

Лабораторна робота № 6.3

Дослідження роботи напівпровідникових діодів.

Мета роботи: Визначити і порівняти залежності сили струму від напруги для напівпровідникових діодів різних типів.

Прилади й принадлежности: Установа для вивчення вольт-амперної характеристики напівпровідникових діодів.

Теоретичні відомості

Перш, ніж приступати до вивчення даної лабораторної роботи, ознайомтеся з положеннями зонної теорії (див. Додаток № 6.0 до робіт з фізики твердого тіла).

1. Властивості p - n -переходу.

Основна структурна комірка величезного числа напівпровідникових приладів називається p - n -переходом. Розглянемо в загальних рисах фізичні процеси, які відбуваються в p - n -переході.

Нехай дві ділянки напівпровідника з провідностями різного типу розділяє плоска межа (рис. 1): ліворуч від неї розміщений напівпровідник p -типу, праворуч - напівпровідник n -типу.

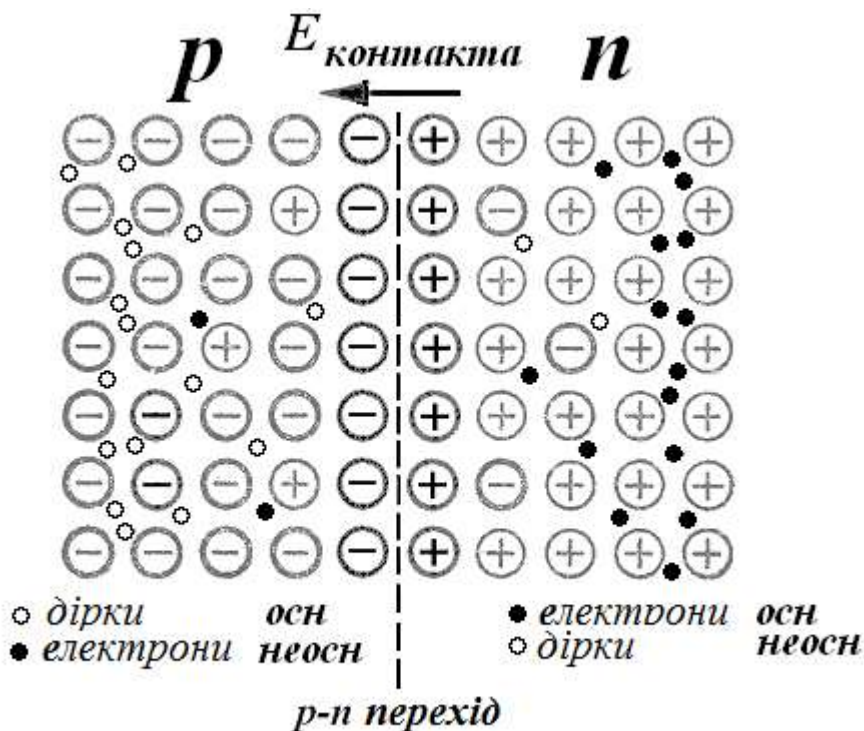


Рис. 1

Іони донорної домішки позначені кружком зі знаком «+», і іони акцепторної домішки позначені кружком зі знаком «-». Іони (кружки) знаходяться в вузлах кристалічної решітки, а дірки і електрони (білі і чорні точки) можуть переміщатися по кристалу.

Носії струму, концентрація яких в даному напівпровіднику є більшою, називають *основними*, а носії, концентрація яких є меншою, – *неосновними*. Концен-

трація основних носіїв є набагато більшою, ніж концентрація неосновних носіїв (приблизно в 10^6 разів).

У p -області основними носіями струму є **дірки**. Однак, в цій області є також невелике число неосновних носіїв - електронів, що виникли внаслідок розриву ковалентних зв'язків за рахунок теплового руху атомів кристала.

Відповідно, в n -області основні носії струму - **електрони**, а неосновні носії - невелике число дірок.

Внаслідок значної різниці в концентрації електронів і дірок по різні боки від переходу **відбувається дифузія** дірок з p -напівпровідника, де їх концентрація вище, в n -напівпровідник, де концентрація дірок нижче. Електрони дифундують в протилежному напрямку - в напрямку $n \rightarrow p$.

Дифундуючи у зустрічних напрямках через прикордонний шар, дірки і електрони рекомбінують (з'єднуються) між собою. Рекомбінація призводить до зникнення пари електрон провідності - дірка.

Такий зустрічний процес дифузії заряджених частинок еквівалентний електричному струму $I_{\text{осн}}$ через p - n -перехід, який проходить з p -області в n -область. Цей **струм основних носіїв** заряду називається **дифузним**.

В p - області після відходу дірок поблизу межі розділу залишаються нерухомі негативні іони акцепторної домішки, заряд яких тепер не компенсується дірками. Вони утворюють негативний просторовий заряд (рис. 1).

В n - області внаслідок відходу електронів поблизу межі залишаються нерухомі позитивні донорні іони, заряд яких тепер не компенсується електронами. Вони утворюють позитивний об'ємний заряд в прилеглому шарі (рис. 1).

Таким чином виникає подвійний електричний шар в p - n -переході і контактна різниця потенціалів. Напруженість електричного поля подвійного шару $E_{\text{контакта}}$ спрямована від n - до p - напівпровідника (рис. 1).

Контактне поле перешкоджає подальшому переходу дірок - направо, а електронів - наліво, тобто перешкоджає дифузному струму основних носіїв струму.

Зате подвійний електричний шар в p - n -переході сприяє руху неосновних носіїв заряду - дірок з n -області і електронів з p -області. Такий «дрейф» заряджених частинок через перехід являє собою електричний струм $I_{\text{неосн}}$, який спрямований протилежно дифузному струму і називається **дрейфовим**.

В умовах термодинамічної рівноваги, яка встановлюється в p - n -переході, якщо до нього не прикладена зовнішня різниця потенціалів, дифузний струм $I_{\text{осн}}$ за величиною точно дорівнює дрейфовому $I_{\text{неосн}}$, обидва струми компенсують один одного і **повний струм через перехід дорівнює нулю**.

Область p - n -переходу збіднена рухливими носіями заряду, тому що тут завдяки зустрічному потоку електронів і дірок відбувається їх інтенсивна рекомбінація. З цієї причини область p - n -переходу має набагато більший питомий опір, ніж весь кристал напівпровідника, і називається **«запірним шаром»**.

Товщина шару p - n -переходу становить приблизно частки мікрометра, а контактна різниця потенціалів - десяті частки вольт. Носії струму в змозі подолати таку різницю потенціалів тільки за температури в десятки тисяч градусів, тобто за звичайних температур контактний шар є запірним.

Опір запірного шару можна змінити за допомогою зовнішнього електричного поля. При цьому **можливі два варіанти**.

1. Прикладемо до кристалу зовнішню напругу так, щоб високий потенціал «+» був поданий на p -область, а низький потенціал «-» був поданий на n -область (режим прямої напруги) (рис. 2).

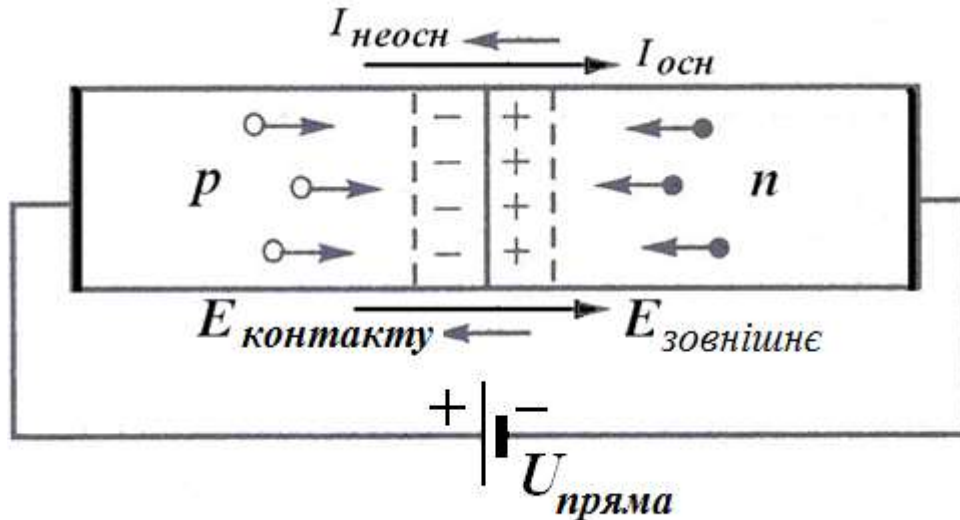


Рис. 2.

Тоді зовнішнє електричне поле в кристалі $E_{зовн}$ буде направлено протилежно полю контактного запірного шару $E_{конт}$. Зовнішнє поле викличе рух дірок з області p -напівпровідника і електронів з області n -напівпровідника до межі $p - n$ -переходу. (рис. 2).

Рухаючись назустріч, електрони і дірки рекомбінують один з одним, струм основних носіїв зростає. Струм ж неосновних носіїв залишиться практично без змін. Отже, результуючий струм стане відмінним від нуля. Зниження потенціального бар'єру пропорційно прикладеній напрузі. При зменшенні висоти бар'єру струм основних носіїв, а, отже, і результуючий струм, швидко зростатиме. Таким чином в напрямку від p -області до n -області $p - n$ -перехід пропускає струм, сила якого швидко зростає при збільшенні прикладеної напруги. Ця напруга називається **прямою** (або пропускною). Розрахунок показує, що зі збільшенням напруги струм експоненціально зростає (рис. 4).

Електричне поле «піджимає» основні носії до межі між областями, внаслідок чого ширина перехідного шару, збудненого носіями, зменшується. Відповідно зменшується і опір переходу, причому тим сильніше, чим більшою є напруга.

2. Тепер докладемо до кристалу напругу протилежного напрямку, щоб «+» був підключений до n -області, а «-» був підключений до p -області. (Режим зворотної або запірної напруги).

Тепер напрямком зовнішнього електричного поля $E_{зовн}$ буде збігатися з напрямком контактного поля $E_{конт}$ (рис. 3).

У цьому випадку зовнішнє поле буде підсилювати поле контактного шару і зумовить рух електронів і дірок від межі $p - n$ -переходу в протилежних напрямках.

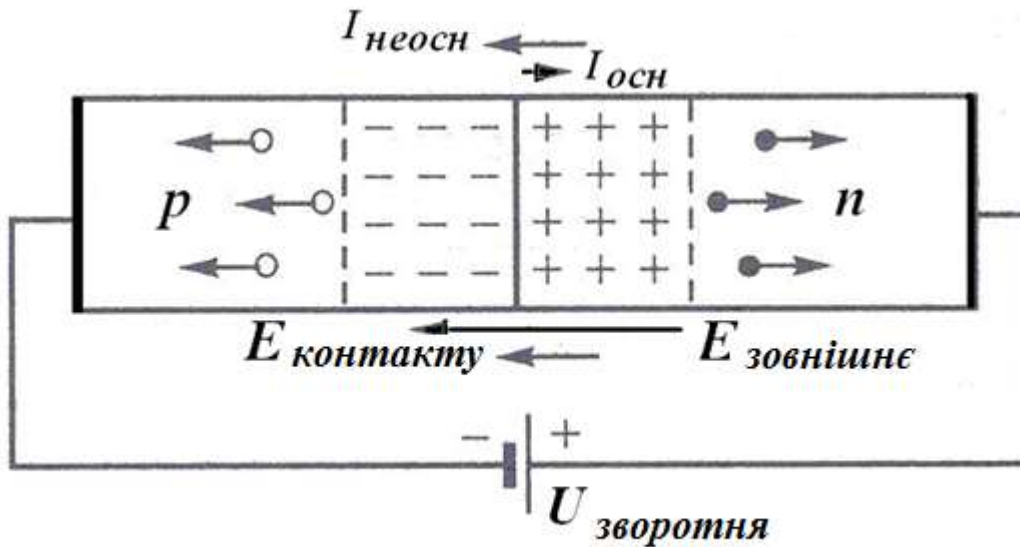


Рис. 3.

Поле, що виникає в кристалі при накладенні зворотної напруги, «відтягує» основні носії від границі між областями, що призводить до зростання ширини перехідного шару, збідненого носіями. Відповідно збільшується і опір переходу. Отже, p - n -перехід має в зворотному напрямку набагато більший опір, ніж в прямому.

В даному випадку через p - n -перехід проходить лише невеликий струм (він називається зворотним), цілком обумовлений неосновними носіями. Струм неосновних носіїв (зворотний струм) не залежить від величини контактної сили, а визначається концентрацією цих носіїв, яка дуже мала в порівнянні з основними носіями.

Вольт-амперна характеристика p - n -переходу зображена на рис. 4.

Зворотний струм швидко сягає насичення, тобто перестає залежати від U . Тільки при дуже великій зворотній напрузі сила струму починає різко зростати, що обумовлено електричним пробоем переходу (див. пунктир на лівій гілці на рис. 4).

Напрямок зовнішнього поля, в якому розширюється запірний шар і p - n -перехід не пропускає електричного струму, називається **зворотним або запірним**.

Прямий струм на кілька порядків перевищує зворотний струм.



Рис. 4

2. Способи отримання p - n -переходів

Напівпровідникові діоди за конструкцією p - n -переходу поділяють на діоди з площинними контактами і діоди з точковими контактами.

Створити *p-n*-перехід механічним з'єднанням (притисненням) електронного та діркового напівпровідників неможливо, навіть якщо контактні поверхні є ретельно відполірованими. Такі поверхні завжди містять величезну кількість різноманітних домішок і дефектів, які сильно змінюють властивості напівпровідників.

Один з методів створення *p-n*-переходу - **метод сплавлення**. Наприклад, в тонку пластинку монокристалу з дуже чистого германію з електронним типом провідності вплавляють з одного боку шматочок індію (рис. 5).

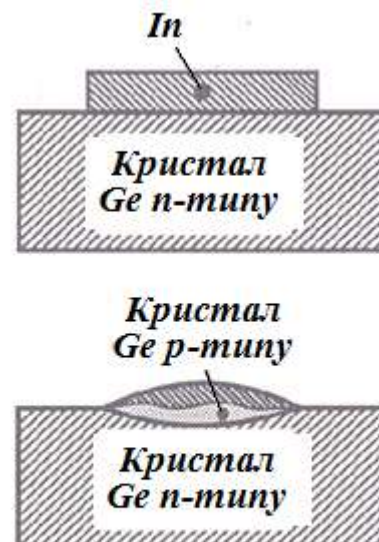


Рис. 5

При нагріванні в вакуумі атоми індію дифундують в германій на деяку глибину. Після охолодження розплаву на ділянці, в яку проникають атоми індію, провідність германію стає дірковою, а решта кристалу зберігає електронну провідність. На внутрішній границі обох ділянок з провідністю різного типу виникає *p-n*-перехід.

Інший спосіб отримання *p-n*-переходу - створення на поверхні кристала *n*-типу за допомогою хімічних реакцій монокристалічної плівки з провідністю *p*-типу.

У точковому германієвій діоді (рис. 6) до кристала германію 1 з провідністю *n*-типу притискається тонкий вольфрамовий дріт 2 вістря, покритим алюмінієм. Якщо через діод в прямому напрямку пропус-

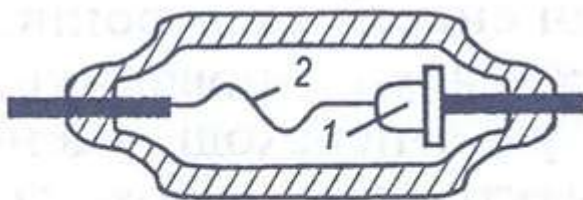


Рис. 6

титу короткочасний імпульс струму, то внаслідок нагрівання різко зростає дифузія алюмінію в германій. Поблизу точкового контакту формується збагачений алюмінієм шар германію з провідністю *p*-типу. На границі цього шару з основним кристалом германію утворюється *p-n*-перехід. Завдяки малій ємності контактного шару точкові ді-

оди використовуються для випрямлення високочастотних електричних коливань.

У лабораторній роботі пропонується отримати порівняльну характеристику випрямляючих властивостей для трьох типів напівпровідникових діодів: КД 521 - силіційовий низькочастотний діод, КД 226 - силіційовий високочастотний діод і Д 9К - германієвий точковий діод.

3. Вимірювання

1. Включити прилад, як вид дослідження вибрати «Дослідження вольт-амперної характеристики діода».

2. В якості об'єкта дослідження вибрати напівпровідниковий діод КД521;

3. Змінюючи пряму напругу від 0 до 0,6 В з кроком 0,05 В і зворотну напругу від 0 до 30 В з кроком 5В, визначити відповідні значення прямого і зворотного струму. Дані вимірювань занести в таблицю.

4. Повторити такі ж вимірювання для напівпровідникових діодів КД 226 і Д 9К;

5. Результати вимірювань занести в таблицю. За даними дослідів побудувати графіки залежності $I = f(U)$ для трьох діодів.

6. Обчислити коефіцієнт випрямлення $k = \frac{I_{\text{прям}}}{I_{\text{обратн}}}$, причому прямий і зворотний струми беруться при однакових значеннях $U_{\text{пр}}$ і $U_{\text{звор}}$.

Таблиця 1

Диод КД521;

Напряг струму	U	I	k	$\langle k \rangle$
Прямий				
Зворотний				

Диод КД 226

Напряг струму	U	I	k	$\langle k \rangle$
Прямий				
Зворотний				

Диод Д 9К;

Напряг струму	U	I	k	$\langle k \rangle$
Прямий				

Зворотний				

За результатами роботи зробити висновок - який з досліджених діодів має кращі властивості випрямлювати.

Контрольні питання

1. Поясніть фізичні процеси, що відбуваються в $p-n$ -переході.
2. Як пояснити односторонню провідність $p-n$ -переходу?
3. Який вигляд має вольт-амперна характеристика $p-n$ -переходу? Поясніть виникнення прямого і зворотного струму.
4. Який напрям в напівпровідниковому діоді є прямим для струму?
5. Які типи напівпровідникових діодів вам відомі?
6. Чому через напівпровідниковий діод проходить струм (хоча і слабкий) навіть при заперній напрузі?

Література

1. Кучерук І.М., Горбачук І.Т., Луцик П.П. Загальний курс фізики. К.: Техніка, 2001. - Т.2.
2. Загальна фізика. Лабораторний практикум. : Навч. посібник. За заг. ред. І.Т.Горбачука.- К. Вища школа. 1992– 509 с.
2. Савельєв І.В. Курс фізики.- М.: Наука, 1997.- Т.3.

Склали: І.П.Гаркуша, Е.А.Якунін