

1. ФІЗИЧНІ ЯВИЩА У НАПІВПРОВІДНИКАХ

1.1 Власна провідність напівпровідників

Із усієї різноманітності напівпровідникових матеріалів в радіоелектроніці для створення напівпровідникових приладів використовуються переважно германій і кремній¹. Обидва вони елементи четвертої групи періодичної системи і, отже, мають по чотири валентні електрони. В просторі атоми цих речовин розташовані у вершинах правильних тетраедрів і зв'язані між собою ковалентними зв'язками за рахунок усупільнених з сусідніми атомами валентних електронів. Умовно система ковалентних зв'язків зображена на рис. 1.1, де великими колами зображені атоми, а малими - валентні електрони.

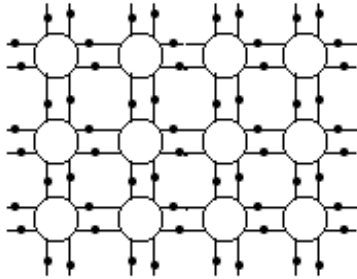


Рис. 1.1.

У ідеальній кристалічній ґратці напівпровідника при температурі абсолютного нуля всі електрони зв'язані з атомами і речовина виявляє властивості ідеального діелектрика. Але при підвищенні температури напівпровідника електрони за рахунок теплових рухів атомів ґратки можуть порівняно легко зриватися з ковалентних зв'язків і хаотично рухатися в межах ґратки кристалу. Концентрація електронів дається таким виразом:

$$n = AT^{3/2} \exp\left(-\frac{\Delta E}{2kT}\right) \quad (1.1)$$

де A - коефіцієнт пропорційності, T - абсолютна температура, ΔE - енергія активації напівпровідника, тобто мінімальна енергія, необхідна для вивільнення валентного електрона². Ця енергія дорівнює 0,67 еВ для германію та 1,12 еВ для кремнію. При кімнатній температурі концентрація вільних електронів у кремнії та германії має дорівнювати $n_{Si} \approx 10^{10} \text{см}^{-3}$ та $n_{Ge} \approx 10^{13} \text{см}^{-3}$. З підвищенням температури концентрація вільних електронів швидко зростає.

Якщо у напівпровіднику створити електричне поле, всі вільні електрони попрямують в бік позитивного потенціалу. Виникне струм з густиною

$$j_e = env = en\mu E = \sigma_e E$$

де v - дрейфова швидкість спрямованого руху електронів в електричному полі напруженістю E , μ - рухливість електронів у цьому полі, σ_e - електронна провідність напівпровідника.

Слід, однак, мати на увазі, що недостача в якомусь із атомів кристалічної ґратки електрона еквівалентна наявності тут рівного за величиною зайвого позитивного заряду. У фізиці напівпровідників таку електронну вакансію називають “діркою”. Вона поводить себе як позитивний заряд, рівний за величиною заряду електрона. На вакантне місце, звільнене електроном, може “перестрибнути” електрон з сусіднього атома, так що дірка переміститься на одну міжатомну відстань. За рахунок наступного стрибка дірка знов переміститься до іншого атома і т.д. Концентрація дірок P дорівнює

¹ У сучасних приладах германій використовується зрідка; все більшого застосування знаходять сполуки галію типу A^3B^5 , наприклад арсенід галію.

² Тобто ширина забороненої зони.

концентрації вільних електронів n , так що в цілому напівпровідник залишається електрично нейтральним.

Звичайно дірки хаотично блукають кристалічною ґраткою. Однак при накладанні електричного поля дірки набувають спрямований дрейфовий рух в бік від'ємного потенціалу. Рухливість дірок в германії та кремнії у кілька разів менша за рухливість електронів, отже, внесок діркової провідності в загальну провідність напівпровідника відповідно менший за внесок електронної.

При зустрічі дірки з вільним електроном може статися їх возз'єднання - рекомбінація, в результаті якої і дірка і вільний електрон щезають, а в кристалічній ґратці відновлюється нейтральний атом. Середній час життя τ вільного електрона з моменту його виникнення до моменту рекомбінації залежить від виду напівпровідника, концентрації в ньому вільних зарядів і лежить, звичайно, в межах порядку мікросекунд.

Всі ці процеси відбуваються так лише в дуже чистих напівпровідниках, де сторонні домішки не перевищують 10^{-8} - 10^{-9} %. Концентрація дірок в них завжди дорівнює концентрації вільних електронів. Такі напівпровідники називають **власними** напівпровідниками, а існуючу в них провідність - відповідно власною провідністю і позначають індексом "i" (від англійського слова "intrinsic" - власний, властивий даній речовині).

Таким чином, на відміну від металів, напівпровідники можуть мати два типи провідності: електронну та діркову. Саме існування двох типів провідності і визначає більшість специфічних властивостей, притаманних напівпровідникам, і можливість їх широкого практичного застосування в електроніці.

1.2 Домішкові напівпровідники

Однак, навіть мізерні домішки сторонніх речовин спроможні істотно змінити властивості напівпровідника. Розглянемо, наприклад, що станеться, якщо в кристалічну ґратку германію упровадити атом сусіднього з ним у таблиці Менделєєва п'ятивалентного миш'яку. Щоб зручно "прилаштуватися" в кристалічній ґратці германію атом миш'яку відпускає "на волю" зайвий електрон. Енергія активації яка потрібна для такого вивільнення електрону складає лише 0,013 eV, отже навіть при кімнатній температурі атоми миш'яку втрачають п'ять валентні електрони, і концентрація створених таким шляхом вільних електронів буде дорівнювати концентрації атомів домішки. Неважко підрахувати, що при кімнатній температурі обумовлена цими домішковими електронами провідність зрівняється з власною провідністю германію вже при концентрації миш'яку порядку 10^{-7} %. При більшій кількості домішку починає переважати домішкова провідність. Домішки, які подібно до миш'яку, віддають свої електрони, називають **електронними** або **донорними** домішками, і всі величини, що до них відносяться, позначають індексом "n" (від слова *negative*, негативний, тобто від'ємний, оскільки створені донорною домішкою вільні заряди - електрони - мають від'ємний знак).

Інший сусід германію - трьохвалентний галій - при введенні в кристалічну ґратку намагається, навпаки, відібрати у сусідніх атомів германію один валентний електрон, внаслідок чого утворюється дірка. Такий домішок називають **дірковими** або **акцепторним** (від англійського слова "accept" - сприймати). Всі величини, що стосуються до акцепторних домішок, позначають

індексом "p" (від слова "positive"), оскільки вони утворюють тільки позитивні носії заряду - дірки.

Акцепторами для германію і кремнію, окрім галію, можуть бути бор, алюміній, індій, а донорами - фосфор або стібій. Енергія активації цих домішок також становить соті частки eВ, так що створені ними концентрації носіїв - електронів чи дірок - практично рівні концентрації домішкових атомів. Таким чином, відповідним підбором виду і концентрації домішок можна в широких межах змінювати характер і величину провідності основного напівпровідника. Таку операцію називають **легуванням** напівпровідника.

1.3 Неосновні носії

Не слід, однак, вважати, що єдиним видом носіїв заряду в донорному напівпровіднику є електрони, а в акцепторному - дірки. Окрім цих **основних** носіїв, у напівпровіднику можуть існувати і протилежні за знаком **неосновні** носії : дірки в донорному напівпровіднику, або електрони в акцепторному. Їх виникнення можливе за рахунок теплових рухів атомів подібно до того, як це має місце у власних напівпровідниках) або ж внаслідок наявності неконтрольованих випадкових домішок. Концентрація неосновних носіїв мала, оскільки вони швидко рекомбінують з основними.

В умовах термодинамічної рівноваги концентрація дірок в електронному напівпровіднику дорівнює

$$p_n = \frac{n_i^2}{n_n} \approx \frac{n_i^2}{N_n}$$

де n_i - концентрація зарядів при тій же температурі у власному напівпровіднику,

n_n - концентрація основних носіїв в даному донорному напівпровіднику,

N_n - концентрація донорних атомів.

Аналогічно для акцепторного напівпровідника

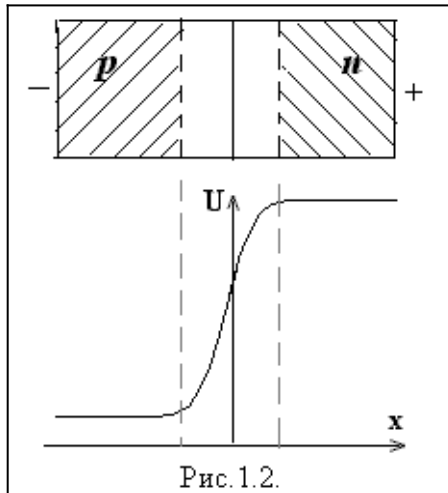
$$n_p = \frac{n_i^2}{p_p} \approx \frac{n_i^2}{N_p}$$

1.4 Електронно-дірковий перехід (p-n перехід)

Робота переважної кількості напівпровідникових приладів ґрунтується на явищах, які виникають при контакті двох монокристалічних напівпровідників з різними типами провідності. Такий контакт p- і n-напівпровідників називають **p-n переходом**. Він має ряд цінних властивостей, використання яких і обумовлює широчезний спектр можливостей напівпровідникових приладів.

При контакті напівпровідників p- і n- типів починається дифузійний рух носіїв в області з протилежним знаком провідності, де концентрація зарядів даного знаку мала: електронів в дірковий напівпровідник, а дірок у електронний. Однак, ця дифузія невдовзі припиняється оскільки напівпровідник n-типу, втративши частину своїх електронів (і набувши деяку кількість дірок) заряджається позитивно, а дірковий напівпровідник, втративши частину дірок і набувши електрони, заряджається негативно. В результаті між p- і n- напівпровідниками в області переходу виникає потенціальний бар'єр

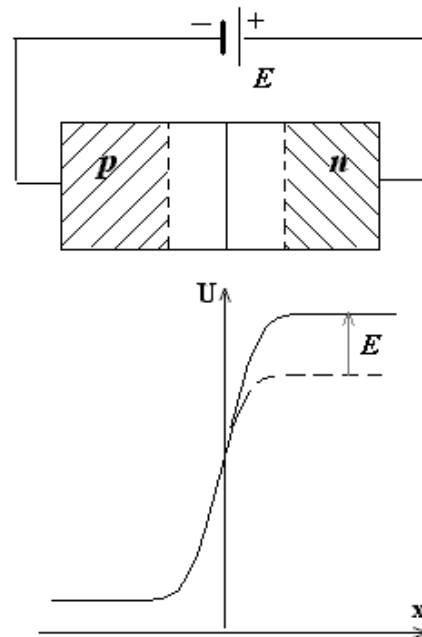
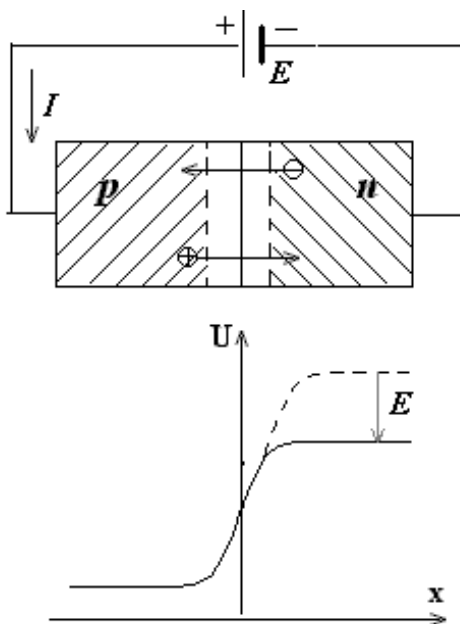
порядку вольт. Ця різниця потенціалів локалізована у контактному шарі товщиною близько 1 мкм і створює в ньому електричне поле порядку 10^5 В/см і більше (рис.1.2). Це поле видаляє носії зарядів з перехідного шару: електрони в



n -область, а дірки в p -область. Внаслідок цього перехідний шар збіднюється носіями і набуває властивостей діелектрика. Глибина проникнення поля у напівпровідник залежить від його провідності: чим вона менша, тим більшою буде глибина. Тому, коли ступінь легування p - і n - областей неоднакова, збіднений носіями заряду шар утворюється переважно в напівпровіднику, котрий зазнав слабшого легування.

При намаганні носіїв проникнути в “чужу” область їм доводиться долати потенціальний бар’єр досить значної висоти. Тому, хоч деякий обмін зарядами між p - і n - областями і існує, він дуже незначний

Справа змінюється, якщо до переходу прикладена зовнішня ЕРС, за напрямком протилежна контактній різниці потенціалів (рис.1.3). Висота



потенціального бар’єру при цьому знижується і тепер вже досить великий потік дірок прямує в n -область, а електронів у p -область, створюючи струм I через перехід. Внесок в цей струм

носіїв різного типу обумовлений насамперед їх концентрацією. Якщо p -область легована значно сильніше, ніж n -область, то струм I створюється переважно дірками. І навпаки, якщо сильніше легована n -область, основний внесок в струм дадуть електрони.

Таким чином, основний потік зарядів через перехід визначається сильніше легованою областю; її називають **емітером**. Слабше леговану область називають **базою**. Процес введення сторонніх носіїв (наприклад, дірок у n -область) називають **інжекцією**. Інжектвані заряди існуватимуть у області інжекції як неосновні носії, поки вони не прорекомбінують там з основним носіями.

При протилежній полярності зовнішньої ЕРС висота потенціального бар'єру зростає, а товщина його збільшується (рис.1.4), в результаті чого рух

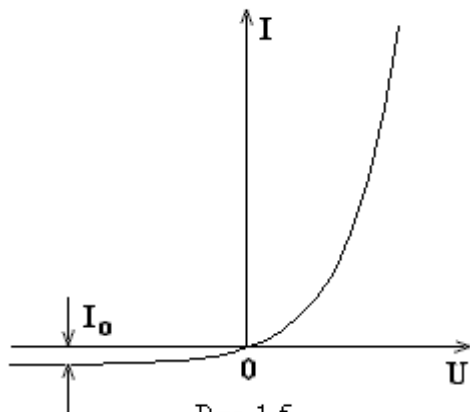


Рис. 1.5.

основних носіїв через перехід практично припиняється. Електричний струм, що існує при такій зворотній полярності обумовлюється лише неосновними носіями, які завжди у невеликій кількості присутні у напівпровіднику. Для них поле у переході є прискорюючим і тому будь-який неосновний носій, який при своєму тепловому русі потрапить на межу збідненого шару буде обов'язково втягнутим у цей шар і перетне межу p - і n - переходу. Таке усмоктування неосновних носіїв в збіднений шар

називають **екстракцією**.

Залежність струму через p - і n - перехід від прикладеної до нього напруги U дається виразом

$$I = I_0 \left(e^{\frac{qU}{kT}} - 1 \right) \quad (1.2)$$

де I_0 - струм насичення, обумовлений неосновними носіями, T - абсолютна температура, q - заряд електрона.

Графік вольтамперної характеристики p - n переходу зображений на рис.1.5. При досить великій позитивній напрузі ($U \gg \frac{kT}{q}$) одиницею у виразі (1.2) можна нехтувати і вважати, що струм експоненціально залежить від прикладеної напруги.

$$I \approx I_0 e^{\frac{qU}{kT}} \quad (1.3)$$

Таким чином, p - n перехід являє собою нелінійний опір, струм якого не пропорційний до прикладеної напруги. Перехід може бути охарактеризований омичним (статичним) опором

$$R_0 = \frac{U}{I}$$

або диференційним (динамічним) опором

$$r_d = \frac{dU}{dI} = \frac{kT}{qI_0} \exp\left(-\frac{qU}{kT}\right) = \frac{1}{I} \frac{kT}{q} \quad (1.4)$$

Для відкритого переходу ($U > 0$) звичайно $r_d < R_0$.

Інжектвані у “чужу” область неосновні носії досить швидко рекомбінують з основними носіями. Однак, маючи скінчений час життя τ , вони утворюють там деякий об’ємний заряд $Q = I\tau$. При стрибкоподібній зміні полярності U (рис.1.6) та переході від відкритого стану до закритого через $p-n$ перехід протягом деякого часу протікає зворотний струм, значно вищий за струм насичення та обумовлений тими неосновними носіями, котрі раніш були інжектвані в “чужі” області, а тепер рухаються у зворотному напрямі за

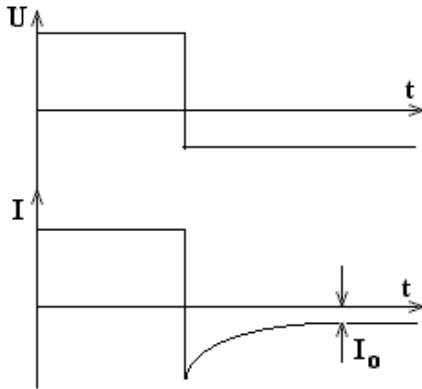


Рис.1.6.

рахунок дифузії. Тривалість цього процесу порядку середнього часу рекомбінації.

1.5 Бар’єрна та дифузійна ємність

Як вже йшла мова, при зворотній полярності на границі $p-n$ переходу утворюється збіднений носіями шар, котрий має властивості діелектрика. Вся система в цілому стає подібною до конденсатора, який має провідні обкладинки, розділені діелектричним прошарком. Ємність такого конденсатора називається **бар’єрною ємністю**, оскільки її існування обумовлене потенціальним бар’єром $p-n$ переходу. Її величина залежить від товщини збідненого шару і зменшується з його потовщенням.

У відкритому режимі $p-n$ перехід характеризується диференціальним опором r_d та **дифузійною ємністю** $C_{\text{диф}}$. Справа в тому, що із збільшенням напруги на ΔU струм через перехід зростає на $\Delta I = \Delta U / r_d$ та відповідно на $\Delta Q = \Delta I \tau$ збільшується об’ємний заряд інжектованих неосновних носіїв. А відношення $\Delta Q / \Delta U = \tau / r_d$ має зміст ємності, яка і носить назву дифузійної. На відміну від бар’єрної ємності, що існує реально і через яку протікає справжній струм зміщення, дифузійна ємність значною мірою є формальним поняттям і вводиться для опису інерційних властивостей $p-n$ переходу. Вона вважається увімкненою разом з r_d паралельно до $p-n$ переходу і визначає його сталу часу $C_{\text{диф}} r_d = \tau$, з якою відбуваються зображені на рис.1.6 перехідні процеси. В реальних умовах бар’єрна ємність невелика і складає звичайно десятки або сотні пікофарад, тоді як дифузійна ємність може бути на кілька порядків більшою.

1.6 Пробій $p-n$ переходу

При занадто великій напрузі, прикладеній до закритого $p-n$ переходу, останній може пробитися, як і звичайний конденсатор. Це відбувається тоді,

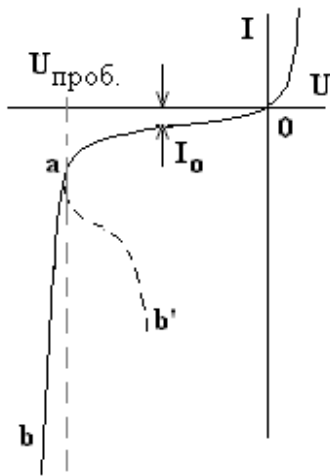


Рис. 1.7.

коли екстрагований неосновний носій (наприклад, електрон) при проходженні через збіднений шар прискориться на довжині вільного пробігу аж до енергії активації даного напівпровідника. Тоді цей прискорений носій при зіткненні з атомом кристалічної ґратки може вибити з нього новий електрон, який також прискорюється і стає спроможним вибивати нові електрони. Таким чином, один первинний електрон здатний викликати цілу лавину нових електронів і в результаті струм через перехід різко зростає. Таке явище має назву лавинного пробію $p-n$ переходу і починається коли напруга на переході досягає значення, яке називається пробійним. При пробію на вольтамперній характеристиці з'являється

ділянка різкого зростання струму (рис. 1.7, ділянка "ab").

Іншою причиною подібного різкого зростання струму може бути локальне перегрівання в якійсь точці збідненого шару. Зі зростанням температури в цьому місці збільшується провідність, зростає густина струму, наслідком чого є ще більше перегрівання та підвищення температури. Таки й пробій носить назву теплового. Вольтамперна характеристика для теплового пробію має вигляд подібний до кривої ab' .

Нарешті, при дуже великих напруженостях поля порядку 10^6 - 10^7 В/см електрони можуть бути вирвані з їх ковалентних зв'язків в результаті квантово-механічного тунельного ефекту. Такий вид пробію називається тунельним. Він спостерігається у напівпровідниках з високим ступенем легування, де збіднений основними носіями шар дуже тонкий.

В нашій уяві слово "пробій" звичайно асоціюється з руйнуванням електротехнічного приладу. Але у $p-n$ переходах, якщо не має місце надто великого зростання струму, пробій не є причиною необоротних змін і виявляється для переходу цілком нешкідливим. На використанні ефекту пробію $p-n$ переходу ґрунтується робота цілого ряду напівпровідникових приладів.

Контрольні питання до розділу "Фізичні явища в напівпровідниках"

1. Які напівпровідникові матеріали використовують для виготовлення напівпровідникових електронних приладів?
2. Чому при однаковій температурі концентрація електронів та дірок у ідеально чистому кремнію менша ніж у такому ж чистому германію?
3. Що таке домішковий напівпровідник, напівпровідник n -типу, p -типу?
4. Яка електропровідність залежить від температури сильніше - власна чи домішкова?
5. Яким домішком буде алюміній для кремнію - донорним чи акцепторним? Пояснить чому.

6. Що називають основними та неосновними носіями зарядів в напівпровіднику? Як пов'язані між собою їх рівноважні концентрації?
7. Як залежить час життя неосновних носіїв зарядів від концентрації основних носіїв?
8. Чи існує збіднений шар на границі $P-n$ переходу, якщо до нього не прикладена зовні напруга?
9. Що таке інжекція та екстракція неосновних носіїв заряду?
10. Що таке зворотний струм $P-n$ переходу, чим він обумовлений та як він залежить від температури?
11. В чому різниця між омичним та диференціальним опорами відкритого $P-n$ переходу? Який з них більше?
12. Що таке бар'єрна ємність $P-n$ переходу? Як вона залежить від знаку та величини прикладеної напруги?
13. Яка наступна доля неосновних носіїв, інжектованих у базу $P-n$ переходу?
14. Чим можна пояснити великий викид зворотного струму в перші моменти після переходу прикладеної напруги відкритої полярності до запертої? Чим визначається тривалість цього викиду?
15. Як пов'язана дифузійна ємність з тривалістю життя неосновних носіїв?
16. Що таке пробій $P-n$ переходу? Вкажіть фізичні процеси, які можуть обумовити цей пробій.

Задачі до розділу.

1. На скільки градусів повинна підвищитись температура, щоб концентрація електронів у чистому кремнії зростає вдвічі? Вихідною температурою вважати 300 К?
Вказівка: шуканий приріст температури можна вважати малим порівняно з вихідною температурою.
2. У кремній введено дірковий (акцепторний) домішок у кількості 10⁻⁵%. Якою буде концентрація дірок? Питома вага кремнію 2,5 г/см³ атомна вага 2,81?
Вказівка: можна вважати, що концентрація дірок, які утворилися, дорівнює концентрації атомів-акцепторів.
3. Якою буде рівноважна концентрація дірок у N -легованому германії при температурі 300 К, якщо концентрація донорних атомів становить 10¹⁶ см⁻³?
4. Концентрація неосновних носіїв у германію становить 2·10⁸ см⁻³, середня швидкість їх теплового хаотичного руху 10⁷ см/с. Якою буде обумовлена ними густина зворотного струму через перехід?
5. Зворотний струм $P-n$ переходу при температурі 300 К дорівнює 5 мкА. Чому дорівнюють омичний та диференціальний опори цього ж переходу у відкритому стані, якщо прикладено напругу +0,3 В?
6. Через відкритий $P-n$ перехід протікає струм 0,5 мА. Час рекомбінації неосновних носіїв 1 нс. Чому дорівнює дифузійна ємність переходу?
7. На яку середню глибину проникають неосновні носії (дірки) у базу кремнієвого $P-n$ переходу? Коефіцієнт дифузії дірок у кремнії 13 см² с⁻¹, середній час життя - 10 нс

Вказівка: скористайтеся виразом для середньої довжини дифузії $d = \sqrt{D\tau}$.