

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1

**Тема:** вивчення ефекту Холла в напівпровідниках.

**Мета:** дослідити явище ефекту Холла й оцінити концентрацію вільних носіїв заряду в напівпровіднику за допомогою визначення коефіцієнту Холла.

**Прилади і матеріали:** установка ФПК-08.

### Література

1. Фистуль В.И. Введение в физику полупроводников: учебное пособие. – 2 изд. – М.: Высш. шк., 1984. – 352 с.
2. Бонч-Бруевич В.Л. Калашников С.Г. Физика полупроводников. – М.: Высшая школа, 1977.
3. Фізичні основи електронної техніки: підручник / З.Ю. Готра, І.Є. Лопатинський, Б.А. Лук'янець та ін. Львів: Бескид Біт, 2004. – 880 с.
4. Фізика процесів у напівпровідниках та елементах електроніки: курс лекцій: навчальний посібник / Д. М. Фреїк, В. М. Чобанюк, З. Ю. Готра та ін. – Івано-Франківськ : Видавництво Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника, 2010. – 263 с.
5. Прокопів В. В. Фізичні основи мікроелектроніки: навчальний посібник – Івано-Франківськ : Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, 2010. – 80 с.

### Теоретичні відомості

Для пояснення фізичного процесу ефекту Холла розглянемо явища, які відбуваються в плоскій напівпровідниковій пластині, що володіє електронною провідністю і має довжину  $a$ , ширину  $b$  і товщину  $d$  (рис. 1). На пластину в перпендикулярному напрямку діє магнітне поле,

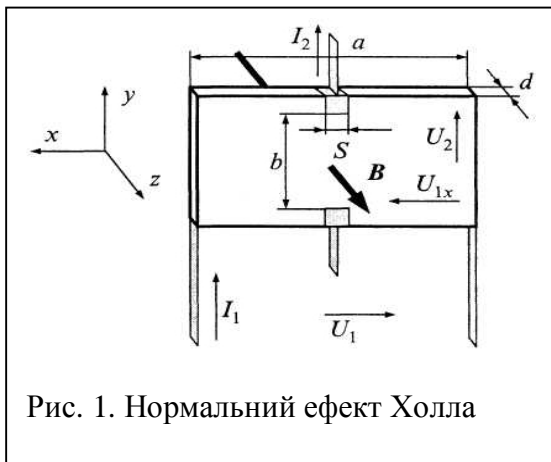


Рис. 1. Нормальний ефект Холла

напруженість якого визначається вектором магнітної індукції  $B$ , а у поздовжньому напрямку протікає струм  $I_1$ , зумовлений напруженістю електричного поля  $E_1$  зовнішнього джерела. Магнітне поле, діючи на електрони, які рухаються з середньою швидкістю  $v$ , відхиляє їх у поперечному напрямку вздовж осі  $y$ . У результаті цього на одній з поперечних граней будуть накопичуватися електрони, а на протилежній – некомпенсований позитивний заряд. Накопичення зарядів на протилежних гранях пластинки призводить до появи поперечного електричного поля з напруженістю  $E_2$ , яке називається полем Холла. Накопичення зарядів на протилежних гранях пластини буде відбуватися доти, доки сила Лоренца  $F_1$  що діє на електрони за рахунок магнітного поля  $B$ , не зрівноважить силу  $F_2$ , яка діє на електрони за рахунок електричного поля  $E_2$ . Після цього встановиться стаціонарний процес, при якому електрони рухаються паралельно до граней пластини, як і за відсутності магнітного поля. Зауважимо, що сказане справедливе для електронів, з середньою швидкістю руху. Умова рівноваги сил  $F_1 = F_2$  запишеться в такому вигляді:

$$e[\mathbf{u} \times \mathbf{B}] = eE_2, \quad (1)$$

де  $e$  – заряд електрона, рівний  $1,602 \cdot 10^{-19}$  Кл.

Якщо врахувати, що вектори  $v$  і  $B$  взаємно перпендикулярні, то з (1) одержимо:

$$E_2 = v \cdot B. \quad (2)$$

Підставляючи в (2) значення:

$$v = \mu E_1, \quad (3)$$

де  $\mu$  – холлівська рухливість носіїв зарядів, маємо:

$$E_2 = \mu E_1 B, \quad (4)$$

Виразимо  $E_1$  через густину струму  $j_1$  і електропровідність  $\sigma$ .

$$E_1 = \frac{j_1}{\sigma} = \frac{j_1}{en\mu}, \quad (5)$$

де  $n$  – концентрація електронів.

Підставивши (5) у (4), отримаємо:

$$E_2 = \frac{1}{en} j_1 B = R_H j_1 B. \quad (6)$$

Коефіцієнт  $R_H$  називається *коефіцієнтом Холла* (поширений також термін *стала Холла*, не зовсім правильний, оскільки  $R_H$  навіть для цього матеріалу не є сталою величиною, а залежить від ряду чинників, зокрема від індукції і температури).

Вираз (6) отримано для напівпровідникового матеріалу з електронною провідністю. Для напівпровідникового матеріалу зі змішаною провідністю, тобто за наявності у ньому дірок і електронів, ті й інші відхиляються магнітним полем до однієї і тієї ж грані зразка, тому що під дією зовнішнього електричного поля  $E_1$  ці заряди рухаються в протилежних напрямках. Поперечні поля, створені накопиченням дірок і електронів, будуть взаємно послабляти один одного, і результуюче холлівське поле виявиться меншим, ніж у напівпровідниках з одним типом носіїв. Його значення в цьому випадку визначатимуться виразом:

$$E_2 \sim \frac{\alpha(\beta^2 n - p)}{e(\beta n - p)^2} j_1 B. \quad (7)$$

де  $\beta = \frac{\mu_n}{\mu_p}$  – відношення рухливостей електронів і дірок;  $n$  і  $p$  – концентрація електронів і дірок;  $\alpha$  – стала, яка залежить від механізму розсіювання носіїв заряду.

Отже, ефект Холла більш різко виражений у напівпровідниках, де переважають носії зарядів одного знака. Оскільки рухливість електронів  $\mu_n$  звичайно більша, ніж рухливість дірок  $\mu_p$ , то ефект Холла в напівпровідниках з електронною провідністю відчутніший, ніж у напівпровідниках із дірковою провідністю. У металах і діелектриках рухливість носіїв не перевищує десятків  $\text{см}^2/(\text{Вс})$ , у той час як в антимоніді індію рухливість сягає  $80000 \text{ см}^2/(\text{Вс})$ . Тому в металах ефект Холла виявляється значно слабше, ніж у напівпровідниках.

Якщо врахувати, що поздовжній струм через пластину  $I_1 = j_1 ba$ , а поперечна напруга  $U_{20} = E_2 b$ , то (6) можна записати в такому вигляді:

$$U_{20} = \frac{R_H}{d} I_1 B. \quad (8)$$

З урахуванням того, що  $\sigma = en\mu$  коефіцієнт Холла можна виразити через рухливість і електропровідність:

$$R_H = \frac{1}{ne} = \frac{\mu}{\sigma}. \quad (9)$$

Отриманий вираз для коефіцієнта Холла в загальному випадку не зовсім точний, оскільки при його виведенні не враховувався розподіл електронів за швидкостями, механізм розсіювання носіїв, різниця між повною швидкістю електронів і дрейфовою швидкістю, яку

електрон набуває під дією електричного поля. Для уточнення значення коефіцієнта Холла вираз (9) доповнюється множителем  $r_H$ , що називається *холл-фактором*:

$$R_H = r_H \frac{1}{ne} = r_H \frac{\mu}{\sigma}, \quad (10)$$

У металах, сильновироджених напівпровідниках і в сильних магнітних полях, для яких справедлива умова  $\mu^2 B^2 \gg 1$ , холл-фактор дорівнює 1. У багатьох випадках перетворювачі Холла, які використовуються для технічних цілей, мають  $r_H = 1$ .

Для технічних цілей перетворювачі Холла використовують для вимірювання величини магнітної індукції  $B$ . У матеріалознавстві ефект Холла використовують для визначення концентрація носіїв зарядів  $n$  ( $p$ ), і холлівської рухливості носіїв зарядів  $\mu$ . З (8) знаходимо:

$$R_H = \frac{U_{20} d}{I_1 B}. \quad (11)$$

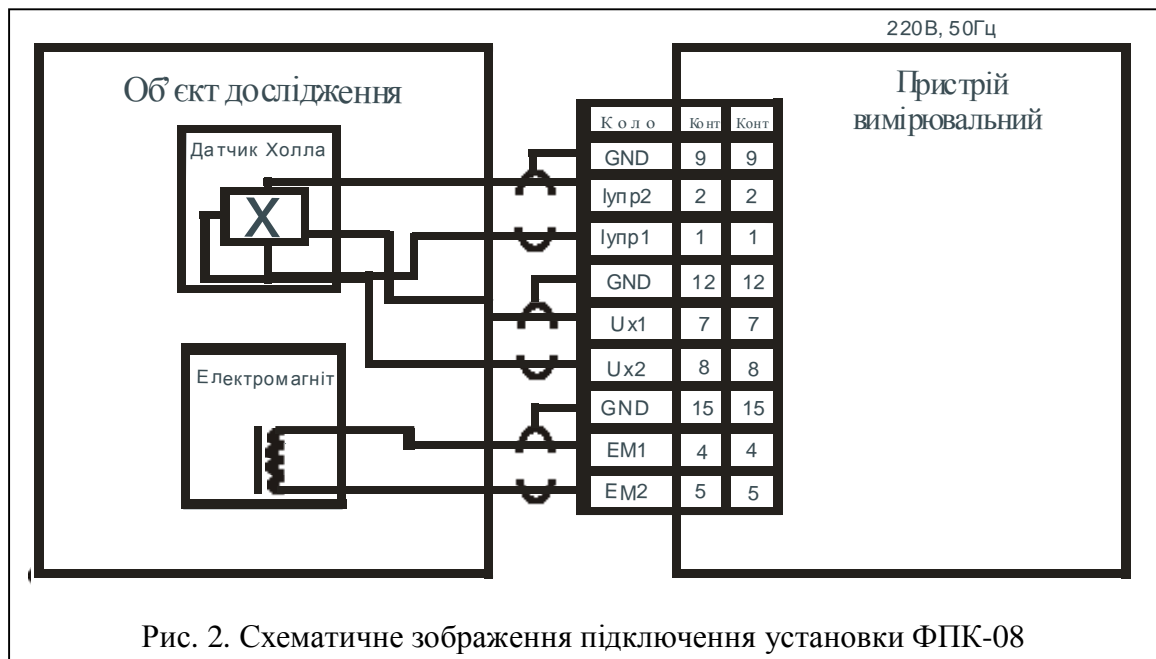
Тоді з (10) одержимо:

$$n = r_H \frac{1}{R_H e}, \quad (12)$$

$$\mu = \frac{R_H \sigma}{r_H}. \quad (13)$$

### Будова і принцип дії установки ФПК-08

Установка складається з об'єкта дослідження і вимірювального пристрою, виконаних у вигляді конструктивно закінчених виробів, які встановлюються на лабораторному столі і з'єднуються між собою кабелем. Схематичне зображення з'єднання пристроїв установки наведено на рис. 2.



Об'єкт дослідження конструктивно виконаний у вигляді збірного корпуса, у якому встановлений електромагніт і датчик Холла. Зверху об'єкт дослідження має вікно, через яке видно полюси електромагніту і плату з датчиком Холла. Для підключення об'єкта дослідження до вимірювального пристрою є з'єднувальний кабель з роз'ємом.

Вимірювальний пристрій виконаний у виді конструктивно закінченого виробу. У ньому застосована однокристална мікро-ЕОМ з відповідними додатковими пристроями, які дозволяють робити вимірювання струму, що протікає через котушку електромагніта, керуючого струму й е.р.с. датчика Холла, встановлених в об'єкті дослідження, а також здійснювати функції керування установкою (встановлення режимів прямого чи зворотного напрямку струму через котушку електромагніту і датчик Холла). До складу вимірювального пристрою входять також джерела його живлення.

На передній панелі вимірювального пристрою розміщені наступні органи керування й індикації:

- кнопки "СБРОС" і "ТОК""+", "-" задають значення і напрямок струму через датчик Холла і котушку електромагніту;

*Примітка: Після натискання кнопки "СБРОС" значення струму обнуляється, і напрямок струму змінюється на протилежний.*

- кнопка "ЭЛ. МАГНИТ – ДАТЧ. ХОЛЛА" переключає індикацію струму, що протікає через котушку електромагніту, і через датчик Холла, що відображається відповідними світлодіодом і таблом індикації;
- табло мА і мВ відображають значення струму через датчик Холла або котушку електромагніту та е.р.с. Холла.

На задній панелі вимірювального пристрою розташований: мережевий вимикач "СЕТЬ", клема заземлення, мережеві запобіжники (закриті запобіжною скобою), мережний шнур з вилкою і роз'єм для підключення об'єкта дослідження.

Вимірювальний пристрій за допомогою мережного шнура підключається до мережі 220 В, 50 Гц.

Принцип дії установки полягає в вимірюванні е.р.с. Холла при різних значеннях сили струму і індукції магнітного поля, яке створюється електромагнітом.

Режим роботи установки переривчастий – через кожні 2 години роботи необхідно зробити перерву на 10–15 хв.

### Хід роботи

1. Включіть установку.
2. Виберіть полярність джерела живлення електромагніта натисканням на відповідну кнопку і задайте струм електромагніта.
3. За допомогою кнопки "ЭЛ. МАГНИТ – ДАТЧ. ХОЛЛА" переведіть установку в режим вимірювання струму через датчик Холла. Змінюючи значення і напрямок керуючого струму через датчик Холла, проведіть вимірювання.  
*Примітка: Не допускається задавати струм через датчик Холла більше 3 мА.*
4. Проведіть вимірювання  $U_{20}$  для трьох різних значень струму через електромагніт  $I_{em}$  (кожного разу змінюючи його напрямок) і чотирьох різних значень струму через датчик Холла  $I_1$  згідно п.3.
5. Після закінченні вимірювань відключіть установку від мережі.
6. Побудуйте сімейство характеристик  $U_{20} = f(I_1)$  при різних значеннях  $B$ . Визначте значення  $R_H$  через кутові коефіцієнти цих залежностей.
7. Проведіть розрахунки  $R_H$ ,  $n$ ,  $\Delta n$ ,  $\mu$ ,  $\Delta \mu$  за формулами (11) – (13). Результати подайте у вигляді  $n = n_{cp} \pm \Delta n$ ;  $\mu = \mu_{cp} \pm \Delta \mu$ .
8. Побудову графіків і всі розрахунки рекомендується виконувати в середовищі Excel Origin.

Величини необхідні для розрахунків знаходяться в додатку.

Таблиця

№ п/п	$I_{em}$ , мА	$B$ , Тл	$I_1$ , мА	$U_{20}$ , В	$R_H$ , м <sup>-3</sup> /Кл	$n$ , м <sup>-3</sup>	$\Delta n$ , м <sup>-3</sup>	$\mu$ , м <sup>-2</sup> /Вс	$\Delta\mu$ , м <sup>-2</sup> /Вс
1									
2									

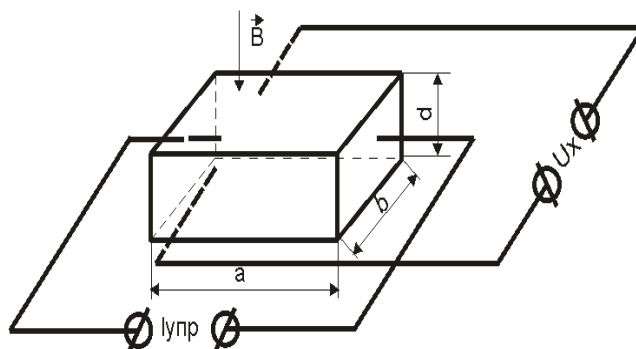
### Контрольні запитання

1. В чому полягає суть ефекту Холла?
2. Від яких чинників залежить коефіцієнтом Холла?
3. Де ефект Холла виявляється найсильніше в металах у напівпровідниках  $n$ -типу чи  $p$ -типу провідності? Чому?
4. Виведіть формули для розрахунку  $R_H$ ,  $n$ ,  $\mu$ ,
5. Яка будова і принцип дії установки ФПК-08?

### Додаток.

Дані необхідні для проведення розрахунків

Коефіцієнт пропорційності між струмом електромагніта й індукцією магнітного поля в його отворі, Тл/А	1,896
Вхідний опір датчика Холла, кОм	1,936
Розміри датчика Холла (див. рис.)	
a, мкм,	42
b, мкм,	31
d, мкм	35



Холл-фактор приймаємо рівним одиниці  $r_H = 1$ .