рис.3.11 та 3.12, побудуйте прохідну характеристику для $U_{KE} = 15$ В. Визначте її крутість при $U_{BE} = 0,22$ В.

6. Величина зворотного струму колекторного переходу транзистора подвоюється кожні 10 °С. На скільки зсунуться догори характеристики, зображені на рис.3.11, якщо температура транзистора зросте на 40 °С?