

*МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ
МИКОЛАЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ*

Кафедра енергетики аграрного виробництва

Фізика

***методичні рекомендації до модуля 5 “Електромагнетизм”
для виконання лабораторних робіт студентами денної форми
навчання напрямів підготовки***

6.100102 “Процеси, машини та обладнання в агропромисловому виробництві”,
6.010104 “Професійна освіта. Технологія виробництва і переробка продуктів сільського господарства”,
6.100101 “Енергетика та електротехнічні системи в агропромисловому комплексі”,
6.090101 “Агрономія”,
6.090102 “Технологія виробництва і переробки продукції тваринництва»,
6.051401 «Біотехнологія»”

Миколаїв
2015

УДК 53 (079/1)

ББК 22.3

В 22

Друкується за рішенням методичної ради Інженерно-енергетичного факультету Миколаївського національного аграрного університету, від 28.05.2015 р., протокол №9

Укладачі:

к.ф-м.н., доцент Вахоніна Л.В.

к.п.н. Бацуровська І.В.

Рецензенти:

Самойленко О.М. д.п.н., професор кафедри математики МНУ ім. В.О. Сухомлинського.

Плахтир О.О. к.т.н., доцент енергетики аграрного виробництва.

Друкується згідно з рішенням Методичної ради інженерно-енергетичного факультету МНАУ

Протокол № 9 від «28 » травня 2015 р.

© Миколаївського національного аграрного університету, 2015

ЗМІСТ

ЗМІСТ	3
Вступ	4
Підготовка до виконання робіт.....	4
Вказівки щодо допуску до виконання лабораторних робіт	5
Виконання лабораторних робіт та вимоги техніки безпеки.	5
Відпрацювання лабораторних робіт.....	6
Вимоги до оформлення графіків.	7
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1 «Вивчення ефекта Холла»	8
Тестові питання для захисту лабораторної роботи: “Визначення ефекта Холла”	17
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2 «Визначення магнітного поля колового струму і визначення горизонтальної складової напруженості магнітного поля Землі»	19
Тестові питання для захисту лабораторної роботи: “Визначення магнітного поля колового струму і визначення горизонтальної складової напруженості магнітного поля Землі”	26
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3 «Визначення питомого заряду методом магнетрона».	27
Тестові питання для захисту лабораторної роботи: “Визначення питомого заряду електрона методом магнетрона”	35
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4 «Фізичні параметри біполярного транзистора».....	37
Тестові питання для захисту лабораторної роботи: “Фізичні параметри біполярного транзистора”	42
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5 «Внутрішній фотоефект у напівпровідниках».	44
Тестові питання для захисту лабораторної роботи: “Внутрішній фотоефект у напівпровідниках”	51
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6 «Зняття вольт-амперної характеристики напівпровідникового діоду».....	53
Тестові питання для захисту лабораторної роботи: “Зняття Вольт-Амперної характеристики напівпровідникового діоду”	60
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №7 «Дослідження залежності опору напівпровідників від температури».....	62
Тестові питання для захисту лабораторної роботи: “Дослідження залежності опору напівпровідника від температури”	75
ЛІТЕРАТУРА	78

Вступ

У процесі занять студенти вчаться застосовувати набуті теоретичні знання. Вивчення теорії на прикладах, взятих із життя і досягнень науки та техніки, чітка організація практичних знань, високі вимоги до студентів сприяють вихованню якостей, які повинен мати майбутній спеціаліст.

Студент має ґрунтовно опрацьовувати відповідний лекційний матеріал, визначати незрозумілі питання для з'ясування під час занять, виконувати лабораторні роботи та домашнє завдання.

Для засвоєння матеріалу, розширення та поглиблення знань, з'ясування функціональної залежності фізичних величин, встановлення зв'язку теорії з практикою, розвитку самостійного мислення і навичок самостійної роботи – виконання лабораторних робіт має першорядне значення. Отже, для виконання лабораторних робіт недостатньо формального знання фізичних законів. Для цього необхідне міркування, аналітично мислити, розуміти чому так, а не інакше.

Перед тим, як виконувати лабораторну роботу, студент повинен вивчити відповідний лекційний матеріал за літературою, рекомендованою викладачем, зрозуміти завдання до теми заняття, відповісти на запитання, поставлені до даної теми.

Підготовка до виконання робіт.

Перед виконанням лабораторної роботи студент повинен:

- опрацювати інструкцію до роботи, законспектувати її;
- знати мету виконання роботи та основні її завдання;
- усвідомити основні теоретичні положення і закони, на яких базується виконання роботи;
- якщо самостійне опрацювання матеріалу за літературою, вказаною в інструкції виявилось недостатнім для розуміння суті явищ чи процесів, слід звернутися за консультацією до викладача;
- ознайомитись з робочим місцем та обладнанням, яке використовується в процесі виконання роботи;

- якщо спосіб використання окремого обладнання студенту невідомий, то йому потрібно взяти у лаборанта технічну інструкцію до цього обладнання і опрацювати її;
- рівень роботи студента з обладнанням оцінює лаборант;
- чітко розмежувати величини, які слід виміряти в ході виконання роботи і величини, які будуть обчислені;
- знати порядок виконання роботи та послідовність операцій;
- підготувати таблиці для запису результатів вимірювань і обрахунків, а також папір для побудови графіків.

Вказівки щодо допуску до виконання лабораторних робіт

Допуск до виконання лабораторних робіт дає керівник занять. У співбесіді зі студентом (або бригадою) виявляється ступінь їх готовності до заняття. Якщо студент не може сформулювати основні положення теорії, на яких базується робота, описати послідовність виконання досліджень, не вміє працювати з обладнанням – то він до виконання роботи не допускається.

Після отримання допуску студенти одержують додатковий інструктаж на робочому місці стосовно конкретної роботи, уточнені завдання до роботи, беруть в лаборанта додаткове обладнання чи прилади. Допуск студентів до виконання робіт оцінюється і фіксується в лабораторному журналі.

Виконання лабораторних робіт та вимоги техніки безпеки.

При виконанні лабораторних робіт слід дотримуватись таких правил:

1. Дотримуватись розпорядку роботи в лабораторії і правил техніки безпеки, з якими студенти ознайомлені на вступному занятті та при допуску до виконання роботи.
2. Без перевірки викладачем або лаборантом готовності до дії установки і електричної схеми не можна починати вимірювання, щоб не зіпсувати прилади.

3. Не можна брати без дозволу прилади з інших робочих місць.
4. Якщо в процесі виконання роботи виникають неполадки в роботі приладів або обладнання, про це слід негайно повідомити керівника заняття і лаборанта. Самостійно налагоджувати роботу приладів не дозволяється.
5. Будьте обережні, в роботах використовується висока напруга.
6. Результати вимірювань занести до таблиці, заздалегідь продумавши їх форму, якщо вона не вказана в інструкції.
7. Вимірювання кожної величини проводити не менше трьох разів, щоб звести до мінімуму похибки.
8. Після закінчення експерименту, не розбираючи пристрою, слід обчислити кінцеві результати; якщо вони не задовільні, треба заново провести вимірювання.
9. Обговорити з керівником занять чи лаборантом отримані результати. Вони підписуються викладачем або лаборантом.
10. При захисті лабораторних робіт студент подає короткий письмовий звіт з результатами вимірювань, обчисленими величинами та побудованими графіками, висновками. В процесі захисту він повинен відповісти на поставлені керівником занять питання стосовно лабораторної роботи чи окремих її частин.
11. Рекомендується в кінці заняття звітувати за попередньо виконані лабораторні роботи.
12. Якщо студент не захистив більше трьох виконаних лабораторних робіт, він може бути не допущений до виконання наступних.

Відпрацювання лабораторних робіт.

Якщо студент не був допущений до виконання робіт через свою не підготовленість, або ж пропустив заняття по хворобі чи іншій причині, то відпрацювання пропущених робіт проводиться у дні та години, вказані у графіку роботи лабораторії.

Студент повинен отримати допуск до заняття, виконати всі дослідження, обробити результати вимірювання і обговорити їх з викладачем чи лаборантом.

В лабораторному журналі фіксується дата відпрацювання таких занять.

Вимоги до оформлення графіків.

При побудові графіків слід дотримуватись таких правил:

1. Графік повинен мати назву – залежність між якими величинами він показує.
2. Позначити осі координат і одиниці вимірювання величин.
3. Вибрати раціональний масштаб осей (прямий однаковий, прямий різний, обернений, логарифмічний, напівлогарифмічний, квадратичний тощо). Вибраний масштаб повинен на графіку зобразити залежність досліджуваних величин прямою лінією. Якщо в роботі вибір масштабу не вказано, зробіть це самі.
4. Вказати мічені (оцифровані) та глухі (неоцифровані) поділки шкал.
5. Графік повинен займати всю площу малюнка.
6. Лінія графіка повинна усереднювати визначені величини в межах похибок.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1

«Вивчення ефекта Холла»

Мета роботи- вивчити залежність "холлівської" різниці потенціалів у напівпровідниковому зразку від величини магнітного поля, визначити концентрацію носіїв струму та їх рухливість.

Прилади та обладнання: Електромагніт, що має число витків $N = 4000$, проводу "ПЭВ" 3,0 з повітряним зазором між полюсами, рівними 3 мм; датчик Холла типу Х 200; резистори для регулювання струму в датчику та електромагніт, міліамперметри, мілівольтметр, тумблер для включення живлення електричного кола. Розміри датчика Холла - 0,7x0,7x0,2 мм.

Вхідний опір 2,9 Ом.

Теоретична частина. Нехай через однорідну пластину напівпровідника вздовж осі X тече струм I_x (рис. 1.). Якщо помістити пластину напівпровідника у магнітне поле, направлене по осі Y , то між гранями, перпендикулярними осі Z , з'явиться різниця потенціалів U_z . Виникнення поперечної різниці потенціалів пов'язано з дією сили Лоренца на рухливі заряди

$$\vec{F} = q \cdot [\vec{v} \times \vec{B}]$$

де q - величина заряду; v - його швидкість, B - індукція магнітного поля.

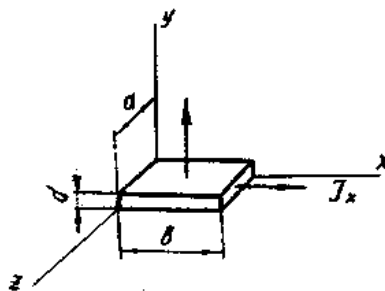


Рис.1.

Під дією цієї сили, направленої по осі Z ,

$$F = q \cdot V_x \cdot B_y$$

відбувається відхилення носіїв заряду в бік граней, які перпендикулярні осі Z . Одна з цих граней, до якої будуть

відхиляться електрони, буде заряджатись негативно, а протилежна їй - позитивно. Ці заряди і зумовлюють у пластині електричне поле (поле Холла).

Процес накопичення зарядів припиниться тоді, коли напруженість "холлівського" поля буде повністю компенсувати дію на заряди сили Лоренца. Умову рівності сил, діючих на електрон з боку електричних та магнітних полів, може бути записано у вигляді:

$$q(V_x B_y) = qEz$$

звідки може бути визначена напруженість "холлівського" поля:

$$E_z = V_x B_y$$

Напруженість "холлівського" поля може бути виражена через "холлівську" різницю потенціалів

$$U_z = E_z a = V_x B_y a = Y_x B_y a.$$

Струм, що протікає через зразок, площа поперечного перерізу якого $S = a \cdot d$, повністю, зв'язаний з концентрацією і швидкістю носіїв заряду співвідношенням:

$$I_x = j_x \cdot S = n \cdot q \cdot V_x \cdot a \cdot d \quad (2)$$

Вирішуючи сумісно рівняння (1) та (2), отримаємо

$$U_z = \frac{1}{q \cdot n} \cdot \frac{B_y \cdot I_x}{d} = K \cdot \frac{B_y \cdot I_x}{d} \quad (3)$$

де $K = \frac{1}{q \cdot n} = \frac{1}{en}$ - постійна Холла ($d = 0,2$ мм).

Величина її залежить від матеріалу пластини, вмісту домішки в ній та температури.

Опис лабораторної установки.

Принципова електрична схема установки приведена на рисунку 2

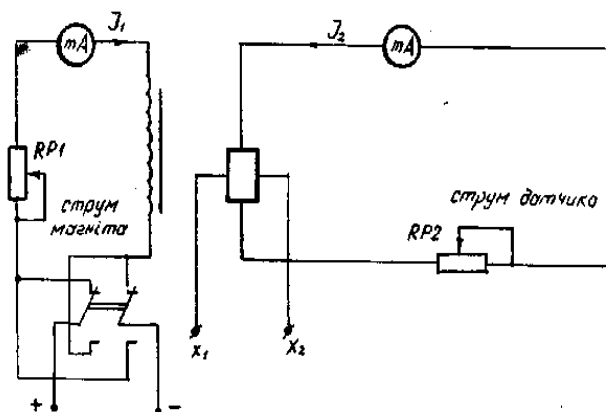


Рис 2

Джерела живлення електромагніту та датчика Холла змонтовані зі зворотнього боку панелі, мілівольтметр підключається до клем X_1 і X_2 . Регулювання струму в електромагніті та датчику Холла здійснюється за допомогою резисторів R_1 і R_2 , які виведені на панель-установки.

Виконання роботи.

а) До клем X_1 і X_2 підключити мілівольтметр, резистори RP_1 і RP_2 встановити в крайнє ліве положення, що забезпечить мінімальне значення струму в електромагніті та датчику Холла;

б) Ввімкнути тумблер живлення електричного кола, поворотом резистора RP_0 досягти струму через датчик Холла 80-100 мА;

в) Зняти залежність "холлівської" різниці потенціалів U_z від індукції магнітного поля B . Для цього резистором RP_1 змінюють струм в електромагніті через 20 мА. Для виключення впливу побічних ефектів та визначення дійсного значення "холлівської" різниці потенціалів вимірювання U_z проводяться з інверсією магнітного поля, тобто при зміні напрямку струму в електромагніті перемикачем.

$$U_z = \frac{(+U_1) + (-U_2)}{2}$$

Величина B лінійних частин кривої намагнічення позначається із співвідношення

$$B = \alpha \cdot I_1(4),$$

де $\alpha = 0,0155$ Тл /А; I_1 - струм через обмотку електромагніта,

г) Підрахувати B згідно формули (4). Результати занести до таблиці:

$I_1, \text{А}$				
$U_1, \text{В}$				
$U_2, \text{В}$				
$U_z, \text{В}$				
$B, \text{Тл}$				
$K, \text{Кл}^{-1}$				

д) Побудувати графік залежності U (В)

є) Згідно формули (3)

$$U_z = K \frac{B_y I_x}{d} \text{ де } d = 3 \text{ мм, визначити постійну Холла } K.$$

ж) Визначити концентрацію носіїв струму згідно формули: $K = \frac{1}{en}$, де e – заряд електрона ($e = 1.602 \cdot 10^{-19}$ Кл), n – концентрація носіїв

к) По заданому значенню опору датчика та його геометричним розмірам визначити його питомий опір, а потім рухливість носіїв струму

$$\rho = \frac{R \cdot S}{l}; \mu = \frac{k}{\rho}.$$

Контрольні питання

1. В чому полягає ефект Холла?
2. Від чого залежить „холлівська” різниця потенціалів?
3. Чим визначається знак постійного Холла?
4. Як за допомогою ефекту Холла визначити знак носіїв заряду?

Додаткові теоретичні відомості

Ефектом Холла називається явище, що полягає в тому, що при пропусканні струму уподовж провідної пластинки, поміщеної перпендикулярно до ліній зовнішнього магнітного поля, виникає поперечна різниця потенціалів внаслідок взаємодії носіїв заряду з магнітним полем.

У найпростішому розгляді ефект Холла виглядає наступним чином. Нехай через металевий брусок у слабкому магнітному полі \mathbf{B} протікає електричний струм під дією напруженості \mathbf{E} . Магнітне поле буде відхиляти носії заряду (для визначеності електрони) від їхнього руху вздовж або проти електричного поля до однієї з граней бруса.

Таким чином, сила Лоренца призведе до накопичення від'ємного заряду біля однієї грані бруса та додатного – біля протилежної грані. Накопичення заряду продовжуватиметься доти, поки електричне поле зарядів \mathbf{E}_1 , яке виникло під дією магнітного поля, не врівноважить магнітну складову сили Лоренца: $eE = evB$; $E = vB$

Швидкість електронів v можна виразити через густину струму:

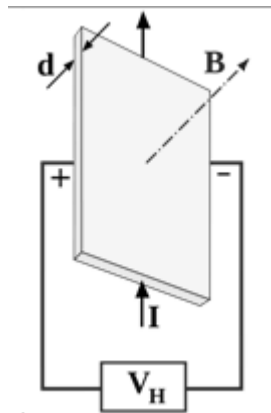
$$j = nev; \quad v = \frac{j}{ne}$$

де n — концентрація носіїв заряду. Тоді

$$E_1 = \frac{1}{ne} jB$$

Коефіцієнт $R_i = \frac{1}{ne}$ пропорційності між \mathbf{E}_1 та $j\mathbf{B}$ називається коефіцієнтом Холла. У такому наближенні знак коефіцієнта Холла залежить від знака носіїв заряду, що дозволяє визначати їхній тип для великого числа металів. Для деяких металів (наприклад, таких як свинець, цинк, залізо, кобальт, вольфрам), у сильних полях спостерігається додатний знак R_H , що пояснюється в напівкласичній і квантовій теоріях твердого тіла (рис.1.).

$$U = k \frac{BI_x}{d}$$
 – «холлівська» різниця потенціалів залежить від вектора магнітної індукції, струму та геометричних розмірів пластин.

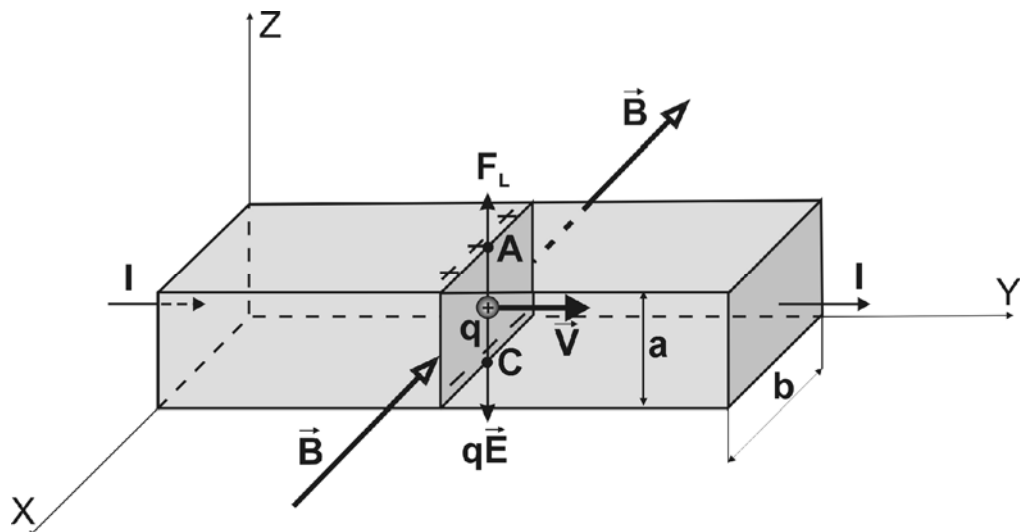


Знак постійного Холла співпадає зі знаком носія струму. Знак постійного Холла для напівпровідника дозволяє судити про тип його провідності. У випадку $k < 0$ спостерігається електронна провідність, $k > 0$ – діркова провідність.

У напівпровідниках у електропровідності беруть участь електрони провідності і дірки, по знаку сталої Холла можна визначити знак носія заряду.

Ефект Холла – це явище виникнення поперечної різниці потенціалів в провіднику з струмом, при вміщенні його в магнітне поле, перпендикулярне до напрямку протікання струму.

Вперше це явище було відкрите американським фізиком Е. Холлом у 1879 р. Пропускаючи постійний струм через пластину у вигляді паралелепіпеда, виготовлену з золота, Холл вимірював різницю потенціалів $\Delta\varphi = U_H$ між протилежними точками А і С на верхній і нижній гранях. Оскільки ці точки лежать в одному і тому ж поперечному перерізі провідника, то при відсутності магнітного поля, виявилось, що $U_H = 0$. Коли пластину з струмом було вміщено в однорідне магнітне поле, перпендикулярне до її бічних граней, то потенціали точок А і С стали різними.



Це явище отримало назву ефекту Холла. Виявилось, що різниця потенціалів $\Delta\varphi$ між точками А і С прямо пропорційна силі струму I , індукції магнітного поля B і обернено пропорційна ширині пластини b , тобто

$$U_H = \varphi_A - \varphi_B = R_H \frac{IB}{b},$$

де R_H - константа Холла. Подальші дослідження показали, що явище Холла спостерігається у всіх провідниках і напівпровідниках незалежно від матеріалу. Зміна напрямку струму або напрямку магнітного поля на протилежний викликає зміну знаку різниці потенціалів U_H .

Ефект Холла пояснюється дією магнітного поля на рухомі заряджені частинки, що створюють струм. Нехай струм в пластині зумовлений впорядкованим рухом електричних зарядів q . Якщо число цих зарядів в одиниці об'єму пластини дорівнює n_0 , а середня швидкість їх впорядкованого руху v , то сила струму I дорівнює

$$I = qvn_0s = qvn_0ab,$$

де $s = ab$ - площа поперечного перерізу пластини. Якщо заряди q додатні, то їх швидкість v збігається з напрямом струму, Якщо ж заряди q від'ємні, то їх швидкість v протилежна до напрямку струму.

На заряд q , що рухається у магнітному полі з індукцією B , діє магнітна складова сили Лоренца

$$\vec{F}_L = q[\vec{v}\vec{B}].$$

Під впливом цієї сили додатні заряди q відхиляються до верхньої грані пластини. Отже, поблизу верхньої грані пластини буде надлишок додатних зарядів q , а поблизу нижньої – нестача цих зарядів. Внаслідок цього в пластині виникне поперечне електричне поле з напруженістю \vec{E} , напрямлене зверху вниз. Сила $q\vec{E}$, яка діє з боку поперечного електричного поля на заряд q , напрямлена в бік, протилежний напрямку сили Лоренца \vec{F}_L . В стані динамічної рівноваги ці сили взаємно зрівноважуються, тобто

$$qE = qvB,$$

звідси числове значення напруженості електричного поля дорівнює

$$E = vB.$$

Якщо пластина досить довга і широка, то поперечне поле в ній можна вважати однорідним. Тоді різниця потенціалів U_H між точками А і С буде рівною

$$U_H = Ea = vBa.$$

Замінивши v її виразом із формули, знайдемо

$$U_H = \frac{1}{qn_0} \frac{IB}{b}.$$

Отриманий результат збігається з експериментальною формулою. Константа Холла обернено пропорційна добутку заряду q на концентрацію n_0 носіїв струму

$$R_H = \frac{1}{qn_0}.$$

Більш точний розрахунок з врахуванням закону розподілу електронів за швидкостями і використанням при цьому класичної статистики приводить до виразу для сталої Холла

$$R_H = \frac{3\pi}{8nq}.$$

Ця формула справедлива для напівпровідників, в яких концентрація електронів менша ніж в металах, коли електронний

газ є невиродженим і для його описання використовується класична статистика. Використання статистики Фермі-Дірака дає значення $R_H = \frac{1}{qn}$, яке збігається з виразом. З формул і видно, що знак константи Холла збігається зі знаком заряду q носіїв струму. Тому на основі вимірювання константи Холла для напівпровідника можна робити висновок про природу його провідності. При електронній провідності $R_H < 0$, а при дірковій $R_H > 0$. За допомогою константи Холла можна також визначити концентрацію носіїв струму, якщо характер провідності і заряд q носіїв струму відомі, а саме:

$$n_0 = \frac{K}{R_H},$$

де K – коефіцієнт, значення, якого залежить від величини концентрації носіїв струму. У випадку, коли концентрація носіїв струму в напівпровідниках є значно нижчою ніж концентрація електронів у металах $K = \frac{3\pi}{8q} = \frac{3\pi}{8 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 7,4 \cdot 10^{18} \text{ Кл}^{-1}$, якщо ж концентрація носіїв є велика і електронний газ можна вважати виродженим, то $K = \frac{1}{q} = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 6,25 \cdot 10^{18} \text{ Кл}^{-1}$.

Відомо, що питома електропровідність σ матеріалу провідника залежить від концентрації носіїв струму n_0 , а також від їх рухливості μ згідно з формулою

$$\sigma = qn_0\mu.$$

Якщо виміряти питомий опір ρ провідника і знайти його питому електропровідність $\sigma = \frac{1}{\rho}$ та константу Холла R_H , а за її значенням і концентрацію носіїв, то можна обчислити їх рухливість. (Рухливість – це величина, яка чисельно дорівнює швидкості впорядкованого руху носія струму при напруженості електричного поля, що дорівнює одиниці. Значення цього параметру залежить від внутрішньої будови напівпровідника і його температури). Проте, необхідно відмітити, що вказані

формули справедливі тільки для напівпровідників з перевагою одного типу носіїв. Питомий опір напівпровідників можна визначити, якщо виміряти спад напруги U між зондами, які дотикаються до поверхні напівпровідника на деякій відстані ℓ вздовж зразка при проходженні через нього постійного струму I .

$$\rho = \frac{U \cdot s}{I \cdot \ell},$$

де $s = a \cdot b$ – поперечний переріз зразка. Якщо електропровідність $\sigma = \frac{1}{\rho}$ і концентрацію $n_0 = \frac{7,4 \cdot 10^{18}}{R_H}$, то отримаємо вираз для обчислення рухливості носіїв $\mu = 0,85 \frac{R_H}{\rho}$.

Тестові питання для захисту лабораторної роботи: “Визначення ефекта Холла”

1. Сформулюйте, в чому полягає сутність ефекту Холла:
 - а) виникнення в металі (чи напівпровіднику) зі струмом густиною j , вміщеному в магнітне поле B , електричного поля в напрямку перпендикулярному до B та j ;
 - б) виникнення струму в провіднику під дією магнітного поля;
 - в) поява магнітного поля під дією електричного заряду.
2. “Холлівська” різниця потенціалів залежить від:
 - а) магнітної індукції, сили струму, товщини пластинки;
 - б) матеріалу пластини, температури;
 - в) напруженості, площі пластинки, напруги, потужності.
3. Постійна Холла залежить від:
 - а) матеріалу пластини, вмісту домішок в ній, температури;
 - б) опору провідника;
 - в) навколишнього середовища, атмосферного тиску.
4. Визначення знаку носіїв заряду за допомогою ефекту Холла:
 - а) знак постійної Холла визначається носієм струму;
 - б) знак постійної Холла визначається індуктивністю;

в) знак постійної Холла визначається електрорушійною силою.

5. Оберіть формулу, за якою можна визначити постійну Холла:

а) $k = \frac{I}{q \cdot n} = \frac{I}{e \cdot n}$;

б) $k = q \cdot n$;

в) $k = e \cdot n$.

6. Виберіть формулу для визначення “холлівської” напруги:

а) $U = \frac{B \cdot I}{d} \cdot k$;

б) $U = I \cdot R$;

в) $U = \frac{B \cdot R}{d} \cdot k$.

7. Виберіть формулу для визначення сили Лоренца:

а) $\vec{F} = \vec{B} \cdot q \cdot \vec{v} \cdot \sin \alpha$;

б) $F = \frac{q^2}{2\epsilon_0 S}$;

в) $F = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$.

8. Виберіть формулу для визначення сили Ампера:

а) $\left| \vec{F}_A \right| = \frac{q^2}{2\epsilon_0 S}$;

б) $F_A = 4\pi\epsilon_0 \epsilon R$;

в) $\vec{F}_A = \vec{B} \cdot \vec{I} \cdot l \cdot \sin \alpha$.

9. Виберіть формулу для визначення потоку магнітної індукції:

а) $E = h \cdot \omega$;

б) $\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S} \cdot \cos \alpha$;

в) $\Phi = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}$.

10. Виберіть формулу для визначення вектора магнітної індукції:

а) $\vec{\Phi} = \vec{B} \cdot S \cdot \cos \alpha$;

б) $M = \frac{B}{B_0}$;

в) $B = \frac{M}{I \cdot S}$.

11. Виберіть формулу закону Біо-Савара-Лапласа:

а) $B = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I \cdot \sin \alpha}{r^2} \cdot l$;

б) $R = \rho \cdot \frac{l}{S}$;

в) $C_v = \frac{i}{2} \cdot \frac{R}{M}$.

12. Виберіть формулу для визначення напруженості магнітного поля:

а) $dH = \frac{I \cdot dl \cdot \sin \alpha}{4\pi r^2}$;

б) $dH = \frac{B \cdot dl \cdot \sin \alpha}{4\pi r^2}$;

в) $dH = \frac{4\pi r^2}{I \cdot dl \cdot \sin \alpha}$.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2

«Визначення магнітного поля колового струму і визначення горизонтальної складової напруженості магнітного поля Землі»

Мета роботи: Визначити залежність магнітного поля колового струму від сили струму, радіуса кільцевого провідника і числа витків, а також визначити горизонтальну складову індукції магнітного поля Землі.

Прилади та обладнання: амперметр, тангенс-гальванометр, джерело регульованого постійного струму, перемикач напрямку струму, набір монтажних провідників.

Опис лабораторної установки.

Визначення горизонтальної складової H напруженості поля Землі, виконується при допомозі приладу, який називають тангенс-гальванометром. Цей прилад являє собою коловий провідник з n вертикальних витків, які достатньо близько прилягають один до одного. В центрі витків розміщений компас, стрілка якого повертаючись навколо вертикальної осі, встановлюється під дією магнітного поля Землі вздовж горизонтальної складової напруженості H . Це дозволяє розмістити витки тангенс-гальванометра в площині магнітного меридіану. Струм, який протікає по виткам тангенс-гальванометра створює магнітне поле, діюче на стрілку компаса. Стрілка встановлюється по напрямку рівнодіючої напруженості обох магнітних полів (рис.1).

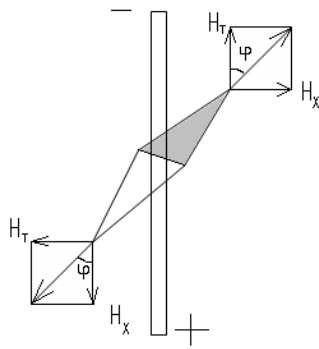


Рис.1

Так як вектор напруженості магнітних полів колового струму H , і вектор

H Землі взаємно перпендикулярні, то їх рівнодіюча є діагоналлю паралелограма зі сторонами H , і H_x . Тому,

$$H_x = \frac{H}{\operatorname{tg} \varphi}, \quad (1)$$

де $H = \frac{n \cdot I}{2 \cdot r}$ – напруженість колового струму, n –кількість витків, I –величина струму, r –радіус витків.

Таким чином, для визначення напруженості H одержуємо формулу:

$$H_x = \frac{n \cdot I}{2 \cdot r \cdot \operatorname{tg} \varphi} \quad (2)$$

Для даної місцевості на Землі і для даного приладу величина

$$C = \frac{I}{\operatorname{tg} \varphi} = \frac{2 \cdot r \cdot H_x}{n}, \quad (3)$$

де C – величина стала і називається сталою тангенс-гальванометра. При відхиленні магнітної стрілки на $\varphi = 45^\circ$, вона чисельно дорівнює величині струму, який протікає по виткам, тобто коли $H_x = H$.

Порядок виконання роботи

Частина 1.

1. В електричне поле, яке зібране на панелі, підключити тангенс-гальванометр згідно схеми на рис.2. Визначити кількість витків та їх радіус.

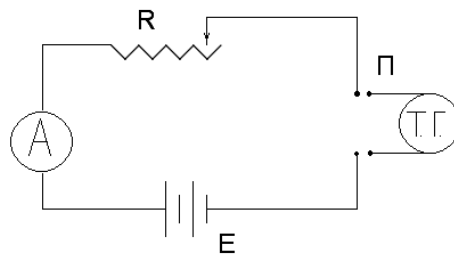


Рис.2

2. Повертаючи основу тангенс-гальванометра, встановити площину колового струму по напрямку магнітної стрілки, тобто в напрямку магнітного меридіана.

3. Ввімкнути тумблером електричний струм, визначити кут відхилення магнітної стрілки.

4. Перемкнувши тумблер на панелі змінити напрям колового струму і визначити кут відхилення.

5. Із одержаних значень знайти середню величину кута відхилення:

$$\varphi_{\text{ср.}} = \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}$$

Виміри провести для 5 різних значень струму.

6. Підрахувати значення магнітної складової Землі H_x для кожного значення струму згідно формули (2). Кінцевий результат представити у вигляді:

$$H_x = H_{x_{cp}} \pm \Delta H_{x_{cp}}$$

7. Визначити постійну тангенс-гальванометра C , згідно формули (3) і представити у вигляді:

$$C = C_{cp} \pm \Delta C_{cp}$$

Результати занести до таблиці:

Таблиця

№ пп	I (ma)	φ^1	φ^2	φ_{cp}	$tg \varphi$	H_{x_i}	ΔH_{x_i}	C	ΔC	B
1.										
2.										
3.										
4.										
5.										

Частина 2.

1. До електричного поля на панелі підключити один виток тангенс-гальванометра.

2. Тумблером ввімкнути джерело струму, при цьому регулятором встановити мінімальну величину струму.

3. Змінюючи величину струму підрахувати значення B згідно формули:

$$B = \mu_0 \frac{n \cdot I}{2 \cdot r} \quad (4)$$

де $n=1$, r =радіус витка, μ_0 =магнітна сила.

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Н\textbackslashм}$$

Результати занести до таблиці, побудувати графік залежності $B=f(I)$.

Контрольні питання.

1. Сформулювати закон Біо-Савара-Лапласа.
2. Як встановлюється стрілка в магнітному полі?

3. Чому необхідно орієнтувати площину колового струму в напрямку магнітного меридіану?
4. Записати розмірність вектора магнітної індукції B .
5. Пояснити елементи земного магнетизму.

Додаткові теоретичні відомості

Закон Біо-Савара-Лапласа — закон, який визначає магнітну індукцію навколо провідника, в якому протікає електричний струм. Початково Жан-Батіст Біо і Фелікс Савар на підставі своїх експериментів сформулювали закон, що визначав напруженість магнітного поля навколо прямолінійного дуже довгого провідника зі струмом. Цей закон називають законом Біо-Савара. П'єр-Симон Лаплас узагальнив результати Біо та Савара, сформулювавши закон, який визначав напруженість магнітного поля в будь-якій точці навколо контура зі струмом довільної форми. Хоча історично закон був сформульований для напруженості магнітного поля, в сучасному формулюванні використовується магнітна індукція. Магнітне поле навколо прямолінійного провідника

У 1820 р. французькі вчені Ж. Біо і Ф. Савар дослідили магнітні поля, створені в повітрі прямолінійним струмом, коловим струмом, соленоїдом тощо. На основі багатьох дослідів вони дійшли таких висновків:

- а) в усіх випадках індукція B магнітного поля електричного струму пропорційна силі струму;
- б) магнітна індукція залежить від форми й розмірів провідника зі струмом;
- в) магнітна індукція B у довільній точці поля залежить від положення цієї точки щодо провідника зі струмом.

Закон Біо-Савара-Лапласа дав змогу визначити індукцію в кожній точці магнітного поля, утвореного електричним струмом, що проходить по провідниках довільної форми.

$$B = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{Idl \cdot \sin \alpha}{r^2}$$

Вектор магнітної індукції визначається також формулою:

$B = k \frac{2I}{r}$, де B — магнітна індукція в точці M на відстані r від прямолінійного провідника із струмом I , k — коефіцієнт пропорційності, величина і розмірність якого залежать від вибору системи одиниць, r — радіус-вектор.

У системі СІ $k = \frac{\mu_0}{4\pi}$, де μ_0 — магнітна сила. У Гауссовій системі одиниць $k = \frac{1}{c}$, де c — швидкість світла.

Закон Біо-Савара експериментально відкрили 1820 Жан-Батіст Біо і Фелікс Савар. Цей закон є частковим випадком загальнішого закону Біо-Савара-Лапласа, сформульованого П'єром-Симоном Лапласом 1820 на підставі матеріалів з численних дослідів Біо і Савара (Рис. 2.)

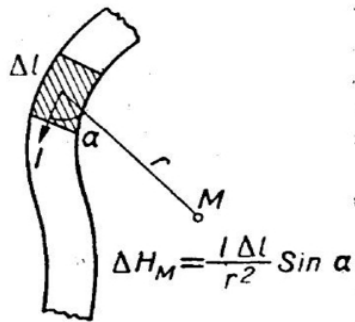


Рис. 2.

Магнітна стрілка, яка може вільно обертатися навкруги своєї осі, завжди встановлюється в одній ділянці магнітного поля орієнтується певним чином. Тому можна ввести поняття про напругу магнітного поля орієнтуючи дію магнітного поля на магнітну стрілку. Необхідно орієнтувати площину колового струму в напрямку магнітного меридіану тому, що в магнітному колі здійснюється взаємодія існуючих зарядів і саме тому, що струм рухомо по направленості є магнітний момент контура зі струмом векторне співпадає з напрямом позитивного направлення $\vec{pm} = IS\vec{n}$

Магнітна індукція-векторна фізична величина. Основна характеристика напрямку магнітного поля. Вектор магнітної індукції зазвичай позначається B . у системі СІ вимірюється в Теслах (Тл).

Вектор індукції магнітного поля чисельно дорівнює відношенню великої сили діючої на заряджену частинку зі стороною магнітного поля до похідної модуля заряду швидкості частинок:

$$B = \frac{F}{I}$$

Напруженість магнітного поля Землі в кожній точці земної поверхні повністю визначається вектором T і його складовими за осями прямокутної системи координат x , y и z . Якщо орієнтувати вісь x по географічному меридіану, а ось y - по паралелі, то проекція вектора T на площину XOY дасть горизонтальну складову H . Горизонтальна складова H завжди спрямована на магнітний полюс Землі - північний або північно-західний в залежності від того, в якому півкулі (північному або південному) знаходиться спостерігач. Кут D між горизонтальною складовою H і напрямом на істинний (астрономічний) північ (в даному випадку цей напрямок задається віссю x) визначає західне чи східне відмінювання вектора магнітного поля H . Кут I між горизонтальною складовою H і вектором T називається нахилом. Вертикальна складова z , північна x і східна y , а також відмінювання D , нахил I і горизонтальна складова H називаються **елементами магнітного поля Землі**. Вони визначають положення вектора T в різних системах координат. Вектор T прийнято називати повним вектором земної магнітного поля. Значення вектора T інваріантної, тобто не залежить від вибору системи координат. Вирази для всіх елементів земного магнітного поля:

$$x = H \cos D; y = H \sin D; z = H \tan I;$$

$$T = (H^2 + z^2)^{1/2}; H = (x^2 + y^2)^{1/2}; \quad (VI.16)$$

$$I = \arctg z/H; D = \arctg y/x.$$

Горизонтальні і вертикальні компоненти повного вектора магнітного поля T можна визначити також через кут I :

$$H = T \cos I; z = T \sin I.$$

Точки на земній поверхні, в яких спосіб $I = 90$, називаються північним і південним магнітними полюсами. Лінія на земній поверхні, де нахил $I = 0$, називається магнітним екватором. На

північ від магнітного екватора вертикальна складова z вважається позитивною, на південь - Негативною. На магнітних полюсах горизонтальна складова H дорівнює нулю ($H_p = 0$), а вертикальна дорівнює повного вектора T ($z_p = T$). На екваторі, навпаки, горизонтальна складова H_e дорівнює повного вектора T ($H_e = T$), а вертикальна z_e дорівнює нулю ($z_e = 0$).

Тестові питання для захисту лабораторної роботи:

“Визначення магнітного поля колового струму і визначення горизонтальної складової напруженості магнітного поля Землі”

1.Оберіть правильну формулу закону Біо – Савара – Лапласа:

а) $B = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I \cdot \sin \alpha}{r^2} \cdot l$;

б) $B = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I \cdot \cos \alpha}{r^2}$;

в) $B = k \frac{IU}{r^2}$.

2.Стрілка в магнітному полі встановлюється:

а) вздовж горизонтальної складової напруженості H ;

б) перпендикулярно до горизонтальної складової напруженості H ;

в) вздовж вертикальної складової напруженості H .

3.Чому необхідно орієнтувати площину колового струму в напрямку магнітного меридіану?

а) щоб стрілка компаса розмістилася вздовж горизонтальної складової напруженості H ;

б) щоб стрілка компаса розмістилася перпендикулярно до горизонтальної складової напруженості H ;

в) щоб стрілка компаса розмістилася вздовж вертикальної складової напруженості H .

4.Розмірність магнітної індукції:

а) Тл;

б) В;

в) Вб.

5. Поясніть елементи земного магнетизму:

а) магнетизм виникає внаслідок того, що у центрі Землі є залізна руда, а також залізна руда є в земній корі;

б) магнетизм виникає внаслідок того, що Земля має форму гелікоєда;

в) магнетизм виникає внаслідок циркуляції повітряних мас.

6. Сила Ампера визначається по формулі:

а) $\left| \vec{F}_A \right| = \frac{q^2}{2\epsilon_0 S};$

б) $F_A = q \cdot \vec{B} \cdot \vec{I} \cdot \cos \alpha;$

в) $\vec{F}_A = \vec{B} \cdot \vec{I} \cdot l \cdot \sin \alpha.$

7. Сила Лоренца визначається по формулі:

а) $\vec{F} = \vec{B} \cdot q \cdot \vec{v} \cdot \sin \alpha;$

б) $F = \frac{q^2}{2\epsilon_0 S};$

в) $F = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}.$

8. Потік магнітної індукції визначається по формулі:

а) $E = h \cdot \omega;$

б) $\Phi = B \cdot S \cdot \cos \alpha;$

в) $\Phi = H \cdot S \cdot \cos \alpha.$

9. Вектор магнітної індукції визначається по формулі:

а) $\Phi = \vec{B} \cdot S \cdot \cos \alpha;$

б) $M = \frac{B}{B_0};$

в) $B = \frac{\vec{M}}{I \cdot S}.$

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3

«Визначення питомого заряду методом магнетрона».

Теоретична частина. В даній роботі відношення e/m для електрона визначається за допомогою методу, що одержав назву

"метод магнетрона". Ця назва пов'язана з тим, що конфігурація електричного і магнітного полів, яка застосовується у цій роботі, нагадує конфігурацію полів в магнетронах-генераторах електромагнітних коливань у галузі надвисоких частот.

Рух електронів в цьому випадку відбувається у кільцевому просторі, який знаходиться між прямолінійним катодом і циліндричним анодом лампового діода. Нитка розжарення (катод) розташовується вздовж осі циліндричного аноду, так що електричне поле направлене по радіусу (рис. 1).

Лампа розташовується усередині соленоїда, що створює магнітне поле, паралельне катоду. З'ясуємо траєкторію електронів, що рухаються під дією комбінації електричного та магнітного полів.

Будемо вважати, що початкова (теплова) швидкість електрона, що вилетів з катода дорівнює нулю. Тоді при заданій орієнтації електричного та магнітного полів рух електрона буде відбуватись у площині, яка перпендикулярна магнітному полю. Скористуємось полярною системою координат. В цьому випадку положення точки характеризується відстанню від осі циліндра r та полярним кутом.

Запишемо рівняння руху електрона в площині (r, φ) , скориставшись рівнянням моментів.

$$\frac{dl}{dt} [r \times qE] + [r \times q[v \times B]] \quad (1)$$

де $q = -e$ - заряд електрона; I - напруженість електричного поля між катодом і анодом.

Якщо розглядати електроди двохелектродної лампи як циліндричний конденсатор, то електричне поле буде змінюватись зі зміненням відстані r і визначається виразом

$$E = \frac{U}{\ln \frac{r_a}{r_k}} \times \frac{1}{r} \quad (2)$$

де r_a - радіус анода, r_k - радіус катода.

Момент сили qE , тобто $[\vec{r} \cdot q\vec{E}] = 0$, оскільки $[\vec{r} \parallel \vec{E}]$.

Спроекуємо рівняння (1) на вісь Z .

Для знаходження проекту і моменту сили Лоренца на вісь Z розглянемо переміщення електрона у полярній площині (\vec{r}, φ) на величинуд \vec{r} (рис. 2). На рис.3 представлені одиничні вектори, радіус-вектори та полярні кути φ \vec{e}_z та

\vec{e}_φ відповідно. Тоді вектор швидкості

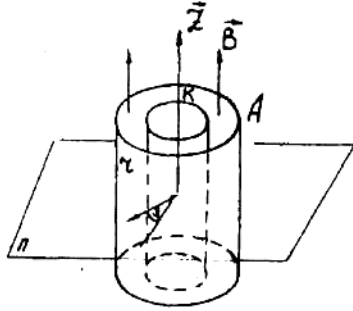


Рис. 1

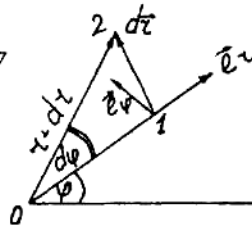


Рис. 2

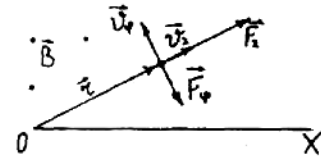


Рис. 3

$$\vec{V} = \frac{drdr}{dt dt} \times \vec{e}_z + r \times \frac{d\varphi}{dt} \times \vec{e}_{z\varphi} = V_z \times \vec{e}_z + V_\varphi \times \vec{e}_{\varphi 2}$$

Наявність двох складових швидкості V_z та V_φ приводить до двох складових сили Лоренца:

$$F_\varphi = -q \cdot V_z \cdot B = -q \cdot r \cdot B \quad (3)$$

$$F_\varphi = q \cdot V_\varphi \cdot B = -q \cdot r \cdot \varphi \cdot B \quad (4)$$

Момент сили V_φ , відносно осі Z, $M_\varphi = r \cdot F_\varphi = q \cdot r^2 \cdot B$, $a[\vec{X} \cdot \vec{F}_\varphi] = 0$

Таким чином, рівняння (1) набуде вигляду

$$\frac{d(mr^2 \varphi)}{dt} = e \cdot r \cdot r \cdot B$$

Проінтегрувавши це рівняння за часом, отримаємо

$$m \cdot r^2 \cdot \varphi + C = \frac{1}{2} e r^2 B \quad (5)$$

де C - постійна інтегрування, яка визначається з початкових умов.

Радіус катода r_k - величина мала, тому на початку руху електрона радіус $r = r_k$ теж малий. Права частина рівняння (5) та перший член його лівої частини тому теж дуже малий. Тоді постійну інтегрування C з визначеною точністю можна прирівняти до нуля: $C = 0$. Рівняння (5) набуде при цьому вигляду

Таким чином, кутова швидкість обертання електронів лінійно залежить від B і при даній індукції магнітного поля величиною постійною.

Перейдемо до вивчення руху електрона вздовж радіуса. Робота сил електричного поля, що звершується при переміщенні електрона від катода до точки з різницею потенціалів U .

$$A = eU \quad (7)$$

Магнітне поле роботи не здійснює. Тому робота, яка виражена співвідношенням (7), дорівнює кінетичній енергії електрона (за умови, що початкова швидкість електрона дорівнює нулю):

$$eU = \frac{mV^2}{2} = \frac{m}{2} \cdot (V_r^2 + V_j^2) = \frac{m}{2} \cdot [r^2 (\dot{\varphi})^2] = \frac{m}{2} \cdot \left[\dot{x}^2 + \left(\frac{r \cdot e \cdot B}{2 \cdot m} \right)^2 \right]$$

Це рівняння визначає радіальний рух електрона.

Далі розглянемо траєкторію електронів, що вилетіли з катода при анодній напрузі U_a - У відсутності магнітного поля (рис. 4) траєкторія прямолінійна та направлена вздовж радіуса. При слабкому полі траєкторія трохи змінюється, але електрон все-таки досягає анода. При збільшенні магнітного поля траєкторія змінюється настільки, що стає дотичною до аноду. Це поле називається критичним. При нулі $B_{кр}$ електрон зовсім не попадає на анод і повертається до катода. Знайдемо величину $B_{кр}$ із співвідношення (8), відмітивши, що у цьому випадку радіальна швидкість електрона \dot{r} при $r = r_a$, перетворюється в нуль:

$$B_{кр} = O \cdot I_{кр}, \quad (8)$$

де коефіцієнт пропорційності: $O = 2,36 \cdot 10^{-2} \text{ Тл/м}^2$, $I_{кр} = 0,85 \cdot I_a$

$$U_a = \frac{e \cdot B_{кр}^2 \cdot r_a^2}{8m} \quad (9)$$

$$\frac{e}{m} = \frac{8 \cdot U_a}{B_{кр}^2 \cdot r_a^2}, \quad (10)$$

де $r_a = 4,5 \text{ мм}$ - радіус анода

Формула (10) дозволяє вирахувати e/m , якщо при заданому U_a знайдено так значення магнітного поля (або навпаки, при заданому $B_{кр}$ таке значення U_a), при якому електрони перестають попадати на анод.

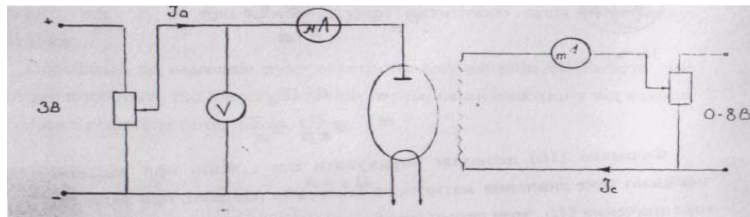
Досі можна було припустити, що всі електрони покидають катод з швидкістю, яка дорівнює нулю. Як виходить з (10). у цьому випадку при $V < V_w$ всі електрони без винятку попадали би на анод, а при $V > V_{кр}$ всі вони повертались би на катод, не досягнувши анода. Анодний струм I_a зі збільшенням магнітного поля змінювався б при цьому так, як це зображено на (рис. 5) пунктирною лінією.

В дійсності електрони, які вилітають з катоду, мають різні початкові швидкості. Тому критичні умови для різних електронів досягаються при різних значеннях V . Крива (В) набуває внаслідок цього вигляду суцільної лінії (5).

В даній роботі для визначення e/m використовується двохелектродна лампа з циліндричним немагнітним анодом. Радіус анода $r = 4,5$ мм.

Опис лабораторної установки.

Принципова електрична схема:



Анодний струм I_a регулюється потенціометром (7). Струм I_c через котушку індуктивності (2) регулюється потенціометром (5). Анодна напруга на діоді вимірюється вольтметром (6). Живлення нитки розжарення катода підключено безпосередньо на панелі.

Хід роботи.

а) До клем (6) підключити вольтметр, резистори (5) і (7) встановити в крайнє ліве положення, що забезпечує мінімальне значення струму в діоді та соленоїді.

Ввімкнути живлення електричного кола тумблером розташованим з правого боку на панелі.

б) Повертаючи ручку резистора (7) праворуч, встановити анодний струм $I_a = 60$ мА. Змінюючи резистором (5) струм в котушці соленоїда, зняти залежність $I_a = f(I_c)$.

Дослід проробити для 3-х значень I_a . Результати вимірів занести до таблиці

mA	$I_{a1}=60$	I_a				U_{a1}
		I_c				
mA	$I_{a2}=80$	I_a				U_{a2}
		I_c				
mA	$I_{a3}=100$	I_a				U_{a3}
		I_c				

Побудувати графіки залежностей $I_a = f(I_c)$.

Контрольні питання

1. Дати визначення сили Лоренца.
2. Чи виконує роботу сила Лоренца.
3. Записати рівняння руху електрона в електричному і магнітному полях.
4. Записати закон повного струму.

Теоретичні відомості

На електричний заряд, що рухається в магнітному полі, діє сила, перпендикулярна як до швидкості заряду, так і до ліній магнітної індукції. **Сила Лоренца** – сила, з якою зовнішнє магнітне поле діє на рухому заряджену частинку.

$$\vec{F} \approx \vec{B}$$

$$\vec{F} \approx \vec{v}$$

$$\vec{F} \approx q$$

$$\vec{F}_л = \frac{\vec{F}_A}{N}$$

$$\vec{F}_л = Bq\vec{v} \sin \alpha - \text{сила Лоренца}$$

Сила Лоренца - сила, з якою, в рамках класичної фізики, електромагнітне поле діє на точкову заряджену частинку. Іноді силою Лоренца називають силу, що діє на рухомий із швидкістю заряд лише з боку магнітного поля, нерідко ж повну силу - з боку

електромагнітного поля взагалі, інакше кажучи, з боку електричного і магнітного полів. Виражається в СІ як:

$$F = q(E + [v \times B])$$

Сила Лоренца не виконує роботу, тому що вона перпендикулярна до швидкості руху зарядженої частинки, яка рухається в магнітному полі. Робота виконується у замкненому контурі.

Рівняння руху електрона в електричному і магнітному полях:

$$A = U_g; U_g = \frac{mV^2}{2} \Rightarrow V = \sqrt{\frac{U_g \cdot 2}{m}} \text{ (електричне поле)}$$

$$W_k = \frac{mV^2}{2}$$

$$F_g = \frac{mV^2}{R}; B_g V = \frac{mV^2}{R}; B_g = \frac{mV}{R} \Rightarrow U = \frac{B_g R}{m} \text{ (магнітне поле)}$$

Закон повного струму: Введення поняття про магнітну проникність речовини дає змогу всі формули, добуті раніше для магнітного поля у вакуумі, застосувати і для магнітного поля в речовині, замінивши в них магнітну сталу μ_0 магнітною проникністю μ_a . Про таку можливість свідчить повна аналогія формул:

$$B_0 = \mu_0 H$$

$$B = \mu_a H$$

Ця обставина разом з поняттям про напруженість магнітного поля є основою для іншого формулювання закону повного струму.

У формулі:

$$\int_l B_l dl = \mu_0 \sum I$$

Замість μ_0 запишемо μ_a , а замість магнітної індукції підставимо рівнозначну величину:

$$B_l = H_l \mu_a, \text{ дістанемо:}$$

$$\boxed{\int H_l dl = \sum I}$$

Останнє рівняння виражає **закон повного струму**:

Циркуляція вектора напруженості магнітного поля по замкненому контуру дорівнює повному струмові, що пронизує поверхню, обмежену цим контуром.

У тих випадках, коли напруженість магнітного поля має однакове значення по всьому контуру, а вибраний контур збігається з лінією магнітної індукції рівняння (192) має простіший вигляд:

$$Hl = \sum I$$

а для котушок:

$$Hl = IN$$

Якщо контур містить кілька ділянок з різними значеннями напруженості поля (H_1, H_2, \dots, H_n) , але в межах кожної ділянки напруженість не змінюється, то можна записати так:

$$\sum_1^n H_n l_n = \sum_1^n I_n N_n$$

де n – номер ділянки контуру.

У такому виразі закон повного струму нагадує другий закон Кірхгофа і застосовується при розрахунку магнітних кіл.

Повний струм – це алгебраїчна сума струмів, які проникають в поверхню, обмежену замкнутим контуром. За законом повного струму сила намагнічення (НС) F_m вздовж замкнутого контуру дорівнює повному струмові:

1. Напруженість (А/м) магнітного поля в точці, яка розміщена на відстані R від прямолінійного прямокутника, $H = I / (2\pi R)$.

Магнітна індукція $B = \mu_0 \mu \frac{I}{2\pi R}$

2. Напруженість в середині провідника в точці, яка знаходиться від осі на відстані a $H = \frac{I}{2\pi a^2}$. Якщо $a = R$, то напруженість на поверхні такого провідника $H = I / (2\pi R)$, Де R – радіус циліндричного провідника, м.

3. Напруженість магнітного поля в центрі кільцевого провідника

$$H = I / (2R) = I / d, \text{ Де } R - \text{ радіус кільця, м.}$$

4. Напруженість магнітного поля в середині кільцевої котушки

$$H = I w / (2\pi R_x), \text{ де } R_x - \text{ радіус від центру кільцевої котушки до}$$

точки, яку ми шукаємо. Магнітна індукція $B = \mu_0 \mu H = \mu_0 \mu \frac{I_w}{2\pi R_x}$

5. Напруженість магнітного поля на середній магнітній лінії кільцевої (тороїдальної) котушки $H = I_w / l$, Де I – струм в обмотці котушки, A ; w – число витків котушки; l – довжина середньої магнітної лінії котушки. Магнітна індукція $B = \mu_a H = \mu_a \frac{I_w}{l}$. Магнітний потік $\Phi = BS = \mu_a$. Де S – площа поперечного перерізу котушки.

6. Напруженість магнітного поля на вісі циліндричної котушки в будь – якій її точці $H = \frac{I_w}{2l} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2)$.

Тестові питання для захисту лабораторної роботи: “Визначення питомого заряду електрона методом магнетрона”

1. Сила Лоренца:

а) $\vec{F} = \vec{B} \cdot \vec{q} \cdot \vec{v} \cdot \sin \alpha$;

б) $F = \frac{q^2}{2\epsilon_0 S}$;

в) $\vec{F} = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$.

2. Чи виконує роботу Сила Лоренца?

а) Так;

б) Ні;

в) Правильної відповіді немає.

3. Рух електрона в електричному і магнітному полях:

а) відбувається у площині, яка перпендикулярна магнітному полю;

б) відбувається у площині, яка паралельна магнітному полю;

в) відбувається у площині, яка паралельна провіднику.

4. Фізичний зміст величини критичного поля $B_{кр}$:

а) при збільшенні магнітного поля траєкторія змінюється настільки, що стає дотичною до аноду;

б) при збільшенні магнітного поля траєкторія змінюється настільки, що стає дотичною до катоду;

в) при збільшенні електричного поля траєкторія змінюється настільки, що стає дотичною до аноду.

5.Закон повного струму:

$$\text{а) } U_{\text{м}} = \mu\mu_0 \sum_{k=1}^n I_k ;$$

$$\text{б) } U_{\text{м}} = \mu\mu_0 \sum_{k=1}^n R_k ;$$

$$\text{в) } I_{\text{м}} = \mu\mu_0 \sum_{k=1}^n I_k .$$

6.Сила Ампера:

$$\text{а) } \left| \vec{F}_A \right| = \frac{q^2}{2\epsilon_0 S} ;$$

$$\text{б) } F_A = q \cdot \vec{B} \cdot \vec{I} \cdot \cos\alpha ;$$

$$\text{в) } \vec{F}_A = \vec{B} \cdot \vec{I} \cdot l \cdot \sin\alpha .$$

7.Закон Біо – Савара – Лапласа:

$$\text{а) } B = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I \cdot \sin\alpha}{r^2} \cdot l ;$$

$$\text{б) } R = \rho \cdot \frac{l}{S} ;$$

$$\text{в) } C_v = \frac{i}{2} \cdot \frac{R}{M} .$$

8.Питомий заряд:

$$\text{а) } \frac{e}{m} = \frac{v}{B \cdot R} ;$$

$$\text{б) } \frac{e}{m} = \frac{v \cdot B}{R} ;$$

$$\text{в) } \frac{e}{m} = \frac{B}{v \cdot R} .$$

9.Напруженість магнітного поля:

$$\text{а) } dH = \frac{I \cdot dl \cdot \sin\alpha}{4\pi r^2} ;$$

$$\text{б) } dH = \frac{B \cdot dl \cdot \sin\alpha}{4\pi r^2} ;$$

$$\text{в) } dH = \frac{4\pi r^2}{I \cdot dl \cdot \sin\alpha} .$$

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4

«Фізичні параметри біполярного транзистора».

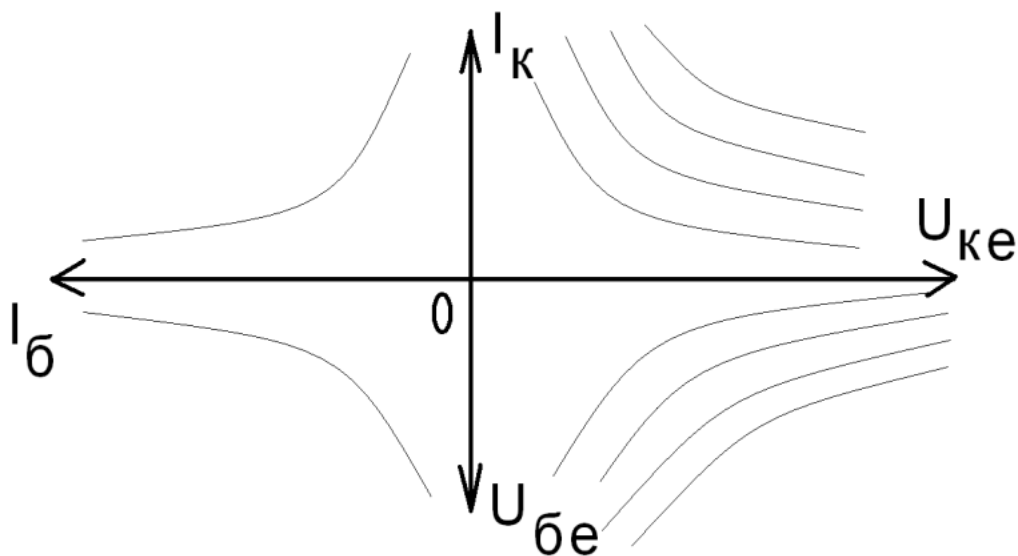
Мета роботи. Вивчити будову та принцип дії біполярного транзистора, зняти вхідні та вихідні статичні характеристики $p-n-p$ транзистора.

Прилади та обладнання. Два джерела живлення постійної напруги 0 - 15 В, що регулюються, вольтметром з межею 0,5 В, мікро амперметр з межами 50 та 250 мкА та міліамперметр на 10 та 50 мА, транзистор $p-n-p$ структури типу МП-20 А. дільник напруги.

Опис експериментальної установки. Схема для вимірювання вольт амперних характеристик транзистора представлена на рис.6. дивись методичні рекомендації

Порядок виконання роботи.

1. Зняти залежність $I_k (U_{ке})$ при $I_b = \text{const}$, I_b встановити 20, 50, 100, 120 мкА.
2. Зняти залежність $U_{бе} (U_{ке})$ при $I_b = \text{const}$. Провести вимірювання при струмах бази, вказаних у п. 1.
3. На основі отриманих сімейств характеристик побудувати графіки $I_k (I_b)$ і $I_b (U_{бе})$.
4. Побудувати характеристичні криві у чотирьох квадрантах.



Фізичні параметри біполярного транзистора

[illegible]

Контрольні питання

1. Що називається напівпровідниками ?
2. Особливості n та p провідності.
3. Будова транзистора та принцип роботи.

4. Для чого використовуються транзистори?

Додаткові теоретичні відомості

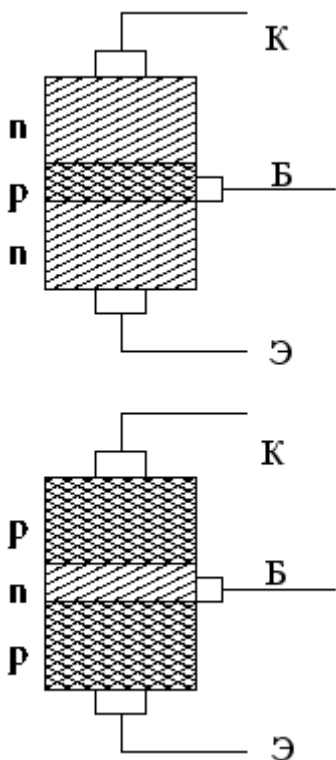
Напівпровідник — матеріал, електропровідність якого має проміжне значення між провідностями провідника та діелектрика. Відрізняються від провідників сильною залежністю питомої провідності від концентрації домішок, температури і різних видів випромінювання. Основною властивістю цих матеріалів є збільшення електричної провідності з ростом температури. Напівпровідниками є речовини, ширина забороненої зони яких складає порядку декількох електрон вольт (eV). Наприклад, алмаз можна віднести до широкозонних напівпровідників, а арсенід індію — до вузькозонних. До числа напівпровідників належать багато простих речовин хімічних елементів (германій, кремній, селен, телур, арсен та інші), величезна кількість сплавів і хімічних сполук (арсенід галію та ін.).

В **напівпровіднику р-типу** концентрація дірок набагато перевищує концентрацію електронів. В напівпровіднику n-типу концентрація електронів набагато перевищує концентрацію дірок. Якщо між двома такими напівпровідниками встановити контакт, то виникне дифузійний струм — носії заряду, хаотично рухаючись перетікатимуть із тієї області, де їх більше у ту область, де їх менше. При такій дифузії електрони та дірки переносять із собою заряд. Як наслідок, область на границі стане зарядженою. Та область у напівпровіднику р-типу, яка примикає до границі розділу, отримає додатковий негативний заряд, принесений електронами, а погранична область в напівпровіднику n-типу отримає позитивний заряд, принесений дірками. Таким чином, границя розділу буде оточена двома областями просторового заряду протилежного знаку. Електричне поле, яке виникає внаслідок утворення областей просторового заряду, спричиняє дрейфовий струм у напрямку протилежному дифузійному струму. Врешті-решт, між дифузійним і дрейфовим струмами встановлюється динамічна рівновага і перетікання зарядів припиняється. Якщо прикласти зовнішню напругу таким чином, щоб створене нею електричне поле було

направленим в протилежному напрямку до напрямку електричного поля між областями просторового заряду, то динамічна рівновага порушується, і дифузійний струм переважатиме дрейфовий струм, швидко наростаючи з підвищенням напруги. Таке під'єднання напруги до р-п переходу називається прямим зміщенням.

Якщо ж зовнішня напруга прикладена так, що створене нею поле є такого ж напрямку що і поле між областями просторового заряду, то це призводить лише до збільшення областей просторового заряду, й струм через р-п перехід не проходить. Таке під'єднання напруги до р-п переходу називається зворотним зміщенням. На властивостях р-п переходів ґрунтується робота численних напівпровідникових приладів: діодів, транзисторів, сонячних елементів, світлодіодів тощо.

Транзистор — напівпровідниковий елемент електронної техніки, який дозволяє керувати струмом, що протікає через нього, за допомогою прикладеної до додаткового електрода напруги.



Транзистори є основними елементами сучасної електроніки. Зазвичай вони застосовуються в підсилювачах і логічних електронних схемах. У мікросхемах в єдиний функціональний блок об'єднані тисячі й мільйони окремих транзисторів. За будовою та принципом дії транзистори поділяють на два великі класи: біполярні транзистори й польові транзистори. До кожного з цих класів входять численні типи транзисторів, що відрізняються за будовою і характеристиками. В біполярному транзисторі носії заряду рухаються від емітера через тонку базу до колектора. База відділена від емітера й колектора р-п переходами. Струм протікає через транзистор лише тоді, коли носії заряду інjektуються з емітера в базу через р-п перехід. В базі вони є неосновними носіями заряду й легко проникають через інший р-п перехід між базою й колектором, прискорюючись при цьому. В самій базі носії заряду рухаються за рахунок дифузійного

механізму, тож база повинна бути досить тонкою. Управління струмом між емітером і колектором здійснюється зміною напруги між базою і емітером, від якої залежать умови інжекції носіїв заряду в базу. В польовому транзисторі струм протікає від витоку до стоку через канал під затвором. Канал існує в легованому напівпровіднику в проміжку між затвором і нелегованою підкладкою, в якій немає носіїв заряду, й вона не може проводити струм. Безпосередньо під затвором існує область збіднення, в якій теж немає носіїв заряду завдяки утворенню між легованим напівпровідником і металевим затвором контакту Шотткі. Таким чином ширина каналу обмежена простором між підкладкою та областю збіднення. Прикладена до затвору напруга збільшує чи зменшує ширину області збіднення, а тим самим ширину каналу, контролюючи струм. Корпуси транзисторів виготовляються з металу, кераміки або пластику. Для транзисторів великої потужності необхідно додаткове охолодження.

Транзистори монтуються на друкованих платах за технологією «через отвір», або за технологією поверхневого монтажу. При технології «через отвір», виводи транзисторів вставляються в попередньо просвердлені в платі отвори. Корпуси транзисторів стандартизовані, але послідовність виводів ні, вона залежить від виробника. Транзистор має два основні застосування: у якості підсилювачі у якості перемикача.

Підсилювальні властивості транзистора зв'язані з його здатністю контролювати великий струм між двома електродами за допомогою малого струму між двома іншими електродами. Таким чином малі зміни величини сигналу в одному електричному колі можуть відтворюватися з більшою амплітудою в іншому колі.

Використання транзистора у якості перемикача пов'язане з тим, що приклавши відповідну напругу до одного з його виводів, можна зменшити практично до нуля струм між двома іншими виводами, що називають запиранням транзистора. Цю властивість використовують для побудови логічних вентилів.

Транзистор має два основні застосування: у якості підсилювача і у якості перемикача.

Підсилювальні властивості транзистора зв'язані з його здатністю контролювати великий струм між двома електродами за допомогою малого струму між двома іншими електродами. Таким чином малі зміни величини сигналу в одному електричному колі можуть відтворюватися з більшою амплітудою в іншому колі.

Використання транзистора у якості перемикача пов'язане з тим, що приклавши відповідну напругу до одного з його виводів, можна зменшити практично до нуля струм між двома іншими виводами, що називають запиранням транзистора. Цю властивість використовують для побудови логічних вентилів.

Тестові питання для захисту лабораторної роботи:

“Фізичні параметри біполярного транзистора”

1. Що називається напівпровідниками?
 - а) речовини, які при зміні умов не змінюють свої властивості;
 - б) речовини, які не проводять змінний струм;
 - в) речовини, які при одних умовах проявляють властивості діелектриків, а при зміні умов (нагрівання, освітлення) переходять в ранг провідників.
2. Як, в залежності від домішок, поділяються напівпровідники:
 - а) донорні та політропні;
 - б) акцепторні та політропні;
 - в) донорні та акцепторні.
3. Чому дорівнює коефіцієнт посилення по напрузі в транзисторі?
 - а) $K_H = \frac{\Delta U_K}{\Delta U_E} = 1$;
 - б) $K_H = \frac{\Delta U_K}{\Delta U_E} \gg 1$;
 - в) $K_H = \frac{\Delta U_K}{\Delta U_E} \ll 1$.

Якого типу бувають напівпровідники?

- а) р-типу та г-типу;
- б) n-типу та г-типу;
- в) р-типу та n-типу.

4. Що називається біполярними транзисторами?

а) діелектрики з двома або декількома взаємодіючими електричними р-n переходами та трьома або більше виводами, посилюючі властивості яких зумовлені явищами інжекції та екстракції неосновних носіїв заряду;

б) провідники з двома або декількома взаємодіючими електричними р-n переходами та трьома або більше виводами, посилюючі властивості яких зумовлені явищами інжекції та екстракції неосновних носіїв заряду;

в) напівпровідникові прилади з двома взаємодіючими електричними р-n переходами та трьома або більше виводами, посилюючі властивості яких зумовлені явищами інжекції та екстракції неосновних носіїв заряду.

5. Що називається вхідною статистичною характеристикою транзистора?

а) залежність струму колектора I_k від напруги $U_{кб}$ при постійному значенні вхідного струму $I_б$;

б) залежність напруги $U_{кб}$ від струму колектора I_k при постійному значенні вхідного струму $I_б$;

в) залежність вхідного струму $I_б$ від струму колектора I_k при постійному значенні напруги $U_{кб}$.

6. З якою метою використовуються транзистори?

- а) як посилювачі напруги;
- б) як посилювачі сили струму;
- в) як посилювачі опору.

7. Що називається електронно-дірковим переходом?

- а) напівпровідник n-типу;
- б) місце спаю двох напівпровідників різного типу;
- в) напівпровідник р-n типу.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5

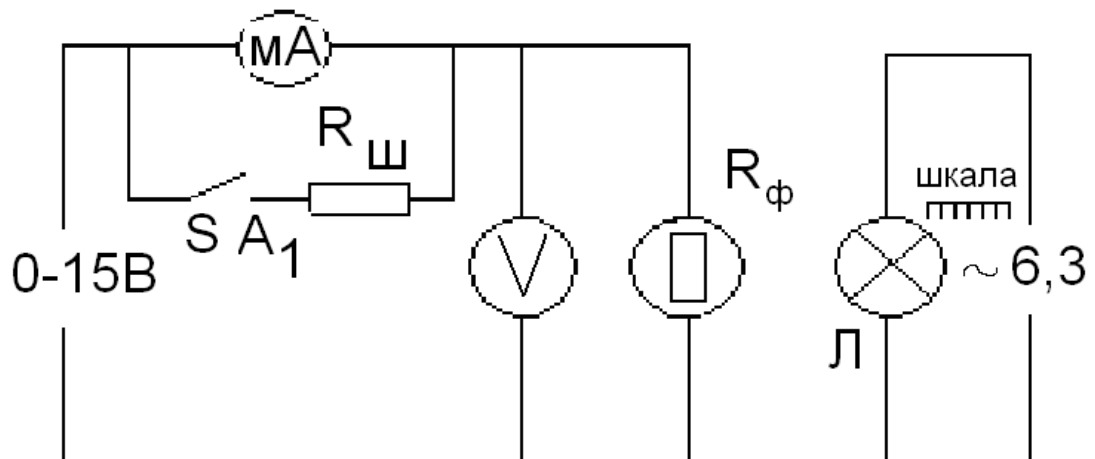
«Внутрішній фотоефект у напівпровідниках».

Мета роботи: експериментально встановити залежність опору напівпровідника від величини падаючого на нього потоку електромагнітного випромінювання та визначити чутливість фото резистора.

Прилади та обладнання: напівпровідниковий фото резистор ФСД-Г2, джерело світла (лампа), мікроамперметр та вольтметр постійного струму, джерело, що регулюється, постійної напруги (0-15В), джерело напруги (6,3В).

Методика експерименту.

Схема лабораторної установки показана на рис.1.



Світло від лампочки накаливання Л падає на фото резистор, змінюючи його опір. За допомогою вольтметра вимірюється напруга на фото резисторі, яка може змінюватись від 0 до 15В. Мікроамперметр вимірює силу струму, що проходить через фото резистор. При збільшенні падаючого світлового потоку опір шунта $R_{ш}$ підключається тумблером SA1 і максимальний струм, що вимірюється становить $I_{max}=5$ мА. При відключенні $I_{max}=I$ мА. Падаючий світловий потік Φ_p можна зменшувати, збільшуючи відстань від лампи до фото резистора. Його величина розраховується

$$\Phi_n = \frac{I \cdot S}{r} \cos \alpha ,$$

де I – сила світла лампи, $S=28 \text{ mm}^2$ – площа світлочутливого шару фото резистору, $\alpha=0$ – кут між напрямком світлового потоку та нормальною до світлочутливої поверхні, r – відстань між лампами до фото резистора визначається по шкалі.

Можна визначити величину падаючого світлового потоку

$$\Phi_n = \frac{I \cdot S}{r^2} \cdot \cos \alpha = \frac{0,43 \cdot 28 \cdot 10^{-6}}{r^2} = 12 \cdot 10^{-6} \frac{1}{r^2}$$

Отже, падаючий світловий потік змінюється обернено пропорційно квадрату відстані к від фото резистора до лампи накаливання.

Порядок виконання роботи.

1. Встановити вимірювання сили струму $I_{\max}=5\text{mA}$. Включити живлення фото резистора та лампи, встановити напругу 10 В. Визначити силу струму при мінімальній відстані r . Збільшуючи r через 1 см зняти залежність I (Φ_n) (при $U = \text{const}$) та побудувати графіки залежності $I=f(\Phi_n)$.

Таблиця 1

№	$r(\text{m})$	$I(\text{A})$	$U(\text{B})$	R_{ϕ}	Φ_n
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					

2. Обчислити опір фото резистора R_{ϕ} ($R_{\phi}=U/I_{\phi}$). для всіх значень сили струму та побудувати графік залежності $R_{\phi}=f(\Phi_n)$

3. установити лампу біля фото резистора ($r=1$ см). Змінюючи вхідну напругу через 1 В, зняти залежність $I(U)$ при $\Phi = \text{const}$ (табл.. 2). та побудувати графік залежності $I=f(U)$

Таблиця 2

№	$r(\text{m})$	$U(\text{В})$	$I(\text{А})$
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			

Контрольні питання.

1. Що називається фотоефектом?
2. Рівняння Планка та Енштейна
3. Як залежить опір від світлового потоку?
4. Від чого залежить сила струму фото резистора?
5. Де застосовуються фоторезистори?

Додаткові теоретичні відомості

Фотоефект - явище, «звільнення» електронів твердого тіла від зв'язків усередині атома під дією електромагнітного випромінювання.

Електрони, що вилітають із речовини при зовнішньому фотоефекті, називаються "фотоелектронами", а електричний струм, який утворюється ними при упорядкованому русі у зовнішньому електричному полі, називається "фотострумом".

Види фотоефекту:

1) **зовнішній фотоефект** (фотоелектронна емісія) - випромінювання електронів з поверхні твердого тела під дією

світла, гамма - випромінювання і т. і. (відкритий Г. Герцем у 1887, пояснений Ейнштейном);

2) **внутрішній фотоефект** – перерозподіл електронів за енергетичними станами в твердих та рідких напівпровідниках та діелектриках, який спричиняється світлом. Він проявляється у зміні концентрації носіїв струму у середовищі і призводить до виникнення фотопровідності;

3) **вентильний фотоефект** - збудження світлом ЕРС на межі поділу метал - напівпровідник або між різнорідними напівпровідниками. При вентильному фотоефекті фотоелектрони виходять через поверхню поділу з одного тіла в інше.

Теоретичне пояснення явища фотоефекта дав Альберт Ейнштейн, за що отримав Нобелівську премію. Ейнштейн використав гіпотезу Макса Планка про те, що світло випромінюється порціями (квантами) із енергією, пропорційною частоті. Припустивши, що світло і поглинається такими ж порціями, він зміг пояснити залежність швидкості вибитих електронів від довжини хвилі опромінення.

Квантова природа світла визначає світловий потік фотонів (квантів). Кожен фотон має масу, імпульс і дискретну енергію тільки при швидкості світла.

Енергія фотона по Планку визначається так званою формулою Планка:

Рівняння Планка має вигляд: $E_{\phi} = h\nu$

h - стала Планка

ν - частота світла

Енергію фотона речовина повністю поглинає або повністю випромінюють. Ця величина неділима. **Енергія фотона по Ейнштейну:**

$$E_{\phi} = m_{\phi} c^2$$

$$h\nu = m_{\phi} c^2$$

m_{ϕ} – це маса фотона, що визначається формулою: $m_{\phi} = \frac{h\nu}{c^2}$

$$\lambda = \frac{1}{T}$$

$$\lambda = cT = c \frac{1}{\nu}$$

ν – частота світла, визначається за формолою: $\nu = \frac{c}{\lambda}$

Імпульс фотона можна визначити:

$$p_{\phi} = m_{\phi}c = \frac{h\nu}{c^2}c = \frac{h\nu}{c}$$

$$p_{\phi} = \frac{h\nu}{c} \text{ - імпульс фотона.}$$

$$h\nu = \frac{mv^2}{2} + A,$$

де ν — частота світла,

h — стала Планка,

m — маса електрона,

v — його швидкість,

A — робота виходу.

Це рівняння називається **рівнянням Ейнштейна**. Робота Ейнштейна мала велике значення для розвитку ідей квантової механіки взагалі та квантової оптики зокрема.

Для виконання повного фотоефекту енергій фотона $h\nu$ поглинаються електроном, що дає йому можливість виконати роботу виходу за межі речовини та надати йому енергії необхідної для проходження від катода до анода.

Червона границя фотоефекту. Мінімальна умова при якій може відбутися фотоефект: $h\nu = A_{\text{вих}}$

$\nu_2 = \frac{A_{\text{вих}}}{h}$ умова, при якій енергії фотона достатньо, щоб виконати роботу виходу.

Причина фотопровідності - збільшення концентрації носіїв заряду - електронів у зоні провідності і дірок у валентній зоні. Світлочутливий шар напівпровідникового матеріалу в таких опорах поміщений між двома струмопровідними електродами. Під впливом світлового потоку електричний опір шару змінюється. У залежності від застосовуваного шару напівпровідникового матеріалу фотоопору підрозділяються на сірко свинцеве, сірко кадмієве, сірковістмутове і полікристалічні селено-кадмієві. При певному освітленні опір фотоелемента зменшується, а, отже, сила

струму в колі зростає, досягаючи значення, достатнього для роботи якого-небудь пристрою (схематично показано у вигляді деякого опору навантаження).

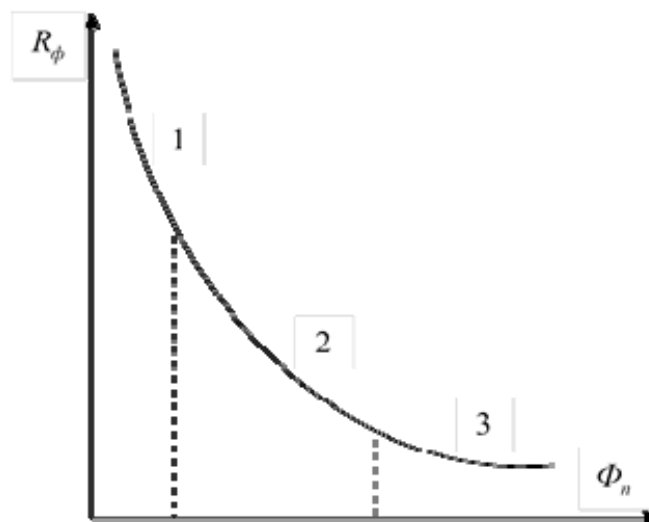
Завдяки простоті і надійності, високій чутливості і малим розмірам фоторезистори знаходять широке застосування в приладобудуванні і технології виробництва. Їх використовують як фотоелектричні перетворювачі вимірювальних пристроїв, фотоелектричні реле, регуляторів і т.п. Фотоелектричні реле на основі фоторезисторів використовуються для захисту від травмування рук робітників, обслуговуючих штампувальні преси з електропневматичним управлінням, в охоронних пристроях для захисту ділянок території від проникнення сторонніх осіб, для контролю розмірів, кольору і якості поверхні різних виробів, для лічби деталей на конвеєрі і т.п.

Оскільки експериментально квантовий вихід визначити складно, інтегральну чутливість визначають як відношення величини відносної зміни опору фоторезистора до приросту потоку енергії випромінювання, що викликав цю зміну:

$$\eta = \frac{\Delta R_{\phi}}{R_{\phi} \cdot \Delta \Phi_n}$$

де R_{ϕ} - опір чутливого шару фоторезистора під час опромінювання його потоком Φ_n (визначається для середнього значення потоку в проміжку $\Delta \Phi_n$).

На малюнку показано залежність $R_{\phi}(\Phi_n)$:



Оскільки залежність R_f від Φ_f нелінійна, то інтегральну чутливість η фоторезистора, як правило, визначають на різних ділянках залежності, наприклад, на ділянках 1, 2, 3.

Фоторезисторами називають напівпровідникові прилади, провідність яких змінюється під дією світла. Основним елементом фоторезистора є у першому випадку монокристал, а в другому - тонка плівка напівпровідникового матеріалу.

Якщо фоторезистор включений послідовно з джерелом напруги і не освітлений, то в його колі буде протікати темної струм

$I_m = E / (R_m + R_n)$, де E - е.р.с. джерела живлення; R_f -величина електричного опору фоторезистора в темряві, звана темного опору; R_n -опір навантаження.

При висвітленні фоторезистора енергія фотонів витрачається на перекид електронів в зону провідності. Кількість вільних електронно-діркових пар зростає, опір фоторезистора падає і через нього тече світловий струм:

$$I_c = E / (R_c + R_n).$$

Різниця між світловим і темновим струмом дає значення струму I_ϕ , що отримав назву первинного фотоструму провідності

$$I_\phi = I_c - I_m.$$

Коли променистий потік малий, первинний фотострум провідності практично безінерційна і змінюється прямо пропорційно величині променистого потоку, що падає на фоторезистор. У міру зростання величини променистого потоку збільшується число електронів провідності. Рухаючись всередині речовини, електрони зіштовхуються з атомами, іонізують їх і створюють додатковий потік електричних зарядів, що отримав назву вторинного фотоструму провідності. Збільшення числа іонізованих атомів гальмує рух електронів провідності. У результаті цієї зміни фотоструму запізнюються у часі щодо змін світлового потоку, що визначає деяку інерційність фоторезистора.

Завдяки простоті і надійності, високій чутливості і малим розмірам фоторезистори знаходять широке застосування в приладобудуванні і технології виробництва. Їх використовують як

фотоелектричні перетворювачі вимірювальних пристроїв, фотоелектричні реле, регуляторів і т.п.

Тестові питання для захисту лабораторної роботи:

“Внутрішній фотоефект у напівпровідниках”

1. Що називається фотоефектом?

а) виривання електронів з поверхні металу під дією рентгенівських променів;

б) виривання електронів з поверхні металу під дією електричного струму ;

в) виривання електронів з поверхні металу під дією світла.

2. Енергія фотона по Планку:

а) $E = h \cdot \nu$;

б) $E = m \cdot c^2$;

в) $E = \frac{m\nu^2}{2}$.

3. Як залежить опір від світлового потоку?

а) прямопропорційно;

б) оберненопропорційно;

в) не залежить.

4. Від чого залежить сила струму фоторезистора?

а) від світлого потоку Φ , відстані, кута падіння;

б) від світлого потоку Φ ;

в) від відстані та кута падіння.

5. Як застосовуються фоторезистори?

а) як вимірювачі напруги;

б) як індикатори;

в) як вимірювачі сили струму.

6. Рівняння Ейнштейна для фотоефекту:

а) $h\nu = A_{\text{вих}} + mgh$;

б) $h\nu = \frac{m\nu_e^2}{2}$;

в) $h\nu = A_{\text{вих}} + \frac{m\nu_e^2}{2}$.

7. Які бувають види фотоефекту:

- а) внутрішній ;
- б) зовнішній ;
- в) внутрішній та зовнішній .

8. Роботою виходу електрона з поверхні металу називається робота, яка необхідна для:

- а) розриву зв'язку з ядром;
- б) виділення кванта енергії;
- в) поглинання кванта енергії.

9. Що називається напівпровідниками?

- а) речовини, які не проводять змінний струм;
- б) речовини, які при одних умовах проявляють властивості діелектриків, а при зміні умов (нагрівання, освітлення) переходять в ранг провідників;

- в) речовини, які при зміні умов не змінюють свої властивості.

10. Необхідна умова існування внутрішнього фотоефекту?

- а) $h\nu \geq \Delta E$;
- б) $h\nu \leq \Delta E$;
- в) $h\nu = \Delta E$.

11. Як змінюється опір напівпровідників в залежості від температури:

- а) збільшується з підвищенням температури;
- б) зменшується з підвищенням температури;
- в) не залежить від температури.

12. Умова червоної межі:

- а) $\nu = \frac{h}{A_{\text{вих}}}$;
- б) $\nu = \frac{A_{\text{вих}}}{h}$;
- в) $\nu = \frac{m\nu_e^2}{h}$.

13. Що називається червоною межею фотоефекту?

- а) максимальна частота, при якій може відбуватися фотоефект;
- б) мінімальна частота, при якій може відбуватися фотоефект;
- в) частота, при якій не може відбуватися фотоефект.

14. Чи залежить швидкість фотоелектронів від інтенсивності випромінювання?

- а) так;
- б) ні;
- в) правильної відповіді немає.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6

«Зняття вольт-амперної характеристики напівпровідникового діоду»

Мета роботи: вивчення напівпровідників та їх властивостей; застосування напівпровідникових діодів.

Теоретична частина. Усі речовини за їх електропровідними властивостями поділяються на три групи: провідники, напівпровідники та ізолятори.

Провідники - це метали та їх сплави.

Ізолятори (діелектрики) - це мінерали, неорганічні аморфні тіла, синтетичні сполуки, полімери тощо.

Напівпровідники - це деякі хімічні елементи, окиси металів, хімічні сполуки.

В напівпровідниках можливі два механізми (типи) електропровідності: *електронний*, що здійснюється рухом електронів, звільнених з хімічних зв'язків і *дірковий*, обумовлений рухом дірок (вакансій хімічних зв'язків).

Напівпровідники, провідність яких зумовлена надлишковими електронами, називаються *електронними* або *напівпровідниками n - типу*.

Напівпровідники, провідність яких викликана наявністю дірок, називаються *дірковими* або *напівпровідниками p-типу*.

Розглянемо напівпровідник, що складається з двох частин, одна з яких має провідність **n** - типу, а друга **p**-типу (рис. 1). У **p**-області основними носіями є дірки, а в **n**-області - електрони. І **n** -, і **p**-області до утворення контакту між ними були, в цілому, електронеутральними. При утворенні контакту внаслідок дифузії та взаємного електричного притягання певна кількість вільних електронів **n**-області перейде в **p**-область, де є незайняті валентні

рівні (дірки). Електрони займуть частину цих рівнів поблизу контакту. Дірки, в свою чергу, дифундуватимуть з **p**-області в **n**-область, де будуть рекомбінувати з вільними електронами. Завдяки цим процесам концентрація вільних електронів і дірок поблизу контакту значно зменшиться.

Поряд з цим, **n**-область поблизу, контакту зарядиться позитивно, бо: по-перше, вона, втратила частину своїх вільних електронів; а по-друге, до неї перейшла частина дірок з **p**-області. Аналогічно, **p**-область поблизу контакту зарядиться негативно. Електричне поле, що виникне при цьому, перешкоджатиме подальшій дифузії носіїв заряду. В області контакту встановиться динамічна рівновага.

Таким чином, на межі контакту **n** - і **p**- напівпровідників виникає **p-n**-перехід (рис.2), який має великий опір, бо він збіднений на носії заряду. Шар, що перешкоджає дифузії носіїв заряду, називається запираючим- шаром. Його товщина залежить від концентрації носіїв заряду в областях напівпровідника.

Якщо до **p-n**-переходу прикласти різницю потенціалів у такому напрямі, як показано на рис. 3, тобто до **p**-області подати позитивний потенціал, а до **n**-області негативний, то під дією зовнішнього поля вільні носії заряду рухатимуться до **p-n**-переходу; концентрація їх на переході зросте і через напівпровідник піде значний струм.

Якщо ж різницю потенціалів прикласти в протилежному напрямі (рис. 4), то ширина **p-n**-переходу зросте, бо носії заряду будуть відходити від контактної області. У цьому випадку опір переходу буде великим, а струм у колі - незначним.

Напрямок, в якому **p-n**-перехід пропускає струм, називається прямим або напрямом провідності.

Протилежний напрям називають зворотнім або запірним.

Таким чином, прилади, в яких створено **p-n**-перехід, пропускають струм лише у прямому напрямі. У зворотному напрямі струм дуже малий. Такі прилади називають діодами і вони використовуються для випрямлення струмів в електро- і

радіотехніці. Промисловість випускає, в основному, кременеві і германієві точкові та площинні діоди.

Для діодів введені позначення, які складають з букв і цифр (наприклад Д7Ж): Д - означає тип приладу - діод; 7 - вказує тип приладу та його застосування, Ж – різновидність приладу.

Найважливіші параметри діодів такі:

1. Найбільше значення зворотної напруги $U_{зв}$, яка може бути прикладена до діода у зворотному напрямі.

2. Прямий струм $I_{пр}$ – величина максимального струму через діод при прямому ввімкненні.

3. Найбільше значення зворотного струму $I_{зв.макс}$ величина струму через діод у зворотному напрямі (коли до нього прикладено зворотну напругу).

4. Пробивна напруга $U_{проб.}$ - напруга на діоді, при якій відношення зміни напруги до зміни струму дорівнює нулю. Перевищення цього значення приводить до різкого збільшення зворотного струму і руйнування діода.

5. Найбільша амплітуда струму при перехідних процесах $I_{перех.макс.}$ - найбільше значення амплітуди струму через діод, яка не спричиняє його пошкодження протягом секунди.

6. Найбільша амплітуда випрямленого струму $I_{випр.макс.}$ – найбільше значення амплітуди струму через діод.

7. Прохідна ємність $C_{пр}$ - статична ємність між електродами діода. Основною характеристикою діода є вольт-амперна характеристика, яка показує залежність величини струму, що проходить через діод від величини прикладеної напруги.

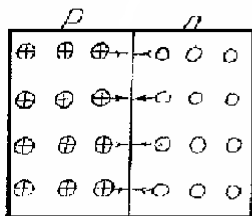


рис. 1

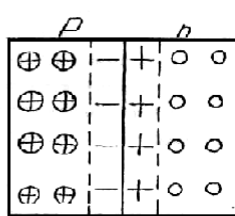


рис. 2

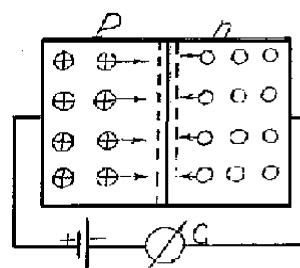


рис. 3

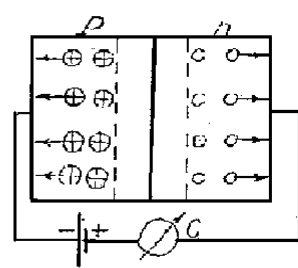
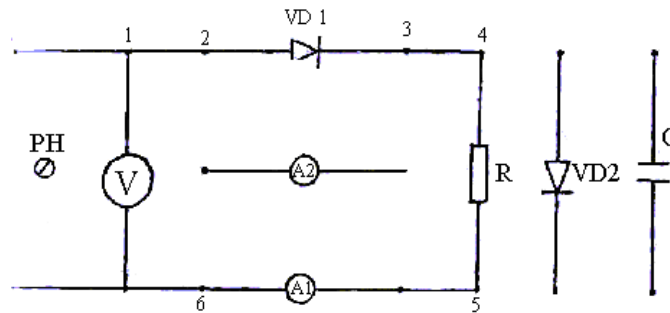


рис. 4



Опис лабораторної установки і методика дослідження

Схема установки для дослідження *p-n* переходу зображена на рис.5

Постійна напруга змінюється регулятором напруги РН від 0 до 8 В, а вимірюється вольтметром ($U_{\text{ном}}=10$ В). Міліамперметр A_1 ($I_{\text{ном}}=50$ мА) використовується в завданні 1 для вимірювання прямого струму *p-n* переходу, а мікроамперметр A_2 ($I_{\text{ном}}=100$ мкА) - в завданні 2 для вимірювання зворотного струму діода. У роботі досліджується *p-n* переходи світло діода VD1 і германієвого діода VD2. При проходженні прямого струму світло діод випромінює світло. У завданнях 1 і 2 досліджується його вольт-амперна характеристика при прямому і зворотному вмиканнях.

Виконання роботи

Завдання 1. Дослідження *p-n* переходу при прямому вмиканні діода.

1. Зібрати схему (рис.5). Під'єднати до клем (5) і (6) міліамперметр A_1 і з'єднати з клемами (1) і (2), а також (3) і (4). Регулятор напруги РН встановити в крайнє положення, обертаючи проти годинникової стрілки.

2. Включити живлення. Змінюючи напруги через 1 В (від 0 до 8 В) вимірювати силу струму в ланцюгу.

3. Результати вимірювань занести в таблицю №1. Відключити електроживлення.

4. Використовуючи отримані данні вирахувати напругу U_d на *p-n* переході за формулою: ,де U - вхідна напруга; $U_k = I_0 R$ - напруга на резисторі.

Результат занести до таблиці №1

Знайти прямий опір p - n переходу R_{np} для всіх значень вхідної напруги за формулою: $R_{i\partial} = \frac{U_{\partial}}{I_0}$

Результати занести до таблиці 1

№п.п.	U	I ₀	R	U _k	U _д	R _{np}
1.						
2.						
3.						
4.						
5.						
6.						
7.						
8.						

5. За отриманими даними побудувати графік залежності $I_0 = f(U_{\partial})$, $R_{np} = f(U_{\partial})$.

Завдання 2. Дослідження p - n переходу при зворотному включенні діода.

1. В схемі (рис.5) під'єднати до клем (5) і(6) мікроамперметр А₂ізмінивши напрям струму в p - n переході, для чого з'єднати провідниками клем (1) і(3); (2) і(4). РН встановити в нульовому положенні. Ввімкнути живлення, збільшуючи вхідну напругу через 1 В (від 0 до 8 В) вимірювати силу зворотного струму $I_{зв}$. Результати занести до таблиці №2. Вимкнути живлення. Розібрали схему.

1. Використовуючи отримані данні , знайти значення зворотного опору p - n переходу $R_{зв}$. для всіх значень вхідної напруги і занести до таблиці №2. Так як $R_{зв} \gg R$, то $R_{зв} \approx U / I_{зв}$ Таблиця 2

№ п.п.	U	I _{зв}	R _{зв}
1.			
2.			
3.			
4.			

3. Побудувати графік залежності $I_{зв} = f(U)$, $R_{зв} = f(U)$.

Контрольні питання

1. Поясніть механізм електронної провідності напівпровідника?
2. Поясніть механізм діркової провідності напівпровідника.
3. Що таке вольт-амперна характеристика діода?
4. Які конструктивні особливості точкових і площинних діодів?

Додаткові теоретичні відомості

Напівпровідники характеризуються як властивостями провідників, так і діелектриків. У напівпровідникових кристалах атоми встановлюють ковалентні зв'язки (тобто, один електрон в кристалі кремнію, як і алмазу, пов'язаний двома атомами), електронам необхідний рівень внутрішньої енергії для вивільнення з атома ($1,76 \cdot 10^{-19}$ Дж проти $11,2 \cdot 10^{-19}$ Дж, чим і характеризується відмінність між напівпровідниками і діелектриками). Ця енергія з'являється в них при підвищенні температури (наприклад, при кімнатній температурі рівень енергії теплового руху атомів дорівнює $0,4 \cdot 10^{-19}$ Дж), і окремі атоми отримують енергію для відриву електрона від атома. Із зростанням температури число вільних електронів і дірок збільшується, тому в напівпровіднику, не містить домішок, питомий опір зменшується. Умовно прийнято вважати напівпровідниками елементи з енергією зв'язку електронів менший ніж 1,5-2 еВ. Електронно-дірковий механізм провідності проявляється у власних (тобто без домішок) напівпровідників. Він називається власною електричною провідністю напівпровідників.

Під час розриву зв'язку між електроном і ядром з'являється вільне місце в електронній оболонці атома. Це обумовлює перехід електрона з іншого атома на атом з вільним місцем. На атом, звідки перейшов електрон, входить інший електрон з іншого атома і т. д. Це обумовлюється ковалентними зв'язками атомів. Таким чином, відбувається переміщення позитивного заряду без переміщення самого атома. Цей умовний позитивний заряд називають діркою. Зазвичай рухливість дірок у напівпровіднику нижче рухливості електронів. **Вольт-амперною характеристикою**, скорочено ВАХ

матеріалу чи пристрою називається залежність струму в ньому від прикладеної напруги.

Вольт-амперну характеристику можна визначити також, як залежність падіння напруги на пристрої від струму, що в ньому протікає.

Вольт-амперна характеристика зображується зазвичай у вигляді графіка, в якому напруга відкладається вздовж осі абсцис, а струм вздовж осі ординат. Для матеріалів вольт-амперна характеристика часто приводиться у вигляді залежності густини струму від напруженості прикладеного поля.

Діод являє собою двохелектродний напівпровідниковий прилад, який має один p - n -перехід. Один вивід (анод) підключений до області напівпровідника p -типу, а другий (катод) до області провідністю n -типу. При підключенні напруги додатної полярності до аноду, а від'ємної до катода перехід зміщується в прямому напрямку і діод відкривається. Через нього починає протікати електричний струм. При зміні полярності діод закривається і струм через нього не проходить.

Діоди поділяють на точкові і площинні. Точкові діоди мають p - n -перехід з малою товщиною і площиною, тому розраховані на малі струми і невеликі напруги, але завдяки малим розмірам переходу вони мають малу власну ємність, що дозволяє використовувати їх в широкому діапазоні частот. Плоскі діоди мають дуже велику площину і товщину p - n -переходу, що дозволяє їх застосовувати для кіл низьких частот при наявності значного струму і великої напруги.

Для багатьох матеріалів, зокрема для провідників і напівпровідників, вольт-амперна характеристика має лінійну ділянку при малих напругах. В цьому діапазоні прикладеної напруги справедливий закон Ома, який стверджує, що струм пропорційний напрузі. При виконанні закону Ома струм у пристрої протікає однаково в обидва боки, в залежності від полярності прикладеної напруги.

Проте така поведінка не має універсального характеру. Наприклад, струм у вакуумному діоді суттєво нелінійний навіть

при дуже малих напругах між анодом і катодом. Це явище зумовлене тим, що випромінені нагрітим катодом електрони створюють у просторі між анодом і катодом негативно-заряджену хмару, яка перешкоджає новим електронам покидати катод. У таких випадках говорять про виникнення області просторового заряду, і залежність струму від напруги описується законом Чайлда. Аналогічні області просторового заряду виникають також у діелектриках, провідність яких у дуже сильних електричних полях зумовлена інжектованими електронами.

Здебільшого струм зростає при зростанні прикладеної напруги. Але й це не є універсальним законом. Наприклад, пристрій, який називається резонансним тунельним діодом, пропускає лише електрони з певною визначеною енергією. Таких електронів мало й при малих напругах, і при великих напругах. Тому при збільшенні напруги струм через резонансний тунельний діод спочатку зростає, а потім, коли електрони мають надто велику енергію, падає. Ділянки ВАХ, на яких струм спадає із підвищенням напруги, називаються областями негативної диференційної провідності. Вони дуже цікаві для практичного використання, бо на них можна побудувати, наприклад, генератори автоколивань. Негативну диференційну провідність при високих напругах мають також деякі напівпровідники.

**Тестові питання для захисту лабораторної роботи:
“Зняття Вольт-Амперної характеристики напівпровідникового діоду”**

1. Провідність у напівпровідників:
 - а) електронна провідність;
 - б) йонна провідність;
 - в) діркова провідність.
2. Механізм діркової провідності напівпровідника:
 - а) обумовлений рухом дірок (вакансій хімічних зв'язків);
 - б) обумовлений рухом електронів;
 - в) обумовлений рухом заряджених частинок.

3. Вольт-амперна характеристика діоду:

- а) показує залежність величини струму, що проходить через діод, від напруги;
- б) показує залежність напруги, що проходить через діод, від величини струму;
- в) показує швидкість руху заряджених частинок.

4. Діоди:

- а) – прилади, в яких створено р-п-перехід, що пропускають струм лише в одному напрямку;
- б) – прилади, які пропускають струм;
- в) – прилади, в яких створено р-п-перехід, які не пропускають струм.

5. Напівпровідники:

- а) – це речовини, в яких валентні електрони зв'язані з атомом слабкими силами;
- б) – це речовини, розчини яких проводять електричний струм;
- в) – це струми, які мають однакову частоту і сталу різницю фаз.

6. Властивість р-п переходу напівпровідника:

- а) пропускати напругу в одному напрямку і не пропускати її в протилежному;
- б) пропускати напругу в обох напрямках;
- в) зовсім не пропускати напруги в жодному напрямку.

7. Р-п перехід:

- а) це границя, яка розділяє область з дірковою (р) і електронною (n) провідностями в одному кристалі;
- б) це червона границя фотоефекту;
- в) це процес, який відбувається без теплообміну з навколишнім середовищем.

8. Домішкова провідність напівпровідників:

- а) це провідність напівпровідників обумовлена домішками;
- б) це провідність обумовлена квазічастинками;
- в) це провідність обумовлена наявністю електронів.

9. Власна провідність напівпровідників:

- а) це впорядкований рух заряджених частинок;
- б) це створення електричного струму рухом рівної кількості негативно заряджених електронів і позитивно заряджених дірок;
- в) це сума кінетичних енергій руху частинок та потенціальної енергії їх взаємодії.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №7

«Дослідження залежності опору напівпровідників від температури».

Мета роботи: Дослідним шляхом встановити закон зміни опору напівпровідника при його нагріванні визначити ширину забороненої зони і концентрацію зарядів у напівпровіднику при різній температурі.

Прилади та матеріали: Експериментальна установка, яка має досліджуваний термоопір, термостат з нагрівачем і стабілізатор струму. Джерело постійної напруги ($U=16\text{В}$). Міліамперметр постійного струму ($I_{\text{max}}=200\text{мА}$). Цифровий вольтметр або мультиметр для вимірювання постійної напруги ($U_{\text{max}}=20\text{В}$).

Короткі теоретичні відомості: *Напівпровідники* - це речовини, які за своєю електропровідністю, мають проміжне місце між провідниками першого роду і діелектриками. Навідміну від металів вони мають від'ємний температурний коефіцієнт опору (в певних температурних інтервалах).

Основною відмінністю напівпровідників від металів є значна залежність їх провідності (опору) від зовнішніх факторів (освітленість, механічні деформації, опромінення рентгенівськими та радіоактивними променями, дія магнітного поля тощо). На величину електропровідності напівпровідників суттєво впливає наявність домішок. Величина питомого опору напівпровідників лежить в межах від 10^{-5} до $10^{-8}\text{Ом}\cdot\text{м}$.

До напівпровідників належать деякі хімічні елементи (кремній, германій, селен, бор, телур), а також окиси (CuO), сульфідів (CdS , PbS , ZnS), телуриди (HgTe , CdTe), фосфіди (GaP , InP , ZnP_2) тощо.

Існують напівпровідники із електронною та дірковою провідністю. У напівпровідниковій техніці використовуються напівпровідники, в яких носіями заряду є електрони хімічного зв'язку, вірніше їх відсутність, вони мають р-тип провідності і електрони провідності n-типу.

Приклади, дія яких ґрунтується на значній залежності опору напівпровідників від температури, називаються термісторами або термоопорами.

Термістори - об'ємні опори, що виготовляють з напівпровідникових матеріалів. Вони мають від'ємний коефіцієнт опору, який у багато разів перевищує температурний коефіцієнт опору металів. Термістори можуть бути найрізноманітніших розмірів і форми, а також мають різні термічні та електричні властивості, високу механічну міцність.

Залежність опору напівпровідників від температури у значних інтервалах описується виразом:

$$R = Ae^{\Delta E / 2kT} \quad (1)$$

де A - константа, K - стала Больцмана, E - енергія активації (висота енергетичного бар'єру).

Під *енергією активації* розуміють енергію, яку необхідно затратити, щоб перевести електрон із зв'язаного стану у вільний.

Зменшення опору з ростом температури пояснюється тим, що при збільшенні температури збільшується число носіїв заряду, тобто збільшується концентрація вільних електронів. Графік залежності опору напівпровідників від температури в координатах $\ln R = f(1/T)$ являє собою пряму лінію, тангенс нахилу якої до осі $1/T$ (вісь Ox) дорівнює:

$$\text{tg} \varphi = \Delta E / 2k \quad (2)$$

Звідси *енергія активації* визначається як

$$E = 2k \text{tg} \varphi \quad (3)$$

Концентрація електронів в зоні провідності напівпровідника змінюється від температури по експотенціальному закону

$$n = n_0 e^{\frac{\Delta E}{2kT}}, \quad (4)$$

де n -концентрація електронів провідності при температурі T ,

n_0 -концентрація електронів провідності при $T \rightarrow \infty$

$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К- постійна Больцмана, ΔE -ширина забороненої зони

Так як електропровідність пропорційна концентрації електронів провідності, то залежність питомої електропровідності γ_0 напівпровідників від температури виражається формулою

$$\gamma = \gamma_0 e^{\frac{\Delta E}{2kT}}, \quad (5)$$

де γ_0 - питома електропровідність при $T \rightarrow \infty$

Опір напівпровідника з підвищенням температури зменшується по закону

$$R = R_0 e^{\frac{\Delta E}{2kT}}, \quad (6)$$

де R_0 -опір при $T \rightarrow \infty$

Цю залежність можна використовувати для визначення ширини забороненої зони напівпровідника ΔE .

Прологарифмувати цей вираз по основі e , отримаємо

$$\ln R = \ln R_0 + E / 2kT \quad (7)$$

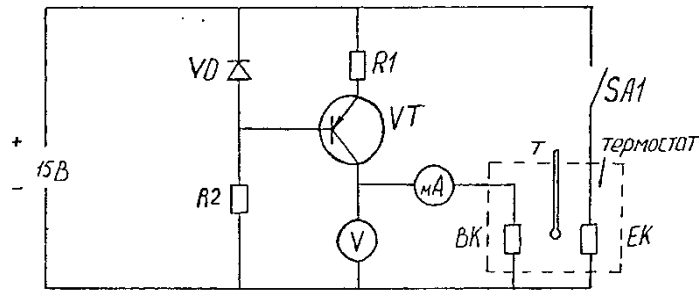
Виразимо k в електрон-вольтах ($1\text{eV}=1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж) $k=0,86 \cdot 10^{-4}\text{eV/K}$

Знайдемо значення $1/2k$; $1/2k=5,8 \cdot 10^{-3}\text{K/eV}$ і підставимо його в (4);

$$\ln R = \ln R_0 + \frac{5,8 \cdot 10^{-3}}{T} \Delta E \quad (8)$$

Якщо побудувати графік залежності $\ln R = f(5,8 \cdot 10^{-3} / T)$, то він буде представляти собою пряму лінію. Тангенс кута нахилу якої до вісі абсцис рівний ширині зображеної зони ΔE , вираженою в електрон-вольтах:

Схема експериментальної установки



Германієвий напівпровідник ВК поміщений в термостат з нагрівачем ЕК, який підключається до джерела живлення вимикачем SA1.

Величина струму в колі ВК піддержується незмінним стабілізатором при зміні опору ВК, визваним його нагріванням, стабілізатор струму складається із стабілізатора VD), транзистора VT, транзисторів R₁ і R₂.

Для підключення цифрового вольтметра є клеми.

Порядок виконання роботи

- 1). Підключити до експериментальної установки (рис.1) цифровий вольтметр ($U_{\max}=20V$).
- 2) Увімкнути живлення тумблером SA1: Значення початкової температури і напруги на термоопорі ВК занести до таб.1.

Сила струму у колі постійна $I = 16 \text{ мА}$.

Таблиця №1

t, °C	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
I, мА	16									
U ₁ , В										
U ₂ , В										
U _{ср.} В										
R, Ом										

- 3) Визначити і занести до таб.1 значення падіння напруги U₁ і U₂ на термоопорі при зміні температури через кожні 5 °C. Провести виміри U як при нагріванні термоопору (U₁), так і при його охолодженні (U₂).

Обробка результатів:

1. По даним таб.1 визначити середнє значення падіння напруги $U_{cp} = (U_1 + U_2)/2$ на термопарі і його опір $R = U_{cp} / I$ для всіх значень температури.

Результати занести до таб. 1.

3. Визначити значення $5,8 \cdot 10^{-3} / T$ і $\ln R$ для всіх температур. Результати занести до табл. 2.

Таблиця № 2

T, K									
$\frac{5,8 \cdot 10^{-3}}{T}, K^{-1}$									
LnR									

По даним табл.2 побудувати графік залежності $\ln R = f(5,8 \cdot 10^{-3} / T)$

Контрольні питання

1. Які речовини належать до напівпровідників ?
2. Пояснити власну провідність напівпровідників.
3. Які типи провідності є у напівпровідниках ?
4. Пояснити домішкову провідність напівпровідників (донорна, акцепторна).
5. Як виникає діркова та електрона домішкова провідність напівпровідників?
6. Що називається енергією, активації?
7. Як залежить опір напівпровідників від температури і освітлення?
8. Що таке терморезистори і яке їх застосування ?

Додаткові теоретичні відомості

Напівпровідники, як це й виходить з їхньої назви, за своєю провідністю посідають проміжне місце між провідниками і діелектриками. Якщо значення питомого електричного опору провідників становить приблизно 10^{-8} Ом м, а діелектриків — від 10^{12} до 10^{20} Ом м, то

напівпровідників — від 10^{-1} до 10^7 Ом м. З точки зору мікроструктури речовини це означає, що концентрація вільних заряджених частинок у напівпровідниках набагато менша, ніж у провідниках, і набагато більша, ніж у діелектриках.

У процесі вивчення фізичних властивостей напівпровідників, зокрема провідності, виявилось, що в напівпровідників залежність провідності від зовнішніх чинників значно відрізняється від тієї, що спостерігається в металів.

По-перше, якщо опір металів із підвищенням температури збільшується, то опір напівпровідників, навпаки, зменшується. По-друге, опір напівпровідників падає зі збільшенням освітленості, тоді як опір металів від освітленості практично не залежить. По-третє, якщо за наявності домішок метали гірше проводять струм, то введення домішок у напівпровідники, навпаки, різко зменшує опір останніх. Існують і інші, не менш важливі й цікаві відмінності, але про них ви дізнаєтеся пізніше.

Механізм власної провідності напівпровідників. У напівпровідниковому кристалі серед валентних електронів обов'язково є електрони, кінетична енергія яких настільки велика, що вони можуть залишити зв'язок і стати вільними.

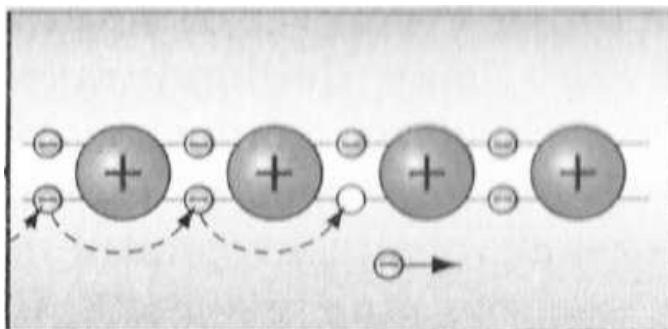
Якщо напівпровідниковий кристал помістити в електричне поле, то вільні електрони почнуть рухатися до позитивного полюса джерела струму і в напівпровіднику виникне електричний струм. Зі збільшенням температури середня кінетична енергія електронів збільшується, у результаті дедалі більше електронів стають вільними. Тому, незважаючи на те що йони внаслідок коливального руху ще більше заважають рухові вільних електронів, опір напівпровідника зменшується. Провідність напівпровідників, зумовлену наявністю в них вільних електронів, називають електронною провідністю, а вільні електрони — електронами провідності.

Коли електрон залишає ковалентний зв'язок одного з атомів, точніше — однієї пари атомів, то цей зв'язок у парі лишається

незайнятим — вільним. Цей вільний зв'язок прийнято називати діркою. Природно, що дірці приписують позитивний заряд.

На вакантне місце може «перестрибнути» електрон від сусіднього зв'язку, і там, у свою чергу, утвориться дірка.

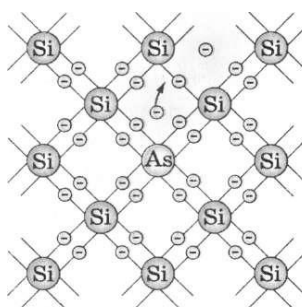
У результаті послідовності таких «стрибків» дірка ніби переміщується по кристалу. Провідність напівпровідників, зумовлену «переміщенням» дірок, називають дірковою провідністю.



Діркова провідність

Вивчаємо домішкову провідність напівпровідників. До цього було розглянуто електричний струм у чистих напівпровідниках. У таких напівпровідниках кількість вільних електронів і дірок є однаковою.

Проте якщо в чистий напівпровідник додати невелику кількість домішки, то картина дещо зміниться. Наприклад, якщо в чистий розплавлений силіцій додати трохи арсену, то після кристалізації утвориться звичайна кристалічна ґрат-ка силіцію, однак у деяких її вузлах замість атомів Силіцію перебуватимуть атоми Арсену.

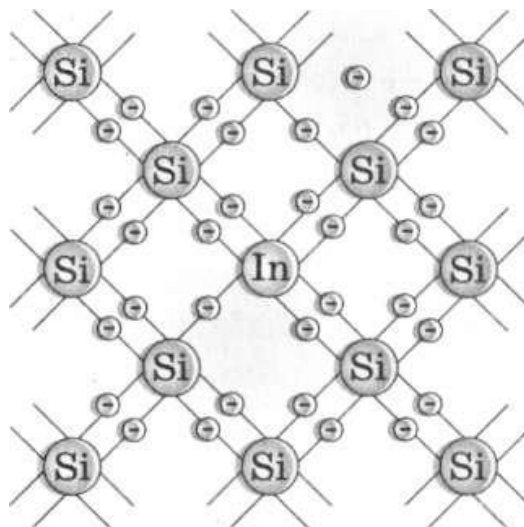


Додавання арсену до чистого розплавленого сіліцію.

Арсен, як відомо,— п'ятивалентний елемент. Чотири валентні електрони атома Арсену утворюють парні електронні зв'язки із сусідніми атомами Силіцію. П'ятому ж валентному електрону зв'язку не вистачить, при цьому він буде так слабо пов'язаний з атомом Арсену, що легко стане вільним. У результаті кожен атом домішки дасть один вільний електрон, а вакантне місце (дірка) при цьому не утвориться. Домішки, атоми яких легко віддають електрони, називаються донорними домішками (від латин. *sio*page — дарувати, жертвувати).

Нагадаємо, що крім вільних електронів, які надаються домішками, у напівпровідниках є електрони й дірки, наявність яких спричинена власною провідністю напівпровідників. Отже, у напівпровідниках з донорними домішками кількість вільних електронів значно більша, ніж кількість дірок. Таким чином, основними носіями зарядів у таких напівпровідниках є негативні частинки. Тому напівпровідники з донорними домішками називають напівпровідниками *p*-типу (від латин. *pa*iшиз — негативний).

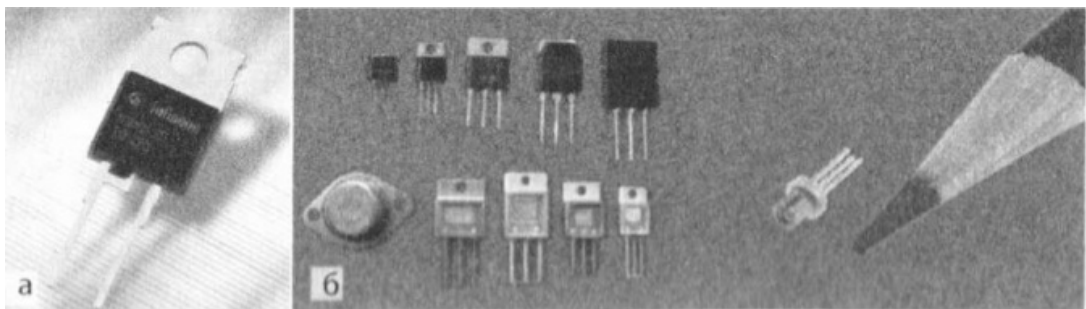
Якщо в силіцій додати невелику кількість тривалентного елемента, наприклад Індію, то характер провідності напівпровідника зміниться. Оскільки атом Індію має три валентні електрони, то він може встановити ковалентний зв'язок тільки з трьома сусідніми атомами Силіцію.



Ковалентний зв'язок.

Для встановлення зв'язку з четвертим атомом електрона не вистачить, і цей відсутній електрон Індій «запозичить» у сусідніх атомів Силіцію. У результаті кожний атом Індію створить одну дірку. Домішки такого роду називаються акцепторними домішками (від латин. *ассеріог* — той, що приймає). У напівпровідниках з акцепторними домішками основними носіями заряду є дірки. Напівпровідники з переважно дірковою провідністю називають напівпровідниками р-типу (від латин. *розіііоиз* — позитивний). Оскільки при наявності домішок кількість вільних заряджених частинок збільшується (кожний атом домішки дає вільний електрон або дірку), то провідність напівпровідників з домішками набагато краща, ніж провідність чистих напівпровідників.

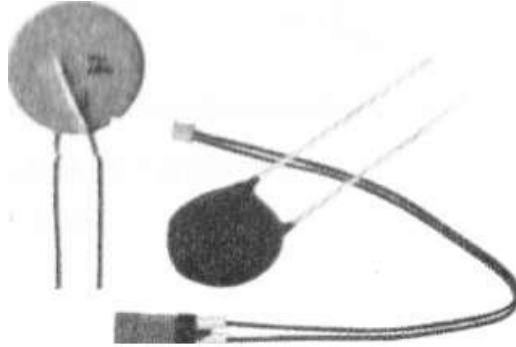
Застосування напівпровідників. Широке застосування напівпровідників зумовлене кількома чинниками. По-перше, властивостями р-переходу — місця контакту двох напівпровідників — р і n-типу. Саме тут спостерігається ряд цікавих явищ. Наприклад, через такий контакт електричний струм добре проходить в одному напрямку і практично не проходить у протилежному. Це явище отримало назву односторонньої провідності. Властивості р-n переходу використовують для виготовлення напівпровідникових діодів і транзисторів, без яких не обходиться жодний сучасний електронний пристрій, а також у сонячних батареях — приладах для безпосереднього перетворення енергії випромінювання Сонця на електричну енергію.



Напівпровідникові діоди і транзистори.

Слід додати, що застосування напівпровідників у техніці майже на 99 % зумовлене саме властивостями р-«переходу і що докладніше з цими властивостями ви познайомитеся під час

подальшого вивчення фізики. По-друге, опір напівпровідників зменшується зі збільшенням температури, і навпаки. Цю залежність використовують у спеціальних термометрах, які застосовують для вимірювання температури, підтримання сталої температури на автоматичних пристроях.



Автоматичні прилади зі спеціальними термометрами.

По-третє, напівпровідники мають властивість змінювати свій опір залежно від освітленості. Ця властивість використовується у напівпровідникових приладах, які називають фоторезисторами і застосовують для вимірювання освітленості, контролю якості поверхні та ін.



Фоторезистор.

Провідність напівпровідників зумовлена рухом вільних електронів (електронна провідність) і рухом дірок (діркова провідність). У чистому напівпровіднику електричний струм створює однакова кількість вільних електронів і дірок. Таку провідність називають власною провідністю напівпровідників. За наявності домішок провідність напівпровідників різко збільшується. У разі введення в напівпровідник домішки з більшою валентністю (донорної домішки) вільних електронів стає в багато разів більше, ніж дірок. Такі напівпровідники називають напівпровідниками *n*-типу. У випадку введення в напівпровідник домішки з меншою валентністю (акцепторної домішки) дірок стає

більше, ніж вільних електронів. Напівпровідники з переважно дірковою провідністю називають напівпровідниками р-типу. Напівпровідники широко використовують у техніці, наприклад для виготовлення напівпровідникових діодів і транзисторів, фотоелементів, термісторів, фоторезисторів тощо.

Напівпровідник — матеріал, електропровідність якого має проміжне значення між провідностями провідника та діелектрика. Напівпровідниками є речовини, ширина забороненої зони яких складає порядку декількох електронвольт (eV). Наприклад, алмаз можна віднести до широкозонних напівпровідників, а арсенід індію — до вузькозонних. До числа напівпровідників належать багато простих речовин хімічних елементів (германій, кремній, селен, телур, арсен та інші), величезна кількість сплавів і хімічних сполук (арсенід галію та ін.).

При накладанні на кристал електричного поля електрони у напівпровідниках переміщуються проти поля і створюють електричний струм. Таким чином, зона внаслідок часткового укомплектування електронами стає зоною провідності.

Провідність власних напівпровідників, зумовлена електронами, називається електронною провідністю, або провідністю n-типу. Провідність власних напівпровідників, зумовлена квазічастинками-дірками, називається дірковою провідністю, або провідністю р-типу. Провідність напівпровідників завжди є збудженою, тобто появляється лише під дією зовнішніх факторів (температури, опромінювання, сильних електричних полів і т.д.). У напівпровідників спостерігається два механізми провідності – електронна і діркова. Кількість електронів в зоні провідності дорівнює кількості дірок у валентній зоні, тобто $N_e = N_p$.

У напівпровідниках, що містять домішку, електропровідність складається із власної й домішкової. Провідність, викликана присутністю в кристалі напівпровідника домішок з атомів з іншою валентністю називається домішковою. Домішки, що викликають у напівпровіднику збільшення вільних електронів, називаються донорними, а викликаючи збільшення дірок - акцепторними. Різна дія домішкових атомів пояснюється в такий спосіб. Припустимо,

що в кристал германія (Ge44) атоми якого мають 4 валентних електрона, уведено п'ятивалентний миш'як As5+. У цьому випадку атоми миш'яку своїми 4-я з п'яти валентних електронів вступають у зв'язок. 5-й валентний електрон миш'яку виявиться не зв'язаним, тобто стає вільним електроном. Напівпровідник, електропровідність яких підвищилася завдяки утвору надлишку вільних електронів при введенні домішки, називаються напівпровідниками з електронною провідністю (напівпровідник n-типу), а домішка донорною, (що віддає електрон). Уведення в 4-х валентний напівпровідник 3-х валентного елемента, наприклад (In3+) індію приводить, навпаки, до надлишку дірок над вільними електронами. У цьому випадку ковалентні зв'язки не будуть повністю завершені дірки, що утворюються, можуть переміщатися по кристалу, створюючи діркову провідність. Напівпровідники, електропровідність яких обумовлена в основному рухом дірок, називається напівпровідниками з дірковою провідністю або напівпровідниками р-типу, а домішка - акцепторною (захоплюючи електрон з ковалентного зв'язку або з валентної зони). Енергетичні рівні цих домішок називаються акцепторними рівнями - розташовані над валентною зоною. Енергетичні рівні донорних домішок називаються донорними рівнями - розташовані під нижнім рівнем зони провідності. У домішкових напівпровідниках носії заряду бувають основними (електрони в провіднику n-типу) і не основними (дірки в напівпровіднику р-типу, електрони в напівпровіднику n-типу).

Енергія активації - характерний параметр процесів, зокрема хімічних реакцій, кінетика яких описується рівнянням Арреніуса. $k = Ae^{-E_a/RT}$, де E_a - енергія активації, R - газова стала, T - температура, A - певний передекспоненційний множник, який слабо залежить від температури. Енергія активації описує потенціальний бар'єр, який повинні подолати частинки для того, щоб реакція відбулася. При підвищенні температури, доля частинок із лкінетичною енергією, достатньою для подолання бар'єру збільшується.

Енергія активації вимірюється зазвичай у кДж/моль або ккал/моль.

В фізиці закон Арреніуса частіше записують у вигляді $k = Ae^{-E_a/k_B T}$, де k_B - стала Больцмана. При такому записі енергія активації записується в розрахунку на одну частинку і має розмірність енергії. Найчастіше її значення приводиться в електронвольтах.

Характерна риса напівпровідників — зростання електропровідності зі зростанням температури; при низьких температурах електропровідність мала. При температурі близькій до абсолютного нуля напівпровідники мають властивості ізоляторів. Кремній, наприклад, при низькій температурі погано проводить електричний струм, але під впливом світла, тепла чи напруги електропровідність зростає.

Терморезистор, термістор — напівпровідниковий резистор, активний електричний опір якого залежить від температури; терморезистори випускаються у вигляді стрижнів, трубок, дисків, шайб і бусинок; розміри варіюються від декількох мкм до декількох см; на їх основі розроблені системи і пристрої дистанційного та централізованого вимірювання і регулювання температури, протипожежної сигналізації та теплового контролю, температурної компенсації різних елементів електричного кола, вимірювання вакууму та швидкості руху рідин і газів та ін. Терморезисторами також називають термометри, в яких температура визначається за зміною електричного опору. Терморезистори діють системи дистанційного і централізованого вимірювання, і регулювання температури, системи теплового контролю машин та правових механізмів, схеми температурної компенсації, схеми виміру потужності ВЧ. Терморезистори знаходять використання у промисловій електроніці і побутової апаратурі: рефрижераторах, автомобілях, електронагрівальних приладах, телевізорах, системах центрального опалення й ін. У телевізорах часто використовуються терморезистори з позитивним ТКС для розмагнічування кінескопа. Вперше, де застосовувалися терморезистори — це датчики для виміру чи регулювання

температури. Терморезистори широко використовують у різних пристроях у ролі датчиків температури. Після відповідної модифікації їх можна використовувати в електронних пристроях зволікання з досить широким інтервалом часів затримки, як конденсаторів чи котушок індуктивності в низькочастотних генераторах, захисту від викидів напруги в ємкостях, індуктивних чи резистивних схемах, як обмежувачів струму, напруги, для вимірювань тиску газу чи теплопровідності. Отже, терморезистори знаходять застосування в багатьох областях.

**Тестові питання для захисту лабораторної роботи:
“Дослідження залежності опору напівпровідника від
температури”**

Тестові питання для захисту лабораторної роботи:

1.Напівпровідники:

- а) – це речовини, в яких валентні електрони, зв’язані з атомом слабкими силами;
- б) – це речовини, розчини яких, проводять електричний струм;
- в) – це струми, які мають однакову частоту і сталу різницю фаз.

2.Електричні властивості напівпровідників:

- а) 1 – опір напівпровідників зменшується зі збільшенням температури; 2 – електричний струм в напівпровідниках здійснюється не лише переміщенням вільних електронів, але й переміщенням зв’язаних (з атомами) електронів; 3 – невелика кількість домішок може сильно змінити опір напівпровідника;
- б) 1 – опір напівпровідників збільшується зі збільшенням температури; 2 – електричний струм в напівпровідниках здійснюється лише переміщенням зв’язаних (з атомами) електронів; 3 – невелика кількість домішок може сильно змінити опір напівпровідника;
- в) 1 – опір напівпровідників зменшується зі зменшенням температури; 2 – електричний струм в напівпровідниках

здійснюється лише переміщенням вільних електронів; 3 – невелика кількість домішок не може сильно змінити опір напівпровідника.

3. Типи провідності у напівпровідниках:

- а) власна, домішкова;
- б) загальна, місцева;
- в) повна, скорочена, обмежена.

4. Вплив домішок на електропровідність напівпровідників:

- а) суттєвий;
- б) не суттєвий;
- в) не впливає.

5. Енергія активації:

- а) $\Delta E = 2k \cdot \operatorname{tg} \varphi$;
- б) $\Delta E = 2k \cdot \cos \varphi$;
- в) $\Delta E = 2k \cdot \sin \varphi$.

6. Терморезистори:

- а) це прилади, дія яких ґрунтується на значній залежності опору напівпровідника;
- б) це прилади, дія яких ґрунтується на незначній залежності опору напівпровідника;
- в) це прилади, дія яких ґрунтується на залежності провідності напівпровідника.

7. Власна провідність напівпровідників:

- а) це впорядкований рух заряджених частинок;
- б) це створення електричного струму рухом рівної кількості негативно заряджених електронів і позитивно заряджених дірок;
- в) це сума кінетичних енергій руху частинок та потенціальної енергії їх взаємодії.

8. Домішкова провідність напівпровідників:

- а) це провідність, напівпровідників обумовлена домішками;
- б) це провідність, обумовлена квазічастинками;
- в) це провідність, обумовлена наявністю електронів.

9. Властивість р-п переходу напівпровідника:

- а) пропускати струм в одному напрямку, і не пропускати в протилежному;

- б) пропускати струм в обох напрямках;
- в) зовсім не пропускати струм в жодному із напрямків.

10 Р-n перехід:

- а) це границя, яка розділяє область з дірковою (р) і електронною (n) провідностями в одному кристалі;
- б) це червона границя фотоефекту;
- в) це процес, який відбувається без теплообміну з навколишнім середовищем.

11. Напівпровідниковими приладами є:

- а) електронно – променева трубка;
- б) транзистор;
- в) дифракційна решітка.

ЛІТЕРАТУРА

1. Кучерук І.М., Загальний курс фізики. / І.М.Кучерук, І.Т. Горбачук – Київ Техніка. 2001. – 224 с.
2. Грабовський Р.І. Курс фізики. / Р.І.Грабовський – «Вища школа», М., 1980. – 328 с.
3. Трофимова Т.І. Курс фізики. / Т.І. Трофимова – «Вища школа», М.,1985. – 433 с.
4. Детлаф А.А. Курс фізики. / А.А. Детлаф, Б.М. Яворський, Л.Б. Милковська – «Вища школа», 1973-1979. – 467 с.
5. Савельєв І.В. Курс загальної фізики. / І.В. Савельєв – М.: Наука, 1972-1974. – 403 с.
6. Волькенштейн В.С. Сборник задач по общему курсу физики. / В.С. Волькенштейн— М.: Наука, 1979. – 183 с.
7. Матвеев А.Н. Электродинамика. / А.Н. Матвеев, — М.: Высшая школа, 1981. – 73 с.
8. Чертов А.Г. Единицы физических величин. / А.Г. Чертов— М.: Высшая школа, 1977. – 236 с.

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

Фізика:

***методичні рекомендації до модуля 5 “Електромагнетизм”
для виконання лабораторних робіт студентами денної форми
навчання***

Укладачі:

Вахоніна Лариса Володимирівна,
Бацуровська Ілона Вікторівна

Формат 60x84 1/16. Ум.друк. арк.5.

Тираж 50 прим. Зам №_____

Надруковано у видавничому відділі

Миколаївського національного аграрного університету

54020, м. Миколаїв, вулю Паризької комуни, 9.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК №4490 від 20.02.2013 р.