

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ
УКРАЇНИ**

КАФЕДРА ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНИХ ДИСЦИПЛІН

**Методичні рекомендації
до лабораторного заняття
з навчальної дисципліни “Фізика”**

**ВИВЧЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ
ЕЛЕКТРОННО - ДІРКОВОГО ПЕРЕХОДУ**

Обговорено та затверджено на засіданні
кафедри фізико-математичних дисциплін
Протокол № ____ від _____ 201 р.

План-конспект лабораторного заняття

«ВИВЧЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЕЛЕКТРОННО - ДІРКОВОГО ПЕРЕХОДУ»

Тема заняття: вивчення контактних явищ в напівпровідниках, зокрема властивостей $p-n$ переходу та його вольт-амперної характеристики.

Мета заняття:

- *навчальна:* навчити використовувати знання властивостей $p-n$ переходу для знаходження фізичних величин, пов'язаних з цими явищами, зокрема його вольт-амперної характеристики. Ознайомити слухачів з методами наукового пізнання на практиці;
- *виховна:* виховувати інформаційну культуру студентів, увагу, дисциплінованість, самоконтроль;
- *розвиваюча:* розвивати впізнавальний інтерес, мислення, уміння використовувати на практиці фізичні прилади. Забезпечити розвиток експериментальних умінь слухачів і навичок проведення вимірювань фізичних величин.

Тип заняття: закріплення вивченого матеріалу.

Вид заняття: лабораторна робота.

Методи навчання:

пояснювально-ілюстративний:

- більш конкретне, наочне пояснювання слухачам навчального матеріалу;

частково-пошуковий метод:

- пошук слухачами відповідей на сукупність логічних запитань з конкретної теми, спрямованих на виконання лабораторної роботи.

Опорні терміни і поняття: контактні явища в напівпровідниках, властивості $p-n$ переходу, вольт-амперна характеристика.

Основні джерела інформації:

1. Кучерук І.М., Горбачук І.Т. Загальний курс фізики: Т.2.: Електрика і магнетизм.– К.: Техніка, 1999. – 269с., ст. 156-168, 178-185.
2. ФІЗИКА. Методичні рекомендації з організації самостійної роботи студентів при вивченні дисципліни. / Борисенко В. Г., Деркач Ю.Ф., Кривцова В.І., Умеренкова К.Р. / Х.: НУЦЗУ, 2010, 63 с. (електронний варіант).
3. Опис лабораторної роботи (див.далі)

План заняття та розподіл часу

1. Організаційний етап – 5хв:
 - нагадування правил техніки безпеки для перебування в лабораторії, та під час виконання лабораторної роботи;
 - перевірка наявності запису лабораторної роботи в журналі звітів.
2. Підготовка до виконання лабораторної роботи – 10хв:
 - перевірка домашнього завдання;
 - перевірка готовності до роботи.
3. Виконання лабораторної роботи – 55хв:
 - підготовка лабораторної установки до роботи;
 - проведення прямих і непрямих вимірів, знаходження необхідних похибок вимірів, оформлення таблиць та графіків. Формулювання висновку.
4. Підведення підсумків заняття – 5хв.
5. Домашнє завдання – 5 хв



НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ УКРАЇНИ

КАФЕДРА ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНИХ
ДИСЦИПЛІН

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА

ВИВЧЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЕЛЕКТРОННО-ДІРКОВОГО ПЕРЕХОДУ

Укладачі:

В.Г. Борисенко, В.І. Кривцова, О.М. Кудін,
К.Р. Умеренкова

Харків
2019

Мета роботи: вивчення контактних явищ в напівпровідниках, зокрема властивостей p - n переходу та його вольт-амперної характеристики.

Короткі теоретичні відомості

Електронно-дірковий перехід (або p - n перехід) являє собою контакт (границю розділу) двох областей того ж самого напівпровідника з різним типом провідності – дірковою (p -типу) і електронною (n -типу).

Розглянемо більш докладно процеси, що відбуваються в області контакту, на прикладі симетричного переходу, при якому концентрація носіїв струму в обох областях однакова ($n = p$).

Спочатку припустимо, що контакт між n і p областями відсутній. Заповнення енергетичних зон у цьому випадку при $T > 0$ К відображено для напівпровідника n -типу на рис. 14.1, а, а для напівпровідника p -типу – на рис. 14.1, б. У кожній з областей крім основних носіїв струму (електронів в області з донорною домішкою й дірок в області з акцепторною домішкою) є незначна кількість і неосновних носіїв струму – дірок у напівпровіднику n -типу й електронів у напівпровіднику p -типу.

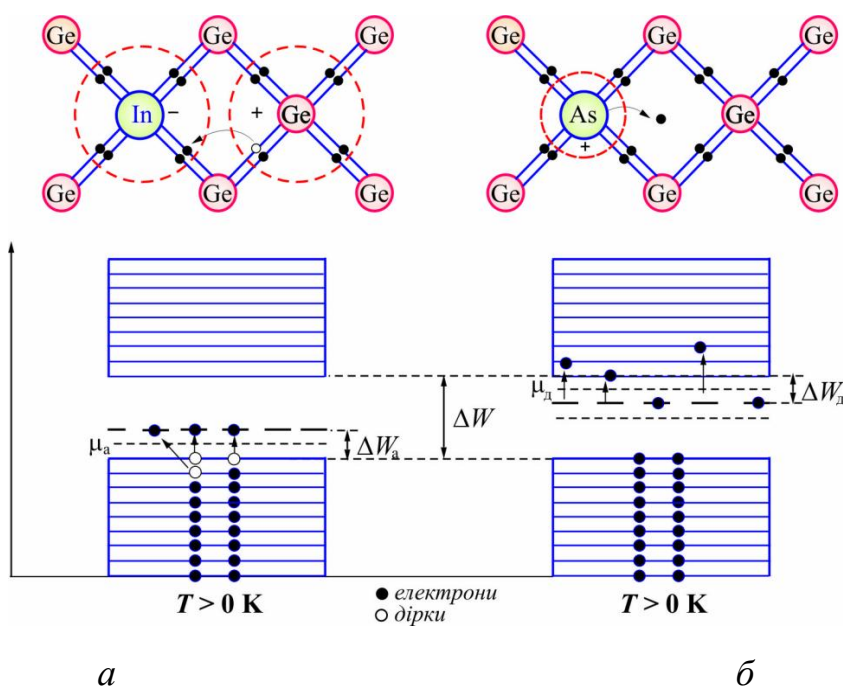


Рис. 14.1. Схематичне зображення структури і енергетичних зон акцепторного (а) та донорного (б) напівпровідників

Наявність неосновних носіїв струму обумовлена переходами електронів у кожній області напівпровідника з валентної зони в зону провідності, що відбуваються в невеликих кількостях при робочих температурах.

Якщо привести розглянуті області в контакт (рис. 14.2, *a*), то виникне дифузійний потік основних носіїв струму з області, у якій концентрація носіїв більша, в область, де вона менша (електронів з напівпровідника *n*-типу

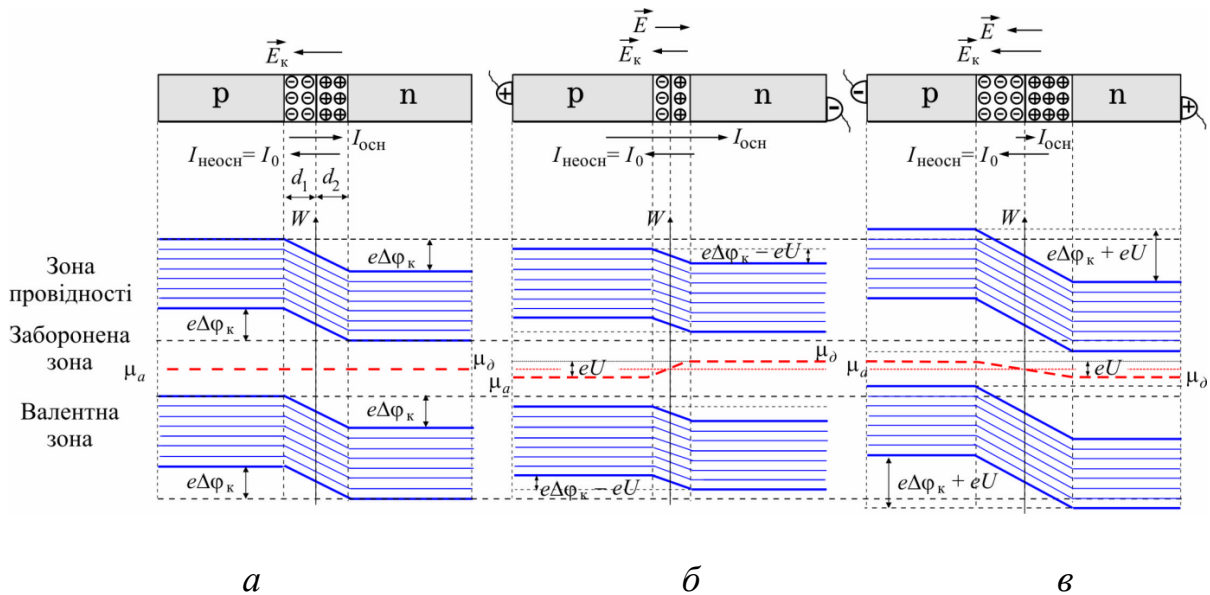


Рис. 14.2. Схематичне зображення енергетичних зон в області *p-n* переходу При відсутності зовнішньої напруги (*a*), при прямій напрузі (*б*), при зворотній напрузі (*в*)

в напівпровідник *p*-типу, а дірок – у протилежному напрямку). Дифузійні потоки основних носіїв породжують електричний струм у зазначеному на рис. 14.2, *a* напрямку (його називають *дифузійним* або *основним* – $I_{осн}$), а в області контакту виникають некомпенсовані електричні заряди – позитивні іони донорної домішки в напівпровіднику *n*-типу й негативні іони акцепторної домішки в напівпровіднику *p*-типу. Дані заряди породжують в області контакту різницю потенціалів $\Delta\varphi$, тобто електричне поле з вектором напруженості \vec{E}_k в зазначеному на рис. 14.2, *a* напрямку. Це поле утрудняє переміщення основних носіїв струму через контактну область і в міру збільшення $\Delta\varphi$ основний струм зменшується.

Одночасно через область контакту переміщуються й неосновні носії струму (електрони з напівпровідника *p*-типу в напівпровідник *n*-типу, а дірки – у протилежному напрямку). Струм, обумовлений переміщенням неосновних носіїв струму, називається *дрейфовим* або *неосновним* – $I_{неосн}$ і спрямований він протилежно основному. Існує в області контакту електричне поле не перешкоджає переміщенню неосновних носіїв струму і тому дрейфовий струм від значення $\Delta\varphi$ не залежить.

Після досягнення динамічної рівноваги між потоками основних і неосновних носіїв (рівності основного й неосновного струмів – $I_{осн} = I_{неосн} = I_0$) рівні Фермі в обох областях вирівнюються (рис.14.2, *a*). При цьому різниця потенціалів $\Delta\varphi$ досягає значення контактної різниці

потенціалів $\Delta\varphi_k = \frac{A_1 - A_2}{e}$ і встановлюється певна глибина $d = d_1 + d_2$ проникнення в обидві області напівпровідника контактної області, яка залежить від концентрації основних носіїв струму й контактної різниці потенціалів. У даному шарі концентрація основних носіїв струму набагато менша, опір його в порівнянні з опором інших частин напівпровідника значно більший (іони домішок перебувають у вузлах кристалічної решітки й носіями струму не являються) і тому цей шар називається *запірним*.

Величину основного й неосновного струмів у рівноважному стані можна оцінити, урахувавши вплив на них контактної електричної області. Наявність області призводить до зміни потенціальної енергії електронів і дірок у контактній області, внаслідок чого в області *p-n* переходу енергетичні рівні зміщуються й виникає, як для електронів, так і для дірок, потенціальний бар'єр висотою $e\Delta\varphi_k$. На рис. 14.2 потенціальні бар'єри зображені тільки для електронів. Аналогічні міркування справедливі і для дірок, тільки для них зміщення енергетичних зон буде оберненим: в *n*-області потенціальна енергія дірки збільшується, а в *p*-області зменшується.

Сила основного струму $I_{\text{осн}}$ пропорційна імовірності подолання даного бар'єру основними носіями і, як випливає з розподілу Фермі-Дірака, пропорційна $\sim e^{-\frac{e\Delta\varphi_k}{kT}}$. Сила неосновного струму $I_{\text{неосн}}$ від висоти бар'єру $e\Delta\varphi_k$ не залежить, а визначається лише концентрацією неосновних носіїв. Отже, для рівноважного стану можна записати

$$I_{\text{осн}} = c e^{-\frac{e\Delta\varphi_k}{kT}} = I_{\text{неосн}} = I_0, \quad (14.1)$$

де c – константа.

Якщо до *p-n* переходу прикласти зовнішню напругу U (різницю потенціалів), то вона буде падати, в основному, в області контакту, тому що опір її значно більший, ніж іншої частини напівпровідника. У результаті на величину, рівну eU , зміниться висота потенціального бар'єру. На цю ж величину в області *p-n* переходу зміниться й положення рівня хімічного потенціалу. Зміна висоти бар'єру приведе до зміни основного струму, а неосновний струм залишиться таким же, яким був і в рівноважному стані. Рівноважний стан буде порушено, через *p-n* перехід потече електричний струм.

У випадку, якщо зовнішня напруга, прикладена до *p-n* переходу, має полярність, зображену на рис. 14.2, *б* (до напівпровідника *p*-типу підключено плюс, а до напівпровідника *n*-типу – мінус), то вектор напруженості \vec{E} зовнішнього електричного поля буде спрямований протилежно вектору напруженості \vec{E}_k контактної області. При такій полярності зовнішньої напруги висота потенціального бар'єру зменшиться і стане рівною $e\Delta\varphi_k - eU$,

основний струм збільшиться, а результуючий струм I через p - n перехід буде визначатися співвідношенням

$$I = ce^{-\frac{(e\Delta\varphi_k - eU)}{kT}} - I_0 = I_0(e^{\frac{eU}{kT}} - 1), \quad (14.2)$$

Тобто із збільшенням U струм I зростає за експоненціальним законом. Зовнішня напруга такої полярності називається *прямою* або *пропускною*.

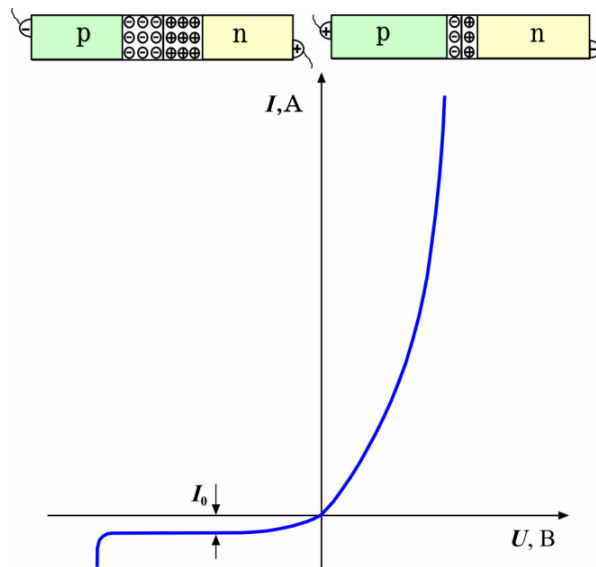


Рис. 14.3

Зміна полярності зовнішньої напруги (рис. 14.2, в) на протилежну (до напівпровідника p -типу підключено мінус, а до напівпровідника n -типу – плюс) приведе до збільшення висоти потенціального бар'єру і зменшенню в порівнянні з рівноважним значенням сили основного струму. У результаті напрямок результуючого струму I через p - n перехід змінюється на протилежний і величина його визначається співвідношенням

$$I = ce^{-\frac{(e\Delta\varphi_k + eU)}{kT}} - I_0 = I_0(e^{-\frac{eU}{kT}} - 1). \quad (14.3)$$

Із (14.3) випливає, що при зовнішній напрузі з даною полярністю з збільшенням U результуючий струм I прямує до $-I_0$, тобто залишається незначним (концентрація неосновних носіїв струму в багато разів менша концентрації основних). Зовнішня напруга такої полярності називається *зворотньою* або *запірною*.

Отже, p - n перехід має односторонню провідність – в одному напрямку електричний струм пропускає, а в іншому – практично не пропускає. Залежність електричного струму I від прикладеної до p - n переходу

зовнішньої напруги U зображена для обох полярностей на рис. 14.3. Ця залежність називається *вольт-амперною характеристикою $p-n$ переходу*. Ділянка різкого зростання струму I при збільшенні зворотної напруги відповідає пробою $p-n$ переходу.

Як впливає з цієї залежності, $p-n$ перехід має практично односторонню провідність, тому він може використовуватись як діод – система, що пропускає струм тільки в одному напрямку. Його застосовують для створення випрямлячів – приладів, що перетворюють змінний струм в постійний. Відношення

$$K = I_{np} / I_{zv} \quad (14.4)$$

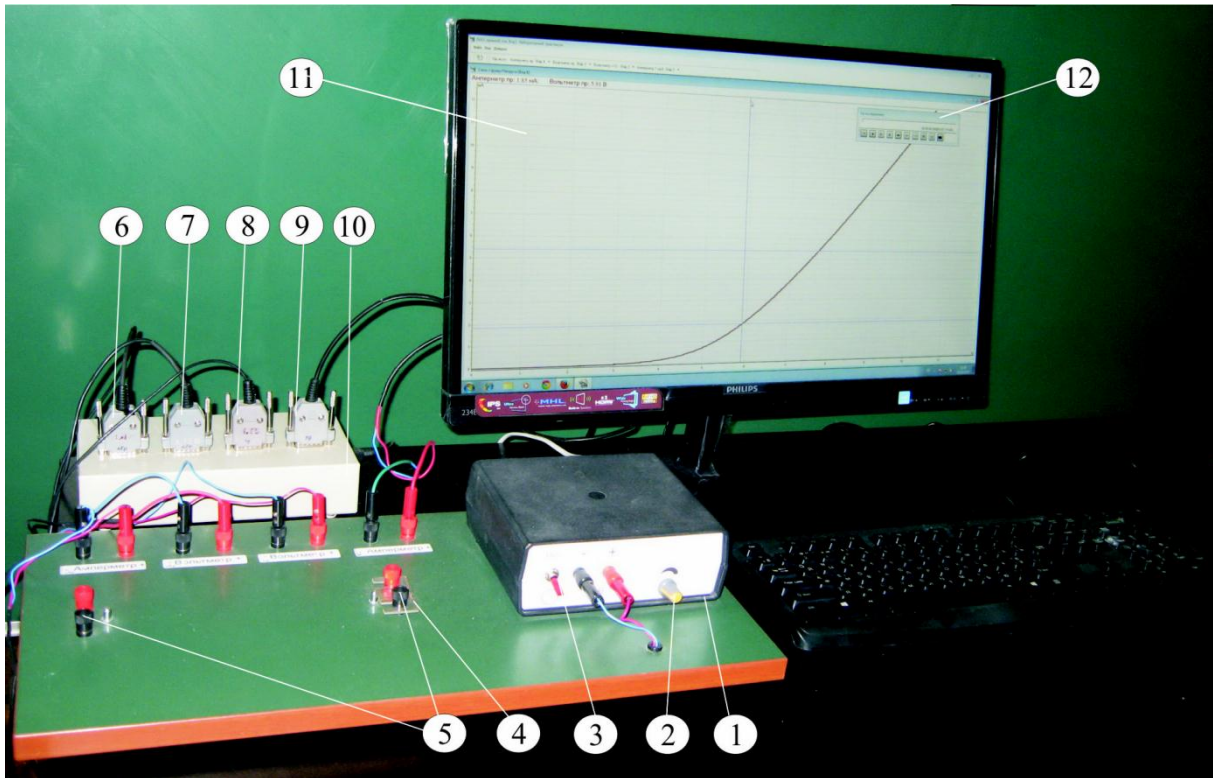
(за однакового значення напруги) має назву *коефіцієнта випрямлення*. Чим більший цей коефіцієнт у даного $p-n$ переходу, тим краще він підходить для випрямлення струму.

Електронно-діркові переходи є основними елементами багатьох напівпровідникових приладів та мікросхем. Вони дозволили значно розширити функціональні можливості радіотехнічної і електротехнічної апаратури, комп'ютерної техніки, багаторазово збільшити їх швидкодію, зменшити споживання електроенергії і суттєво покращити інші важливі характеристики.

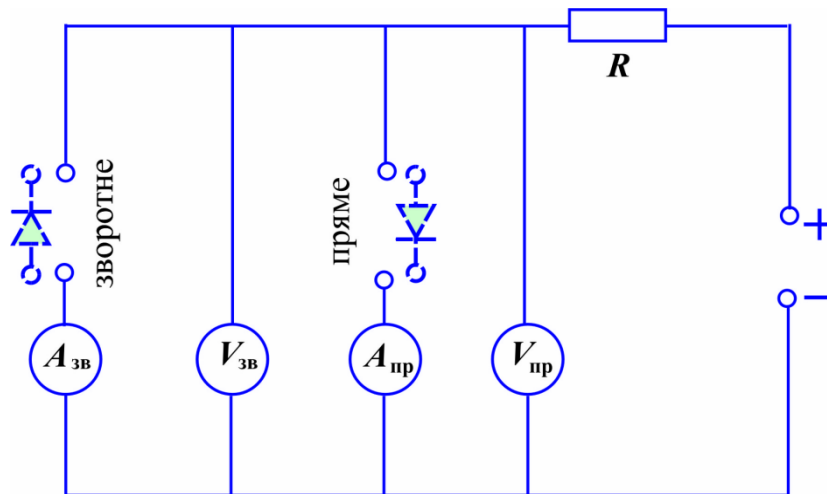
Опис лабораторної роботи

Зовнішній вигляд та схема лабораторної установки наведені на рис.14.4. В ній за допомогою джерела 1 з регулятором напруги 2 та ключом 3 створюється необхідна зовнішня різниця потенціалів на діоді 4, який під'єднується до контактів 5 прямого та зворотнього підключення.

Вимірювання сили струму та напруги виконується відповідними датчиками сили струму 6, 9 та напруги 7, 8, які з'єднані з вимірювальним блоком 10, що сполучений з комп'ютером. Результати вимірювання відображаються через комп'ютер на дисплей монітора 11 у вигляді залежності $I(U)$. Наприклад, на рис. 14.4, *a* на дисплеї монітора відображена залежність $I(U)$ для прямого підключення діода. Керування процесом вимірювання відбувається через вікно 12.



a



б

Рис.14.4. Зовнішній вигляд лабораторної роботи (а) та її схематичне зображення (б):

1 – джерело живлення; 2 – регулятор зовнішньої напруги; 3 – перемикач ; 4 – діод; 5 – контакти прямого та зворотнього підключення; 6,7 – датчики сили струму і зовнішньої напруги прямого підключення; 8,9 – датчики сили струму і зовнішньої напруги зворотнього підключення; 10 – вимірювальний блок; 11 – дисплей монітору; 12 – вікно керування.

Завдання:

- а) за даними вимірів зовнішньої напруги U та сили струму I побудувати вольт –амперну характеристику $p-n$ переходу;
- б) розрахувати коефіцієнт випрямлення $p-n$ переходу для декількох значень напруги.
- в) зробити висновок про характер вольт-амперної залежності і провідності $p-n$ переходу в прямому та зворотньому напрямках.

Порядок виконання роботи

1. Під'єднати діод 4 до клем 5 прямого підключення, датчики сили струму 6, 9 і напруги 7, 8 до вимірювального блоку 10, а сам блок до увімкненого комп'ютера.

2. Завантажити програму „ІТМ” проведення вимірювань. У відкритому вікні „Навчальна лабораторія ІТМ” вибрати і натиснути „Робота з вимірювальним приладом”. Після відкриття вікна „Новий експеримент” вибрати і натиснути „Проведення”. В результаті на дисплеї монітора 11 відкриється вікно „Хід експерименту” з сіткою системи координат $I(U)$.

3. Увімкнути джерело струму, встановивши перемикач 3 у верхнє положенні „Вкл”.

4. У вікні керування експериментом 12, натиснути кнопку „Пуск” меню і регулятором 2 плавно збільшити напругу до максимальної (8-12 В). Спостерігати процес побудови залежності $I(U)$ і зупинити процес вимірювань натисненням кнопки „Стоп” у меню вікна 12. Вимкнути джерело струму.

5. Після одержання залежності $I(U)$, за допомогою маркера, що являє точку перетину горизонтальної і вертикальної прямих, вибрати 8-10 точок вольт-амперної характеристики і записати в таблицю вимірів відповідні їм значення напруги та сили струму.

6. Під'єднати діод 4 до клем 5 зворотнього підключення, повторити дії пунктів 1-5 і записати в таблицю вимірів відповідні значення напруги та сили струму для зворотнього підключення.

Таблиця

№	$U, В$	$I_{пр}, мА$	$I_{об}, мкА$	K
1.				
2.				
⋮				
⋮				

7. За даними вимірювань побудувати вольт - амперну характеристику $p- n$ переходу.

8. Для різних значень напруги визначити за виразом (14.4) коефіцієнт випрямлення $p-n$ переходу K .

9. Зробити висновки щодо результатів експерименту.

Контрольні питання.

1. Яка мета лабораторної роботи?
2. Чим відрізняються напівпровідники n -типу і p -типу?
3. За яких умов утворюється p - n перехід?
4. Які основні і неосновні носії зарядів в p - та n - напівпровідниках?

Пояснити механізм виникнення неосновних носіїв заряду.

5. Як залежить концентрація неосновних носіїв заряду від температури?
6. Яке явище є причиною утворення контактної різниці потенціалів?
7. Як контактна різниця потенціалів впливає на основні та неосновні носії заряду?
8. Яка полярність зовнішньої напруги має назву прямої (пропускної), а яка зворотньої (запірної)?
9. Яка величина має назву коефіцієнта випрямлення?
10. Опишіть хід виконання даної роботи.

Література.

1. Кучерук І.М., Горбачук І.Т. Загальний курс фізики: Т.2.: Електрика і магнетизм.– К.: Техніка, 1999. – 269с., ст. 156-168, 178-185.
2. Опис від виробника „ІТМ[©]”.