

**РЕКОМБІНАЦІЯ** – це процес зникнення пари електрон-дірка і створення нейтрального атома.

При включенні діода в зворотньому напрямку із-за теплової генерації носії різного знаку розтягуються полем в різні напрями і не можуть рекомбінувати в  $p-n$ -переході. Тому процес генерації не урівноважується процесом рекомбінації. Зворотній струм, обумовлений генерацією нерівноважних носіїв заряду в  $p-n$ -переходах називається генераційним струмом. При включенні діода в прямому напрямку частина нерівноважних носіїв заряду не може подолати потенційний бар'єр, але близько до середини  $p-n$ -переходу проходить їх рекомбінація.

### *Пробої $p-n$ – переходу*

При деяких досить великих  $U_{зв}$  на зворотній гілці реальної ВАХ з'являється ділянка пробою  $p-n$ -переходу. Явище пробою полягає в різному зростанні зворотного струму. Існує 4 різновиди пробою: лавинний, тунельний, тепловий та поверхневий.

При **лавинному** пробі (рисунок 3.11, крива 2) відбувається ударна іонізація нейтральних атомів збідненого шару НП неосновними носіями заряду, що розвивають під час вільного пробігу достатню кінетичну енергію. Іонізація приводить до лавинного помноження вільних носіїв і до зростання  $I_{зв}$ . Оскільки умовою лавинного пробою є те, що довжина вільного пробігу електрона має бути значно меншою від товщини  $p-n$ -переходу ( $L_n \ll \delta$ ), такі пробої найбільш імовірні для широких переходів, коли НП леговано невеликою кількістю домішок.

**Тунельний пробій** (рисунок 3.11, крива 1) виникає у вузьких  $p-n$ -переходах (при великих концентраціях домішок у НП), коли напруженість зовнішнього електричного поля в кремнію досягає 10В/см, а в германію -  $3 \cdot 10^5$ В/см. Під дією сильного поля валентні електрони вириваються з ковалентних зв'язків, створюються пари "електрон-дірка", зростає  $I_{зв}$ . Для дуже вузьких переходів величини напруг пробою можуть бути невеликими.

**Тепловий пробій** (рисунок 3.11, крива 3) спричинюється явищем самоперегріву НП. Воно полягає в тому, що збільшення  $I_{зв}$  приводить до зростання температури в переході; це, у свою чергу, зумовлює додаткову термогенерацію носіїв, зростає струм і, нарешті, перехід перегрівається, кристалічна решітка руйнується. Тому пробій такого виду є необоротним і стає можливим при порушенні режиму охолодження. Ділянка АВ з негативним диференціальним опором зумовлена тим, що збільшення кількості носіїв заряду веде до зменшення опору  $p-n$ -переходу і спад напруги на ньому.

**Поверхневий пробій** може виникнути в місцях виходу  $p$ - $n$ -переходу на поверхню НП, в яких створюється додатковий електричний поверхневий заряд, що значно спотворює картину поля в переході. Якщо товщина переходу біля поверхні менша від товщини переходу в глибині НП, то поверхневий пробій відбувається при менших напругах, ніж звичайно. Цю особливість необхідно враховувати при виборі захисних покриттів напівпровідникових приладів.

### 3.3.4 Різновиди електричних переходів та контактів

Крім  $p$ - $n$ -переходів, у напівпровідникових приладах використовують й інші переходи та контакти. Розглянемо деякі з них.

#### Гетеро- переходи

Гетероперехід створюється двома НП, які відрізняються шириною забороненої зони. До таких переходів належать переходи германій-арсенід галію, арсенід галію – миш'яковий індій, германій-кремній. Розрізняють  $n$ -  $p$ - та  $p$ - $n$ -гетеропереходи (на першому місці ставиться буква, що означає тип електропровідності НП з більш вузькою ЗЗ).

Енергетична діаграма  $n$ -  $p$ - гетеропереходу германій  $n$ -типу ( $\Delta W_n = 0.72eV$ ) - арсенід галію  $p$ - типу ( $\Delta W_n = 0.72eV$ ) наведена на рисунку 3.12.

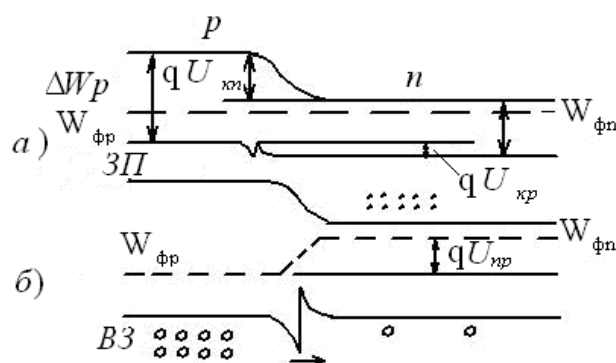


Рисунок 3.12 – Енергетична діаграма  $n$ -  $p$ - гетеропереходу в стані рівноваги (а) і при прямому вмиканні(б)

При відсутності зовнішньої напруги ( $U=0$ ) і з'єднанні напівпровідників відбувається перерозподіл носіїв заряду, внаслідок чого вирівнюються рівні Фермі  $p$ - та  $n$ -областей і виникають потенціальні бар'єри: для електронів  $n$ -області -  $qU_{kn}$ , для дірок  $p$ -області-  $qU_{kp}$ , причому  $U_{kn} > U_{kp}$  (рисунок 3.12,а).

Оскільки бар'єри для електронів і дірок відрізняються, то під дією зовнішньої прямої напруги гетероперехід забезпечує односторонню ефективну інжекцію дірок з матеріалу, що має більшу ширину ЗЗ (рисунк 3.12,б). Цю особливість називають явищем над інжекції, що робить гетероперехід ефективним інжектором.

### **$P^+ - p -$ та $n^+ - n -$ переходи**

$P^+ - p$ -переходи ( $n^+ - n$ -переходи) - це контакти двох НП одного типу електропровідності, але з різною концентрацією домішок. Знаком “+” позначають НП з більшою концентрацією акцепторів чи донорів.

У таких переходах носії з області більшої концентрації переходять до області з меншою концентрацією. Внаслідок цього в області з більшою концентрацією домішок створюється деяка кількість іонізованих атомів домішок, а з протилежного боку переходу зростає надлишок основних носіїв. Виникає дифузійне електричне поле і контактна різниця потенціалів:

$$\text{для } p^+ - p \text{ - переходу } U_k = \varphi_T \ln \frac{P^+_{p_0}}{P_{h_0}},$$

$$\text{для } n^+ - n \text{ - переходу } U_k = \varphi_T \ln \frac{n^+_{n_0}}{n_{n_0}}.$$

Оскільки в таких переходах не створюється шар з малою концентрацією носіїв заряду й опір переходів істотно не відрізняється від опорів нейтральних областей, залишаючись низькоомним, то такі переходи не мають випрямлювальних властивостей. В  $p^+ - p$ - та  $n^+ - n$ -переходах відсутня інжекція неосновних носіїв заряду з низькоомної області до високоомної. Якщо, наприклад, до  $n^+ - n$ -переходу підімкнути джерело зовнішньої напруги плюсом до  $n$ -області, а мінусом – до  $n^+$ -області, то з  $n^+$ -області в  $n$ -область будуть переходити електрони, які залишаються основними носіями. При зміні полярності зовнішньої напруги з  $n^+$ -області до  $n$ -області повинні інжекувати дірки. Проте їх концентрація настільки мала, що це явище не відбувається. Невипрямлювальні та неінжектуючі переходи використовують в омичних контактах напівпровідникових приладів.

### **$P - i$ та $n - i$ -переходи**

$P$

Ці переходи займають проміжне положення між звичайними  $p-n$ -переходами та описаними в попередньому пункті контактами. Створюються  $p-i$  та  $n-i$ -переходи між двома пластинами, одна з яких має домішкову (електронну або діркову) електропровідність, а друга – власну.

В  $p$ - $i$ -контактах внаслідок різниці концентрацій носіїв у областях відбувається інжекція дірок з  $p$ -області до  $i$ -області, а електронів з  $i$ -області до  $p$ -області. Внаслідок малої величини електронної інжекційної складової потенціальний бар'єр на межі переходу створюється нерухожими негативними іонами акцепторів  $p$ -області, надлишковими дірками  $i$ -області, які дифундують до неї через перехід. Оскільки  $p_{p_0} \gg p_i$ , то запірний шар в  $i$ -області значно товщій, ніж в  $p$ -області.

### ***Контакти металу з напівпровідниками***

Уперше утворення потенційного бар'єра в приконтактній області металу і напівпровідника було виявлено в 1930р. німецьким фізиком В. Шотткі. По імені вченого контакт метал – напівпровідник  $n$ -типу, що випрямляє, називають переходом Шотткі.

Властивості таких контактів визначають співвідношенням робіт виходу електронів з металу ( $W_{om}$ ) та з НП ( $W_{op}$  або  $W_{on}$ ). Електрони переходять з матеріалу, що має меншу роботу виходу, до матеріалу з більшою роботою виходу.

Найважливішою особливістю переходу Шотткі порівняно з  $p$ - $n$ -переходом є відсутність інжекції неосновних носіїв заряду. Ці переходи працюють тільки на основних носіях. Звідси випливає, що в приладах, у яких використовують перехід Шотткі, відсутня дифузійна ємність, зв'язана з нагромадженням і розсмоктуванням неосновних носіїв. Відсутність дифузійної ємності істотно підвищує швидкодію приладів. Не менш важливою особливістю таких приладів є значно менша пряма напруга. Це пояснюється тим, що під час проходження навіть невеликого початкового струму через контакт із великим опором на ньому виділяється тепла енергія, що сприяє додатковій термоелектронній емісії та зростанню числа носіїв заряду, що беруть участь в утворенні прямого струму. Для порівняння на рисунку 3.13 наведені ВАХ переходу Шотткі та  $p$ - $n$ -переходу.

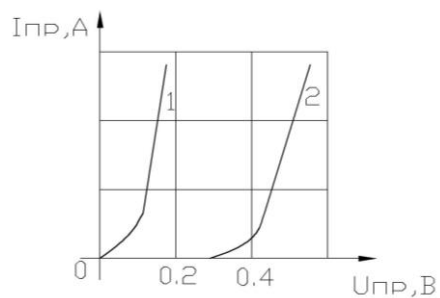


Рисунок 3.13 – ВАХ переходу Шотткі (1) та  $p$ - $n$ -переходу

Якщо при з'єднанні металу з НП  $n$ -типу співвідношення робіт виходу  $W_{on} > W_{om}$  або  $W_{om} > W_{op}$ , то приконтактний шар НП збагачується на основні носії заряду, його опір зменшується і не залежить від полярності зовнішньої наруги. Такий контакт має практично лінійну ВАХ і є невідпрямлювальний.

Найчастіше як метал для омичних контактів на кремнію використовують алюміній, силіциди металів (платини, нікелю), евтектику золото-кремній. Важливою характеристикою омичного переходу є питомий опір контакту.

### **Омичні контакти**

Омичні контакти також мають лінійну ВАХ і забезпечують з'єднання НП з металевими струмопровідними елементами (виводами) напівпровідникових приладів. Крім лінійності ВАХ, контакти такого типу повинні мати малий опір і забезпечувати відсутність інжекції з металу до НП.

Ці вимоги задовольняються введенням між робочим напівпровідниковим кристалом і металом області НП з підвищеною концентрацією домішок (рис. 3.14).

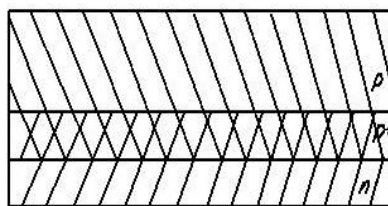


Рисунок 3.14 – Омичний контакт

Контакт між НП одного типу електропровідності ( $p$  та  $p^+$ ) є невідпрямлювальним і низькоомним. Метал вибирають із міркувань забезпечення малої контактної різниці потенціалів. Для цього можна, наприклад, ввести домішки, якими леговано напівпровідник.

У цьому випадку при сплавленні металу з НП в приконтактній області утворюється тонкий шар виродженого НП, що відповідає структурі, зображеній на рисунку 3.14.

**РОБОТА ВИХОДУ**- це робота, яку повинен виконати електрон, щоб перейти із середовища в вакуум.

-робота виходу із металу менше роботи виходу із напівпровідника

-робота виходу із металу більше роботи виходу із напівпровідника

Існують 3 види омічних контактів:

- тунельний,
- контакт Шоткі,
- контакт Мотта.

Якщо робота виходу із металу менше роботи виходу із напівпровідника, то електрони в прикордонній області будуть переходити із металу в напівпровідник. Прикордонна область буде заряджатись основними носіями заряду – електронами. Опір такого шару буде малий - цей шар називають омічним контактом Шоткі.

Якщо робота виходу з напівпровідника менша ніж із металу, то в прикордонній області електрони будуть переходити із напівпровідника в метал. Виникає контактна різниця потенціалів, яка називається випрямляючим контактом або бар'єром Шоткі.

В омічних контактах, в яких вплив бар'єру на потік носіїв заряду буде малий внаслідок використання високолегованих областей, називаються тунельними омічними контактами

Якщо використовувати напівпровідники, у яких в прикордонній області різко змінюється концентрація основних носіїв заряду, то виникає омічний контакт Мотта.

#### 4. Основні співвідношення для розрахунку характеристик приладів твердотілої електроніки

### *РІВНЯННЯ МАКСВЕЛА ДЛЯ ІЗОТРОПНОГО СЕРЕДОВИЩА*

В Ізотропному середовищі параметри приладів не залежать від напрямку струму.

Для розрахунку явищ переносу заряду в твердому тілі можна скористатися ФСР ( ФУНДАМЕНТАЛЬНОЮ СИСТЕМОЮ РІВНЯНЬ) – їх 5:

#### 1.ДИФУЗІЙНО-ДРЕЙФОВІ РІВНЯННЯ

2.РІВНЯННЯ НЕПЕРЕРВНОСТІ. Рівняння неперервності показують, що концентрація змінюється безперервно.

#### 3.РІВНЯННЯ ФЕРМІ

В рівноважному стані функція розподілу вільних часток за енергіями залежить тільки від енергії електрона і області низьких енергій.

#### 4. РІВНЯННЯ МАКСВЕЛЛА

#### 5. РІВНЯННЯ ПУАССОНА

Якщо не розглядати вплив зовнішніх магнітних полів, а власне магнітне поле мале, то достатньо розглянути лише рівняння Пуассона.

### 4.1 КВАЗІРІВНІ ФЕРМІ

В нерівноважному стані при штучній зміні концентрації носіїв заряду електронів і дірок розподіл вільних носіїв заряду не відповідає термодинамічній рівновазі. Тому в нерівноважному стані розподіл вільних електронів на енергетичних рівнях характеризується своїм квазірівнем Фермі, а для дірок - квазірівнем Фермі для дірок, які мають теж смислове значення у нерівноважному стані, що й рівні Фермі у термодинамічній рівновазі. Чим більше нерівноважні концентрації електронів і дірок відхиляються від своїх рівноважних значень, тим більше відрізняються квазірівні Фермі для електронів і дірок від положення рівня Фермі в умовах термодинамічної рівноваги.

### 4.2 ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В ДІОДАХ

Перехідні процеси в напівпровідникових діодах пов'язані з двома явищами, які відбуваються при швидкій зміні напруги на діоді або струму через діод. Перше з них – це накопичення носіїв заряду в базі діода при його прямому включенні та їх розсмоктування при зменшенні напруги. Оскільки електричне поле невелике в базі діода, то рух носіїв заряду в базі визначається законами дифузії і відбувається повільно. Тому накопичення носіїв заряду в базі та їх розсмоктування впливають на властивості діода в режимі переключення. Друге явище, яке відбувається в діодах при переключенні, за заряд та розряд бар'єрної ємності, що також відбувається не миттєво і тому впливає на властивості діодів.

При порівнянню великій густині прямого струму через діод відбувається значне накопичення носіїв заряду в базі, а заряд та розряд бар'єрної ємності є другорядними. При малих густинах струму перехідні процеси в діодах визначаються зарядом та розрядом бар'єрної ємності, накопичення носіїв заряду в базі практично не впливає.

## 4.3 ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ ПРИ ВЕЛИКИХ НАПРУЗІ ТА СТРУМАХ

### *Робота діода в схемі з генератором напруги*

При цьому режимі всі процеси відбуваються при включенні діода на генератор напруги, тобто при включенні діода в коло з малим повним опором в порівнянні з опором діода.

При подачі на діод прямої напруги струм через діод встановлюється не відразу, оскільки з плином часу відбувається накопичення в базі інжектованих через  $p-n$ -перехід неосновних носіїв та зменшення в зв'язку з цим опору бази. Цей процес *модуляції опору бази* відбувається не миттєво, оскільки накопичення дірок в базі діода пов'язано з відносно повільним процесом дифузії їх від  $p-n$ -переходу в глибину бази.

При накопиченні дірок та зменшення опору бази відбувається переросподіл усієї зовнішньої напруги між опором бази та  $p-n$ -переходом; падіння напруги на базі діода зменшується, а на  $p-n$ -переході збільшується і приводить до збільшення рівня інжекції. При довготерміновому проходженні прямого струму процес інжекції дірок урівноважується процесом їх рекомбінації. Виникає деякий урівноважений стан, що характеризується розподілом дірок в базі, при якому їх концентрація перевищує рівноважну близько  $p-n$ -переходу і знижується, наближаючись до рівноважної при віддаленні від нього в глибину бази.

Градієнт концентрації дірок біля  $p-n$ -переходу збільшується зі збільшенням напруги на  $p-n$ -переході при постійній напрузі на діоді та при зменшенні напруги на базі діода. Однак треба відмітити, що опір бази зменшується не тільки внаслідок збільшення концентрації неосновних носіїв (дірок), а й внаслідок збільшення концентрації основних носіїв (електронів). Концентрація електронів й час життя дірок. Окрім того, число накопичених дірок залежить від геометрії бази.

При переключенні діода з прямої напруги на зворотну в початковий момент спостерігається великий зворотній струм, обмежений послідовним опором бази діода. Джерело живлення разом з опором бази в цей час можна вважати генератором струму для  $p-n$ -переходу.

Після переключення діода на зворотну напругу починається процес розсмоктування неосновних носіїв, накопичених в базі. Внаслідок обмеження зворотного струму концентрація дірок в базі біля  $p-n$ -переходу не може миттєво зменшитися до рівноважного значення. Поки концентрація дірок в базі біля  $p-n$ -переходу перевищує рівноважне значення, на  $p-n$ -переході



зберігається пряме падіння напруги .

Після зменшення концентрації дірок в базі біля р-n- переходу до нуля величина зворотного струму починає зменшуватися з часом, що свідчить про зменшення градієнту концентрації дірок біля р-n- переходу . З плином часу всі накопиченні в базі дірки проходять через р-n- перехід або рекомбінують в базі діода, внаслідок чого зворотній струм зменшиться до стаціонарного значення струму насичення. В цей час закінчується поновлення зворотного опору діода.

Процес розсмоктування накопичених носіїв відбувається значно повільніше процесу їх накопичення, тому саме процес розсмоктування і визначає частотні властивості більшості діодів.

### ***Робота діода в схемі з генератором струму***

Ця робота діода відповідає включенню діода в схему з великим опором, яке і визначає величину струму в колі з діодом. Розглянемо процеси, які відбуваються в діоді при проходженні через діод імпульсу прямого струму прямокутної форми.

В перший момент проходження через діод імпульсу прямого струму на діоді падає відносно велика напруга, яка в подальшому зменшується внаслідок зменшення опору базової області діода, пов'язаного з накопиченням нерівноважних носіїв в базі.

Після закінчення процесу накопичення неосновних носіїв в базі величини напруг на діоді, на базі діода та на р-n- переході досягають встановлених значень. Розподіл дірок в базі в цей час також відповідає деякому урівноваженому значенню. Залишкова напруга на діоді зменшується до нуля після рекомбінації усіх нерівноважних носіїв в базовій області діода.

### ***Процеси при малих напругах та струмах***

#### Робота генератора в схемі генератором напруги.

При прикладенні до діода малої прямої напруги ефект модуляції опору бази діода внаслідок малого рівня інжекції дуже малий. Тому опір діода в

даному випадку має ємнісний характер. В перший момент напруга на р-п - переході близька до нуля, а струм через діод обмежений лише опором бази діода. При помірному заряді бар'єрної ємності напруга на р-п- переході та струм через діод наближаються до деяких встановлених значень, які визначаються активною складовою опору р-п---переходу.

В момент переключення діода напруга на бар'єрній ємності не може змінитися миттєво, воно досягає певного значення лише через деякий час. Струм через діод також залежить від часу, що характерно для ємнісного опору.

### Робота діода в схемі з генератором струму.

В перший момент пропускання імпульсу через діод увесь струм складає ємнісна складова. Тому напруга на діоді в перший момент визначається падінням напруги на опорі бази діода. При заряді бар'єрної ємності збільшується і напруга на діоді.

При виключенні діода на ньому деякий час зберігається залишкова напруга, зменшується з часом. Залишкова напруга в даному випадку пов'язана з тим, що бар'єрна ємність залишається ще зарядженою. При розряді цієї ємності через активний опір р-п---переходу діода зменшується напруга на ємності та залишкова напруга на діоді.

## 5.ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ БТ

### *ДИФУЗІЙНІ ТРАНЗИСТОРИ*

Основним методом виготовлення високочастотних БТ являється метод, в основу якого покладено дифузію домішок, тому вони називаються дифузійними.

Акцепторні домішки проникають на більшу глибину, оскільки коефіцієнт дифузії у них більший, а донорні домішки створюють більшу концентрацію біля поверхні. Різниця концентрацій таким чином створює п-р-п – структуру.

Дифузійний транзистор має ряд переваг, оскільки дифузійна технологія дозволяє точно контролювати глибину залягання переходів, тобто отримувати базу транзистора дуже малої величини. Концентрація домішок в базі , якщо

знехтувати невеликою їх кількістю близько емітерного переходу, зменшується в сторону колекторного переходу, що створює в базі електричне поле, яке сприяє руху носіїв заряду від емітера до колектора і відповідно зменшує час прольоту носіїв через базу.

### СПЛАВНО-ДИФУЗІЙНІ ТРАНЗИСТОРИ

Для виготовлення германієвих транзисторів з робочими частотами в десятки-сотні мегагерц використовують технологію, де область бази та колекторний перехід отримують методом дифузії, а емітерний перехід – вплавленням.

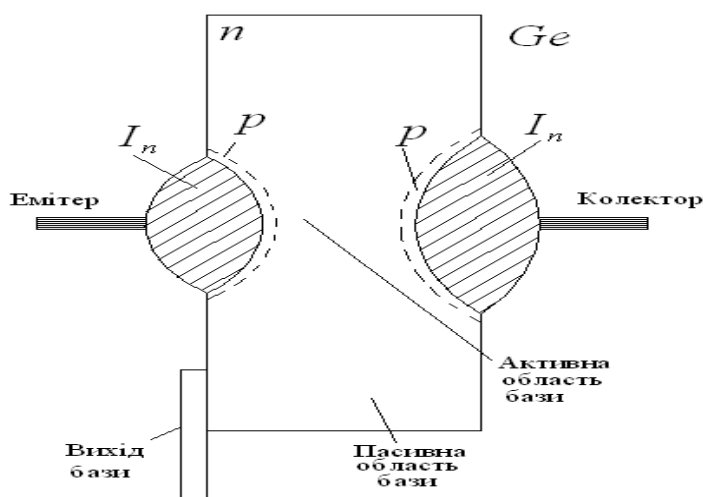


Рис. 5.1 Сплавно-дифузійний транзистор.

Дифузія домішок відбувається із емітерного навіску, який знаходиться у розплавленому стані. Транзистори, виготовлені за допомогою такого методу, називаються сплавно – дифузійними.

Для виготовлення таких транзисторів на основі германію p – типу в емітерний навісок вводиться сурма, яка має більший коефіцієнт дифузії, і індій, у якого коефіцієнт дифузії малий. При вплавленні такого навіску сурма дифундує із нього на значно більшу глибину, а індій – на малу. Внаслідок різної розчинності концентрація індію в рекристалізованій області значно більша, ніж сурми. Таким чином утворюється розподіл домішок близький до ідеального для дрейфового транзистора.

## ТРАНЗИСТОРИ «МЕЗА»

В пластину напівпровідника проводиться дифузія речовини, яка змінює тип електропровідності основного матеріалу. Потім проводиться шліфування однієї сторони так, що утворюється структура р-п; на пластинку випаровуванням в вакуумі наносяться полоски для утворення емітерного та базового контактів. Для кремнієвих транзисторів, наприклад, емітерний контакт виготовляють із алюмінію, а базовий – із золота. Після цього проводиться впалення. Транзистор, виготовлений таким способом, ще не має високих частотних властивостей, оскільки механічним шляхом важко отримати малу площу колектора, а відповідно, і малу його ємність. Тому проводиться травлення частини кристалу, при цьому область його біля контактів емітера та бази захищається. Після травлення утворюється столообразна структура.

Перевагами транзистора «меза» є хороший тепловідвід від колектора, оскільки контакт його з виводом відбувається на великій площі. Столообразна структура має велику механічну прочність, а пластинка напівпровідника – великий розмір, що полегшує її монтаж.

Транзистори «меза» можуть мати граничні частоти за струмом 500 МГц, а ємність колектора 1 пФ.

Однак при виробництві таких транзисторів виникають труднощі з виготовленням бази, якщо поверхня оброблена погано.

# ПЛАНАРНІ ТРАНЗИСТОРИ

Відмінність планарних транзисторів в тому, що покриття пластини напівпровідника шаром окису, нанесення фоторезиста, його засвічення, травлення та дифузія повторюються щоб отримати базову та емітерну області. Частіше планарну технологію використовують при виготовленні кремнієвих транзисторів, оскільки у цьому випадку шари  $\text{SiO}_2$  простим методом – окисленням вихідної пластини.

При планарній технології значно покращуються параметри транзисторів, особливо частотні характеристики. Це обумовлено тим, що у цьому випадку можна проводити селективну дифузію, тобто вводити домішки тільки в невелику обмежені області. Оптичні методи, які застосовуються при фотолітографії, дають можливість краще і з більшою точністю суміщати ці області. Таким чином стало можливим виготовляти транзистори з товщиною бази в долі мікрметра і розмірами переходів в одиниці мікрметрів. Робочі частоти планарних транзисторів сягають до 10 ГГц.

# КОНВЕРСІЙНІ ТРАНЗИСТОРИ

Технологічно конверсійні транзистори нагадують сплавно-дифузійні транзистори. Для їх виготовлення використовують германій, до якого вводять одночасно два типи домішок – донорну та акцепторну (мідь). Мідь відрізняється високим коефіцієнтом дифузії в германії, завдяки цьому при вплавленні емітера відбувається дифузія міді з германію в емітерний навісок. Таким чином із шару, що прилягає до емітера, акцепторна домішка зникає, змінюється тип електропровідності, тобто відбувається конверсія. Такий спосіб дає змогу отримати тонкі базові шари з великою площею, відповідно і потужні високочастотні транзистори.

## 6. СОНЯЧНІ ЕЛЕМЕНТИ

Напівпровідниковий фотоелемент (сонячний елемент) – це напівпровідниковий прилад з випрямляючим електричним переходом, який служить для безпосереднього перетворення світлової енергії в електричну.

Фотоелемент працює без зовнішніх джерел живлення бо сам являється джерелом електричної енергії.

При освітленні фотоелемента внаслідок поглинання квантів світла в р-n – переході та в областях, що близько прилягають до нього, відбувається генерація нових носіїв заряду. Дифузійне електричне поле, яке виникає в р-n-переході, проводить розподіл нерівноважних носіїв заряду. Іншими словами, з точки зору енергетичної діаграми р-n –переходу нерівноважні електрони скочуються з потенційного бар'єру та попадають в n-область, а дірки – в р-область. Внаслідок накопичення цих носіїв заряду між областями виникає додаткова різниця потенціалів - фото- е.р.с.

Ця складова фото-е.р.с. є основною в фотоелементах, але існують і інші. При освітленні напівпровідника з'являється градієнт концентрації електронів і дірок, які дифундують від освітленої поверхні в глибину напівпровідника. Але коефіцієнти дифузії електронів і дірок відрізняються, тому виникає друга складова фото-е.р.с. Окрім цього, при наявності на освітленій поверхні напівпровідника пасток захвату носіїв одного знаку виникає третя складова фото-е.р.с. внаслідок дифузії в глибину напівпровідника заряду другого знаку.

## **ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ТА КОНСТРУКЦІЯ СОНЯЧНОГО ЕЛЕМЕНТА**

Фотоелементи широко використовуються у вигляді сонячних батарей, які служать для перетворення сонячного світла в електричну енергію. Для цієї мети використовують кремнієві фотоелементи.

Електронно – дірковий перехід в монокристалічній пластині кремнію з електропровідністю р-типу створюють дифузією фосфору або сурьми. При великій концентрації донорів в приповерхневому шарі кремнію провідність n-області стає високою. Тому не випрямляючий контакт до цієї області можна виготовити у вигляді кільця або рамки, залишивши поверхню кристалу доступною до освітлення.

## **ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА ПАРАМЕТРИ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ**

### **Вольт-амперні характеристики.**

Крапки перетину ВАХ з вісю напруг відповідає значенням фотое.р.с. або напругам холостого ходу при різній освітленості.

Крапки перетину ВАХ з вісю струмів відповідають значенням струмів

короткого замикання, які залежать від площі випрямляючого електричного переходу фотоелемента.

За ВАХ при різній освітленості фотоелемента можна вибрати оптимальний режим роботи фотоелемента, тобто оптимальний опір навантаження, при якому буде виділятися максимальна потужність. Оптимальному режиму роботи фотоелемента відповідає найбільша площа прямокутника з вершиною на ВАХ при даній освітленості.

## **Світлові характеристики фотоелемента.**

Світлові характеристики фотоелемента – це залежність фото-е.р.с. та струму короткого замикання від світлового потоку або освітленості фотоелемента. Сублінійність світлових характеристик пов'язана зі зменшенням висоти потенційного бар'єру при накопиченні збиткового заряду електронів в  $n$ -області і дірок в  $p$ -області.

## **Спектральні характеристики фотоелемента.**

Спектральна характеристика фотоелемента – це залежність струму короткого замикання від довжини падаючого світла. Вони аналогічні спектральним характеристикам фотодіодів, виготовлених на основі того ж напівпровідника. Максимум спектральної характеристики кремнієвих фотоелементів майже відповідає максимуму спектрального розподілу енергії сонячного світла. Тому саме кремнієві фотоелементи використовують для створення сонячних батарей.

## ***КОЕФІЦІЄНТ КОРИСНОЇ ДІЇ (ККД):***

К.к.д. - це відношення максимальної потужності, яку можна отримати за допомогою фотоелемента, до повної потужності променевого потоку, що падає на робочу поверхню .

# 7.ТЕРМІСТОРИ , БОЛОМЕТРИ, ПОЗИСТОРИ

## ТЕРМІСТОРИ.

Термістор – це напівпровідниковий прилад (резистор), у якого використовується залежність опору напівпровідника від температури.

Зменшення опору напівпровідника зі збільшенням температури може бути обумовлено 3 причинами:

- збільшення концентрації носіїв заряду;
- **збільшення їх рухливості;**
- **фазові перетворення напівпровідника.**

**1** – характерне для термісторів, виготовлених із матеріалів монокристалів ковалентних напівпровідників (кремній, германій, карбід кремнію, сполуки  $A^3B^5$ ). Такі напівпровідники мають від'ємний температурний коефіцієнт опору в діапазоні температур, що відповідають домішковій електропровідності, коли не всі домішки іонізовані, коли концентрація носіїв заряду змінюється внаслідок іонізації власних атомів напівпровідника. В обох випадках залежність опору напівпровідника визначається зміною концентрації носіїв заряду, оскільки температурні зміни рухливості дуже малі.

**2**– термістори виготовлені із окисних напівпровідників – окисів металів перехідної групи таблиці Менделєєва з переважним іонним зв'язком між атомами. Для металів перехідної групи характерна наявність незаповнених електронних оболонок та змінна валентність. При створенні окисла в певних умовах в однакових кристалографічних положеннях з'являються іони з різними зарядами. Електропровідність таких матеріалів пов'язана з обміном електронами між сусідніми атомами, тому ці електрони (дірки) можна вважати вільними носіями заряду, а концентрацію – постійною в робочому діапазоні температур термістора.

Внаслідок сильної взаємодії носіїв заряду з іонами рухливість носіїв заряду в окисному напівпровіднику стає малою та експоненційно зростає з ростом температури. Таким чином температурна залежність опору термістора із окисного напівпровідника така ж як і у термісторів із ковалентних напівпровідників, однак коефіцієнт температурної чутливості в цьому випадку характеризує зміну рухливості носіїв заряду, а не зміну концентрації.

**3**- в окислах ванадію  $V_2O_4$ ,  $V_2O_3$  при температурі фазових перетворень (68 та - 110<sup>0</sup>C) спостерігається зменшення питомого опору на декілька порядків, Це явище може бути використано для створення термісторів з великим негативним температурним коефіцієнтом опору в діапазоні температур, що відповідають фазовому перетворенню.



# ПАРАМЕТРИ ТЕРМІСТОРІВ

1. Номінальний опір термістора – це опір при певній температурі ( $20^0$ ). Термістори виготовляють з допустимим відхиленням від номінального значення 20, 10, та 5%. Номінальний опір для різних типів термісторів коливається від декількох Ом до декількох сотен Ом.

2. Коефіцієнт температурної чутливості-  $B$  - це коефіцієнт в показнику експоненти температурної характеристики термістора. Його значення залежить від матеріалу термістора і майже постійне для різних типів термісторів ( знаходиться в межах від 700 до 1500К) .

3. Температурний коефіцієнт опору термістора – показує відносну зміну Опору термістора при зміні температури на один градус.

Значення температурного коефіцієнта опору при кімнатній температурі для різних термісторів знаходиться в межах:  $-(0,8 - 6,0) 10^{-2} K^{-1}$ .

4. Коефіцієнт розсіювання термістора  $H$  – чисельно рівний потужності, яка розсіюється термістором при різниці температур термістора та навколишнього середовища на один градус, тобто чисельно рівний потужності, яку треба виділити в термісторі, щоб нагріти його на один градус.

5. Максимально - допустима температура термістора – це температура, при якій не відбувається необратимих змін параметрів та характеристик термісторів. Вона визначається не тільки властивостями термістора а й його конструктивними особливостями.

6. Максимально допустима потужність розсіювання термістора – це потужність, при якій термістор, що знаходиться в стані спокійного повітря при температурі  $20^0 C$ , розігрівається при проходженні струму до максимально допустимої температури. При зменшенні температури навколишнього повітря, а також при роботі термістора в середовищі, що забезпечує кращий тепло відвід, потужність розсіювання може перевищувати максимально допустиме значення.

7. Коефіцієнт енергетичної чутливості термістора  $G$  - чисельно рівний потужності, яку необхідно підвести до термістора для зменшення його опору на 1% :

$$G = H \backslash TKR.$$

8. Постійна часу термістора – це час, протягом якого температура термістора зменшиться в на 63% ( в  $e$ - разів) по відношенню до різниці температур термістора та навколишнього середовища. Для різних типів термісторів постійна часу знаходиться в межах від 0,5 до 140с.

## **БОЛОМЕТРИ.**

**НАПІВПРОВІДНИКОВИЙ БОЛОМЕТР** – це прилад, який служить для індикації та визначення теплового випромінювання ( оптичного або інфрачервоного діапазону частот електромагнітного випромінювання).

За звичай болометри складаються з двох плівкових термісторів (товщиною до 10 мкм). Один із термісторів являється активним, тобто безпосередньо на нього діє вимірюване випромінювання. Другий термістор – компенсаційний, який служить для компенсації можливих змін температури навколишнього середовища.

### **ПАРАМЕТРИ БОЛОМЕТРІВ:**

- опір активного термістора болометра при кімнатній температурі;
- робоча напруга;
- чутливість при певній частоті модуляції променевого потоку, рівна відношенню корисного сигналу, що знімається з болометра на вхід підсилювача, до потужності випромінювання, що падає на болометр;
- поріг чутливості, чисельно рівний потужності випромінювання, яка викликає сигнал, еквівалентний рівню власних шумів болометра, тобто поріг чутливості визначається мінімальною потужністю випромінювання, яку при даних умовах здатний зареєструвати болометр;
- постійна часу, що характеризує теплову інерційність активного термістора;
- рівень власних шумів.

## **ПОЗИСТОРИ.**

**Позистори** – це напівпровідникові резистори з позитивним температурним коефіцієнтом опору.

Позистори виготовляють на основі титанату – барієвої кераміки, питомий опір якої значно зменшено внаслідок введення домішок.

Різде збільшення питомого опору титанату барію відбувається за рахунок тетрагонально – кубічного фазового перетворення, тобто в діапазоні температур вище точки Кюрі, коли титанат барію переходить із сегнетоелектричного до параелектричного становища.

Інколи для виготовлення позисторів використовують монокристалічний кремній, германій або інші напівпровідникові матеріали. Принцип дії їх оснований на зменшенні рухливості носіїв заряду при збільшенні температури внаслідок збільшення їх розсіювання на теплових коливаннях атомів кристалічної решітки.

# 8.Інтегральні схеми

ІНТЕГРАЛЬНА МІКРОСХЕМА - це мікроелектронний виріб, який виконує певну функцію перетворення та обробки сигналу і має не менше 5 елементів, що нероздільно зв'язані та електрично з'єднані між собою так, що пристрій розглядається як єдине ціле.

ІМС – це мікроелектронний пристрій, який має велику кількість елементів та компонентів, що виконують функціональні обробку сигналів і являє собою одне ціле при прийманні та експлуатації.

Основними параметрами ІМС є :

- густина (плотність) упаковки – це число елементів електронної схеми в одному кубічному сантиметрі об'єму ІМС;
- ступінь інтеграції визначається кількістю елементів, що входять до складу ІМС: до 10 елементів - мала, від 10 до 100 – середня, від 100 до 1000 – вища, більше 1000 - зверхвелика.

ІМС за технологічними особливостями бувають:

- біполярні ІМС;
- МДН –ІМС.

За конструктивно-технологічними особливостями бувають:

- Напівпровідникові ІМС;
- Гібридні ІМС.

Напівпровідникова ІМС - це ІМС, всі елементи якої та міжелементні з'єднання виконані в об'ємі і на поверхні напівпровідника.

Гібридна ІМС – це ІМС, пасивні елементи якої виконані нанесенням різних плівок на поверхню діелектричної підкладки із скла, кераміки або ситалу, а активні елементи – навісні напівпровідникові прилади без своїх корпусів.

Елементами ІМС називають МС або частину МС, які не можуть складати собою одне ціле при прийманні або експлуатації.

Компоненти виконують функції радіо- або електроелементів-, але не можуть бути використані як самостійна частина.

ІМС поділяються:

- на напівпровідникові і плівкові.

В плівкових ІМС на діелектричну пластину наносяться плівки, в яких формуються всі елементи. Такі ІМС виготовляють за допомогою тонко- та товсто плівкової технологій. Якщо товщина плівки до 1мкм – тонко плівкова

технологія, 2мкм – товсто плівкова технологія.

ІМС складаються із активних та пасивних елементів. До активних елементів відносяться : діоди, транзистори; до пасивних: резистори, конденсатори.

## **БІПОЛЯРНИЙ ТРАНЗИСТОР.**

Структура БТ в ІС відрізняється від структури дискретного транзистора ізоляцією підкладки, значно меншими розмірами.

## **ДІОД.**

**Цей активний елемент використовується в логічних схемах.**

## **ДИФУЗІЙНІ РЕЗИСТОРИ.**

Дифузійні резистори, як і інші резистивні елементи, характеризують наступні параметри: діапазон номінальних значень опору, допуски за опором, температурний коефіцієнт опору, допустима потужність розсіювання та максимальна напруга.

## **ПЛІВКОВІ РЕЗИСТОРИ.**

Основою плівкового резистора є резистивна плівка із металу (хром, тантал, паладій, металевого сплаву (нихром) або металокераміки (кермет). Резистивну плівку певної конфігурації наносять на діелектричну підкладку гібридної ІМС або на окислений кристал напівпровідникової ІМС.

## **ДИФУЗІЙНІ КОНДЕНСАТОРИ.**

**Як конденсатори ІМС часто використовують бар'єрну ємність електронно – діркового переходу, зміщеного у зворотньому напрямку. Такий пасивний елемент зручно формувати одночасно з формуванням транзисторної структури або використовувати безпосередньо електронно – діркові переходи транзисторних структур.**

## **МДН – КОНДЕНСАТОРИ.**

Як діелектрик у такого конденсатора використовують шар двоокису кремнію, яким покритий кристал напівпровідника. Однією обкладкою конденсатора є шар металу, нанесеного на поверхню шару двоокису кремнію, другою обкладкою – є сильно легована область напівпровідника.

## **ПЛІВКОВІ КОНДЕНСАТОРИ.**

Плівкові конденсатори формують на діелектричній підкладці ГІМС. Як діелектрик такого конденсатора використовують різні матеріали, але найбільше – моноокис кремнію.

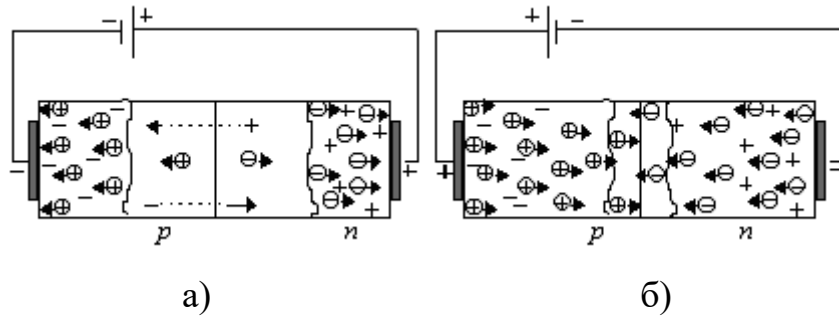
Дисципліна «Твердотілі компоненти мікро-та наноелектроніки» є курсом спеціального профілю для підготовки бакалаврів зі спеціальності 153 «Мікро-та наносистемна техніка» В навчальному посібнику викладено основні короткі теоретичні відомості про твердотілі структури, надано основні формули для розрахунку параметрів та характеристик діодних-, транзисторних-, та оптоструктур і елементів інтегральних схем. Розглянуто, як приклад, розрахунок параметрів та характеристик твердотілих структур за вихідними даними.

### **1 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ТА ХАРАКТЕРИСТИК ДІОДНИХ ТА ТВЕРДОТІЛИХ СТРУКТУР**

#### **1.1 Малопотужні діоди**

**Напівпровідниковим діодом** називають напівпровідниковий прилад з одним електричним р-п переходом та двома зовнішніми виводами, в якому використовують ті чи інші властивості р-п переходу.

Малопотужні діоди відрізняються від інших значенням теплового опору  $R_T$  (100- 130 °C/Вт) та середнім значенням струму, що випрямляється за період  $I_{впр} < 400\text{мА}$ .



а) зворотня напруга,  
б) пряма напруга

Рисунок 1.1 - Принцип роботи р-п переходу

У більшості діодів малої та середньої потужності допустимий прямий струм, як правило, не перевищує точку інверсії, а у силових потужних діодів допустимий струм може бути вище цієї точки [1].

Як приклад, розглянемо розрахунок параметрів та характеристик малопотужного кремнієвого діода.

Вихідні дані:

- Коефіцієнт теплової дифузії  $D_0 = 10,5 \text{ см}^2/\text{с}$
- Енергія іонізації акцепторів  $\Delta E_{\text{акт}} = 3.66 \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ Дж}$
- Постійна Больцмана  $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ Дж/К}$
- Питомий опір  $\rho_n = 4.2 \text{ Ом} \times \text{см}$
- Градієнт концентрації  $a = 2.886 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$
- Рухливість дірок  $\mu_p = 480 \text{ см}^2/\text{Вс}$
- Кімнатна температура  $T_w = 300\text{К}$
- Концентрація електронів у власному напівпровіднику  $n_i = 1.6 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$
- Заряд електрона  $q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ Кл}$
- Діелектрична постійна  $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ Ф/м}$
- Ширина забороненої зони  $\Delta E_g = 1.11 \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ Дж}$
- Діелектрична проникливість 11,8
- Площа перерізу напівпровідника  $A_{\text{пер}} = 0.283 \text{ мм}^2$   
 $\phi_t = 0.0259 \text{ В}$

Напруга пробою плавного р-п переходу

$$U_{np} = 60 \cdot \left( \frac{\Delta E_g}{1,1 \cdot q \cdot} \right)^{1,2} \cdot \left( \frac{a}{3 \cdot 10^{20}} \right)^{-0,4} \quad (1.1)$$

$$U_{np} = 154,73 \text{ В}$$

Максимальна зворотня напруга плавного р-п переходу:

$$U_{max} = 0.5 U_{np} \quad (1.2)$$

$$U_{max} = 77.36 \text{ В}$$

Контактна різниця потенціалів плавного р-п переходу:

$$\varphi_k = \varphi_t \cdot \left( 1.61 \cdot \text{Log} \left( \frac{3\epsilon\epsilon_0 \cdot \varphi_t \cdot a^2}{qn_i^3} \right) + 0.8 \right) \quad (1.3)$$

$$\varphi_k = 0.604 \text{ В}$$

Ширина ОПЗ при  $U_{max}$  і при нульовій  $U_0$ :

$$\delta(U) = \sqrt[3]{\frac{12 \cdot \epsilon\epsilon_0 \cdot (\varphi_k - U)}{q \cdot a}} \quad (1.4)$$

$$\delta(-U_{max}) = 5.959 \times 10^{-6} \text{ м}$$

$$\delta(0) = 1,179 \times 10^{-6} \text{ м} .$$

Бар'єрна ємність при  $U_{max}$  :

$$C_{бар} = \frac{\epsilon\epsilon_0 A_{per}}{\delta(-U_{max})} \quad (1.5)$$

$$C_{бар} = 4,95 \text{ пФ} .$$

Побудуємо ВАХ діода .

Зворотня гілка ВАХ:

- Коефіцієнт дифузії неосновних носіїв  $D_p$  заряду та їх час життя  $\tau_p$ :

$$D_p = \frac{k \cdot T_w}{q} \cdot \mu_p \quad (1.6)$$

$$D_p = 12.42 \text{ см}^2/\text{с} .$$

$$\tau_p = \frac{L_p^2}{D_p} \quad (1.7)$$

$$\tau_p = 8.052 \times 10^{-6} \text{ c .}$$

- Струм насичення:

$$I_s = q \cdot n_i^2 \cdot \frac{D_p \cdot A_{per}}{C_b L_p} \quad (1.8)$$

$$I_c = 1.199 \times 10^{-13} \text{ .}$$

- Генераційний стум:

$$I_g(U) = \frac{A_{per} \cdot q \cdot n_i}{2\tau_p} \cdot \sqrt[3]{\frac{12\epsilon\epsilon_0 \cdot (\phi_k - U)}{q \cdot a}} \quad (1.9)$$

$$I_g = 2,68 \times 10^{-16} \text{ A .}$$

- Загальний зворотній струм:

$$I_1(U) = I_s \left( \exp\left(\frac{U}{\phi_t}\right) - 1 \right) - I_g(U) \quad (1.10)$$

- Загальна зворотня щільність струму:

$$J_1(U) = \frac{I_1}{A_{per}} \quad (1.11)$$

За формулою (1.10) побудуємо зворотню гілку ВАХ.

Таблиця 1.1 - Дані вольтамперної характеристики

U(V)	0	-10	-20	-30	-40	-50
I(mkA)	0	-0,761	-0,929	-1,046	-1,139	-1,217



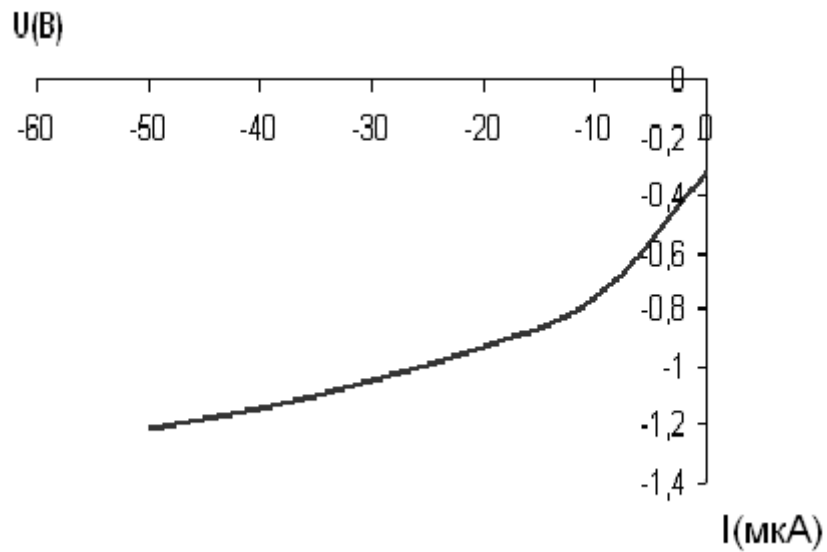


Рисунок 1.2 - Вольтамперна характеристика діода (зворотня гілка)

## 1.2 Надвисокочастотні діоди

**Надвисокочастотний напівпровідниковий діод (НВЧ- діод)** - це напівпровідниковий діод, який використовують для обробки надвисокочастотного сигналу. Це - детекторні, тунельні, лавино-прольотні, параметричні діоди, а також діоди Ганна, діоди Шоткі. До діапазону НВЧ прийнято відносити частоти від 0.3 до 330 ГГц: дециметрові хвилі ( $\lambda=10^2..10$  см,  $f= 0.3..3$  ГГц), сантиметрові хвилі ( $\lambda=10..1$  см,  $f = 3..30$  ГГц), міліметрові хвилі ( $\lambda = 10..1$  мм,  $f = 30...300$  ГГц) [1, 2].

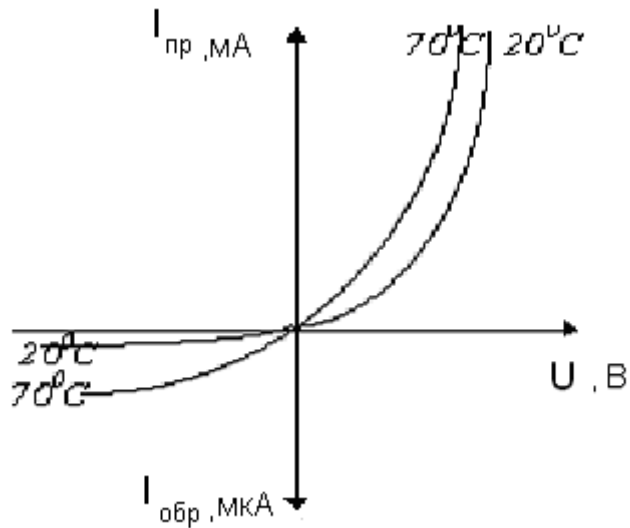


Рисунок 1.3 - Вольтамперна характеристика діода

Розглянемо розрахунок деяких параметрів діоду.

Вихідні дані :

- Власна концентрація  $n_i = 1.79 \times 10^6 \text{ см}^{-3}$
- Температура  $T_0 = 300 \text{ К}$
- Постійна Больцмана  $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ Дж/К}$   
 $L_n = 1,6 \times 10^{-19} \text{ м}$
- Концентрація акцепторної домішки  $N_a = 1.5 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$
- Концентрація донорної домішки  $N_d = 2 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$

Контактна різниця потенціалів:

$$\varphi_k = \frac{kT}{l} L_n \frac{N_a N_d}{n_i^2} = 2.5 \cdot 10^{-2} L_n (9.3 \cdot 10^{19}) = 1.14 \text{ В} \quad (1.12)$$

Ширина p-n переходу:

$$l_0 = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0\varphi_k}{l} \left( \frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right)} = \sqrt{165 \cdot 10^7 \cdot 3,5 \cdot 10^{-9}} = 2,3 \cdot 10^{-6} \text{ м} \quad (1.13)$$

Бар'єрна ємність:

$$C_{\bar{o}} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{l_0} \cdot \sqrt{\frac{\varphi_k}{|U|}} = 7.82 \cdot 10^{-9} \text{ Ф} \quad (1.15)$$

Гранична частота:

$$f = \frac{1}{2\pi C_0} = 2 \cdot 10^{10} \text{ Гц} \quad (1.16)$$

Тепловий опір

$$R_T = \frac{l_0}{\lambda S} = \frac{2.3 \cdot 10^{-3}}{55 \cdot 16 \cdot 10^{-15}} = 261.3 \quad (1.17)$$

Максимальна напруга:

$$U_{\max} = \frac{T_{n \max} - T_0}{R_T \cdot I_{зв}} = 22 \text{ В} \quad (1.18)$$

### 1.3 Високочастотні діоди Шоткі

Перехідний шар, в якому існує дифузійне контактне електричне поле, створений в результаті контакту між металом і напівпровідником називають **переходом Шоткі**.

Діоди Шоткі відрізняються від діодів на р-п - переходах відсутністю інжекції неосновних носіїв. Це означає, що у них відсутня дифузійна ємність, пов'язана з накопиченням та розсіюванням неосновних носіїв в базі, що суттєво підвищує швидкодію діодів. Робочі частоти лежать у межах 3...15 ГГц. Не менш важливою особливістю діодів Шоткі є значно менша пряма напруга, ніж напруга на р-п - переході.

При ідеальному контакті металу з напівпровідником відбувається дифузія електронів із матеріалу з меншою роботою виходу електронів у матеріал з більшою роботою виходу. *Робота виходу* - це енергія, необхідна для переходу електронів з рівня Фермі до верхньої вільної зони.

В результаті дифузії електронів і перерозподілу зарядів порушується електрична нейтральність прилягаючих до межі розділу областей, виникає контактне електричне поле і контактна різниця потенціалів:

$$\varphi_{\text{кон}} = (A_M - A_N) / q, \quad (1.19)$$

де  $A_M, A_N$  – робота виходу електронів з напівпровідника.

Діод з бар'єром Шоткі виготовляється з арсеніду галія n-типу з контактом нікелю. Для роботи діода в дециметрових і сантиметрових діапазонах довжин хвиль, тобто до частот біля 12 ГГц він закріплюється в стандартному коаксіальному корпусі [1-3].

Як приклад розглянемо розрахунок деяких параметрів діодів Шоткі.

Вихідні дані:

- Температура  $T = 300 \text{ К}$

- Висота бар'єру  $\phi_b = 0.8 \text{ eV}$
  - Заряд електрона  $q = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
  - Постійна Больцмана  $k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$
- Ефективна постійна Річардсона  $A = 8,7 \times 10^4 \text{ А / м}^2 \times \text{К}^2$

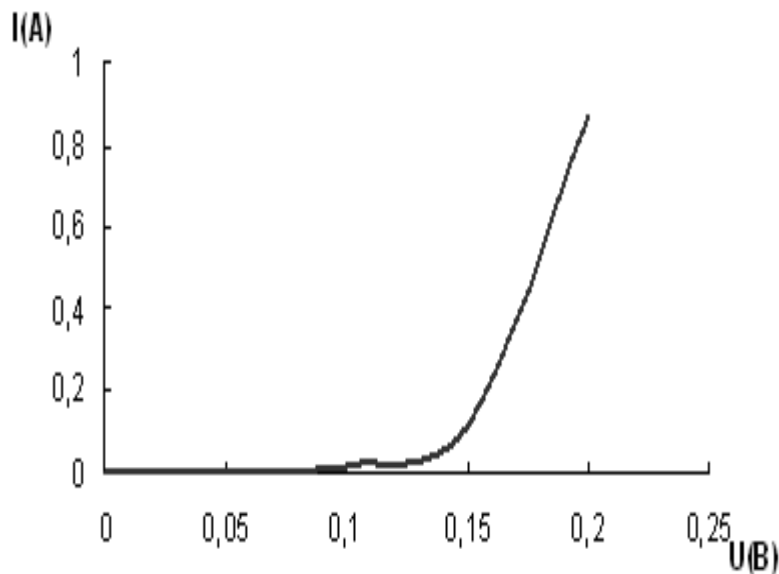
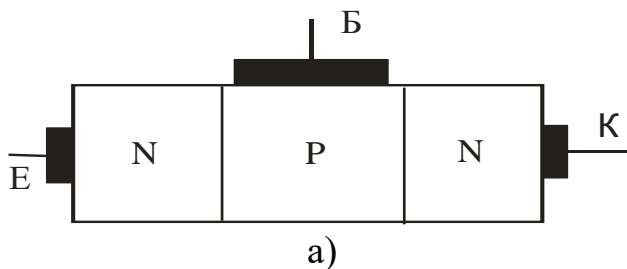


Рисунок 1.4 - Вольтамперна характеристика діода Шоткі (пряма гілка)

## 2 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ТА ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНЗИСТОРНИХ ТВЕРДОТІЛИХ СТРУКТУР

### 2.1 Біполярний транзистор

Транзистори - це напівпровідникові прилади, які призначені підсилювати сигнал та мають три виводи або більше. Транзистори можуть мати різне число переходів між областями з різною електропровідністю. Найбільш поширені транзистори з двома р-п переходами. Ці транзистори називають біполярними, тому що їх робота пов'язана з використанням носіїв заряду обох знаків.



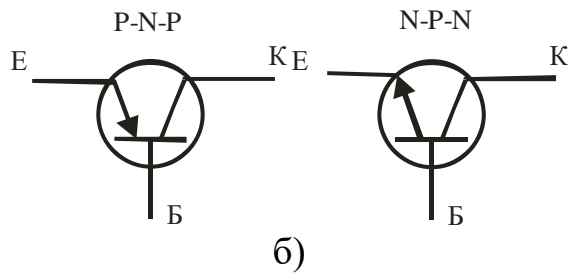


Рисунок 2.1 -Схематичне зображення плоского транзистора:  
а) умовне, б) на схемах

Середня область транзистора називається базою, одна крайня область -емітером, друга - колектором. Таким чином, транзистор має два р-п переходи емітерний - між емітером і базою та колекторний - між базою і колектором. Відстань між ними повинна бути мала, не більше одиниць мікрометрів, тобто область бази повинна бути дуже тонкою. Окрім цього, концентрація домішок в базі завжди значно менша, ніж у колекторі та емітері. Це являється умовою для стабільної роботи транзистора [1, 3, 4].

Розглянемо, як приклад, розрахунок деяких параметрів транзистора.

Вихідні дані:

- Заряд електрона,  $e = 1,6 \times 10^{-19}$  Кл,
- Власна концентрація,  $n_i = 8 \times 10^6$  см,
- Концентрація домішкових атомів області бази,  $N_B = 10^{13}$  см<sup>-3</sup>
- Кімнатна температура  $T_w = 300$ К
- Концентрація домішкових атомів області колектора,  
 $N_K = 2 \times 10^{16}$  см<sup>-3</sup>
- Концентрація домішкових атомів області емітера,  
 $N_e = 3 \times 10^{17}$  см<sup>-3</sup>
- Рухливість зарядів колектора,  $\mu_K = 1800$  см<sup>2</sup>/В×с
- Рухливість зарядів емітера,  $\mu_E = 1461$  см<sup>2</sup>/В×с

Розрахуємо потенціал транзистора:

$$\varphi_T = \frac{k \cdot T}{g} = \frac{1.38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1.6 \cdot 10^{-19}} = 0.026V \quad (2.1)$$

Потенціал колектора:

$$\begin{aligned}\varphi_{KK} &= \varphi_T \ln \frac{N_B \cdot N_K}{n_i^2} = \\ &= 0,026 \cdot \ln \frac{10^{13} \cdot 2 \cdot 10^{16}}{(8 \cdot 10^6)^2} = 1,33B\end{aligned}\tag{2.2}$$

Потенціал колектора-емітера:

$$\begin{aligned}\varphi_{KE} &= \varphi_T \ln \frac{N_B \cdot N_E}{n_i^2} = \\ &= 0,026 \cdot \ln \frac{10^{13} \cdot 3 \cdot 10^{17}}{(8 \cdot 10^6)^2} = 1,32B\end{aligned}\tag{2.3}$$

Коефіцієнт дифузії емітера:

$$D_E = \varphi_{KE} \cdot \mu_E = 1,32 \cdot 1100 = 1461\tag{2.4}$$

Коефіцієнт дифузії колектора:

$$D_K = \varphi_{KK} \cdot \mu_K = 1,33 \cdot 1800 = 2392\tag{2.5}$$

Генераційний струм переходу емітера та колектора:

$$\begin{aligned}I_{OE} &= \frac{g \cdot n_i^2 \cdot S_E \cdot D_E}{h_E \cdot N_E} = \\ &= \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot (8 \cdot 10^6)^2 \cdot 0,4 \cdot 1461,9}{0,1 \cdot 10^{18}} = 6 \cdot 10^{-9} A\end{aligned}\tag{2.6}$$

$$\begin{aligned}I_{OK} &= \frac{g \cdot n_i^2 \cdot S_K \cdot D_K}{h_K \cdot N_K} = \\ &= \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot (8 \cdot 10^6)^2 \cdot 0,4 \cdot 2392,2}{0,1 \cdot 10^{18}} = 2,5 \cdot 10^{-9} A\end{aligned}\tag{2.7}$$