

Дослідження фотопровідності напівпровідників на прикладі фотодіода

Мета роботи: ознайомлення з явищем внутрішнього фотоефекту і принципом дії фотодіода. Зняття вольт-амперної характеристики фотодіода.

Прилади й принадлежности. Лабораторна установка з фотодіодом, освітлювачем, джерелом живлення і вимірювальними приладами.

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.

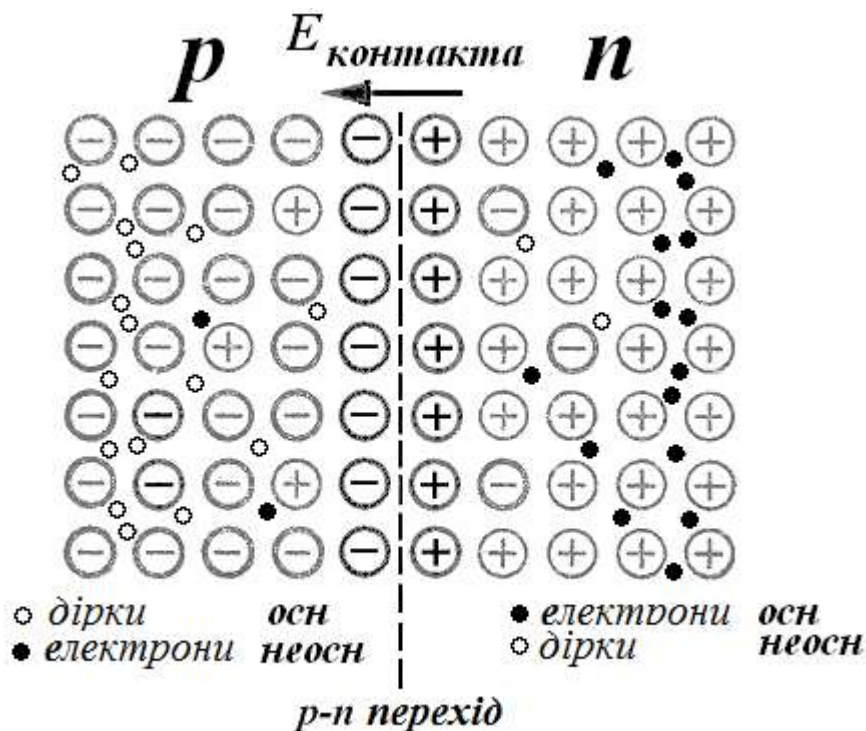


Рис. 1

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*. Концентрація 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 $E_{\text{контакт}}$ 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).

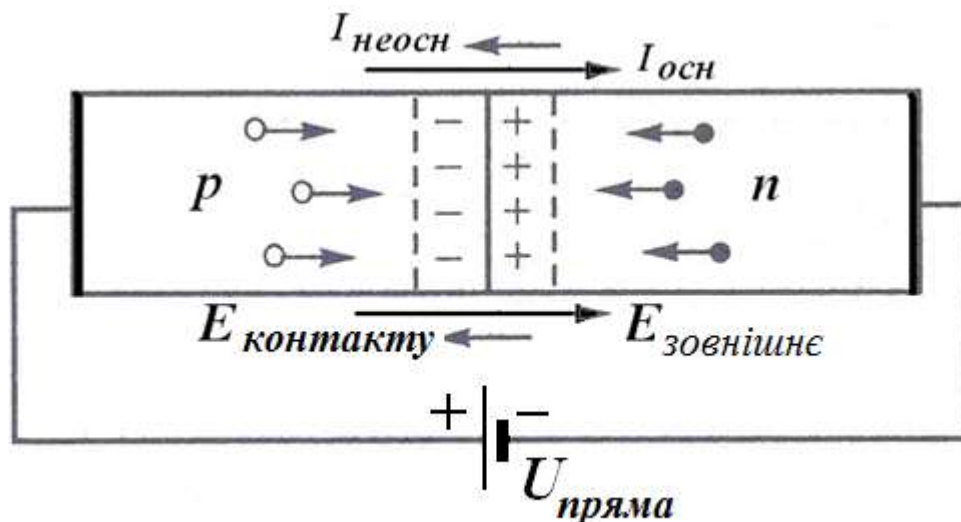


Рис. 2.

Тоді зовнішнє електричне поле в кристалі $E_{\text{зовн}}$ буде направлено протилежно полю контактного запірного шару $E_{\text{конт}}$. 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, збідненого 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 напрямок зовнішнього електричного поля $E_{\text{зовн}}$ буде збігатися з напрямком контактного поля $E_{\text{конт}}$ (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.

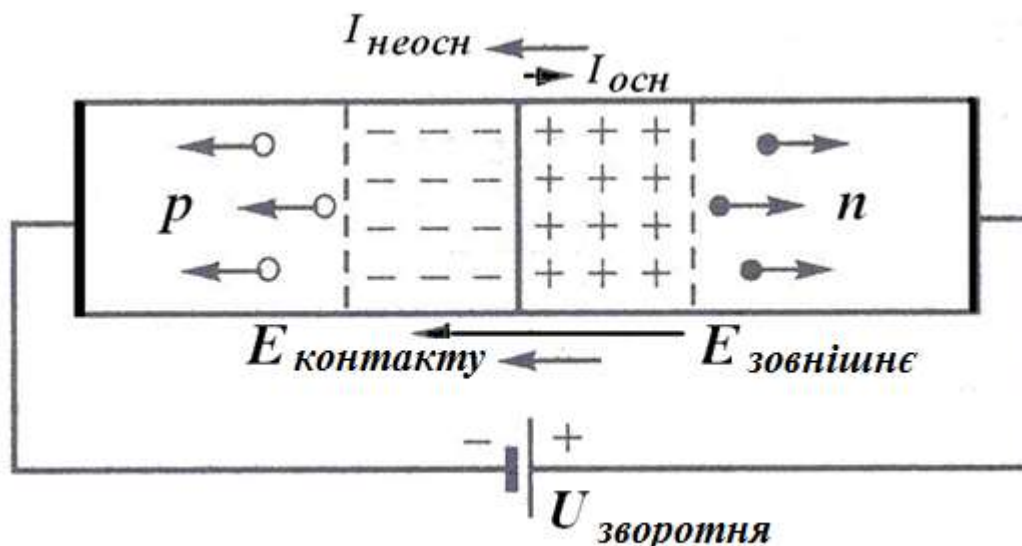


Рис. 3.

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 поля, 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 заперний шар і p - n -перехід не пропускає електричного струму, називається **зворотним або заперним**.

Прямий струм на кілька порядків перевищує зворотний струм.

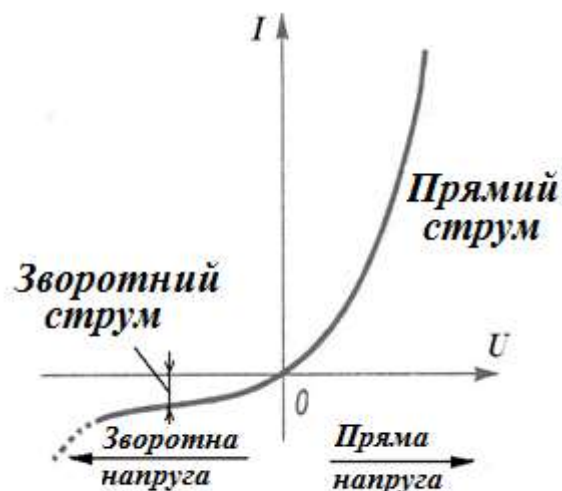


Рис. 4

2. Фотопровідність. Фотодіод.

Під впливом світла в напівпровідниках можуть з'являтися додаткові пари носіїв струму - електрони і дірки, від чого збільшується електропровідність речовини. Це явище називається **внутрішнім фотоефектом або фотопровідністю**.

Напівпровідниковий прилад, що містить p - n -перехід і використовує явище внутрішнього фотоелектричного ефекту, називається **фотодіодом**.

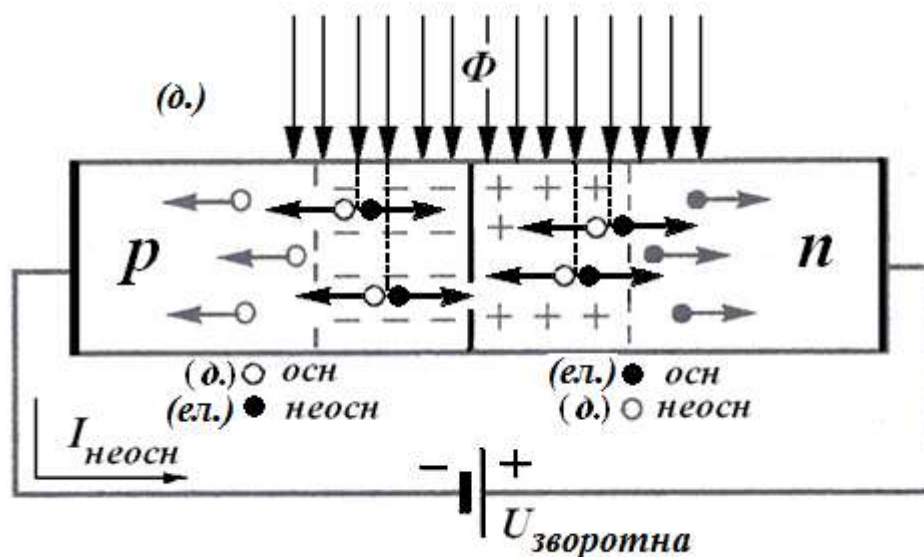


Рис. 5.

Розглянемо процес генерації вільних носіїв струму в фотодіоді. Якщо освітити напівпровідник пучком світла, то в результаті поглинання енергії фотонів будуть утворюватися пари носіїв струму - вільні електрони і вільні дірки.

Дірки в області p є основними носіями, тому поле p - n -переходу буде їх відштовхувати від границі розділу і вони залишаються в своїй області.

Але вільні електрони, що утворилися, будучи в області p неосновними носіями, легко проходять через перехід. Електрони перекидаються полем через границю розділу в область n , де вони стають основними.

Аналогічно, в області n з утворених носіїв «електрон - дірка» тільки дірки, будучи неосновними носіями, будуть перекинуті через границю розділу в область p , а вільні електрони, що утворилися, тільки поповнять кількість основних носіїв в області n , збільшивши їх концентрацію.

В результаті в p -області накопичується надлишковий позитивний заряд, а в n -області - надлишковий негативний заряд.

Сумарний електричний заряд основних носіїв в обох областях напівпровідника вже не врівноважується протилежним зарядом іонів домішки. Отже, в області p з'являється сумарний позитивний заряд, а в області n - сумарний негативний заряд, які зумовляють виникнення різниці потенціалів між областю p і областю n . Цю різницю потенціалів називають **фотоЕРС**.

Якщо тепер підключити кристал з p - n -переходом до зовнішнього навантаження (рис.6), в ньому буде проходити струм навіть за відсутності прикладеної напруги.

На цьому заснована дія **сонячної батареї**.

На рис. 6 показані умовне позначення фотодіода і схема його включення. Тут R_H - навантаження, E_Φ

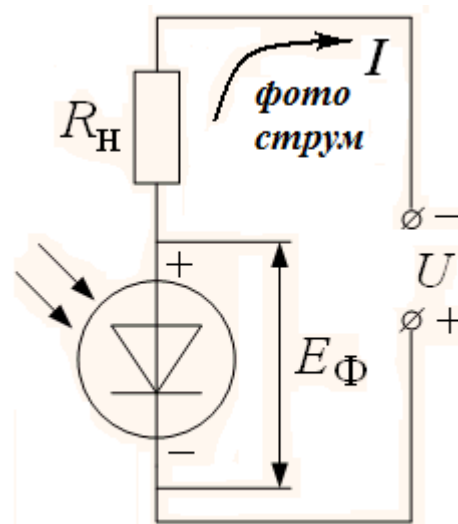


Рис. 6.

- фотоЕРС, U - джерело постійного струму, включене у зворотному напрямі.

Слід зазначити важливу *особливість фотодіода*. З усіх носіїв, що утворилися в результаті поглинання світлової енергії, не всі будуть брати участь в утворенні зворотного струму.

Частина неосновних носіїв встигають рекомбінувати, знижуючи ефективність використання світлової енергії. Тому доцільно освітлювати не обидві області напівпровідника, а тільки одну, зате дуже тонку, наприклад, n -область (рис. 7). Ширину n -області роблять такою, щоб дірки не встигали рекомбінувати до переходу в p -область.

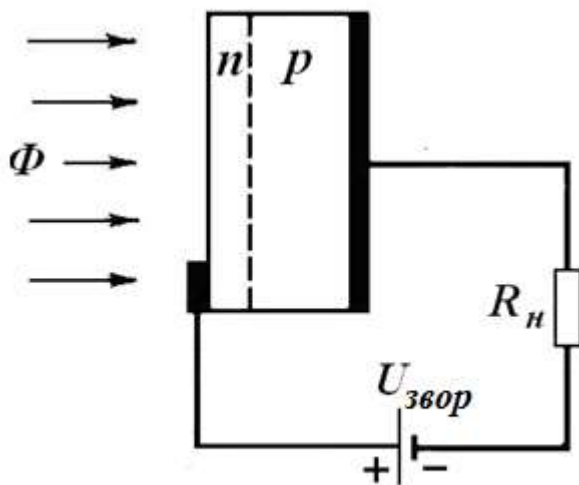


Рис. 7

Тоді практично всі неосновні носії, що утворилися під дією освітлення, будуть розділені p - n -переходом.

Властивості фотодіода можна охарактеризувати вольт-амперною характеристикою. Вона являє собою залежність зворотного струму від напруги при незмінному світловому потоці.

Вольт-амперні характеристики фотодіода наведені на рис 8.

Якщо світлового потоку немає ($\Phi = 0$), то через фотодіод протікає звичайний зворотний струм. Його називають темновим струмом ..

Під дією світлового потоку (Φ_1, Φ_2, Φ_3 і т.д.) зворотний струм в діоді зростає, і характеристика розміщується нижче. **Чим більшим є світловий потік, тим більше зворотний струм.** Таким чином, світловий потік управляє зворотним струмом фотодіода.

Фотострумом називається величина, на яку зростає зворотний струм при освітленні фотодіода. Сила цього струму пропорційна падаючому на кристал світловому потоку (при не дуже великих освітленостях). Оскільки використовуються зворотні гілки вольт-амперної характеристики, для зручності використання їх можна перенести з третього квадранта в перший квадрант (рис.9).

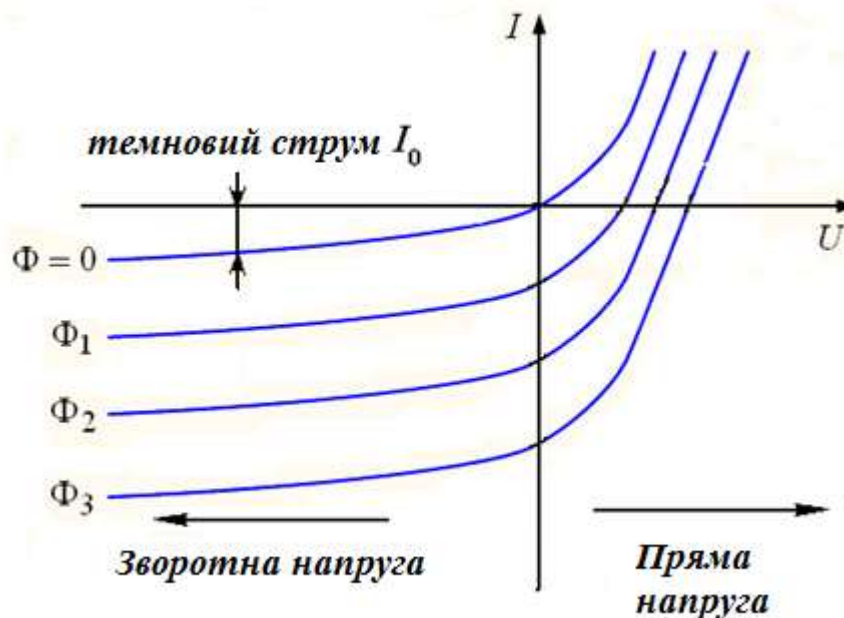


Рис. 8.

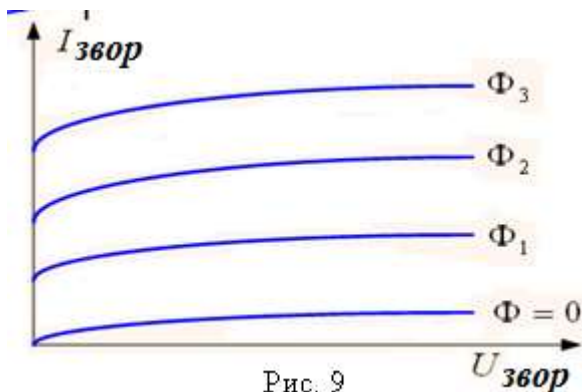


Рис. 9

3. Опис лабораторної установки і проведення експерименту.

Схема лабораторної установки наведена на рис. 10. Від джерела живлення U через подільник напруги $П$ напруга зсуву подається на фотодіод. Знак напруги зсуву - прямої чи зворотної можна змінювати за допомогою перемикача K . Струм вимірюється за допомогою міліамперметра μA , напруга -

вольтметра V .

Джерелом світла служить малопотужна лампочка розжарювання. Світло від неї через фокусуючу лінзу попадає на фотодіод. Світловий потік від лампочки можна змінювати (Φ_1, Φ_2, Φ_3 і т.д.), подаючи на лампу по черзі різну напругу живлення: $U_{\text{лампи}} = 2 \text{ В}, 4 \text{ В}, 6 \text{ В}$ і т.д.

Метою роботи є побудова вольт-амперних характеристик фотодіода при різних його освітленостях.

Порядок роботи.

1. Після ознайомлення з конструкцією установки підключити її до мережі в присутності викладача.

2. Тумблером «Мережа» включити установку.

3. Обертаючи ручку потенціометра із позначкою лампи , подати на лампу розжарювання одну з напруг $U_{\text{лампи}} = 2 \text{ В}, 4 \text{ В}, 6 \text{ В}$ і т.д. і тим самим встановити певне значення світлового потоку Φ_1, Φ_2, Φ_3 і т.д. При цьому відстань між фотодіодом і джерелом світла має бути постійною.

4. Встановити перемикачем ВАХ ПР або ВАХ ОБР напрямок прямої або зворотної напруги зсуву. Плавнo збільшуючи напругу ручкою потенціометра зі

знаком , записати за шкалою міліамперметра відповідні значення прямого, а потім зворотного струму.

При прямому включенні на фотодіод можна подавати напругу **не більше 10 В**.

При зворотному включенні на фотодіод можна подавати напругу **не більше 50 В**.

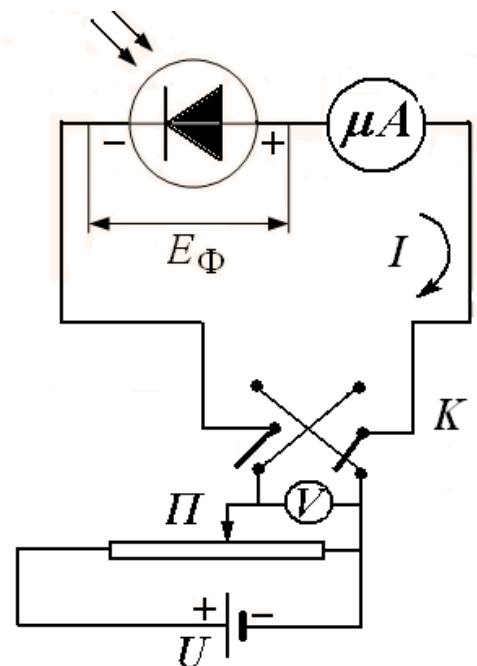


Рис. 10.

5. Зняти також вольт-амперну характеристику фотодіода при прямому і зворотному включенні при природному світлі.

6. Дані вимірювань занести в таблицю і за ними побудувати графіки залежності (рис. 8, рис. 9).

7. Відповісти письмово в зошиті для лабораторних робіт на контрольні питання.

Таблиця.

U, В		Природне світло		Світловий потік Φ від лампи розжарювання									
				Φ_1 $U_{\text{лампи}} = 2 \text{ В}$		Φ_2 $U_{\text{лампи}} = 4 \text{ В}$		Φ_3 $U_{\text{лампи}} = 6 \text{ В}$		Φ_4 $U_{\text{лампи}} = 8 \text{ В}$		Φ_5 $U_{\text{лампи}} = 10 \text{ В}$	
				$I, \text{ мкА}$		$I, \text{ мкА}$		$I, \text{ мкА}$		$I, \text{ мкА}$		$I, \text{ мкА}$	
ПР	ЗВОР	ПР	ЗВОР	ПР	ЗВОР	ПР	ЗВОР	ПР	ЗВОР	ПР	ЗВОР	ПР	ЗВОР

Контрольні питання

1. Чим відрізняється струм в металевому дроті від струму через p - n -перехід?
2. Який механізм дифузійного і дрейфового струму через p - n -перехід?
3. Що таке прямий струм? Зворотний струм?
4. В чому полягає явище внутрішнього фотоефекту?
5. Як впливає освітлення фотодіода на прямий і зворотний струми?
6. Що відбувається при освітленні фотодіода, якщо на нього не подавати зовнішньої напруги?
7. Чому n -область фотодіода виготовляється тонкою?
8. Де можна застосовувати фотодіоди?

Література

1. Кучерук І. М., Горбачук І.Т, Луцик П.П.. Т.З. К .; «Техніка», 2006 ..
2. Трофимова Т.И. Курс фізики - М., «Академія», 2005.
3. Савельєв І. В. Курс фізики т.З. М. «Наука». - 1989.

Склав Гаркуша І.П.