

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до виконання лабораторних робіт
з навчальної дисципліни «Фізичні методи дослідження матеріалів
та приладів сонячної енергетики»
для студентів денної форми навчання
спеціальності «Електроніка, електронні комунікації,
приладобудування та радіотехніка»
Частина 2

Затверджено
редакційно-видавничою
радою
протокол №2 від 26.06.2025 р.

Харків
НТУ «ХП»
2025

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з навчальної дисципліни «Фізичні методи дослідження матеріалів та приладів сонячної енергетики» для студентів денної форми навчання за спеціальністю «Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка»
Частина 2 / уклад.: К.О. Мінакова, М.В. Кіріченко, Р.В. Зайцев, А.І. Доброжан. – Харків: НТУ «ХПІ», 2025. – 83 с.

Укладачі: К.О. Мінакова
М.В. Кіріченко,
Р.В. Зайцев
А.І. Доброжан

Рецензент проф. Хрипунов Г.С.

Кафедра мікро- та наноелектроніки

ВСТУП

Реалізація сучасних технологічних процесів в галузі мікро- та наноелектроніки безпосередньо пов'язана з фізичними методами дослідження матеріалів. Для успішної підготовки спеціалістів, які здатні працювати на сучасних підприємствах електронної промисловості, опанування методів дослідження електронних параметрів напівпровідників є необхідним.

Виконання лабораторних робіт з курсу «Фізичні методи дослідження матеріалів та приладів сонячної енергетики» сприяє більш глибокому засвоєнню теоретичного матеріалу і закріпленню знань, отриманих студентами на лекціях, а також формуванню практичних навичок дослідження електронних параметрів напівпровідників. Лабораторні роботи передбачають дослідження типу основних носіїв заряду термоелектричним методом, вимірювання електрорушійної сили Холла, визначення параметрів основних носіїв методом Ван-дер-Пау та визначення рухливості основних носіїв заряду шляхом виміру геометричного магнетоопору.

У методичних вказівках наведено опис лабораторних робіт, що забезпечують здобуття практичних навичок проведення експериментів з використанням фізичних методів, а також аналізу та оформлення результатів дослідження. Наведено теоретичний матеріал, необхідний для кращого розуміння і виконання практичних завдань, а також вказані необхідні завдання та порядок їх виконання. Для самостійного додаткового вивчення наведено список літературних джерел і контрольні запитання до кожної лабораторної роботи.

Лабораторна робота вважається виконаною після успішного захисту шляхом співбесіди з викладачем (захист звіту + оцінка за теоретичний матеріал). Захист звіту включає представлення мети роботи, експериментальної методики та висновків. Теоретичний матеріал охоплює знання алгоритму дій, вивчених у даній лабораторній роботі.

Приступати до виконання лабораторної роботи дозволяється тільки після отримання допуску від викладача.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 1

ВИЗНАЧЕННЯ ТИПУ ОСНОВНИХ НОСІЇВ ЗАРЯДУ В НАПІВПРОВІДНИКАХ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИМ МЕТОДОМ

Мета роботи – навчитися визначати тип основних носіїв заряду в напівпровідникових шарах різної товщини за знаком термоелектрорушійної сили, котра виникає при градієнті температури в напрямку одного з геометричних розмірів досліджуваного зразка.

1.1 Загальні відомості

Метод визначення типу основних носіїв заряду в напівпровідниках за знаком термоелектрорушійної сили (у подальшому – термо-ЕРС) або, як його ще прийнято називати, метод термозонду широко використовується у науково-дослідних лабораторіях і на підприємствах з серійного виготовлення напівпровідникових матеріалів та виробів електронної техніки на їхній основі [1, 2].

Явище виникнення термо-ЕРС при створенні вздовж одного із напрямків в зразку градієнта температури ∇T є різновидом ефекта Зеєбека [3]. При цьому різниця потенціалів U між розімкнутими кінцями напівпровідника в широкому діапазоні зміни його температури чисельно пов'язана з ∇T співвідношенням $\alpha = dU/dT$, де α – є питома термо-ЕРС або коефіцієнт Зеєбека. У випадку, коли температури гарячого T_1 і холодного T_2 кінців напівпровідника різняться не більше, ніж на декілька десятків градусів, це співвідношення може бути подане як $\alpha = U/(T_1 - T_2)$, звідки

$$U = \alpha(T_1 - T_2). \quad (1.1)$$

Виникнення термо-ЕРС в однорідному напівпровіднику під впливом градієнта температури є наслідком того, що останній обумовлює зростання середньої енергії й концентрації носіїв заряду в той області напівпровідника, де вище його температура. Тому в однорідному напівпровіднику з'являються градієнти середньої енергії та концентрації носіїв заряду, завдяки чому виникає їхній дифузійний потік i , як наслідок, електричний струм [4]. При розімкненому колі у стаціонарному стані густина струму в кожній точці зразка повинна дорівнювати нулю. Це означає, що електричний струм, обумовлений градієнтом температури, компенсується зустрічним струмом, котрий обумовлюється виникненням електричного поля у об'ємі зразка у зв'язку з накопиченням зарядів різного знака на протилежних, нагрітому і холодному, кінцях напівпровідника, між якими з цієї причини має місце різниця потенціалів U , що і є мірою термо-ЕРС. Для невідродженого напівпровідника на підставі наведених уявлень про механізм виникнення термо-ЕРС теоретично отримано формулу, котра згідно з [4] при переважному розсіюванні носіїв заряду на акустичних фононах пов'язує коефіцієнт Зеєбека з параметрами рівноважних носіїв заряду напівпровідника таким чином:

$$\alpha = -\frac{k}{e} \left[\frac{\left(2 + \ln \frac{N_C}{n}\right) n \mu_n - \left(2 + \ln \frac{N_V}{p}\right) p \mu_p}{n \mu_n + p \mu_p} \right], \quad (1.2)$$

де k – стала Больцмана, котра дорівнює $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К; e – абсолютне значення заряду електрона, котре дорівнює $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл; n – концентрація електронів в зоні провідності; p – концентрація дірок у валентній зоні; μ_n – рухливість електронів; μ_p – рухливість дірок; N_C – ефективна густина станів в зоні провідності; N_V – ефективна густина станів у валентній зоні.

З формул (1.1) й (1.2) видно, що коефіцієнт Зеєбека α , а тому і термоелектрорушійна сила U , зумовлюються двома доданками, кожен з яких відповідає внеску, пов'язаному з електронами або дірками; до того ж ці доданки мають протилежні знаки. Крім того, з формули (1.2) випливає, що α є від'ємною величиною для електронного напівпровідника, тобто для напівпровідника, основними носіями заряду у якому є електрони (n -тип провідності). Це пояснюється тим, що для напівпровідників з $n \gg p$ мають місце співвідношення $N_C > N_V$ і $\mu_n > \mu_p$, внаслідок чого перший доданок у чисельнику формули (1.2) більший від абсолютного значення другого доданку. У цьому випадку, оскільки електрони дифундують від гарячого кінця зразка до холодного, на гарячому кінці виникає позитивний об'ємний заряд, а на холодному – негативний. Тобто знак потенціалу останнього відповідає знаку основних носіїв заряду у такому досліджуваному зразку. Тому, коли основними носіями заряду у напівпровіднику є електрони, то відповідно до формул (1.1) і (1.2) має місце нерівність $U < 0$.

Для діркового напівпровідника, де основними носіями заряду є дірки (p -тип провідності), коефіцієнт Зеєбека α – це позитивна величина, оскільки при $p \gg n$ другий доданок у чисельнику формули (1.2) за абсолютною величиною більший від першого. У цьому випадку на гарячому кінці зразка виникає негативний об'ємний заряд, а на холодному – позитивний, тому що від його гарячого кінця до холодного дифундують позитивно заряджені дірки. Отже, коли основними носіями заряду у напівпровіднику є дірки ($p \gg n$), то знак потенціалу холодного кінця такого досліджуваного зразка відповідає знаку основних носіїв заряду у ньому – дірок, і згідно до формул (1.1) й (1.2) має місце протилежна нерівність $U > 0$.

Таким чином, якщо напівпровідник домішковий, то напрям внутрішнього електричного поля і полярність термо-ЕРС залежать від знака основних носіїв заряду, з чого випливає можливість визначення типу ос-

новних носіїв заряду за знаком термо-ЕРС, котрий відповідає знаку потенціалу холодного кінця досліджуваного зразка.

Зміна переважного механізму розсіювання рівноважних носіїв заряду в напівпровіднику, котра може мати місце в різних температурних інтервалах, впливає на термо-ЕРС через рухливість носіїв заряду і може позначатися на перших числових значеннях у круглих дужках обох доданків чисельника формули (1.2). Наприклад, ці числові значення при переважному механізмі розсіювання на акустичних фонах (як у наведеній формулі) дорівнюють 2, при розсіюванні на іонах домішки в атомних кристалах дорівнюють 4, а при розсіюванні на оптичних фонах в іонних кристалах у випадках, коли температура останніх є вищою або нижчою за температуру Дебая, дорівнюють відповідно 3 або $5/2$ [4]. Але вказані зміни не позначаються на залежності знака термо-ЕРС від типу основних носіїв заряду у досліджуваному напівпровіднику.

Для практичної реалізації методу термозонда, який розглядається у цій лабораторній роботі, вкрай важливою є ще одна обставина, яка полягає у тому, що термо-ЕРС металів набагато менша за абсолютним значенням U у порівнянні з термо-ЕРС напівпровідників. Це зумовлено тим, що у металів $1 \leq |\alpha| \leq 10$ мкВ/К, а у напівпровідників $100 \leq |\alpha| \leq 1000$ мкВ/К. Така різниця у значеннях α призводить до того, що при наявності у вимірювальному колі металу поряд з напівпровідником сукупна термо-ЕРС такого кола дуже слабо залежить від властивостей металу, а тому, як правило, для значень термо-ЕРС напівпровідників не вказується, відносно якого металу вона визначена.

1.2 Вимірювальна установка і особливості практичної реалізації методу термозонда

При виконанні цієї лабораторної роботи використовується вимірювальна установка, котра схематично зображена на рис. 1.1. На рис. 1.2 наведено різні варіанти створення температурного градієнта вздовж досліджуваних

напівпровідникових зразків залежно від їхніх геометричних і конструкційних особливостей.

Згідно з рис. 1.1 і 1.2 при дослідженні типу основних носіїв заряду методом термозонда місцеве нагрівання напівпровідникового зразка, необхідне для виникнення у ньому термо-ЕРС, здійснюють, торкаючись гарячим металевим зондом наміченої ділянки поверхні цього зразка, заздалегідь закріпленого у пристрої для його фіксації. У виконуваний лабораторній роботі термозондом є молібденовий стрижень завдовжки 20 см і діаметром 4 мм, робочий торець якого залежно від природи і геометричних розмірів напівпровідника має форму півсфери радіусом 2 мм з полірованою дзеркальною поверхнею або вістря.

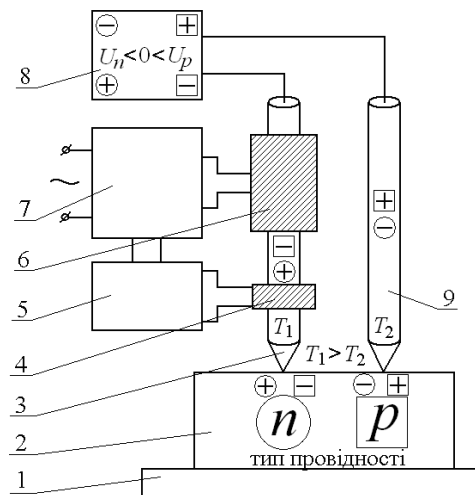


Рисунок 1.1 – Схематичне зображення вимірювальної установки:

1 – пристрій для фіксації досліджуваного зразка; 2 – досліджуваний напівпровідник; 3 – гарячий молібденовий термозонд; 4 – гальванічно розв’язаний з термозондом датчик його температури; 5 – електронний терморегулятор; 6 – гальванічно розв’язаний з термозондом його резистивний нагрівач; 7 – кероване джерело електричного живлення нагрівача термозонда; 8 – електронний індикатор полярності термо-ЕРС; 9 – холодний молібденовий зонд

Для забезпечення необхідної температури термозонда використовується невеличкий резистивний електронагрівач, змонтований на його віддаленій

від робочого торця стрижневій частині таким чином, щоб уникнути гальванічного зв'язку з нею.

Температура термозонда встановлюється і підтримується у межах 50–70 °С за допомогою сервісного електричного кола, яке складається з активного резистивного елемента нагрівача, джерела живлення нагрівача змінним електричним струмом та електронного терморегулятора з датчиком температури поблизу робочого торця термозонда, керуючого ввімкненням і вимкненням електричного струму у резистивному елементі нагрівача. Холодний зонд, котрий відрізняється від гарячого лише значно меншою довжиною, у випадках, що відповідають зображенням *a* і *б* на рис. 1.2, згідно з рекомендацією, наведеною у [1], має знаходитися на відстані не менше 1 см від місця торкання напівпровідника гарячим термозондом. У випадку, коли плівковий напівпровідниковий шар нанесено на металеву підкладку (рис. 1.2, *в*), холодний зонд має торкатися саме цієї підкладки. При цьому реєстрація знака термо-ЕРС повинна здійснюватись протягом декількох секунд після торкання термозондом поверхні досліджуваного плівкового напівпровідникового шару (особливо коли металева підкладка досить тонка, оскільки через малу товщину напівпровідникового шару початкове значення $\Delta T = T_1 - T_2$ може швидко зменшуватись завдяки підвищенню T_2 з боку підкладки під місцем розташування термозоду. Це, згідно з формулою (1.1), має приводити до відповідного зменшення абсолютної величини термо-ЕРС, що зрештою унеможливить реєстрацію знака термо-ЕРС реальним індикатором, до якого гнучкими проводами приєднані обидва зонди. За такий індикатор може бути використаний електронний вольтметр з якомога більшим внутрішнім опором R_B , наприклад, типу UNI-T UTM 1804 ($R_B = 10^7$ Ом). Заздалегідь для такого індикатора слід ідентифікувати відповідність знака термо-ЕРС (що висвічується на його дисплеї) до входу індикатора, до якого має підключатися холодний зонд. Це можна зробити шляхом використання за порівняльне джерело ЕРС будь-якого непошкодженого

гальванічного елемента, наприклад, пальчикового типу для живлення відповідних вимірювальних приладів або побутових виробів.

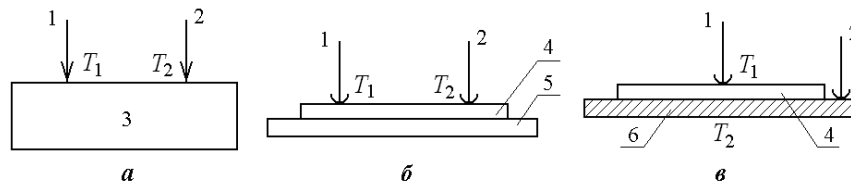


Рисунок 1.2 – Варіанти створення температурного градієнта $T_1 > T_2$

вздовж досліджуваних напівпровідникових зразків:

a – масивний напівпровідник; *б* – плівковий напівпровідниковий шар

на діелектрику; *в* – плівковий напівпровідниковий шар на металі;

1 – гарячий молибденовий термозонд; 2 – холодний молибденовий зонд;

3 – масивний напівпровідник; 4 – плівковий напівпровідниковий шар;

5 – діелектрична підкладка; 6 – металева підкладка

1.3 Порядок виконання роботи

1.3.1 Завдання для виконання роботи

Методом термозонда визначити тип основних носіїв заряду в монокристалічній пластині легovanого напівпровідника, в плівковому шарі напівпровідникової сполуки на діелектричній підкладці і в плівковому шарі напівпровідникової сполуки на металевій підкладці.

1.3.2 Порядок дій

1. За допомогою наданої інструкції, котра знаходиться на робочому місці, ознайомитись з особливостями використання відповідної вимірювальної установки для визначення типу основних носіїв заряду у напівпровідниках відповідно до схеми, наведеної на рис. 1.1, а також з особливостями

конструкції зондової групи, до складу якої входять термозонд і холодний зонд.

2. Після перевірки викладачем засвоєння правил використання вказаного вимірювального обладнання підключити установку до живильної електромережі для її попереднього прогріву.

3. Отримати у викладача для досліджень зазначені у завданні зразки, дізнатися про їхню конкретну природу і занести відповідні дані у табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Вихідні дані про досліджувані зразки

Номер зразка	Напівпровідник			Підкладка	
	Матеріал	Структура	Товщина, мкм	Матеріал	Товщина, мкм
1					
2					
3					

4. Закріпити леговану напівпровідникову пластину (зразок № 1) у фіксуєчому пристрої вимірювальної установки і за допомогою маніпулятора з силою до 2 Н для проколу тонкого шару природного оксиду напівпровідника підтиснути до поверхні пластини загострений кінець холодного зонду.

5. Нагріти загострений кінець термозонда до температури 60 °С і з зазначеною вище силою за допомогою другого маніпулятора підтиснути термозонд до тієї ж поверхні на відстані 2 см від місця торкання пластини холодним зондом.

6. Виміряти стаціонарне значення термо-ЕРС і занести його з урахуванням знака термо-ЕРС у табл. 1.2. У цю таблицю занести також значення температур термозонда і холодного зонда, яке приблизно дорівнює

температурі в лабораторії за даними розміщеного поблизу установки термометра.

Таблиця 1.2 – Результати експериментального дослідження термо-ЕРС напівпровідникових зразків

Номер зразка	Температура, °С		Термо-ЕРС, мВ	Тип основних носіїв заряду
	Холодний зонд	Термо-зонд		
1				
2				
3				

7. Закріпити діелектричну підкладку з плівковим шаром напівпровідникової сполуки (зразок № 2) у фіксуєчому пристрої вимірювальної установки і за допомогою маніпулятора з силою 0,3-0,5 Н підтиснути до поверхні плівкового шару півсферичний кінець холодного зонда.

8. Нагріти півсферичний кінець термозонда до температури 60 °С і з зазначеною вище силою за допомогою другого маніпулятора підтиснути термозонд до тієї ж поверхні на відстані 2 см від місця торкання плівкового шару холодним зондом.

9. Повторити дії, зазначені у п. 6.

10. Закріпити металеву підкладку з плівковим шаром напівпровідникової сполуки (зразок № 3) у фіксуєчому пристрої вимірювальної установки і за допомогою маніпулятора підтиснути півсферичний кінець холодного зонда до вільної поверхні металевої підкладки з боку, на якому знаходиться плівковий шар напівпровідникової сполуки.

11. Нагріти півсферичний кінець термозонда до температури $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ і з силою $0,3\text{-}0,5\text{ Н}$ за допомогою другого маніпулятора підтиснути термозонд до центральної ділянки поверхні плівкового шару зразка № 3.

12. Протягом перших двох секунд виміряти значення термо-ЕРС і занести усереднену величину U з урахуванням знака термо-ЕРС у табл. 1.2. Після цього виконати другу вказівку п. 6.

13. За знаками термо-ЕРС, отриманими експериментально, визначити тип основних носіїв заряду для кожного з трьох досліджених напівпровідникових зразків і занести ці результати до відповідних клітинок табл. 1.2.

14. Приступити до оформлення звіту.

1.3.3 Зміст звіту

У звіті повинні бути наведені вказані нижче відомості:

1. Мета роботи.
2. Фізична сутність методу термозонда і особливості його реалізації у виконуваний роботі.
3. Спрощена схема вимірювальної установки.
4. Креслення досліджуваних зразків з їхніми геометричними розмірами.
5. Заповнені табл. 1.1 і 1.2.
6. Висновки.

Запитання та завдання для самоперевірки

1. Написати формулу, що пов'язує величину і знак термо-ЕРС з коефіцієнтом Зеебека й градієнтом температури напівпровідника, та пояснити, виходячи із неї і з особливостей електронної енергетичної структури домішкових напівпровідників, чому за знаком термо-ЕРС можна визначати тип основних носіїв заряду у таких матеріалах.

2. До яких спрощених виглядів можна звести формулу (1.2) у випадках $n \gg p$ та $p \gg n$?

3. Яким може бути внесок холодного і гарячого металевих зондів у сукупну термо-ЕРС вимірювального кола при умовах виконання лабораторної роботи, якщо згідно з довідковими даними коефіцієнт Зеєбека для молібдену становить 7,6 мкВ/К?

4. Чому залежно від природи напівпровідникового матеріалу і конструкційних особливостей досліджуваних зразків мають застосовуватись металеві зонди з робочими торцями у вигляді полірованої півсфери або вістря?

5. Навіщо при торканні холодним і гарячим зондами однієї поверхні напівпровідника відстань між ними має бути більше 1 см?

6. З якої причини при дослідженні методом термозонда плівкового напівпровідникового шару на металевій підкладці вимір термо-ЕРС має відбуватися протягом декількох секунд?

7. Користуючись отриманими експериментальними результатами виконати кількісну оцінку коефіцієнта Зеєбека для досліджуваних напівпровідникових матеріалів.

8. Проаналізувати можливість впливу зовнішнього середовища і товщини досліджуваних напівпровідникових матеріалів на отримані експериментальні результати.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 2

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ

ОСНОВНИХ НОСІЇВ ЗАРЯДУ В НАПІВПРОВІДНИКАХ ШЛЯХОМ ВИМІРУ ЕЛЕКТРОРУШІЙНОЇ СИЛИ ХОЛЛА

Мета роботи – навчитися визначати тип, концентрацію та рухливість основних носіїв заряду в однорідних напівпровідникових шарах з домішковою провідністю за знаком й величиною електрорушійної сили

Холла, котра виникає при дії на основні носії заряду сили Лоренца у схрещених магнітному і електричному полях.

2.1 Загальні відомості

2.1.1 Природа виникнення електрорушійної сили Холла та її зв'язок з типом і концентрацією основних носіїв заряду в напівпровідниках з домішковою провідністю

Ефект Холла є одним з гальваноманітних ефектів, котрий являє собою виникнення в провіднику або у напівпровіднику поперечного електричного поля \mathbf{E}_H , спрямованого перпендикулярно до струму густиною \mathbf{J} , що тече вздовж зразка, а також до магнітного поля з індукцією \mathbf{B} , що пронизує цей зразок у другому перпендикулярному до \mathbf{E}_H і \mathbf{J} напрямку. Вказане поперечне електричне поле \mathbf{E}_H називається полем Холла і у лівогвинтовій прямокутній системі координат воно пов'язане з \mathbf{J} і \mathbf{B} емпірично встановленим співвідношенням

$$\mathbf{E}_H = - R_H[\mathbf{J}\mathbf{B}], \quad (2.1)$$

де R_H – стала (або коефіцієнт) Холла, що залежить від типу, концентрації та механізму розсіювання основних носіїв заряду і у інтернаціональній системі одиниць виміру має розмірність $\text{м}^3/\text{Кл}$.

На рис. 2.1 схематично зображено явище ефекту Холла в однорідних прямокутних напівпровідникових зразках *n*-типу і *p*-типу провідності, легованих відповідно донорною і акцепторною домішками. Як видно з цього рисунку, між так званими холловими гранями зразка з розмірами l і t при виникненні ефекту Холла у відсутності струму вздовж осі Oy з'являється електрорушійна сила (ЕРС) Холла U_H , модуль якої пов'язаний з модулем напруженості поля Холла співвідношенням

$$E_H = U_H / d \quad (2.2)$$

Це дає змогу, користуючись відповідними геометричними розмірами досліджуваного зразка, а також експериментальними значеннями індукції магнітного поля і струму I у зразку, за експериментально вимірюваною величиною ЕРС Холла розраховувати сталу Холла.

Дійсно, за умови

$$\mathbf{E}_H \perp \mathbf{J} \perp \mathbf{B} \quad (2.3)$$

співвідношення (2.1) зводиться до рівняння

$$E_{H_y} = -R_H J_x B_z, \quad (2.4)$$

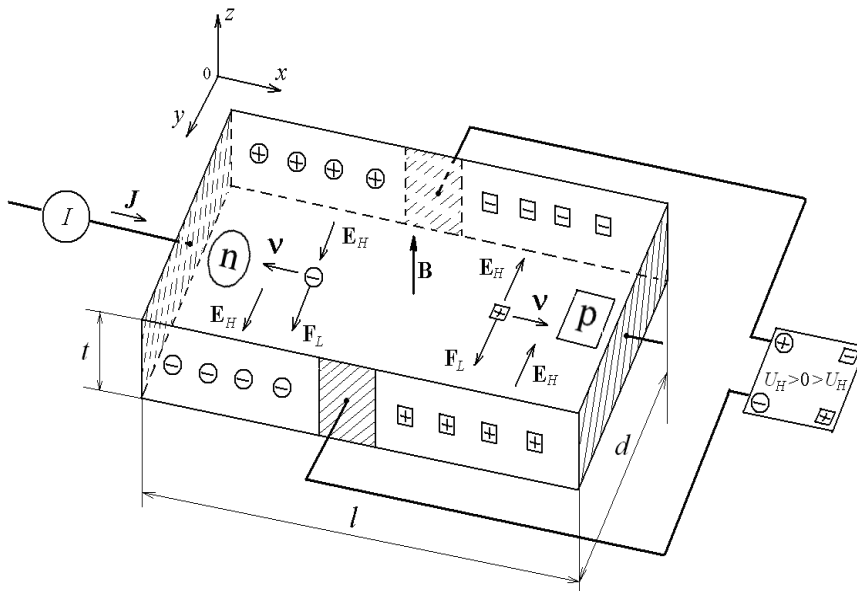


Рисунок 2.1 – Явище ефекту Холла в однорідних прямокутних напівпровідникових зразках n -типу і p -типу провідності, легованих відповідно донорною і акцепторною домішками

де

$$J_x = I/(td), \quad (2.5)$$

а E_{Hy} визначається за формулою (2.2). Таким чином, з системи рівнянь (2.2), (2.4) і (2.5) випливає, що

$$R_H = -\frac{U_H t}{IB}. \quad (2.6)$$

Для з'ясування можливості визначення типу і концентрації основних носіїв заряду за розрахованим значенням R_H встановимо зв'язок між полем Холла і силою Лоренца \mathbf{F}_L , завдяки дії якої на основні носії заряду це поле виникає [4]. Якщо не враховувати відмінність швидкостей окремих носіїв заряду від їх середньої швидкості, то для усіх них величина \mathbf{F}_L може бути розрахована за формулою

$$\mathbf{F}_L = q[\mathbf{v}\mathbf{B}], \quad (2.7)$$

де q – заряд носіїв, \mathbf{v} – їх дрейфова швидкість.

Оскільки

$$\mathbf{v} = \frac{1}{qN}\mathbf{J}, \quad (2.8)$$

де N – концентрація основних носіїв заряду, то після підстановки (2.8) у (2.7) формула (2.7) перетворюється на формулу

$$\mathbf{F}_L = \frac{1}{N}[\mathbf{J}\mathbf{B}] \quad (2.9)$$

З формули (2.9) видно, що напрямок дії сили Лоренца не залежить від знака носіїв заряду, тобто як на електрони, так і на дірки у напівпровіднику вона діє в ту саму сторону. Останнє означає, що залежно від типу провідності напівпровідника полярність ЕРС Холла при незмінних напрямках векторів \mathbf{J} і \mathbf{B} має бути різною (див. рис. 2.1). При цьому корисно пам'ятати мнемонічне правило лівої руки, згідно з яким напрямок дії сили Лоренца вказує відігнутий на 90° великий палець лівої руки коли чотири інших пальці цієї руки зорієнтовані у напрямку протікання струму, а вектор індукції магнітного поля входить у долоню перпендикулярно до неї.

З формули (2.9) випливає, що

$$[\mathbf{J}\mathbf{B}] = N\mathbf{F}_L \quad (2.10)$$

Порівнюючи (2.10) з (2.1) легко встановити, що

$$\mathbf{E}_H = -R_H N \mathbf{F}_L. \quad (2.11)$$

Поряд з цим слід взяти до уваги, що при встановленні стаціонарного стану через деякий час після увімкнення магнітного поля рівнодіюча сили холлового поля і сили Лоренца, котрі одночасно відчуюються основними носіями заряду, дорівнює нулю. Тобто

$$q\mathbf{E}_H + \mathbf{F}_L = 0, \quad (2.12)$$

звідки випливає, що

$$\mathbf{E}_H = -\frac{1}{q} \mathbf{F}_L. \quad (2.13)$$

По-перше, це співвідношення є, так би мовити, ще одним ключем поряд зі співвідношенням (2.9) до визначення типу основних носіїв заряду у досліджуваному напівпровідниковому матеріалі. А саме, як видно з (2.13):

при $q < 0$ (основні носії заряду електрони – n -тип провідності)

$$\mathbf{E}_H \uparrow \uparrow \mathbf{F}_L \quad (2.14)$$

при $q > 0$ (основні носії заряду дірки – p -тип провідності)

$$\mathbf{E}_H \downarrow \uparrow \mathbf{F}_L \quad (2.15)$$

По-друге, співвідношення (2.13) і співвідношення (2.11) дозволяють отримати формулу, яка пов'язує сталу Холла з типом і концентрацією основних носіїв заряду. Дійсно, після підстановки правої частини (2.13) замість \mathbf{E}_H у співвідношення (2.11) отримуємо

$$R_H = \frac{1}{qN}. \quad (2.16)$$

У випадку напівпровідника n -типу $q = -e$ і $N = n$, а тому

$$R_H = -\frac{1}{en} < 0. \quad (2.17)$$

У випадку напівпровідника p -типу $q = e$ і $N = p$, а тому

$$R_H = \frac{1}{ep} > 0. \quad (2.18)$$

Проте, як показано, наприклад, у [4], при урахуванні розподілу основних носіїв заряду за швидкостями і залежності часу релаксації від їх енергії співвідношення (2.16), (2.17) і (2.18) мають бути скореговані таким чином:

$$R_H = \frac{r_H}{qN}, \quad (2.19)$$

$$R_H = -\frac{r_H}{en}, \quad (2.20)$$

$$R_H = \frac{r_H}{ep}, \quad (2.21)$$

де r_H – безрозмірний коефіцієнт, котрий зветься холл-фактором.

Згідно з теоретичними розрахунками числове значення холл-фактора залежить від індукції магнітного поля, дрейфової рухливості μ й концентрації основних носіїв заряду, а також від механізму їхнього розсіювання. Дані про кількісний зв'язок r_H з переліченими вище показниками наведено у табл. 2.1.

Таким чином, якщо за результатами відповідних експериментальних вимірів встановлено значення R_H і відомий механізм розсіювання основних носіїв заряду, то за співвідношеннями (2.14) і (2.15) легко ідентифікувати їх тип, а співвідношення (2.20) і (2.21) дають змогу розрахувати їх концентрацію за формулами

$$n = -\frac{r_H}{eR_H}, \quad (2.22)$$

$$p = \frac{r_H}{eR_H}. \quad (2.23)$$

Таблиця 2.1 – Залежність холл-фактора r_H від умов виміру ЕРС Холла і природи напівпровідникового матеріалу [4]

Природа на- півпровідника	Невироджений напівпровідник						Вироджений напівпровідник					
	Слабке, $\mu B \ll 1$			Сильне, $\mu B \gg 1$			Слабке, $\mu B \ll 1$			Сильне, $\mu B \gg 1$		
Механізм розсіювання	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Холл-фактор	1,00	1,93	1,18	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Примітка: 1 – розсіювання на електронейтральній домішці, 2 – розсіювання на іонізованій домішці, 3 – розсіювання на акустичних фонах.

Щодо знака експериментально вимірюваної ЕРС Холла, яка використовується для розрахунку R_H за допомогою формули (2.6), то очевидно, що у випадку напівпровідника n -типу провідності, де основними носіями заряду є електрони, величині ЕРС Холла слід надавати позитивне значення ($U_H > 0$). Саме тоді, як випливає з формули (2.6), стала Холла є, як і належить, негативною величиною ($R_H < 0$). І навпаки, у випадку напівпровідника p -типу провідності, де основними носіями заряду є дірки, величині ЕРС Холла слід надавати негативне значення ($U_H < 0$). Саме тоді, як випливає з формули (2.6), стала Холла є, як і належить, позитивною величиною ($R_H > 0$). Наочна ілюстрація вказаних співвідношень між типом основних носіїв заряду у досліджуваному напівпровіднику і знаком вимірюваної величини U_H подана на рис. 2.1.

2.1.2 Спосіб визначення рухливості основних носіїв заряду у напівпровідниках з домішковою провідністю за значеннями електрорушійної сили Холла та їх питомого опору

Вимірювання ЕРС Холла є доцільним не тільки у зв'язку з розглянутими вище науково- і практично важливими можливостями використання цієї величини. При відомому значенні питомого опору ρ досліджуваного напівпровідникового матеріалу з'являється ще одна важлива можливість – поряд з типом і концентрацією основних носіїв заряду за значенням сталої Холла, яка розраховується завдяки експериментально виміряній ЕРС Холла, визначити їх рухливість μ . Оскільки

$$\rho = (qN\mu)^{-1}, \quad (2.24)$$

то після ділення (2.19) на (2.24) і використання замість R_H абсолютного значення сталої Холла $|R_H|$ маємо

$$\frac{|R_H|}{\rho} = r_H \mu = \mu_H, \quad (2.25)$$

де μ_H – холлова рухливість, котра, як і дрейфова рухливість μ , у інтернаціональній системі одиниць виміру має розмірність $\text{м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$.

З (2.25) видно, що

$$\mu = \frac{|R_H|}{r_H \rho}, \quad (2.26)$$

де R_H , ρ і r_H відповідають одній і тій же температурі.

Після підстановки у формулу (2.26) замість R_H значення сталої Холла, що відповідає формулі (2.6), легко отримати співвідношення між μ , U_H і ρ , яке має вигляд

$$\mu = \frac{|U_H|t}{r_H \rho l B}. \quad (2.27)$$

2.2 Методи підвищення точності вимірювання ЕРС Холла при постійному струмі та стаціонарному магнітному полі

2.2.1 Основні фактори впливу на похибку вимірювання

Серед різноманітних варіантів контактного вимірювання ЕРС Холла [5, 6] найбільшого практичного поширення набуло вимірювання U_H при постійному струмі з силою I та стаціонарному магнітному полі з індукцією B [1, 7, 8]. Це зумовлено оптимальністю співвідношення між рівнями точності отримання досліджуваної величини і складності реалізації відповідної експериментальної методики для помірно та сильно легованих напівпровідників. Але й при такому варіанті контактного вимірювання ЕРС Холла можуть мати місце суттєві похибки, зумовлені так званими геометричними і фізичними факторами.

У випадку прямокутних холлових зразків (див. рис. 2.1) з товщиною t , що більша від довжини λ вільного пробігу носіїв заряду, до геометричних факторів належать співвідношення розмірів у напрямку протікання струму (розмір l) і у напрямку вектора холлового поля (розмір d), а також особливості геометрії електродів на холлових гранях, до яких перш за все належать зображені на рис. 2.1 холлові електроди. Щодо впливу співвідношення розмірів l і d , то, як показано теоретично і підтверджено експериментально, у загальному випадку струмові електроди чинять шунтувальну дію відносно зарядів різного знака, накопичуваних завдяки силі Лоренца на холлових гранях. Вказане призводить до того, що коли $l/d < 3$ (так звані короткі та широкі зразки), то вигляд екіпотенціальних поверхонь і ліній напруженості електричного поля у зразку стає докорінно відмінним у порівнянні з добре відомим при відсутності такої шунтувальної дії. Наслідком цього є зменшення експериментального значення різниці потенціалів U_y між холловими гранями у порівнянні з U_H відповідно до формули (2.6). Кінцева ширина w електродів (розмір у напрямку осі Ox) на

холлових гранях призводить до порушення однорідності густини струму у об'ємі зразка, що не відповідає теоретичній моделі, покладеній в основу розрахунків при отриманні формули (2.6). Очевидно, що для коротких і широких зразків з кінцевою шириною електродів безпосередньо на холлових гранях одночасна дія обох розглянутих геометричних факторів суттєво підвищує похибку вимірювання ЕРС Холла. На рис. 2.2 згідно з [6] зображено еквіпотенціальні поверхні, лінії напруженості електричного поля і лінії струму у холловому зразку при $\mu_{H}B = 0,73$, $l/d = 1$ та $w/l \approx 0,2$.

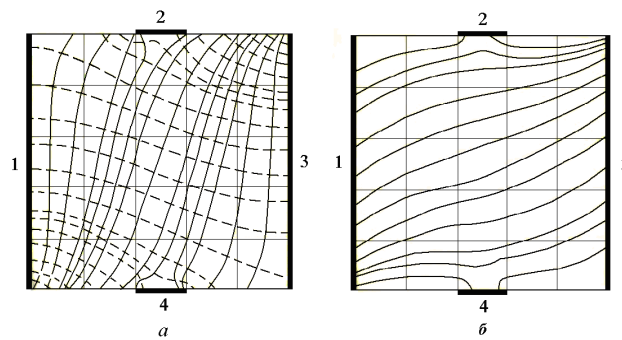


Рисунок 2.2 – Вплив геометричних факторів на електричне поле і струм у квадратному холловому зразку при $\mu_{H}B = 0,73$:

a – розподіл еквіпотенціальних поверхонь (суцільні лінії) і ліній електричного поля (пунктирні лінії); b – розподіл ліній струму;
1, 3 – струмові електроди; 2, 4 – холлові електроди

До фізичних факторів належать зокрема електричні, термоелектричні, магнітоелектричні, термомагнітні та термогальваномагнітні ефекти, котрі виникають поряд з ефектом Холла [5, 6]. Тому при вимірюванні різниці потенціалів U_y між холловими гранями при дослідженні ефекту Холла у прямокутних зразках з оптимальною геометрією, що забезпечує практично повне усунення негативного впливу розглянутих вище геометричних факторів, експериментальне значення U_y є алгебраїчною сумою

електрорушійних сил, пов'язаних з усіма узагальнено переліченими фізичними явищами, що супроводжують ефект Холла. Тобто

$$U_y = U_H + \sum_{i=1}^n U_{y_i}, \quad (2.28)$$

де n – число, котре дорівнює кількості фізичних ефектів, що супроводжують ефект Холла.

Як наочно кількісно продемонстровано у [6], серед майже 560 супутніх ефектів тільки три – нееквіпотенціальність холлових електродів, термоелектричний ефект та термогальваномагнітний ефект Нернста-Еттінгсгаузена – можуть давати порівняльні з U_H за абсолютними значеннями ЕРС (U_{y_i}) до суми, що відповідає формулі (2.28). Для обґрунтування можливості усунення похибок визначення U_H , зумовлених цими трьома супутніми ефектами, доцільно розглянути якісну залежність ЕРС зазначених ефектів від умов відповідних експериментальних досліджень.

Причиною виникнення ЕРС нееквіпотенціальності холлових електродів U_{y_1} у відсутності магнітного поля є їх електрична асиметрія, котра зумовлена тим, що вони не розташовані на тій самій еквіпотенціальній поверхні. Це може бути при неточному розташуванні самих холлових електродів один проти одного або через електричну неоднорідність досліджуваного зразка. Очевидно, що у обох випадках існує зв'язок

$$U_{y_1} \propto I_x, \quad (2.29)$$

згідно з яким U_{y_1} за полярністю залежить від напрямку протікання струму I_x , але не залежить від напрямку і величини індукції магнітного поля.

Згаданий вище термоелектричний ефект є ефектом Зеебека, суть якого було розглянуто у попередній лабораторній роботі. При дослідженні ефекту

Холла цей супутній ефект може виникати при наявності різниці температур ΔT_y у напівпровіднику між холловими електродами. Тоді відповідно до співвідношення (1.1) між термо-ЕРС (U_{y_2}) і ΔT_y має місце дуже простий зв'язок

$$U_{y_2} \propto \Delta T_y, \quad (2.30)$$

звідки випливає, що ні за величиною, ні за полярністю U_{y_2} не залежить від \mathbf{J} та \mathbf{B} .

Ефект Нернста-Еттінгсгаузена виникає у магнітному полі при існуванні градієнта температури вздовж напрямку протікання струму (ось Ox). Вказаний температурний градієнт призводить до різниці температур ΔT_x між струмовими електродами, що у свою чергу викликає виникнення додаткової струмової компоненти вздовж осі Ox , взаємодія якої з магнітним полем обумовлює так званий вторинний ефект Холла, за рахунок чого між холловими електродами виникає ЕРС Нернста-Еттінгсгаузена U_{y_3} . Згідно з [5]

$$U_{y_3} \propto \Delta T_x B_z, \quad (2.31)$$

звідки видно, що за величиною й полярністю ЕРС Нернста-Еттінгсгаузена залежить від величини та напрямку вектора \mathbf{B} і не залежить від вектора \mathbf{J} .

Таким чином, змінюючи напрямки векторів \mathbf{B} та \mathbf{J} при вимірюваннях U_y і залишаючи незмінними модулі цих векторів, відповідно до [6] можна у кінцевому рахунку позбавитися впливу розглянутих супутніх ефектів на вимірюване значення ЕРС Холла U_H .

Ще одним суттєвим фізичним фактором, котрий може впливати на систематичну похибку вимірювання U_H є анізотропна електронна енергетична структура монокристалічних напівпровідників, адже формули (2.20) і (2.21), а з них відповідно (2.22) і (2.23), були отримані за припущенням, що

матеріал досліджуваного зразка є ізотропним середовищем. Тому для монокристалічних напівпровідників ці співвідношення у загальному випадку не виконуються. Однак, згідно з [7-9], у випадку деяких монокристалічних напівпровідників, котрі мають широке практичне застосування, згадані співвідношення залишаються справедливими або корегуються числовим множником, наближеним до одиниці.

2.2.2 Практичні заходи зі зниження похибки вимірювання

2.2.2.1 Зниження похибки, зумовленої геометричними факторами

Теоретично розрахована і експериментально підтверджена залежність U_y/U_H від l/d , де U_y – вимірювана різниця потенціалів між розташованими посередині холлових граней електродами при відсутності інших джерел похибки, показана на рис. 2.3. Ця залежність, що вважається класичною [5], вказує на зменшення U_y при $l/d = 3$ у порівнянні з U_H лише на 1,5 %, а при $l/d = 4$ – на 0,3 %, в той час як при $l/d < 3$ відмінність U_y від U_H суттєво збільшується зі зменшенням l/d . Тому для максимально точного визначення U_H слід використовувати так звані довгі вузькі зразки зі співвідношенням $l/d \geq 3$. Підкреслимо, що таким чином усувається негативний вплив струмових електродів на результат вимірювання ЕРС Холла.

Залежність U_y/U_H від розташування протилежних холлових електродів відносно лівого струмового електрода (рис. 2.1), тобто від x/l , показано на рис. 2.4 для різних значень l/d . Як видно з цієї залежності, навіть при $l/d > 3$ для точного виміру ЕРС Холла протилежні холлові електроди повинні розташовуватись строго посередині холлових граней зразка.

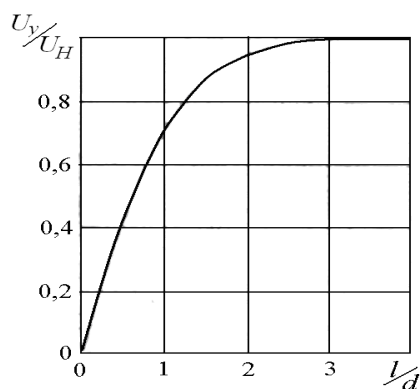


Рисунок 2.3 – Залежність U_y/U_H від l/d

при розташуванні холлових електродів посередині протилежних холлових граней

У пункті 2.2.1 було показано, що не тільки струмові, але й холлові електроди при кінцевому значенні їх ширини w негативно впливають на можливість визначення сталої Холла за вимірним значенням різниці потенціалів між ними. На рис. 2.5 наведено залежності U_y/U_H від w/d для різних величин μB при розташуванні холлових електродів посередині протилежних холлових граней і відсутності інших джерел похибок виміру U_H .

Як видно з рис. 2.5, зі зменшенням індукції магнітного поля похибка визначення ЕРС Холла істотно збільшується при відхиленні форми холлового електроду від одновимірної лінії. Тільки при дуже сильних магнітних полях, котрі при практичному використанні ефекту Холла ніколи не реалізуються, у випадку $w/d < 0,1$ ця похибка стає достатньо малою.

Тому для суттєвого зменшення негативного впливу холлових електродів на результат виміру ЕРС Холла запропоновано виготовляти експериментальні зразки з вузькими виступами у центрі холлових граней з матеріалу зразків, а холлові електроди наносити на кінці цих виступів.

Теоретично, а потім і експериментально було доведено, що при довжині виступів $h \geq w$ шунтувальна дія холлових електродів зменшується більш ніж на порядок. Тому вже при $h/w = 1$ та $\mu B \ll 1$ похибка визначення ЕРС Холла,

пов'язана тільки з впливом ширини холлових виступів, не перевищує 4,5 % і зменшується зі зростанням μB .

Це, а також намагання поряд з якомога точнішим визначенням ЕРС Холла визначати без застосування додаткового вимірювального обладнання у тих же умовах, але при відсутності магнітного поля, і питомий опір досліджуваного зразка, сприяло розробці декількох конфігурацій зразків, найбільш придатних для такого комплексного дослідження. Серед них найбільш простою і найчастіше використовуваною конфігурацією є така, що схематично зображена на рис. 2.6.

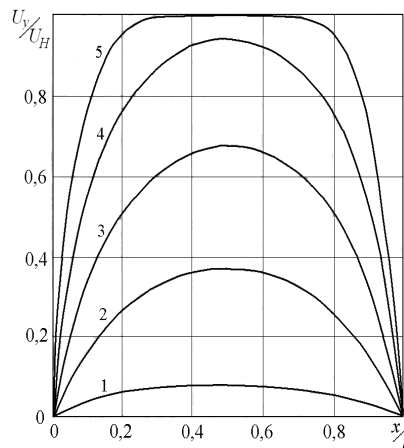


Рисунок 2.4 – Залежність U_y/U_H від x/l для різних значень l/d (1-5) при відсутності інших джерел похибки виміру U_H : 1 – 0,1; 2 – 0,5; 3 – 1,0; 4 – 2,0; 5 – 4,0

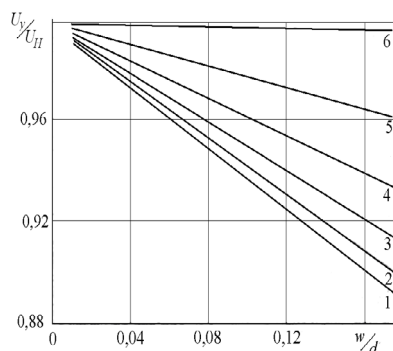


Рисунок 2.5 – Залежності U_y/U_H від w/d для різних величин μB (1-6) при розташуванні холлових електродів посередині протилежних холлових граней і відсутності інших джерел похибки виміру U_H :
1 – 0,27; 2 – 0,58; 3 – 1,00; 4 – 1,73; 5 – 3,73; 6 – 57,3

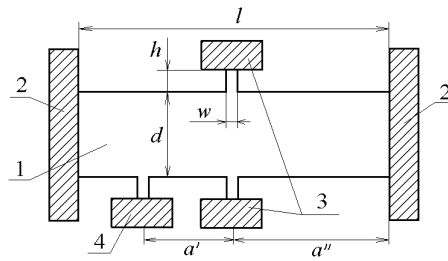


Рисунок 2.6 – Схематичне зображення однієї з найбільш придатних конфігурацій однорідного напівпровідникового зразка для якомога точнішого визначення ЕРС Холла і питомого опору досліджуваного матеріалу: 1 – напівпровідник; 2 – струмові електроди; 3 – холлові електроди на холлових виступах, 4 – додатковий електрод на додатковому виступі

На рис. 2.6 другий виступ нижньої холлової грані з електродом на його кінці разом з холловим виступом на цій же грані як раз і виконують функцію двох зондів, за допомогою яких при $B = 0$ вимірюється різниця потенціалів U_a між двома точками на поверхні відповідної холлової грані з відстанню a' у напрямку осі Ox . Між відстанню a' і розмірами l та d повинне бути збережене співвідношення $d \leq a' < l/2$.

Згідно з [9] при силі струму I у тому ж напрямку питомий опір ρ матеріалу досліджуваного зразка завтовшки t (розмір вздовж осі Oz) і вимірне значення U_a пов'язані співвідношенням

$$U_{a'} = I\rho \frac{a'}{td}, \quad (2.32)$$

звідки

$$\rho = \frac{U_{a'} td}{I a'}. \quad (2.33)$$

2.2.2.2 Зниження похибки, зумовленої фізичними факторами

Відповідно до підрозділу 2.2.1, при експериментальному дослідженні ефекту Холла за відсутності струму в колі холлових електродів вимірювана

різниця потенціалів U_y між холловими електродами є алгебраїчною сумою як ЕРС Холла U_H , так і ЕРС $U_{y_1}, U_{y_2}, U_{y_3}$ ще трьох найбільш кількісно суттєвих супутніх ефектів. Тому формула (2.28) у такому випадку зводиться до рівняння

$$U_y = U_H + U_{y_1} + U_{y_2} + U_{y_3}. \quad (2.34)$$

Як доведено у [5, 6], з урахуванням характеру залежностей знака і величини кожного з доданків у формулі (2.34) від напрямків і величин I та B (вказані співвідношення впливають з формул (2.1), (2.2) й зі співвідношень (2.29)-(2.31)) виділити U_H з експериментальних значень U_y достатньо просто наступним чином.

Слід провести чотири послідовних виміри значення U_y при фіксованих величинах I та B , але при чотирьох вказаних нижче комбінаціях напрямків струму і індукції магнітного поля

$$\begin{aligned} U_y^{++} &= U_y(+I, +B); & U_y^{+-} &= U_y(+I, -B); \\ U_y^{--} &= U_y(-I, -B); & U_y^{-+} &= U_y(-I, +B); \end{aligned} \quad (2.35)$$

після чого ЕРС Холла розраховується за формулою

$$U_H = \frac{(U_y^{++} + U_y^{--}) - (U_y^{+-} + U_y^{-+})}{4}. \quad (2.36)$$

При цьому слід прийняти до уваги, що для найбільшої надійності визначення таким чином ЕРС Холла згідно з [7] необхідно переконатися у прямо пропорційній залежності U_H від B , тобто, що

$$U_H \propto B, \quad (2.37)$$

для чого визначення U_H вказаним вище чином треба проводити при, як мінімум, двох різних кількісних значеннях B .

Для уникнення впливу анізотропності електронної енергетичної структури монокристалічних напівпровідників на можливість використання формул (2.20) та (2.21) і відповідно (2.22) та (2.23) у загальному випадку згідно з [7] струм I і індукцію магнітного поля \mathbf{B} слід орієнтувати у напрямку кристалографічних осей з найбільшою симетрією. Поряд з цим, у кубічних кристалах ефект Холла і провідність при слабкому магнітному полі ізотропні [9], а тому у випадку таких кристалів холлові виміри з наступним опрацюванням їх результатів за відповідними формулами можна виконувати для будь-якої орієнтації зразка відносно кристалографічних осей і магнітного поля. Нагадаємо, що до кубічних кристалів належать: кремній, германій, арсенід галію та деякі інші, поширені з точки зору практичного застосування напівпровідники. Але навіть при цьому для багатодолинних напівпровідників з кубічною решіткою і енергетичними поверхнями у вигляді еліпсоїда обертання, що реалізується у зоні провідності германію та кремнію, при слабкому магнітному полі згідно з [9] холл-фактор, котрий має використовуватись у формулах (2.20) – (2.23), визначається як

$$r_H = r_H^* \frac{3K(K+2)}{(2K+1)^2}, \quad (2.38)$$

де r_H^* – значення холл-фактора згідно з табл. 2.1; K – відношення поздовжньої і поперечної ефективних мас основних носіїв заряду, що входять до рівнянь ізоенергетичних поверхонь.

Тому при переважному розсіюванні основних носіїв заряду на акустичних фонах холл-фактор r_H у германії становить 0,93, а у кремнії 1,03.

У підрозділі 2.3.1 методичних вказівок до лабораторної роботи «Визначення питомого електричного опору однорідних тонких

напівпровідникових шарів чотиризондовим методом» [10] було показано, що електрична однорідність напівпровідникового зразка з незмінною концентрацією основної легуючої домішки в усіх його мікрооб'ємах може бути порушена через виникнення приповерхневої області просторового заряду, збагаченої або збідненої основними носіями заряду. Але там же було доведено, що при концентраціях повністю іонізованої домішки $N > 10^{17} \text{ см}^{-3}$ (наприклад, для монокристалічного кремнію це відповідає $\rho < 0,1 \text{ Ом}\cdot\text{см}$) напівпровідникові зразки завтовшки більш 0,1 мкм можна вважати електрично однорідними, оскільки при таких значеннях N викривленням границь валентної зони і зони провідності біля поверхні можна знехтувати. Тому, оскільки метою цієї лабораторної роботи є визначення типу, концентрації та рухливості основних носіїв заряду саме в однорідних напівпровідникових шарах з домішковою провідністю, досліджувані зразки мають відповідати наведеному вище критерію за величиною N . Зазначимо, що урахування вказаного критерію забезпечує придатність формул (2.20) – (2.23) і у випадку полікристалічних напівпровідників зі щільними міжзеренними границями та розміром кристалітів $\gamma \leq 100 \text{ нм}$, якщо $\gamma \gg \lambda$ [6]. При цьому $r_H = 1$. До таких матеріалів належать, наприклад, індій-олов'яний оксид ІТО (твердий розчин: 90-95 % In_2O_3 + 10-5 % SnO_2) і ZnO:Al , котрі широко застосовуються у фотоелектричних перетворювачах сонячної енергії та у різноманітних оптоелектронних виробках. Щодо формули (2.27) для розрахунку рухливості основних носіїв заряду за результатами визначення ЕРС Холла і питомого опору досліджуваного напівпровідникового матеріалу можна стверджувати, що у випадку полікристалічних напівпровідників, котрі відповідають вказаним вище критеріям, вона теж є прийнятною, але за умови заміни у ній позначки рівності на позначку приблизної рівності.

Для усунення похибок, котрі можуть бути викликані додатковим розігріванням досліджуваного зразка струмом I та додатковою інжекцією у напівпровідниковий матеріал нерівноважних носіїв заряду, слід додержуватись рекомендацій, наведених стосовно цих фізичних факторів у

підрозділі 2.3.1 методичних вказівок до лабораторної роботи «Визначення питомого електричного опору однорідних тонких напівпровідникових шарів чотиризондовим методом» [10].

2.3 Вимірювальна установка для визначення ЕРС Холла і питомого опору при постійному струмі та стаціонарному магнітному полі у випадку зразків з виступами на холлових гранях

Блок-схему установки, котра використовується у цій лабораторній роботі для визначення ЕРС Холла і питомого опору при постійному струмі та стаціонарному магнітному полі у випадку зразків з виступами на холлових гранях (див. рис. 2.6) зображено на рис. 2.7. Ця схема складається з двох частин: блока електромагніту і блока досліджуваного зразка.

До блока електромагніту перш за все належить власно ЕМ типу ФЛ-1, у зазорі завширшки $0,5 \leq W \leq 5$ см між плоско-паралельними полюсними наконечниками котрого діаметром 5 см при $0 < I_{EM} \leq 10$ А індукція однорідного магнітного поля складає $0 < B \leq 1$ Тл.

Модуль й напрямок вектора **B** залежать від сили та напрямку струму I_{EM} , котрі регулюються трансформатором ЛАТР, генератором струму Г1, а також перемикачем П1 (позиції 1М-1'М або 2М-2'М), і визначаються за допомогою приладу ВМІ, датчик якого знаходиться безпосередньо поряд з досліджуваним зразком у зазорі між полюсними наконечниками ЕМ. Сила струму I_{EM} вимірюється амперметром А, функцію якого можуть виконувати, наприклад, прилад типу UNI-T UTM 1804. Функцію ВМІ може виконувати, наприклад, прилад типу EM4305. Між тим, для фіксованих значень W заздалегідь за допомогою такого приладу можна побудувати градуовальні графіки залежностей B від I_{EM} і у подальшому користуватися ними без застосування ВМІ. При цьому контроль напрямку **B** можна легко здійснювати за допомогою магнітної стрілки компаса.

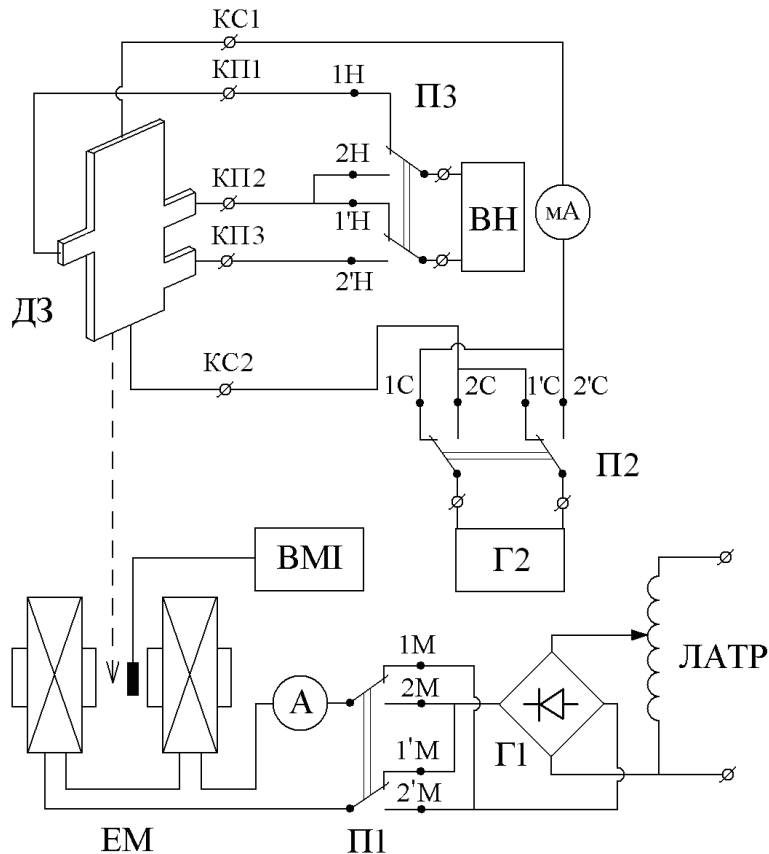


Рисунок 2.7 – Блок-схема установки для визначення ЕРС Холла при постійному струмі та стаціонарному магнітному полі і питомого опору у випадку зразків з виступами на холлових гранях:

ЕМ – електромагніт; ВМІ – вимірювач магнітної індукції; А – амперметр для вимірювання сили струму I_{EM} у котушках електромагніту; П1 – перемикач напрямку струму I_{EM} ; Г1 – генератор постійного струму I_{EM} ; ЛАТР – лабораторний автотрансформатор; ДЗ – досліджуваний зразок; Г2 – генератор постійного струму I у колі ДЗ; мА – цифровий міліамперметр для виміру сили струму I ; П2 – перемикач напрямку струму I ; ВН – вимірювач напруги – цифровий вольтметр з входним опором R_B на декілька порядків більшим за опір R ДЗ; ПЗ – перемикач для комутації ВН з необхідними виступами на холлових гранях ДЗ.

До блока досліджуваного зразка поряд з самим ДЗ (конфігурація якого деталізована на рис. 2.6) належать два електричних кола: струмове і

вимірювальне. Струмове коло призначене для живлення зразка через клема КС1 і КС2 постійним струмом I , сила якого задається генератором постійного струму Г2, а напрям струму в зразку – перемикачем П2 (позиції 1С-1'С або 2С-2'С). Генератор Г2 створюється регулюючим джерелом постійної напруги, наприклад, типу Siglent SPD 3303-Х, послідовно з яким з'єднано змінний резистор з достатньо високим опором. Величина I контролюється струмовимірювальним приладом мА, функцію якого можуть виконувати цифрові прилади, наприклад, типу UNI-T UTM 1804. До вимірювального кола належать вимірювач напруги ВН і перемикач П3, який за допомогою потенціальних клем КП1 – КП3 з'єднує ВН залежно від позиції П3 (1Н-1'Н або 2Н-2'Н) з холловими виступами для виміру U_y (клеми КП1 і КП2) для подальшого визначення ЕРС Холла U_H (позиція П3: 1Н-1'Н) або з сусідніми виступами на одній з холлових граней для виміру U_a (клеми КП2 і КП3) для подальшого визначення питомого опору ρ матеріалу ДЗ (позиція П3: 2Н-2'Н). При цьому функцію ВН можуть виконувати, наприклад, цифрові прилади типу UNI-T UTM 1804 (див. методичні вказівки до попередньої лабораторної роботи).

2.4 Особливості визначення сталої Холла чотиризондовим методом у випадку тонких однорідних напівпровідникових шарів круглої і прямокутної форми з домішковою провідністю

Згідно з [6, 7] у випадку тонких однорідних напівпровідникових шарів круглої і прямокутної форми з домішковою провідністю при $\rho < 1$ Ом·см для оперативного визначення ЕРС Холла U_H , а тому і сталої Холла R_H , можна застосувати чотиризондовий метод з розташуванням зондів у вершинах квадрата, котрий стосовно визначення ρ для такого типу зразків розглянуто у підрозділі 2.2.2 методичних вказівок до лабораторної роботи «Визначення питомого електричного опору однорідних тонких напівпровідникових шарів чотиризондовим методом» [10]. При цьому суттєвою перевагою методу є

виключення необхідності створення відповідних виступів на холлових гранях, як це має місце для класичного холлового зразка, схематично зображеного на рис. 2.6.

Так, наприклад, згідно з [7] при $\mu B \ll 1$ вибором відповідної симетрії розташування і схеми увімкнення зондів можна домогтися того, що після застосування до вимірюваної різниці потенціалів U_{hk} між потенціальними зондами з номерами h і k процедури позбавлення від впливу супутніх ефектів за формулою (2.36) (див. пункт 2.2.2.2) буде знайдено значення ЕРС Холла U_H , котре пов'язане з R_H співвідношенням

$$U_H = \frac{R_H I_{13} B}{t} C_H, \quad (2.39)$$

де I_{13} – сила струму I_{ij} між струмовими зондами з номерами $i = 1$ та $j = 3$ при $U_{hk} = U_{24}$; B – модуль вектора \mathbf{B} , орієнтованого перпендикулярно до планарної поверхні шарового зразка; t – товщина зразка; C_H – поправкова функція, котра враховує форму і співвідношення планарних розмірів зразка з відстанню s між сусідніми зондами (тобто з розміром сторони квадрата, у вершинах якого розташовані зонди).

З цього співвідношення випливає, що величина R_H може бути розрахована за формулою

$$R_H = \frac{U_H t}{C_H I_{13} B}. \quad (2.40)$$

На рис. 2.8 і 2.9 наведено форми планарних поверхонь шарових зразків, у випадку яких можна використовувати описаний вище метод, і формулу (2.40), а також у вигляді графіків надано чисельні залежності C_H від D/s для зразків у формі круга, півкруга, чвертькруга (де D – діаметр круга) або C_H від b/a та $s\sqrt{2}/b$ (де a і b – відповідно довша і коротша сторони зразка з прямокутною планарною поверхнею).

Якщо досліджувані зразки мають геометричну форму, котра відповідає зразкам, наведеним на рис. 2.8, то на тих самих зразках після визначення U_H і R_H можна визначити ρ при $I_{ij} = I_{12}$ та $U_{hk} = U_{34}$ і $B = 0$. Формула, котра дозволяє розрахувати ρ за експериментальними значеннями I_{12} й U_{34} , має вигляд

$$\rho = \frac{\pi t}{C_\rho \ln 2} \frac{U_{34}}{I_{12}}, \quad (2.41)$$

де C_ρ – поправкова функція, котра враховує форму і співвідношення планарних розмірів зразка з відстанню s між сусідніми зондами при розрахунку питомого опору матеріалу зразка; графіки цієї функції залежно від D/s для шарових зразків відповідної форми теж наведено на рис. 2.8.

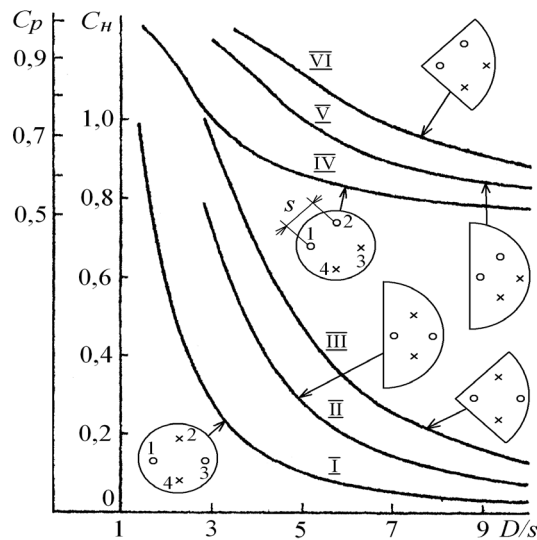


Рисунок 2.8 – Поправкові функції чотирьохзондового холлового методу для круглих шарових зразків і їх секторних частин з центрованим розташуванням зондів 1-4:

кружками позначені контактні позиції струмових зондів, хрестиками – контактні позиції потенціальних зондів; I–III – графіки поправкових функцій C_H ; IV–VI - графіки поправкових функцій C_ρ

Для експериментальної реалізації чотиризондового холлового методу застосовується та сама вимірювальна установка, що і для визначення ЕРС Холла у випадку зразків з виступами на холлових гранях (рис. 2.7). Система з чотирьох зондів конструктивно оформлюється у вигляді чотиризондової головки, тіло якої виготовляється з діелектричного матеріалу. Особливості її конструкції акцентовані у методичних вказівках до лабораторної роботи «Визначення питомого електричного опору однорідних тонких напівпровідникових шарів чотиризондовим методом» [10].

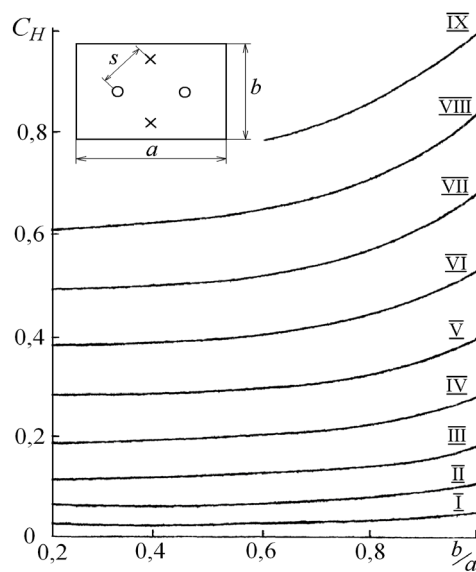


Рисунок 2.9 – Графіки поправкових функцій C_H для зразка з прямокутною планарною поверхнею і центрованим розташуванням зондів 1-4 (кружками позначено контактні позиції струмових зондів, хрестиками – контактні позиції потенціальних зондів) залежно від відношення ширини поверхні b до її довжини a при різних значеннях $\chi = s\sqrt{2}/b$: I – 0,2; II – 0,3; III – 0,4; IV – 0,5; V – 0,6; VI – 0,7; VII – 0,8; VIII – 0,9; IX – 1,0

У випадку визначення ЕРС Холла з клемми КС1 і КС2 вимірювальної установки гальванічно з'єднуються струмові зонди з номерами $i = 1$ та $j = 3$, а з клемми КП1 і КП2 з'єднуються потенційні зонди з номерами $h = 2$ та $k = 4$.

У випадку визначення питомого опору з клемми КС1 і КС2 вимірювальної установки гальванічно з'єднуються струмові зонди з номерами $i = 1$ та $j = 2$, а з клемми КП1 і КП2 з'єднуються потенційні зонди з номерами $h = 3$ та $k = 4$.

Якщо досліджувані зразки за формою відповідають зразку, зображеному на рис. 2.9, то для них чотиризондовим холловим методом визначається лише ЕРС Холла. Визначення питомого опору матеріалу такого зразка слід здійснювати розглянутим у методичних вказівках до лабораторної роботи «Визначення питомого електричного опору однорідних тонких напівпровідникових шарів чотиризондовим методом» [10] чотиризондовим методом при лінійному еквідістантному розташуванні системи зондів у центрі зразка паралельно до його сторони з розміром a (аналогічно до зображеного у [10] на рис. 2.2, в). У цьому випадку з клемми КС1 і КС2 схематично зображеної на рис. 2.7 вимірювальної установки гальванічно з'єднуються струмові зонди з номерами $i = 1$ та $j = 4$, а з клемми КП1 і КП2 з'єднуються потенціальні зонди з номерами $h = 2$ та $k = 3$. Після виміру різниці потенціалів U_{23} при струмі I_{14} питомий опір згідно з [10] розраховується за формулою

$$\rho = G_l \frac{U_{23}}{I_{14}} t, \quad (2.42)$$

де G_l – поправкова функція, табличні значення якої залежно від a , b та s наведено у табл. 2.3 методичних вказівок до попередніх лабораторних робіт [10].

2.5 Порядок виконання роботи

2.5.1 Завдання для виконання роботи

За знаком та величиною електрорушійної сили Холла, встановленими експериментально при постійному струмі у стаціонарному магнітному полі для однорідних шарових напівпровідникових зразків з домішковою провідністю і виступами на холлових гранях, а також чотиризондовим холловим методом для зразків з тих же матеріалів, визначити тип й концентрацію основних носіїв заряду, після чого, використовуючи експериментально отриману інформацію про питомий опір матеріалів у досліджуваних зразках, визначити для них дрейфову рухливість основних носіїв заряду.

2.5.2 Порядок дій

1. За допомогою наданої інструкції, котра знаходиться на робочому місці, ознайомитись з особливостями використання лабораторної установки для визначення ЕРС Холла і питомого опору напівпровідникових зразків, досліджуваних відповідно до схеми, наведеної на рис. 2.7, а також з особливостями конструкцій двох чотиризондових головок, до складу яких входять система зондів, які розташовуються у вершинах квадрата, та лінійна еквідистантна система зондів.

2. Після перевірки викладачем засвоєння правил використання вказаного вимірювального обладнання підключити лабораторну установку до живильної електромережі для попереднього прогріву обох її блоків.

3. Отримати у викладача для досліджень однорідні тонкі напівпровідникові зразки з домішковою провідністю і питомим опором менше 0,1 Ом·см, котрі являють собою нанокристалічні плівкові шари завтовшки $0,1 < t \leq 1$ мкм на жорсткій підкладці з матеріалу, що має питомий опір, набагато більший, ніж

досліджуваний напівпровідниковий матеріал. До асортименту досліджуваних зразків належать:

1) зразок № 1 з виступами на холлових «гранях», аналогічний за конфігурацією до зображеного на рис. 2.6 зі співвідношенням довжини до ширини $l/d \geq 3$ та з відстанню $l/3 \leq a' < l/2$;

2) зразок № 2 круглої форми з відношенням діаметра до відстані між зондами, розташованими у вершинах квадрата (див. рис. 2.8), $2 \leq D/s \leq 9$;

3) зразок № 3 прямокутної форми з розмірами a і b (див. рис. 2.9), котрі відповідають діапазонам $0,2 \leq b/a \leq 1$ та $0,2 \leq s\sqrt{2}/b \leq 1$.

4. З'ясувати у викладача конкретну природу та товщину t напівпровідникових шарів для цих зразків, визначити за допомогою мірної лінійки їх характерні планарні розміри і занести усі отримані таким чином дані у табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Матеріали і геометричні параметри напівпровідникових шарів досліджуваних зразків

Номер зразка	Матеріал зразка	l , мм	d , мм	D , мм	a , мм	a' , мм	b , мм	t , мм
1								
2								
3								

5. Розрахувати та занести у табл. 2.3 за нижченаведеною формою реальні співвідношення D/s , b/a , $s\sqrt{2}/b$, s_l/b (де s_l – міжзондові відстані у випадку лінійної еквідістантно системи зондів), після чого, користуючись відповідними графіками на рис. 2.8 і 2.9, а також табл. 2.3 з [10], визначити й занести до табл. 2.3 поправкові функції C_H , C_ρ , G_l , котрі використовуються відповідно у формулі (2.40) для розрахунку сталої Холла, у формулі (2.41)

для розрахунку питомого опору у випадку круглого зразка і у формулі (2.42) для розрахунку питомого опору у випадку прямокутного зразка.

6. Розташувати зразок № 1 у контактному пристрої і за допомогою останнього гальванічно з'єднати струмові електроди зразка з клемми КС1 та КС2, а спарені на одній з холлових «граней» виступи – з клемми КП2 та КП3 вимірювальної установки. Перемикач П2 перемкнути у позицію 1С-1'С, а перемикач ПЗ – у позицію 2Н-2'Н.

Таблиця 2.3 – Міжзондові відстані, реальні співвідношення і поправкові функції, перелічені у описі дії 5 відносно досліджуваних зразків

Номер зразка	s , мм	s_l , мм	t/s	t/s_l	l/d	D/s	b/a	$s\sqrt{2}/b$	s_l/b	C_H	C_ρ	G_l
1	+		+		+							
2	+		+			+				+	+	
3	+	+	+	+			+	+	+	+		+

7. За допомогою генератора постійного струму Г2 встановити силу струму I у зразку не вище 10 мА і приладом ВН виміряти різницю потенціалів U_a . Стабільність величини U_a протягом декількох хвилин при незмінному значенні величини I має бути підтвердженням оптимального вибору останньої. У противному разі слід зменшувати I , поки не буде досягнута вказана стабільність U_a . Виміряні стабільне значення U_a і відповідне йому значення I занести у табл. 2.4.

8. Залишити перемикач П2 у позиції 1С-1'С, за допомогою контактної пристрою здійснити додаткове з'єднання виступу на протилежній холловій «грані» з клемою КП1 вимірювальної установки, перемкнути перемикач ПЗ у позицію 1Н-1'Н і розташувати контактний пристрій зі зразком № 1 між полюсними наконечниками електромагніту ЕМ таким чином, щоб планарна

поверхня зразка з розмірами l і d була паралельною до торцевих поверхонь цих наконечників, а сам зразок знаходився між ними на рівних відстанях.

9. Залишивши напрям й силу струму I у зразку тими, при яких було виміряне стабільне значення U_a , перемкнути перемикач П1 у позицію 1М-1'М і за допомогою ЛАТРа встановити у котушках електромагніту струм силою I_{EM} , необхідною для створення у зазорі між полюсними наконечниками зі зразком однорідного магнітного поля з індукцією $0,3 \leq B \leq 0,5$ Тл (слабке магнітне поле для досліджуваних у цій лабораторній роботі зразків), котру слід виміряти приладом ВМІ, датчик якого знаходиться між зразком і торцевою поверхнею одного з полюсних наконечників (див. рис. 2.7).

10. Виміряти приладом ВН напругу U_y між протилежними холловими виступами і, позначивши її як U_y^{++} , занести це значення у табл. 2.4 поряд з відповідними значеннями I_{EM} та B .

Таблиця 2.4 – Значення сили струмів у напівпровідниковому матеріалі I і котушках електромагніту I_{EM} , індукції магнітного поля B та напруг U_a і U_y між відповідними виступами на холлових «гранях», виміряних при експериментальному дослідженні зразка № 1

Номер зразка	I, A	U_a, B	I_{EM}, A	$B, Tл$	U_y^{++}, B	U_y^{-}, B	U_y^{+-}, B	U_y^{-+}, B
1								

11. Не змінюючи попередніх величин I й I_{EM} , перемкнути П1 у позицію 2М-2'М та П2 – у позицію 2С-2'С і знову виміряти приладом ВН напругу U_y , позначивши її як U_y^{-} . Далі, зберігаючи тими ж самими величини I й I_{EM} та встановивши П1 у позицію 1М-1'М, залишаючи П2 у позиції 2С-2'С, виміряти напругу U_y , позначивши її як U_y^{+-} , а потім, встановивши П1 у

позицію 2М-2'М, а П2 – у позицію 1С-1'С, виміряти напругу U_y , позначивши її як U_y^{--} . Виміряні значення U_y^{--} , U_y^{+-} , U_y^{++} теж занести у табл. 2.4.

12. За значеннями I й U_a з табл. 2.4 згідно з формулою (2.33) розрахувати питомий опір ρ матеріалу зразка № 1. Користуючись співвідношеннями (2.14) і (2.15), правилом лівої руки і рис. 2.1, встановити тип основних носіїв заряду (ОНЗ: електрони – e^- або дірки – h^+), а на підставі цього – тип провідності (n або p) матеріалу зразка № 1. Згідно з формулою (2.36) за значеннями U_y з табл. 2.4 визначити ЕРС Холла U_H , після чого за формулою (2.6) розрахувати сталу Холла R_H , а потім за формулами (2.22) або (2.23) визначити концентрацію N основних носіїв заряду при $r_H = 1$ (слабке магнітне поле, нанокристалічна структура сильно легованого напівпровідникового шару). Далі, за значеннями R_H і ρ , користуючись формулою (2.26), розрахувати рухливість μ ОНЗ. Нарешті, для переконання у справедливості твердження про те, що експериментальне значення B відповідає умові слабого магнітного поля, розрахувати добуток μB . Усі результати, отримані при виконанні цієї комплексної дії, занести у табл. 2.5.

Таблиця 2.5 – Параметри основних носіїв заряду у напівпровідниковому матеріалі і його питомий опір, визначені за результатами комплексного експериментального дослідження зразка № 1

Номер зразка	ρ , Ом·м	Тип ОНЗ	Тип провідності	U_H , В	R_H , м ³ /Кл	N , м ⁻³	μ , м ² /(В·с)	μB , абс. од.
1								

13. Закріпити зразок № 2 у контактному пристрої під чотиризондовою голівкою з зондами у вершинах квадрата таким чином, щоб зонди підтискалися до круглої планарної поверхні зразка, як на рис. 2.8 з силою 0,3

– 0,5 Н. За допомогою контактної пристрою через його перемикач-комутатор ПК з'єднати струмові зонди 1 і 2 (кружки на рис. 2.8) з клемми вимірювальної установки КС1 і КС2, а потенціальні зонди 3 і 4 (хрестики на рис. 2.8) – з клемми КП1 і КП2. Перемикач П2 перемкнути у позицію 1С-1'С, а перемикач П3 – у позицію 1Н-1'Н. Про належне підтискання усіх чотирьох зондів до поверхні зразка мають свідчити наявність заданих сили струму I_{12} у колі зондів 1 і 2, яка встановлюється за допомогою генератора постійного струму Г2 і повинна бути не вище 10 мА, та різниці потенціалів U_{34} між зондами 3 і 4, котра вимірюється приладом ВН. Стабільність величини U_{34} протягом декількох хвилин при незмінному значенні величини I_{12} має бути підтвердженням оптимального вибору останньої. У противному разі слід зменшувати I_{12} , поки не буде досягнуто вказаної стабільності U_{34} . Виміряні стабільне значення U_{34} і відповідне йому значення I_{12} занести у табл. 2.6.

Таблиця 2.6 – Значення сили струмів у напівпровідниковому матеріалі I_{12} , I_{13} і котушках електромагніту I_{EM} , індукції магнітного поля B та напруг U_{34} і U_{24} між відповідними потенціальними зондами, виміряних при експериментальному дослідженні зразка № 2

Номер зразка	I_{12} , А	U_{34} , В	I_{EM} , А	B , Тл	I_{13} , А	U_{24}^{++} , В	U_{24}^{--} , В	U_{24}^{+-} , В	U_{24}^{-+} , В
2									

14. Залишити перемикач П2 у позиції 1С-1'С, а перемикач П3 у позиції 1Н-1'Н. За допомогою контактної пристрою через його перемикач-комутатор ПК з'єднати зонди 1 і 3 з клемми КС1 і КС2, а зонди 2 і 4 – з клемми КП1 і КП2 вимірювальної установки та розташувати контактний пристрій зі зразком № 2 між полюсними наконечниками електромагніту ЕМ

таким чином, щоб кругла планарна поверхня зразка з діаметром D була паралельною до торцевих поверхонь цих наконечників, а сам зразок знаходився між ними на рівних відстанях.

15. За допомогою генератора постійного струму Г2 встановити таку силу струму I_{13} у зразку, при якій було виміряне стабільне значення U_{34} , перемкнути перемикач П1 у позицію 1М-1'М і за допомогою ЛАТРа встановити у котушках електромагніту струм силою I_{EM} , необхідною для створення у зазорі між полюсними наконечниками зі зразком однорідного магнітного поля з індукцією $0,3 \leq B \leq 0,5$ Тл, котру слід виміряти приладом ВМІ, датчик якого знаходиться між зразком і торцевою поверхнею одного з полюсних наконечників.

16. Виміряти приладом ВН напругу U_{24} між зондами 2 та 4 і, позначивши її як U_{24}^{++} , занести це значення у табл. 2.6 поряд з відповідними значеннями I_{13} , I_{EM} та B .

17. Не змінюючи попередніх величин I_{13} й I_{EM} перемкнути П1 у позицію 2М-2'М, П2 – у позицію 2С-2'С і знову виміряти приладом ВН напругу U_{24} , позначивши її як U_{24}^{--} . Далі, зберігаючи тими ж самими величини I_{13} й I_{EM} та встановивши П1 у позицію 1М-1'М, залишаючи П2 у позиції 2С-2'С, виміряти напругу U_{24} , позначивши її як U_{24}^{+-} , а потім, встановивши П1 у позицію 2М-2'М, а П2 – у позицію 1С-1'С, виміряти напругу U_{24} , позначивши її як U_{24}^{-+} . Виміряні значення U_{24}^{--} , U_{24}^{+-} , U_{24}^{-+} теж занести у табл. 2.6.

Таблиця 2.7 – Параметри основних носіїв заряду у напівпровідниковому матеріалі і його питомий опір, визначені за результатами комплексного експериментального дослідження зразка № 2

Номер зразка	ρ , Ом·м	Тип ОНЗ	Тип провідності	U_H , В	R_H , м ³ /Кл	N , м ⁻³	μ , м ² /(В·с)	μB , абс. од.
2								

18. За значеннями I_{13} й U_{24} з табл. 2.6 згідно з формулою (2.41) при використанні відповідного значення C_ρ з табл. 2.3 розрахувати питомий опір ρ матеріалу зразка № 2. Тип ОНЗ і тип провідності матеріалу зразка № 2 встановити аналогічно дії 12 відносно зразка № 1. Згідно з формулою (2.36) при заміні у ній індексу y на 24 за значеннями U_{24} з табл. 2.6 визначити ЕРС Холла U_H , після чого за формулою (2.40) розрахувати сталу Холла R_H , використовуючи відповідне значення C_H з табл. 2.3. Концентрацію N основних носіїв заряду і їх рухливість μ встановити аналогічно дії 12 відносно зразка № 1. Розрахувати добуток μB . Усі результати, отримані при виконанні цієї комплексної дії, занести у табл. 2.7.

Таблиця 2.8 – Значення сили струмів у напівпровідниковому матеріалі I_{14} , I_{13} і котушках електромагніту I_{EM} , індукції магнітного поля B та напруг U_{23} і U_{24} між відповідними потенціальними зондами, вимірних при експериментальному дослідженні зразка № 3

Номер зразка	I_{14} , А	U_{23} , В	I_{EM} , А	B , Тл	I_{13} , А	U_{24}^{++} , В	U_{24}^{--} , В	U_{24}^{+-} , В	U_{24}^{-+} , В
3									

19. Закріпити зразок № 3 у контактному пристрої під чотиризондовою голівкою з лінійною еквідистантною системою зондів таким чином, щоб зонди підтискалися до прямокутної планарної поверхні зразка, як на рис. 2.2, в у [10], з силою 0,3 – 0,5 Н. За допомогою контактної пристрою через його перемикач-комутатор ПК з'єднати струмові зонди 1 і 4 з клемми КС1 і КС2, а потенціальні зонди 2 і 3 – з клемми КП1 і КП2 вимірної установки. Перемикач П2 перемкнути у позицію 1С-1'С, а перемикач П3 – у позицію 1Н-1'Н. Про належне підтискання усіх чотирьох зондів до поверхні зразка мають свідчити наявність заданих сили струму I_{14} у колі зондів 1 і 4, яка

встановлюється за допомогою генератора постійного струму Г2 і повинна бути не вище 10 мА, та різниці потенціалів U_{23} між зондами 2 і 3, котра вимірюється приладом ВН. Стабільність величини U_{23} протягом декількох хвилин при незмінному значенні величини I_{14} має бути підтвердженням оптимального вибору останньої. У противному разі слід зменшувати I_{14} , поки не буде досягнуто вказаної стабільності U_{23} . Виміряні стабільне значення U_{23} і відповідне йому значення I_{14} занести у табл. 2.8.

20. Залишивши перемикач П2 у позиції 1С-1'С, а перемикач П3 у позиції 1Н-1'Н, закріпити зразок № 3 у контактному пристрої під чотиризондовою головкою з розташуванням зондів у вершинах квадрата таким чином, щоб зонди підтискалися до прямокутної планарної поверхні зразка як на рис. 2.9, з силою 0,3 – 0,5 Н. За допомогою контактної пристрою через його перемикач-комутатор ПК з'єднати зонди 1 і 3 з клемми КС1 і КС2, а зонди 2 і 4 – з клемми КП1 і КП2 вимірювальної установки та розташувати контактний пристрій зі зразком № 3 між полюсними наконечниками електромагніту ЕМ таким чином, щоб прямокутна планарна поверхня зразка з розмірами a і b була паралельною до торцевих поверхонь цих наконечників, а сам зразок знаходився між ними на рівних відстанях.

21. За допомогою генератора постійного струму Г2 встановити таку силу струму I_{13} у зразку, при якій було виміряне стабільне значення U_{23} , переключити перемикач П1 у позицію 1М-1'М і за допомогою ЛАТРа встановити у котушках електромагніту струм силою I_{EM} , необхідною для створення у зазорі між полюсними наконечниками зі зразком однорідного магнітного поля з індукцією $0,3 \leq B \leq 0,5$ Тл, котру слід виміряти приладом ВМІ, датчик якого знаходиться між зразком і торцевою поверхнею одного з полюсних наконечників.

22. Повторити дії 15 і 16 відносно зразка № 3. Виміряні при цьому значення U_{24}^{++} , U_{24}^{--} , U_{24}^{+-} , U_{24}^{-+} занести у табл. 2.8 поряд з відповідними значеннями I_{13} , I_{EM} та B .

23. За значеннями I_{14} й U_{23} з табл. 2.8 згідно з формулою (2.42) при використанні відповідного значення G_l з табл. 2.3 розрахувати питомий опір ρ матеріалу зразка № 3. Тип ОНЗ і тип провідності матеріалу зразка № 3 встановити аналогічно дії 12 відносно зразка № 1. Електрорушійну силу Холла U_H , сталу Холла R_H , концентрацію N основних носіїв заряду і їх рухливість μ встановити аналогічно дії 18 відносно зразка № 2, користуючись при цьому необхідними даними з таблиць 2.3 і 2.8. Розрахувати добуток μB . Усі результати, отримані при виконанні цієї комплексної дії, занести у табл. 2.9.

Таблиця 2.9 – Параметри основних носіїв заряду у напівпровідниковому матеріалі і його питомий опір, визначені за результатами комплексного експериментального дослідження зразка № 3

Номер зразка	ρ , Ом·м	Тип ОНЗ	Тип провідності	U_H , В	R_H , м ³ /Кл	N , м ⁻³	μ , м ² /(В·с)	μB , абс. од.
3								

24. Приступити до оформлення звіту.

2.5.3 Зміст звіту

У звіті повинні бути наведені вказані нижче відомості:

1. Мета роботи.
2. Основні співвідношення, які використовуються для визначення типу, концентрації і рухливості основних носіїв заряду в напівпровідниках з домішковою провідністю за результатами вимірів ЕРС Холла і їх питомого опору.
3. Креслення досліджуваних зразків з їх геометричними розмірами.

4. Блок-схема вимірювальної установки.
5. Розрахунки питомих опорів, сталих Холла і параметрів основних носіїв заряду для досліджуваних зразків, виконані з використанням програми електронних таблиць Excel 2007.
6. Заповнені табл. 2.2 – 2.9 за наведеними вище зразками.
7. Висновки.

Запитання та завдання для самоперевірки

1. Які фізичні явища є підґрунтям для визначення параметрів основних носіїв заряду напівпровідникового матеріалу з домішковою провідністю за результатом виміру ЕРС Холла?
2. Чим визначається вибір співвідношень геометричних розмірів зразків з виступами на холлових гранях для проведення дослідження ефекту Холла з мінімальною похибкою виміру ЕРС Холла і навіщо потрібні такі виступи?
3. Що собою являють основні фізичні фактори, котрі найбільш суттєво можуть впливати на похибку виміру ЕРС Холла, і як має проводитися експеримент для усунення негативного впливу цих факторів?
4. Довести вірність формули (2.36).
5. Навіщо для визначення усіх параметрів основних носіїв заряду напівпровідникового матеріалу з домішковою провідністю поряд з ЕРС Холла необхідно знати його питомий опір?
6. У яких випадках для визначення параметрів основних носіїв заряду напівпровідникового матеріалу з домішковою провідністю доцільно використовувати чотиризондовий холловий метод?
7. Які експериментальні відмінності мають місце при використанні чотиризондового холлового метода у випадках зразків з круглою і прямокутною планарними поверхнями?
8. У чому полягає універсальність вимірювальної установки, блок-схема якої зображена на рис. 2.7?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 3

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ОСНОВНИХ НОСІЇВ ЗАРЯДУ В НАПІВПРОВІДНИКАХ МЕТОДОМ ВАН-ДЕР-ПАУ

Мета роботи – навчитися визначати методом Ван-дер-Пау тип, концентрацію та рухливість основних носіїв заряду в тонких однорідних напівпровідникових шарах з домішковою провідністю і у загальному випадку – з довільною формою їх планарної поверхні.

3.1 Загальні відомості

При виконанні попередньої лабораторної роботи з визначення параметрів основних носіїв заряду (ОНЗ) в напівпровідникових шарах з домішковою провідністю використовувались результати дослідження ефекту Холла та питомого опору матеріалу у зразках тільки правильної геометричної форми. Це є певним недоліком, оскільки не завжди виникає можливість виготовлення таких зразків. Тому Ван-дер-Пау розробив удосконалений варіант холлового методу, котрий у принципі повинен бути придатним для визначення сталої Холла R_H у режимі ЕРС Холла і питомого опору ρ , а за ними й параметрів ОНЗ в тонких однорідних домішкових напівпровідникових шарах плоско-паралельних зразків будь-якої конфігурації. Реалізацію методу Ван-дер-Пау може бути здійснено для таких зразків за умови використання чотирьох точкових омічних контактів, розташованих вздовж периметра зразка на його боковій поверхні й на якомога більших відстанях один від одного [5-7].

На рис. 3.1 згідно з [6] схематично зображено планарну поверхню зразка Ван-дер-Пау довільної конфігурації з чотирма точковими омічними контактами вздовж його периметра, де показано три варіанти використання

цих контактів: перший (фрагмент *a* рис. 3.1) – для визначення R_H ; другий і третій (відповідно фрагменти *б* і *в* рис. 3.1) – для визначення ρ .

Згідно з теорією цього методу у випадку взаємно ортогональних одне до одного та стаціонарних електричного \mathbf{E} і однорідного магнітного \mathbf{B} полів (вектор напруженості \mathbf{E} орієнтовано у зразку паралельно до його планарної поверхні, а вектор індукції \mathbf{B} орієнтовано перпендикулярно до неї) у відсутності супутніх фізичних ефектів, котрі обговорювались в методичних вказівках до попередньої лабораторної роботи 2, стала Холла визначається за формулою

$$R_H = \frac{\Delta R_{13}}{B} t, \quad (3.1)$$

де

$$\Delta R_{13} = \frac{\Delta U_{24}}{I_{13}} = \frac{U_{24}(B) - U_{24}(0)}{I_{13}}, \quad (3.2)$$

$U_{24}(B)$ – напруга між контактами 2 і 4 при $B > 0$ (фрагмент *a* рис. 3.1); $U_{24}(0)$ – напруга між контактами 2 і 4 при $B = 0$; I_{13} – сила струму у зразку від генератора постійного струму, що тече між контактами 1 і 3 (фрагмент *a* рис. 3.1); t – товщина напівпровідникового зразка.

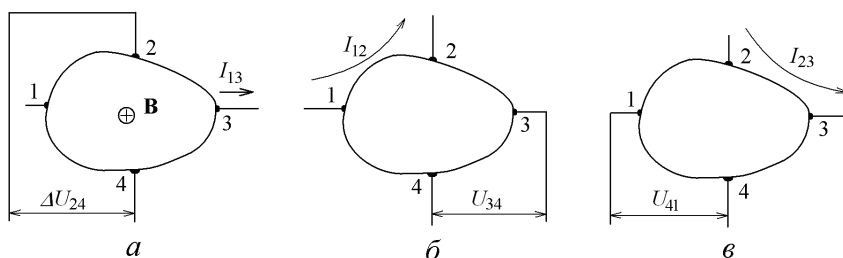


Рисунок 3.1 – Схематичне зображення планарної поверхні зразка довільної конфігурації з чотирма точковими омичними контактами вздовж його периметра

для визначення сталої Холла (*a*) і питомого опору (*б*, *в*) методом Ван-дер-Пау

Важливою умовою реалізації метода Ван-дер-Пау є необхідність вимірювання напруг між потенціальними контактами таким чином, щоб у колі цих контактів струм не протікав, тобто щоб при вказаних вимірюваннях за допомогою вольтметра його внутрішній опір був на багато порядків більшим за опір досліджуваного зразка.

Питомий опір матеріалу зразка визначається методом Ван-дер-Пау у такий спосіб. При $V = 0$ струм I_{12} пропускається від генератора постійного струму через два сусідніх контакти 1 і 2, а напруга U_{34} вимірюється між контактами 3 і 4 (фрагмент б рис. 3.1). За цими даними визначається параметр

$$R_{12} = U_{34}/I_{12}. \quad (3.3)$$

Потому зазначена процедура повторюється, але для інших пар контактів (фрагмент в рис. 3.1). За отриманими при цьому даними визначається параметр

$$R_{23} = U_{41}/I_{23}. \quad (3.4)$$

Отримані таким чином параметри R_{12} і R_{23} надають можливість розрахувати питомий опір матеріалу зразка за формулою

$$\rho = \frac{\pi t}{\ln 2} \left(\frac{R_{12} + R_{23}}{2} \right) f \left(\frac{R_{12}}{R_{23}} \right), \quad (3.5)$$

де $f(R_{12}/R_{23})$ – поправкова монотонна функція, аргументом якої є показане у дужках відношення.

При значеннях цього аргументу, наближених до одиниці, функція f може бути апроксимована таким чином:

$$f\left(\frac{R_{12}}{R_{23}}\right) \approx 1 - \frac{\ln 2}{2} \left(\frac{R_{12} - R_{23}}{R_{12} + R_{23}}\right)^2 \quad (3.6)$$

Таблиця 3.1 – Числові значення поправкової функції f в залежності від її аргументу R_{12}/R_{23}

R_{12}/R_{23}	f	R_{12}/R_{23}	f
1	1,000	50	0,472
2	0,961	100	0,404
5	0,822	200	0,350
10	0,699	500	0,296
20	0,589	1000	0,264

Характер функції в залежності від зміни її аргумента в широкому діапазоні значень R_{12}/R_{23} ілюструють числові дані, котрі згідно з [6] наведено у табл. 3.1.

Після визначення R_H за формулою (3.1) і ρ за формулою (3.5) згідно з [6, 7] рухливість μ основних носіїв заряду визначається таким чином.

Спочатку за формулою (2.25) при використанні знайдених величин R_H та ρ розраховується їх холлова рухливість μ_H і потому, відповідно до формули (2.26), з урахуванням відомого для умов експерименту холл-фактора r_H (див. табл. 2.1 та підпункт 2.2.2.2) виконується розрахунок

$$\mu = \mu_H / r_H . \quad (3.7)$$

Легко довести, що сумісне використання формул (2.25), (2.26) (3.1) та (3.2) дає

$$R_H = \frac{\Delta U_{24} t}{I_{13} B} , \quad (3.8)$$

$$\mu = \frac{|R_H|}{r_H \rho} = \frac{|\Delta U_{24}| t}{r_H \rho I_{13} B}. \quad (3.9)$$

При сумісному використанні співвідношень (3.8) і (2.19) для розрахунку концентрації N основних носіїв заряду q можна отримати таку формулу:

$$N = \frac{r_H}{q R_H} = \frac{r_H I_{13} B}{q \Delta U_{24} t}. \quad (3.10)$$

Тип основних носіїв заряду при застосуванні методу Ван-дер-Пау визначається як і у випадку дослідження класичного ефекту Холла (див. підрозділи 2.1.1 та 2.5.2) за полярністю вимірюваної величини ΔU_{24} при використанні співвідношень (2.14) й (2.15) та правила лівої руки і рис. 2.1.

3.2 Розрахунок параметрів основних носіїв заряду залежно від необхідної точності їх визначення

Як було зазначено у розділі 3.1, однією з ключових умов реалізації методу Ван-дер-Пау і правильності відповідних теоретичних співвідношень є використання чотирьох точкових омічних контактів, розташованих вздовж периметра зразка на його боковій поверхні й на якомога більших відстанях один від одного. Окрім цього важливим є також нехтовно малий вплив супутніх фізичних факторів, котрі обговорювались в підрозділі 2.2.1 методичних вказівок до попередньої лабораторної роботи 2.

Між тим, у реальних умовах вказані контакти мають скінченну площу, вони не є ідеально омічними, а у випадку плівкового напівпровідникового шару частково виходять і на планарну поверхню зразка. Помітний вплив на величину ΔU_{24} вносять також супутні фізичні фактори. Тому згідно з [6] похибки визначення R_H при використанні формули (3.1) без урахування

зазначених вище негативних факторів можуть сягати 100-600 %, а при визначенні ρ за формулою (3.5) – до 40 %. Істотно, що у такому випадку точність визначення μ і N за формулами (3.9) і (3.10) буде відповідно низькою. Але з іншого боку, якщо обставини виключають можливість виготовлення зразків для проведення необхідних досліджень звичайними холловими методами, метод Ван-дер-Пау є корисним навіть при такій низькій точності визначення параметрів ОНЗ за формулами (3.9) та (3.10).

Поряд з цим, значна інформативність і концептуальна простота методу Ван-дер-Пау стали потужним стимулом для наукових пошуків оптимальних співвідношень форм зразків й розмірів контактів, а також способів коректного усереднення результатів вимірів, котрі змогли б забезпечити суттєве підвищення точності визначення параметрів ОНЗ в досліджуваних напівпровідникових матеріалах. На цей час знайдено декілька варіантів конфігурації зразків і контактів до них, а також способів усереднення результатів вимірів, котрі у певній мірі відповідають зазначеній вимозі.

Щодо конфігурації зразків і контактів до них, то найбільш придатними вважаються три типи так званих зразків Ван-дер-Пау, котрі схематично зображено на рис. 3.2.

Так, наприклад, у випадку зразка типу листа конюшини (фрагмент *a* рис. 3.2) з $\beta > 0,1\pi$ при довжині кожного з чотирьох прорізів $L = 0,9r$ похибка виміру ΔU_{24} , що зумовлена тільки співвідношенням геометричних розмірів зразка і контактів, складає лише 5 %. У випадку квадратного зразка (фрагмент *б* рис. 3.2) при $c/a = 1/8$ похибка виміру ρ складає 2,5 %, а ΔU_{24} – 10 %. Однією з найбільш вдалих форм зразка є грецький хрест (фрагмент *в* рис. 3.2). По-перше, якщо $h/w > 1$, то зникає необхідність використання поправкової функції f при розрахунку величини питомого опору за формулою (3.5). По-друге, при $h/w \geq 1,5$ похибка виміру ΔU_{24} становить менше 1 %.

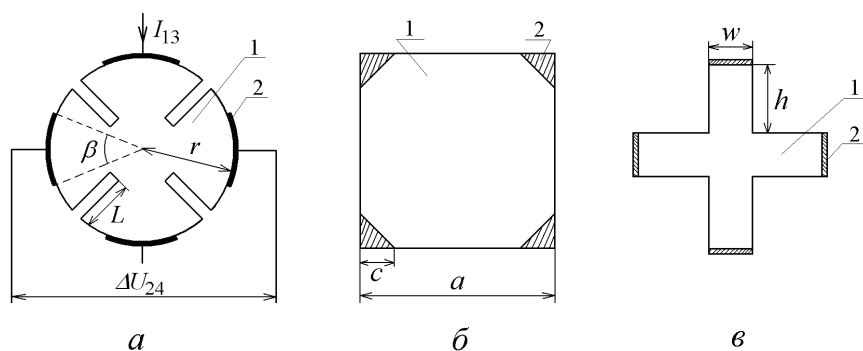


Рисунок 3.2 – Схематичне зображення зразків Ван-дер-Пау

(1 – напівпровідниковий матеріал, 2 – омичні контакти), найбільш придатних для визначення параметрів основних носіїв заряду з достатньо високою

точністю:

a – лист конюшини (кут β вимірюється у радіанах); b – квадрат; c – грецький хрест

Так, наприклад, у випадку зразка типу листа конюшини (фрагмент a рис. 3.2) з $\beta > 0,1\pi$ при довжині кожного з чотирьох прорізів $L = 0,9r$ похибка виміру ΔU_{24} , що зумовлена тільки співвідношенням геометричних розмірів зразка і контактів, складає лише 5 %. У випадку квадратного зразка (фрагмент b рис. 3.2) при $c/a = 1/8$ похибка виміру ρ складає 2,5 %, а ΔU_{24} – 10 %. Однією з найбільш вдалих форм зразка є грецький хрест (фрагмент c рис. 3.2). По-перше, якщо $h/w > 1$, то зникає необхідність використання поправкової функції f при розрахунку величини питомого опору за формулою (3.5). По-друге, при $h/w \geq 1,5$ похибка виміру ΔU_{24} становить менше 1 %.

Для максимального зниження похибок визначення величин ρ й R_H , зумовлених супутніми фізичними факторами, а звідси – і похибок визначення параметрів ОНЗ, за наведеною нижче методикою усереднення певної кількості експериментальних вимірів на зразках Ван-дер-Пау знаходяться

напруги \bar{U}_ρ при $B = 0$ та \bar{U}_{R_H} при $B > 0$, після чого величини ρ й R_H розраховуються таким чином:

$$\rho = \frac{\pi t}{\ln 2} \frac{\bar{U}_\rho}{I}, \quad (3.11)$$

$$R_H = \frac{\bar{U}_{R_H} t}{IB}. \quad (3.12)$$

Величина \bar{U}_ρ визначається за формулою

$$\bar{U}_\rho = [\bar{U}_{\rho 1} f(\alpha_{\rho 1}) + \bar{U}_{\rho 2} f(\alpha_{\rho 2})] / 2. \quad (3.13)$$

Аргументи $\alpha_{\rho 1}$ й $\alpha_{\rho 2}$ поправкової функції f , котра тотожна використовуваній у формулі (3.5) і чисельно подана у табл. 3.1, знаходяться зі співвідношень

$$\alpha_{\rho 1} = [U_{34}(+I) + U_{34}(-I)] / [U_{23}(+I) + U_{23}(-I)], \quad (3.14)$$

$$\alpha_{\rho 2} = [U_{14}(+I) + U_{14}(-I)] / [U_{21}(+I) + U_{21}(-I)], \quad (3.15)$$

а значення $\bar{U}_{\rho 1}$ і $\bar{U}_{\rho 2}$ – зі співвідношень

$$\bar{U}_{\rho 1} = [U_{34}(+I) + U_{34}(-I) + U_{23}(+I) + U_{23}(-I)] / 4, \quad (3.16)$$

$$\bar{U}_{\rho 2} = [U_{14}(+I) + U_{14}(-I) + U_{21}(+I) + U_{21}(-I)] / 4. \quad (3.17)$$

Величина \bar{U}_{R_H} визначається за формулою

$$\bar{U}_{R_H} = (\bar{U}_{24} + \bar{U}_{13})/2, \quad (3.18)$$

а величини \bar{U}_{24} і \bar{U}_{13} – за формулами

$$\bar{U}_{24} = [U_{24}(+I, +B) + U_{24}(-I, +B) + U_{24}(+I, -B) + U_{24}(-I, -B)]/4 \quad (3.19)$$

$$\bar{U}_{13} = [U_{13}(+I, +B) + U_{13}(-I, +B) + U_{13}(+I, -B) + U_{13}(-I, -B)]/4. \quad (3.20)$$

Знаки при величинах I та B у формулах (3.14)-(3.20) означають те ж саме, що і у формулах (2.35) методичних вказівок до попередньої лабораторної роботи 2. Сила струму I , що задається генератором постійного струму, при усіх вимірах підтримується однаковою.

Після визначення таким чином величин ρ і R_H відповідно до формул (3.11) і (3.12) параметри основних носіїв заряду розраховуються з відносними похибками менше 10 % за формулами

$$\mu = \frac{|R_H|}{r_H \rho} \quad (3.21)$$

та

$$N = \frac{r_H}{qR_H}. \quad (3.22)$$

3.3 Експериментальне дослідження однорідних напівпровідникових зразків з домішковою провідністю методом Ван-дер-Пау

Експериментальне дослідження однорідних напівпровідникових зразків з домішковою провідністю методом Ван-дер-Пау передбачає, по-перше, виготовлення тонких (значно менших за товщиною у порівнянні з

найменшою відстанню між сусідніми контактами вздовж периметра зразка) напівпровідникових шарів з однорідним об'ємним розподілом легуючої домішки і чотирьох якомога менших за площею омичних контактів до них на максимально можливих відстанях один від одного вздовж периметра зразка. По-друге, таке дослідження передбачає здійснення у певній послідовності при $B = 0$ та при $B > 0$ операцій спрямованого пропускання постійного струму відомої сили I_{ij} між однією з двох пар контактів (номери i та j) і вимірювання напруги U_{hk} між другою парою контактів (номери h та k), за значеннями яких у кінцевому рахунку визначаються параметри основних носіїв заряду у досліджуваному напівпровідниковому матеріалі.

Виготовлення таких напівпровідникових шарів може здійснюватись, наприклад, шляхом технологічно контрольованого потоншення первинно відносно товстих напівпровідникових пластин завдяки їх глибокому хімічному щавленню у відповідних щалівниках, вакуумної конденсації парової фази або парофазного хімічного осадження напівпровідникового матеріалу на діелектричну підкладку. Важливо нагадати, що виключення помітних похибок визначення параметрів ОНЗ у таких шарах при їх подальшому дослідженні на повітрі можливе лише у випадку сильно легованого напівпровідникового матеріалу з $\rho < 0,1$ Ом·см (див. підрозділ 2.3 у [10]). Інформацію про створення омичних контактів вміщує підрозділ 1.1 у [10].

Для пропускання постійного струму I_{ij} та вимірювання напруги U_{hk} при виконанні цієї лабораторної роботи використовується універсальна вимірювальна установка, блок-схема якої зображена на рис. 2.7, а її опис надано у підрозділі 2.3 методичних вказівок до попередньої лабораторної роботи 2. При цьому струмові контакти досліджуваного зразка з номерами i та j гальванічно з'єднуються зі струмовими клемми установки КС1 і КС2, а потенціальні контакти з номерами h та k – з потенціальними клемми установки КП1 і КП2. Перемикач П2 дозволяє змінювати напрям струму I_{ij} у

зразку, сила якого задається генератором постійного струму $\Gamma 2$ і вимірюється приладом mA . При позиції 1Н-1'Н перемикача ПЗ останній з'єднує високоомний вимірювач напруги ВН з потенціальними клемми установки КП1 і КП2, завдяки чому прилад ВН здійснює вимір напруги U_{hk} . Зміни номерів струмових і потенціальних контактів зразка при переході від вимірів, необхідних для визначення ρ , до вимірів, необхідних для визначення R_H , здійснюються за допомогою додаткового перемикача-комутатора ПК, котрий належить не показаному на рис. 2.7 контактному пристрою, що забезпечує гальванічне з'єднання досліджуваного зразка з вимірювальною установкою. Однорідне стаціонарне магнітне поле з $\mathbf{V} \perp \mathbf{E}$ створюється у зразку, розміщуваному паралельно до полюсних наконечників електромагніту ЕМ, при пропусканні через котушки ЕМ струму I_{EM} , котрий задається генератором постійного струму $\Gamma 1$, вимірюється амперметром А і може змінюватись за напрямом за допомогою перемикача П1. Зміна величини і напрямку I_{EM} забезпечує зміну величини і напрямку вектора \mathbf{V} , які контролюються вимірювачем магнітної індукції ВМІ.

3.4 Порядок виконання роботи

3.4.1 Завдання для виконання роботи

Для двох однорідних тонких шарових напівпровідникових зразків з домішковою провідністю однакового походження, але з різною формою фронтальної поверхні, за величиною питомого опору і за знаком та величиною сталої Холла, встановленими експериментально методом Ван-дер-Пау при постійному струмі у стаціонарному магнітному полі, визначити тип, концентрацію та рухливість основних носіїв заряду, після чого порівняти отримані кінцеві результати і зробити висновок відносно причин їх можливої розбіжності.

3.4.2 Порядок дій

1. За допомогою наданої інструкції, котра знаходиться на робочому місці, ознайомитись з особливостями використання універсальної лабораторної установки, блок-схему якої наведено на рис. 2.7, для визначення питомого опору і сталої Холла напівпровідникових зразків методом Ван-дер-Пау.

2. Після перевірки викладачем засвоєння правил використання вказаної вимірювальної установки підключити її до живильної електромережі для попереднього прогріву.

3. Отримати у викладача для досліджень два однорідних тонких напівпровідникових зразки з домішковою провідністю і питомим опором менше $0,1 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, котрі являють собою нанокристалічні плівкові шари однакового походження, але з різною формою фронтальної поверхні, завтовшки $0,1 < t \leq 1 \text{ мкм}$ на жорсткій підкладці з матеріалу, що має питомий опір, набагато порядків більший, ніж досліджуваний напівпровідниковий матеріал. До асортименту досліджуваних зразків належать:

1) зразок № 1 з планарною поверхнею довільної форми і чотирма омічними контактами вздовж периметра з виходом на цю поверхню, схожий за конфігурацією до зображеного на рис. 3.1;

2) зразок № 2 у формі грецького хреста з омічними контактами вздовж кожного кінця хреста і відношенням довжини h більших боків хреста до довжини w омічних контактів (див. рис. 3.2, в) $h/w > 1$.

4. З'ясувати у викладача конкретну природу та товщину t напівпровідникових шарів для цих зразків, визначити за допомогою мірної лінійки їх характерні планарні розміри, середні відстані $\langle d \rangle$ між сусідніми контактами вздовж периметра напівпровідникового шару і занести усі

отримані таким чином дані до таблиці 3.2. Поряд з цим розрахувати та занести у цю таблицю реальні співвідношення $t/\langle d \rangle$ і h/w .

Таблиця 3.2 – Форми, матеріали і геометричні параметри досліджуваних зразків

Номер зразка	Форма зразка	Матеріал зразка	t , мм	$\langle d \rangle$, мм	h , мм	w , мм	$t/\langle d \rangle$	h/w
1								
2								

5. Розташувати зразок № 1 у контактному пристрої і за допомогою останнього через ПК гальванічно з'єднати струмові електроди 1 і 2 зразка з клемми КС1 та КС2, а потенціальні електроди 3 і 4 – з клемми КП1 та КП2 вимірної установки. Перемикач П2 перемкнути у позицію 1С-1'С, а перемикач ПЗ – у позицію 1Н-1'Н.

6. За допомогою генератора постійного струму Г2 встановити силу струму I_{12} у зразку № 1 не вище 10 мА і приладом ВН при $B = 0$ виміряти різницю потенціалів U_{34} . Стабільність величини U_{34} протягом декількох хвилин при незмінному значенні величини I_{12} має бути підтвердженням оптимального вибору останньої. У противному разі слід зменшувати I_{12} , поки не буде досягнуто вказаної стабільності U_{34} . За формулою (3.3) розрахувати величину R_{12} , що відповідає стабільному значенню U_{34} .

7. За допомогою ПК підключити контакти 2 і 3 зразка № 1 до клем КС1 і КС2, а контакти 4 і 1 – до клем КП1 і КП2. Генератором Г2 встановити силу струму $I_{23} = I_{12}$ і приладом ВН при $B = 0$ виміряти різницю потенціалів U_{41} . За формулою (3.4) розрахувати величину R_{23} .

8. Якщо $R_{12} > R_{23}$, то результати проведених вимірів і розрахунків занести у табл. 3.3. При протилежному співвідношенні R_{12} і R_{23} вказані виміри і

розрахунки слід зробити знову після циклічної зміни нумерації контактів за напрямком обертання годинникової стрілки. У кінцевому рахунку у табл. 3.3 мають бути занесені результати вказаних вимірів і розрахунків, котрі відповідають співвідношенню $R_{12} > R_{23}$. Цьому співвідношенню має відповідати і остаточна нумерація контактів, при якій індексація для нових значень сили струму та напруги не зміниться.

9. Розрахувати величину відношення R_{12}/R_{23} і за нею, користуючись табл. 3.1 або табл. 12 на стор. 43 у [7], визначити числове значення поправкової функції f . Після цього за формулою (3.5) розрахувати питомий опір матеріалу зразка № 1 і усі результати, отримані при виконанні дії 9, теж занести у табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Результати, пов’язані з визначенням питомого опору напівпровідникового матеріалу зразка № 1

Номер зразка	I_{12} , А	U_{34} , В	R_{12} , Ом	I_{23} , А	U_{41} , В	R_{23} , Ом	$\frac{R_{12}}{R_{23}}$	$f\left(\frac{R_{12}}{R_{23}}\right)$	ρ , Ом·м
1									

10. За допомогою ПК підключити контакти 1 і 3 зразка № 1 до клем КС1 і КС2, а контакти 2 і 4 – до клем КП1 і КП2. Генератором Г2 встановити силу струму $I_{13} = I_{12}$ і приладом ВН при $B = 0$ виміряти різницю потенціалів $U_{24}(0)$. Розташувати контактний пристрій зі зразком № 1 між полюсними наконечниками таким чином, щоб планарна поверхня зразка була паралельною до їх торцевих плоских поверхонь. Створити магнітне поле з $0,3 \leq B \leq 0,5$ Тл і при силі струму I_{13} виміряти різницю потенціалів $U_{24}(B)$. За формулою (3.2) розрахувати величину ΔR_{13} , після чого за формулою (3.1) при $r_H = 1$ розрахувати величину R_H . Усі результати, отримані при виконанні дії 10, занести у табл. 3.4 поряд з конкретним значенням B .

11. Користуючись співвідношеннями (2.14) і (2.15) та правилом лівої руки і рис. 2.1, встановити тип основних носіїв заряду (ОНЗ: електрони – e^- або дірки – h^+), а на підставі цього – тип провідності (n або p) матеріалу зразка № 1. За значеннями ρ і R_H з табл. 3.3 та 3.4, користуючись формулами (3.9) й (3.10), при $r_H = 1$ розрахувати рухливість і концентрацію основних носіїв заряду у матеріалі зразка № 1. Усі результати, отримані при виконанні дії 11, занести у табл. 3.5. До цієї таблиці занести також результат розрахунку величини μV .

Таблиця 3.4 – Результати, пов’язані з визначенням сталої Холла для напівпровідникового матеріалу зразка № 1

Номер зразка	I_{13} , А	$U_{24}(0)$, В	B , Тл	$U_{24}(B)$, В	ΔR_{13} , Ом	R_H , м ³ /Кл
1						

Таблиця 3.5 – Параметри основних носіїв заряду у напівпровідниковому матеріалі, визначені за результатами комплексного експериментального дослідження зразка № 1

Номер зразка	Тип ОНЗ	Тип провідності	N , м ⁻³	μ , м ² /(В·с)	μV , абс. од.
1					

12. Замінити у контактному пристрої зразок № 1 на зразок № 2. Розпочати дослідження, необхідні для визначення питомого опору матеріалу цього зразка з похибкою менше 5 %. Для досягнення вказаної мети на першому етапі спочатку за допомогою перемикача-комутатора ПК з’єднати зі струмовими клемми КС1 і КС2 контакти зразка 1 і 2, а з потенціальними клемми КП1 і КП2 контакти зразка 3 і 4. Далі, при $B = 0$ та позиції 1С-1'С перемикача П2 повторити дію 6, після чого експериментальну величину I_{12}

позначити як $+I$ і відповідно до неї експериментальну величину U_{34} позначити як $U_{34}(+I)$. Перевести перемикач П2 у позицію 2С-2'С і при протилежному напрямі струму I_{12} , який позначити як $-I$, знову визначити U_{34} , позначивши її як $U_{34}(-I)$. Потому, за допомогою ПК з'єднати зі струмовими клемми КС1 і КС2 контакти зразка 1 і 4, а з потенціальними клемми КП1 і КП2 контакти зразка 2 і 3. Далі, використовуючи позиції перемикача П2, при $V = 0$ та попередніх за абсолютною величиною значеннях I виміряти напруги $U_{23}(+I)$ і $U_{23}(-I)$. За отриманими результатами, користуючись формулою (3.14), розрахувати величину $\alpha_{\rho 1}$. Подібним способом при аналогічному за абсолютною величиною значенні I , маніпулюючи відповідним чином перемикачами ПК і П2, виміряти напруги $U_{14}(+I)$, $U_{14}(-I)$, $U_{21}(+I)$ і $U_{21}(-I)$. За цими результатами, користуючись формулою (3.15), розрахувати величину $\alpha_{\rho 2}$. Користуючись знайденими величинами $\alpha_{\rho 1}$ і $\alpha_{\rho 2}$ та табл. 3.1 або табл. 12 на стор. 43 у [7], визначити числові значення поправкової функції $f(\alpha_{\rho 1})$ і $f(\alpha_{\rho 2})$. Усі результати, отримані при виконанні дії 12, занести у табл. 3.6.

Таблиця 3.6 – Результати, пов'язані з визначенням поправкових функцій $f(\alpha_{\rho 1})$ і $f(\alpha_{\rho 2})$ для зразка № 2

Номер зразка	I, A	$U_{34}(+I), B$	$U_{23}(+I), B$	$U_{14}(+I), B$	$U_{21}(+I), B$	$\alpha_{\rho 1}$	$f(\alpha_{\rho 1})$
		$U_{34}(-I), B$	$U_{23}(-I), B$	$U_{14}(-I), B$	$U_{21}(-I), B$	$\alpha_{\rho 2}$	$f(\alpha_{\rho 2})$
2							

13. Виконати другий етап досліджень, необхідних для визначення питомого опору матеріалу зразка № 2 з похибкою менше 5 %. Спочатку, за допомогою формул (3.16) і (3.17), користуючись значеннями U_{hk} з табл. 3.6, розрахувати величини $\bar{U}_{\rho 1}$ і $\bar{U}_{\rho 2}$. Потому, за допомогою формули (3.13), користуючись значеннями $f(\alpha_{\rho 1})$ і $f(\alpha_{\rho 2})$ з табл. 3.6 та величинами $\bar{U}_{\rho 1}$ і $\bar{U}_{\rho 2}$, розрахувати величину \bar{U}_{ρ} . Наприкінці, за формулою (3.11) розрахувати

питомий опір ρ напівпровідникового матеріалу зразка № 2. Усі результати, отримані при виконанні дії 13, занести у табл. 3.7.

Таблиця 3.7 – Результати, пов’язані з визначенням питомого опору напівпровідникового матеріалу зразка № 2

Номер зразка	$\bar{U}_{\rho 1}, \text{В}$	$\bar{U}_{\rho 2}, \text{В}$	$\bar{U}_{\rho}, \text{В}$	$\rho, \text{Ом}\cdot\text{м}$
2				

14. Розпочати дослідження, спрямовані на визначення типу і концентрації N основних носіїв заряду за сталою Холла для зразка № 2 з похибкою менше 5 %. На першому етапі цих досліджень спочатку за допомогою ПК підключити контакти 1 і 3 зразка № 2 до клем КС1 і КС2, а контакти 2 і 4 – до клем КП1 і КП2. Розташувати контактний пристрій зі зразком № 2 між полюсними наконечниками ЕМ таким чином, щоб планарна поверхня зразка була паралельною до їх торцевих плоских поверхонь. Генератором Г2 встановити силу струму $I_{13} = I$. Створити магнітне поле з $0,3 \leq B \leq 0,5$ Тл і при силі струму I виміряти різницю потенціалів $U_{24}(+I,+B)$. Далі, підтримуючи стабільними абсолютні значення I та B і послідовно змінюючи відповідним чином позиції перемикачів П1 й П2, подібно до дії 12 провести виміри величин $U_{24}(-I,+B)$, $U_{24}(+I,-B)$, $U_{24}(-I,-B)$. Позначивши усі виміряні величини U_{24} відповідно $U_{24}^{++}, U_{24}^{+-}, U_{24}^{-+}, U_{24}^{--}$, занести їх у табл. 3.8 поряд зі значенням I і конкретним значенням B . Далі, за допомогою ПК підключити контакти 2 і 4 зразка № 2 до клем КС1 і КС2, а контакти 1 і 3 – до клем КП1 і КП2, після чого при тих же за абсолютними значеннями I та B , послідовно змінюючи відповідним чином позиції перемикачів П1 й П2, подібно до попередніх аналогічних операцій провести виміри величин $U_{13}(+I,+B)$, $U_{13}(-I,+B)$, $U_{13}(+I,-B)$, $U_{13}(-I,-B)$. Позначивши усі виміряні величини U_{13} відповідно $U_{13}^{++}, U_{13}^{+-}, U_{13}^{-+}, U_{13}^{--}$, занести їх у табл. 3.8. За усіма цими результатами,

користуючись формулою (3.18), розрахувати величину \bar{U}_{R_H} і теж занести її у табл. 3.8.

Таблиця 3.8 – Результати, пов’язані з визначенням сталої Холла для зразка № 2

Номер зразка	I , А	B , Тл	U_{24}^{++} , В	U_{24}^{-+} , В	U_{24}^{+-} , В	U_{24}^{--} , В	U_{13}^{++} , В	U_{13}^{-+} , В	U_{13}^{+-} , В	U_{13}^{--} , В	\bar{U}_{R_H} , В
2											

15. На другому етапі досліджень, розпочатих дією 14, перш за все, користуючись формулою (3.12) і результатами з табл. 3.8, розрахувати сталу Холла R_H для зразка № 2. Далі, за формулою (3.22) розрахувати N . Аналогічно до дії 11 встановити тип основних носіїв заряду. Усі ці результати занести у табл. 3.9. Після завершення цього етапу досліджень за формулою (3.21) при $r_H = 1$, користуючись попередньо визначеними величинами ρ (таблиця 3.7) і R_H (табл. 3.9), розрахувати рухливість μ , а потім – величину μB . Останні дві величини теж занести у табл. 3.9.

Таблиця 3.9 – Стала Холла і параметри основних носіїв заряду у напівпровідниковому матеріалі, визначені за результатами комплексного експериментального дослідження зразка № 2

Номер зразка	R_H , м ³ /Кл	Тип ОНЗ	Тип провідності	N , м ⁻³	μ , м ² /(В·с)	μB , абс. од.
2						

16. Приступити до оформлення звіту.

3.4.3 Зміст звіту

У звіті повинні бути наведеними вказані нижче відомості:

1. Мета роботи.
2. Основні співвідношення, які використовуються для визначення типу, концентрації і рухливості основних носіїв заряду в напівпровідниках з домішковою провідністю за результатами досліджень методом Ван-дер-Пау.
3. Креслення досліджуваних зразків з їх геометричними розмірами.
- 4.. Розрахунки питомих опорів, сталих Холла і параметрів основних носіїв заряду для досліджуваних зразків, виконані з використанням програми електронних таблиць Excel 2007.
5. Заповнені табл. 3.2 – 3.9 за наведеними вище зразками.
6. Висновки.

Запитання та завдання для самоперевірки

1. Завдяки чому метод Ван-дер-Пау набув широкого поширення для визначення параметрів основних носіїв заряду в напівпровідникових матеріалах з домішковою провідністю?
2. Яка конфігурація зразків і на підставі яких теоретичних висновків вона є переважною для проведення досліджень методом Ван-дер-Пау з мінімальною похибкою?
3. Що собою являють основні фізичні фактори, котрі найбільш суттєво можуть впливати на похибку виміру ЕРС Холла, і як має проводитися експеримент для усунення негативного впливу цих факторів?
4. Довести вірність формул (3.8) та (3.9).

5. Навіщо для визначення усіх параметрів основних носіїв заряду напівпровідникового матеріалу з домішковою провідністю методом Ван-дер-Пау поряд зі сталюю Холла необхідно знати його питомий опір?

6. Які експериментальні відмінності мають місце при необхідності визначення параметрів основних носіїв заряду методом Ван-дер-Пау з похибкою менше 5 %?

7. Чому вимірювальна установка, блок-схема якої зображено на рис. 2.7, може бути використана для реалізації методу Ван-дер-Пау?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 4

ВИЗНАЧЕННЯ РУХЛИВОСТІ ОСНОВНИХ НОСІЇВ ЗАРЯДУ В НАПІВПРОВІДНИКАХ ШЛЯХОМ ВИМІРУ ГЕОМЕТРИЧНОГО МАГНЕТООПОРУ

Мета роботи – навчитися визначати методом геометричного магнетоопору рухливість основних носіїв заряду в тонких однорідних напівпровідникових шарах з домішковою провідністю.

4.1 Загальні відомості

Викривлення силою Лоренца траєкторії носіїв заряду у магнітному полі веде до зменшення складової струму, спрямованої вздовж вектора напруженості електричного поля, що еквівалентно підвищенню питомого опору напівпровідника. Це явище отримало назву ефекту магнетоопору або ефекту Гауса чи магнеторезистивного ефекту [4].

Викликана цим ефектом зміна повного опору напівпровідника визначається як

$$\Delta R = R(B) - R(0), \quad (4.1)$$

де $R(B)$ і $R(0)$ – повні опори напівпровідника відповідно у магнітному полі з індукцією B та при $B = 0$.

Ця зміна є тим більшою при тих самих значеннях B , чим, наприклад, меншим є відношення довжини l прямокутного напівпровідникового зразка у напрямку між двома паралельними струмовими електродами до його ширини d , якій відповідають найбільші розміри вказаних електродів. Тому найбільші значення ΔR для прямокутних напівпровідникових зразків досягаються при використанні коротких й широких зразків з $l/d \ll 1$ і струмовими електродами, що утворюють омичні контакти до напівпровідникового матеріалу повністю вздовж його довгих боків. Схематичне зображення подібного зразка показано на рис. 4.1.

Оскільки при такій геометрії зразків, у протилежність довгим і вузьким холловим зразкам з $l/d \geq 3$, струмові електроди ефективно шунтують протилежні холлові грані, то холлове поле у них практично відсутнє. Завдяки цьому під дією сили Лоренца викривляються траєкторії усіх основних носіїв заряду, що і забезпечує найбільш суттєвий прояв магнеторезистивного ефекту, котрий у розглянутому випадку зветься геометричним магнеторезистивним ефектом або ефектом геометричного магнетоопору.

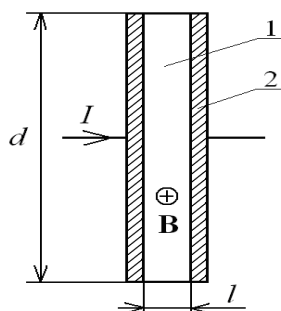


Рисунок 4.1 – Схематичне зображення зразка для виміру геометричного магнетоопору

При реалізації ефекту геометричного магнетоопору за умови, що вектор \mathbf{B} є перпендикулярним до планарної поверхні зразка (див. рис. 4.1), згідно з [6, 7]

$$\Delta R/R(0) = (r_M \mu B)^2, \quad (4.2)$$

де r_M – коефіцієнт, що залежить від типу розсіювачів носіїв заряду (див. табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Залежність коефіцієнта r_M від типу розсіювачів носіїв заряду у напівпровідниковому матеріалі

Розсіювачі	Акустичні фонони	Іонізована домішка	Нейтральна домішка
r_M , відн. од.	1,33	2,43	1,00

Як видно зі співвідношень (4.1) і (4.2), за результатами експериментального виміру геометричного магнетоопору ΔR досить легко знаходиться рухливість основних носіїв заряду μ . Ця обставина стала ключовим чинником для широкого застосування методу геометричного магнетоопору щодо визначення параметра μ у практично важливих напівпровідникових матеріалах і особливо у випадках, коли використання інших методів для визначення μ неможливе. Наприклад, коли напівпровідникові шари знаходяться на підкладках зі значно більшою, ніж у самих шарах, провідністю.

4.2 Умови виміру геометричного магнетоопору, необхідне обладнання і спосіб подальшого розрахунку рухливості основних носіїв заряду

Згідно з теорією цього методу [6] вимір величини ΔR необхідно здійснювати, живлячи зразок від джерела напруги, тобто щоб модуль вектора напруженості електричного поля \mathbf{E} у зразку відповідав умові

$$E(B) = \text{const} \quad (4.3)$$

незалежно від значення B . Ще раз підкреслимо важливість наявності саме омичних контактів між електродами і напівпровідниковим матеріалом та дотримання співвідношення $l/d \ll 1$ для досліджуваних зразків з конфігурацією, аналогічною до зображеної на рис. 4.1.

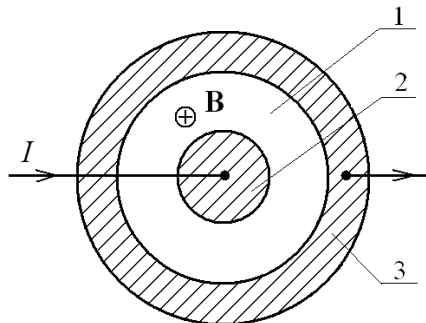


Рисунок 4.2 – Схематичне зображення зразка у формі диска Корбіно:

1 – напівпровідниковий шар; 2 – центральний електрод; 3 – периферійний електрод

Однак, при можливості, рекомендується також виготовляти досліджувані зразки у формі так званого диска Корбіно [4, 9], зображеного на рис. 4.2. З цього рисунку легко бачити, що при такій формі зразка принципово відсутній ефект накопичення будь-де зарядів під впливом сили Лоренца і

створення холлового поля, котре заважало б викривленню траєкторій усіх носіїв заряду магнітним полем.

Оскільки навіть у сильних магнітних полях величина $\Delta R/R(0)$ частіше за все не перевищує декількох десятків відсотків, вимір величин $R(0)$ і $R(B)$ слід проводити за допомогою мостової схеми. Тому у цій лабораторній роботі для таких вимірів використовується міст постійного струму, подібний до приладів типу МОД-61 або Р4833, принцип роботи яких і спосіб розрахунку повного опору R досліджуваного зразка за їх допомогою описано у підрозділі 1.3 методичних вказівок до лабораторної роботи «Визначення питомого електричного опору однорідних напівпровідників за їх повним електричним опором» [10].

Для створення регульованого за силою магнітного поля у зразку при виконанні цієї лабораторної роботи використовується блок електромагніту ЕМ вимірювальної установки, схему якої зображено на рис. 2.7, а опис роботи блока ЕМ наведено у підрозділі 2.3.

Після експериментального визначення величин $R(0)$ і $R(B)$ розрахунок величини μ виконується за допомогою формули

$$\mu = \frac{1}{r_M B} \left[\frac{R(B) - R(0)}{R(0)} \right]^{1/2}, \quad (4.4)$$

яку легко отримати, користуючись формулами (4.1) і (4.2). Ця формула є справедливою, перш за все, у випадку ізотропних напівпровідникових матеріалів, наприклад, полікристалічних. У випадку монокристалічних напівпровідників її можна використовувати тільки при вимірах $R(B)$ за умови, що вектор \mathbf{B} орієнтовано паралельно до осі симетрії кристала не нижче третього порядку [9] при перпендикулярній орієнтації відносно відповідної осі планарної поверхні монокристалічного зразка, у якій лежить вектор \mathbf{E} .

4.3 Порядок виконання роботи

4.3.1 Завдання для виконання роботи

Для двох однорідних тонких шарових напівпровідникових зразків з домішковою провідністю однакового походження, але різної форми, при постійній напрузі і стаціонарному магнітному полі за результатами вимірів геометричного магнетоопору визначити рухливість основних носіїв заряду, після чого порівняти отримані кінцеві результати і зробити висновок відносно причин їх можливої розбіжності.

4.3.2 Порядок дій

1. За допомогою наданої інструкції, котра знаходиться на робочому місці, ознайомитись з особливостями використання обладнання для вимірювання геометричного магнетоопору досліджуваних зразків – моста постійного струму і блока електромагніту лабораторної установки, блок-схему якої наведено на рис. 2.7.

2. Після перевірки викладачем засвоєння правил використання вказаного обладнання підключити його до живильної електромережі для попереднього прогріву.

3. Отримати у викладача для досліджень два однорідних тонких напівпровідникових зразки різної конфігурації з домішковою провідністю і питомим опором менше 0,1 Ом-см, котрі являють собою нанокристалічні плівкові шари однакового походження завтовшки $0,1 < t \leq 1$ мкм на жорсткій підкладці з матеріалу, що має питомий опір набагато порядків більший, ніж досліджуваний напівпровідниковий матеріал. До асортименту досліджуваних зразків належать:

1) зразок № 1, аналогічний за конфігурацією до зображеного на рис. 4.1;

2) зразок № 2, аналогічний за конфігурацією до зображеного на рис. 4.2.

4. З'ясувати у викладача конкретну природу та товщину t напівпровідникових шарів для цих зразків, визначити за допомогою мірної лінійки характерні планарні розміри l й d для зразка № 1 і занести усі отримані таким чином дані у табл. 4.2. Поряд з цим розрахувати та занести до цієї таблиці реальне співвідношення l/d .

Таблиця 4.2 – Форми, матеріал і геометричні параметри досліджуваних зразків

Номер зразка	Форма зразка	Матеріал зразка	t , мм	l , мм	d , мм	l/d
1	+	+	+	+	+	+
2	+	+	+			

5. Розташувати зразок № 1 у контактному пристрої і за допомогою останнього з'єднати його струмові електроди з відповідними клемми моста постійного струму, після чого за вказівками інструкції до цього приладу при $B = 0$ з максимально можливою точністю визначити величину $R(0)$. Занести це значення у табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Результати, пов'язані з визначенням рухливості основних носіїв заряду у напівпровідниковому матеріалі досліджуваних зразків

Номер зразка	$R(0)$, Ом	$R(B)$, Ом	B , Тл	μ , м ² /(В·с)	μB , абс. од.
1					
2					

6. Подібно до того, як це було зроблено при виконанні дії 10 попередньої лабораторної роботи 3, розмістити контактний пристрій зі зразком № 1, підключеним до моста постійного струму; між полюсними наконечниками електромагніту і за допомогою відповідних засобів блока електромагніту створити у зразку магнітне поле з $0,3 \leq B \leq 0,5$ Тл. Після цього за допомогою моста постійного струму з максимально можливою точністю визначити величину $R(B)$. Це значення поряд з конкретною величиною B теж занести у табл. 4.3. У кінцевому рахунку, користуючись $r_M = 2,43$ (тому що досліджується сильно легований напівпровідниковий матеріал в умовах повної іонізації домішкових центрів) та формулою (4.4), визначити величину μ для досліджуваного напівпровідникового матеріалу і у свою чергу занести її у табл. 4.3.

7. Повторити порядок дій 5 та 6 для зразка № 2. Після цього розрахувати і занести у табл. 4.3 величину добутку μB .

8. Приступити до оформлення звіту.

4.3.3 Зміст звіту

У звіті повинні бути наведені вказані нижче відомості:

1. Мета роботи.
2. Основні співвідношення, які використовуються для визначення рухливості основних носіїв заряду в напівпровідниках з домішковою провідністю за результатами досліджень методом геометричного магнетоопору.
3. Креслення досліджуваних зразків з їх геометричними розмірами.
- 4.. Розрахунки рухливості основних носіїв заряду для досліджуваних зразків, виконані з використанням програми електронних таблиць Excel 2007.
5. Заповнені табл. 4.2 і 4.3 за наведеними вище зразками.
6. Висновки.

Запитання та завдання для самоперевірки

1. Завдяки чому метод геометричного магнетоопору набув широкого поширення для визначення рухливості основних носіїв заряду в напівпровідникових матеріалах з домішковою провідністю?
2. Яка конфігурація зразків і на підставі яких теоретичних висновків є переважною для проведення досліджень методом геометричного магнетоопору з мінімальною похибкою?
3. Навіщо для мінімізації похибки визначення рухливості основних носіїв заряду цим методом контакти струмових електродів з напівпровідником мають бути омичними?
4. Довести вірність формули (4.4).
5. Проаналізувати ключові чинники можливої відмінності визначених величин рухливості основних носіїв заряду в однакових напівпровідникових матеріалах при різній формі зразків з них.
6. Пояснити, у який спосіб можна було би розрахувати концентрацію основних носіїв заряду у напівпровідниковому матеріалі досліджених зразків, якщо було би відомо його питомий опір.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Schroder, Dieter K. Semiconductor Material and Device Characterization. 3rd Ed. John Wiley and Sons, Inc. Hoboken, New Jersey, 2006.
2. Kasap S.O. Principles of Electronic Materials and Devices. – N.Y.: McGraw-Hill, 2005.
3. Sze, S.M., Ng, K.K.: Physics of Semiconductor Devices. Wiley, Hoboken (2007)
4. Deen, M.J., Pascal, F.: Electrical characterization of semiconductors materials and devices. In: Kasap, S., Capper, P. (eds.) Springer Handbook of Electronic and Photonic Materials, pp. 453–481. Springer International Publishing, AG (2017)
5. Neamen D. Semiconductor Physics and Devices. – N.Y.: McGraw-Hill, 2003.
6. Метрологія [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальні технології» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: Н.М. Защепкіна. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 397 с.
7. Основи метрології та електричних вимірювань [Електронне видання]: навч. посіб. / Д.Л. Лавренова, В.М. Хлистов. – К.: НТУУ «КПІ», 2016. – 123 с.
8. Пека Г.П., Стріха В.І. Поверхневі та контактні явища у напівпровідниках. – К.: Либідь, 1992. – 235 с.
9. Щупляк Н. М. Основи електроніки і мікроелектроніки. – Дрогобич: Бескид БІТ, 2014. – 443 с.
10. Поплавко Ю.М., Ільченко В.І., Воронов С.О., Якименко Ю.І. Фізичне матеріалознавство. Частина 4. Напівпровідники. – К.: НТУУ «КПІ», 2011.- 333 с.

ЗМІСТ

ВСТУП	3
1. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 1 Визначення типу основних носіїв заряду в напівпровідниках термoeлектричним методом	4
1.1. Загальні відомості	4
1.2. Вимірювальна установка і особливості практичної реалізації методу термозонда	7
1.3. Порядок виконання роботи	10
1.3.1 Завдання для виконання роботи	10
1.3.2 Порядок дій	10
1.3.3 Зміст звіту	13
Запитання для самоперевірки	13
2. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 2 Визначення параметрів основних носіїв заряду в напівпровідниках шляхом виміру електрорушійної сили Холла	14
2.1. Загальні відомості	15
2.1.1. Природа виникнення електрорушійної сили Холла та її зв'язок з типом і концентрацією основних носіїв заряду в напівпровідниках з домішковою провідністю	15
2.1.2. Спосіб визначення рухливості основних носіїв заряду у напівпровідниках з домішковою провідністю за значеннями електрорушійної сили Холла та їх питомого опору	21
2.2. Методи підвищення точності вимірювання ЕРС Холла при постійному струмі та стаціонарному магнітному полі	23
2.2.1 Основні фактори впливу на похибку вимірювання	23
2.2.2 Практичні заходи зі зниження похибки вимірювання	27
2.2.2.1 Зниження похибки, зумовленої геометричними факторами	27
2.2.2.2 Зниження похибки, зумовленої фізичними факторами	30
2.3. Вимірювальна установка для визначення ЕРС Холла і питомого опору при постійному струмі та стаціонарному магнітному полі у випадку зразків з виступами на холлових гранях	34
2.4. Особливості визначення сталої Холла чотиризондовим методом у випадку тонких однорідних напівпровідникових шарів круглої і прямокутної форми з домішковою провідністю	36
2.5. Порядок виконання роботи	41
2.5.1 Завдання для виконання роботи	41
2.5.2. Порядок дій	41
2.5.3 Зміст звіту	50
Запитання для самоперевірки	51
3. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 3 Визначення параметрів основних носіїв заряду в напівпровідниках	

методом Ван-дер-Пау	52
3.1 Загальні відомості	52
3.2 Розрахунок параметрів основних носіїв заряду залежно від необхідної точності їх визначення	56
3.3 Експериментальне дослідження однорідних напівпровідникових зразків з домішковою провідністю методом Ван-дер-Пау	60
3.4 Порядок виконання роботи	62
3.4.1.Завдання для виконання роботи	62
3.4.2. Порядок дій	63
3.4.3 Зміст звіту	69
Запитання для самоперевірки	70
4.ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 4	
Визначення рухливості основних носіїв заряду в напівпровідниках шляхом виміру геометричного магнетоопору	71
4.1 Загальні відомості	71
4.2 Умови виміру геометричного магнетоопору, необхідне обладнання і спосіб подальшого розрахунку рухливості основних носіїв заряду	74
4.3 Порядок виконання роботи	76
4.3.1.Завдання для виконання роботи	76
4.3.2. Порядок дій	76
4.3.3 Зміст звіту	78
Запитання для самоперевірки	79
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	80

Навчальне видання

Методичні вказівки
до виконання лабораторних робіт
з навчальної дисципліни «Фізичні методи дослідження матеріалів
та приладів сонячної енергетики»
для студентів спеціальності денної форми навчання
за спеціальністю «Електроніка, електронні комунікації,
приладобудування та радіотехніка»
Частина 2

Укладачі:

МІНАКОВА Ксенія Олександрівна
КІРІЧЕНКО Михайло Валерійович
ЗАЙЦЕВ Роман Валентинович
ДОБРОЖАН Андрій Ігорович

Відповідальний за випуск проф. Зайцев Р.В.
Роботу до видання рекомендував доц. Конотопський Л.Є.

В авторській редакції

План 2025 р., поз. 565

Підп. до друку _____ Гарнітура Times New Roman.
Видавничий центр НТУ «ХПІ»,
вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 5478 від 21.08.2017 р.
Електронна версія