

Лабораторная работа № 7.

ИЗУЧЕНИЕ ЭФФЕКТА

ХОЛЛА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

ЦЕЛЬ: ознакомиться с явлением Холла, определить постоянную Холла и концентрацию электронных носителей в полупроводнике.

ОБОРУДОВАНИЕ: регулируемый источник постоянного напряжения «0...15В», стабилизированный источник постоянного напряжения «+15В», миниблок «Эффект Холла», мультиметры.

Введение

Эффект Холла - появление в проводнике (или в полупроводнике) с плотностью тока $\vec{j}$, помещенном в магнитное поле $\vec{B}$, напряжения U в направлении, перпендикулярном векторам $\vec{j}$ и $\vec{B}$ (рис. 1). Эффект открыт

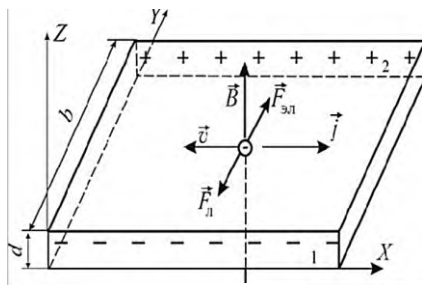


Рис. 1.

в 1879 г. американским физиком Э. Г. Холлом, который экспериментально установил следующее выражение для напряжения:

$$U = R \frac{IB}{d} \quad (1)$$

где R – коэффициент пропорциональности (коэффициент Холла), его величина и знак зависят от химического состава проводника, от температуры и заряда носителей тока; I – сила тока в образце; B – индукция магнитного поля; d – толщина образца.

Рассмотрим элементарную теорию эффекта Холла. Пусть носителями тока являются электроны (например, в металлах и примесных полупроводниках n -типа). При протекании в

образце тока плотностью $\vec{j}$ электроны имеют скорость дрейфа $\vec{v} \uparrow \downarrow \vec{j}$. Если проводник с током помещен в магнитное поле, то на электроны действует сила Лоренца:

$$\vec{F}_л = -e[\vec{v}, \vec{B}] \quad (2)$$

вызывающая перераспределение заряда в направлении оси Y (см. рис. 1). Электроны будут отклоняться к одной из граней, оставляя на противоположной нескомпенсированный положительный заряд. В результате вдоль оси Y появится электрическое поле $\vec{E}$, действующее на электрон с силой $\vec{F}_{эл} = -e\vec{E}_y$ которая направлена противоположно силе Лоренца. Стационарному состоянию соответствует условие

$$F_{эл} = F_л \text{ или } eE_y = evB, \quad (3)$$

так как в данном случае вектор скорости $\vec{v} \perp \vec{B}$.

Из уравнения (3) находим напряженность поля Холла:

$$E_y = vB \quad (4)$$

и разность потенциалов между гранями 1 и 2 (напряжение Холла):

$$U = \int_0^b E_y dy = vBb \quad (5)$$

где b – размер образца вдоль направления поля Холла. Выразим скорость электронов v через силу тока с помощью формул:

$$I = jbd; j = env; v = \frac{I}{enbd} \quad (6)$$

где n – концентрация электронов проводимости в образце.

Напряжение Холла согласно уравнению (5) с учетом формулы (6) запишем в виде

$$U = \frac{1}{en} \cdot \frac{IB}{d} \quad (7)$$

Коэффициент Холла ($\text{м}^3/\text{Кл}$) получим, сравнив выражения (1) и (7):

$$R = \frac{1}{en} \quad (8)$$

Более строгая теория, учитывающая взаимодействие носителей тока (электронов) с кристаллической решеткой, дает постоянную Холла:

$$R = \frac{r}{en} \quad (9)$$

где r - Холл-фактор; его величина $r > 1$ и зависит от магнитного поля, температуры и свойств материала образца. Для слабо легированного германия при комнатной температуре $r = 3\pi/8$.

Из формулы (8) следует, что знак коэффициента Холла определяется знаком заряда носителей тока. Для металлов и полупроводников n -типа величина $R < 0$, а для полупроводников с дырочной проводимостью (p -типа) $R > 0$.

Метод изучения эффекта Холла

Напряжение Холла, согласно формуле (1), линейно зависит от магнитной индукции B и от тока I , протекающего в датчике. Установка позволяет получить зависимости $U(B)$ и $U(I)$ и по угловому коэффициенту экспериментальной прямой определить коэффициент Холла R . В случае линейной зависимости вида $U = KB$ в соответствии с формулой (1) величина углового коэффициента

$$K = \frac{RI}{d} \quad (10)$$

В качестве источника постоянного магнитного поля можно использовать электромагнит.

Величина индукции магнитного поля B в зазоре электромагнита нелинейно зависит от намагничивающего

тока $I_{\text{эм}}$ в его обмотке. Однако на кривой намагничивания сердечника B ($I_{\text{эм}}$) можно выделить практически линейный участок, для которого справедлива формула

$$B = \frac{\mu_0 I_{\text{эм}} N}{h} \quad (11)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м - магнитная постоянная; N – число витков электромагнита; h – толщина зазора электромагнита.

Задача измерения напряжения Холла осложняется тем, что при проведении эксперимента в пластинке имеется не только поле Холла $\vec{E}_y$, но и электрическое поле $\vec{E}$, создающее ток в датчике (пропускаемый для наблюдения эффекта). На рис. 4 показаны эти взаимно перпендикулярные поля и положение проводников ($2' - 2'$) припаянных к датчику для измерения напряжения Холла.

На рис. 4а видно, что в случае, если линия измерительных контактов ($2' - 2'$) смещена от идеальной ($2-2$), которая должна быть строго нормальна линии тока I (полю $\vec{E}_x$), то потенциал точки $2'$ будет меньше, чем потенциал точки 2. При этом измеренная величина U_1 окажется на ΔU меньше, чем напряжение Холла (при смещении 10 мкм $\Delta U = 5\text{мВ}$).

Обратившись к рис. 4б, видим, что достаточно изменить только направление индукции магнитного поля B , чтобы на линии ($2' - 2'$) измерить напряжение: $U_2 = U + \Delta U$.

Используя значения U_1 и U_2 , исключаем неизвестную погрешность ΔU :

$$U = \frac{U_1 + U_2}{2} \quad (12)$$

Для экспериментальной реализации этого приема изменяют направление тока $I_{\text{эм}}$ в обмотке электромагнита. Как следует из рис. 4б, при этом изменяется и полярность напряжения Холла. Но нередко оказывается, что величина $\Delta U \geq U$; при этом измеряемые напряжения U_1 и U_2 имеют одинаковый знак, а

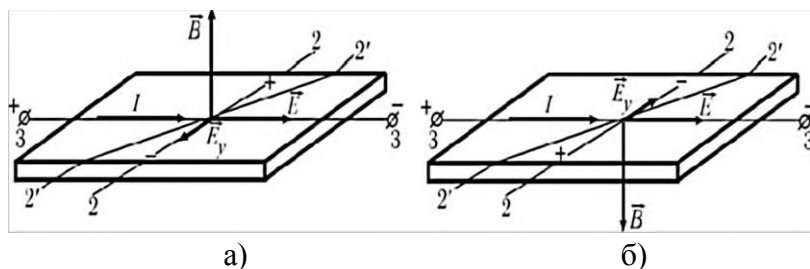


Рис. 4. Измерение напряжения Холла

их значения $U_1 = \Delta U - U$ и $U_2 = \Delta U + U$ позволяют найти напряжение Холла как полуразность: $U = \frac{U_2 - U_1}{2}$

Описание установки

Электрическая схема установки представлена на рис. 2, монтажная – на рис. 3. Исследуемый образец – датчик Холла (Д) представляет собой тонкую пластинку германия, обладающего дырочной проводимостью при комнатных температурах. Датчик помещен в зазор сердечника электромагнита 6 и подсоединен к источнику постоянного напряжения 4. Обмотка электромагнита подключена к регулируемому источнику постоянного напряжения 10 через переключатель 8. С помощью переключателя можно изменять направление тока $I_{\text{эм}}$ в обмотке электромагнита. Ток $I_{\text{эм}}$ измеряют миллиамперметром 9. Для измерения напряжения Холла предназначен цифровой вольтметр 5.

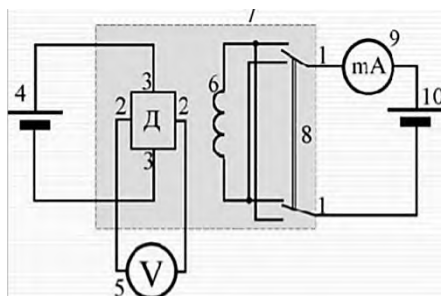


Рис.2.Электрическая схема:

(1–1)– цепь питания электро-
магнита 6; 8-переключатель;
9 - мультиметр (режим
 $A \dots 200mA$, входы COM, mA);

(2–2) – цепь измерения
напряжения Холла;

5 - мультиметр (режим $V \dots 2V$, входы COM, V Ω);

(3–3) – цепь питания датчика Холла Д; 4 –источник
стабилизированного постоянного напряжения «+15 В»; 7 –
миниблок «Эффект Холла»; 10 –регулируемый источник
постоянного напряжения «0...+15В»

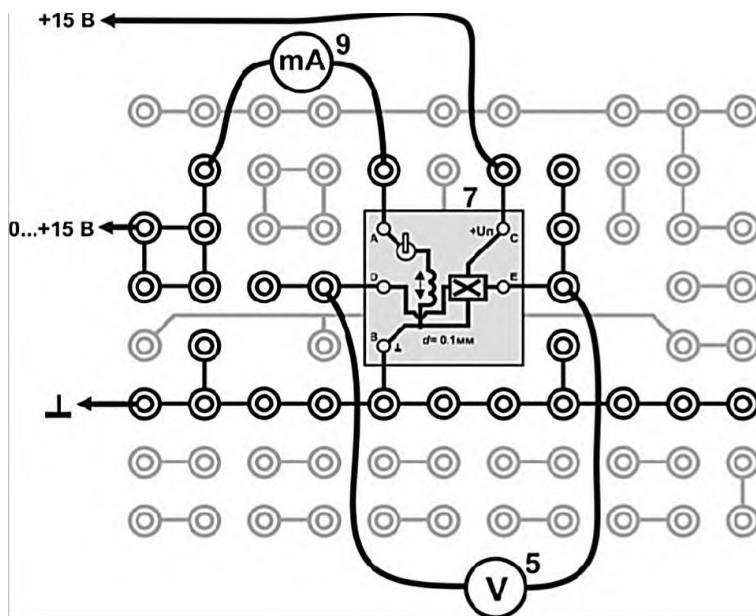


Рис. 3. Монтажная схема: 5, 7, 9 см. на рис. 2

Порядок выполнения работы

Выполнение измерений

1. Запишите в таблицу число витков электромагнита N , ширину зазора h и толщину датчика d (указаны на миниблоке «Эффект Холла»).
2. Соберите электрическую цепь по монтажной схеме, приведенной на рис.3.
3. Включите кнопкой «Сеть» питание блока генераторов напряжений. Нажмите кнопку «Исходная установка» (поз. 19, см. рис. 1 на стр. 93).

Таблица 1

Параметры установки: $I = 5 \text{ мА}$, $N = \dots$ витков, $h = \dots \text{ мм}$, $d = \dots \text{ мм}$					
Величина					
№	$I_{эм}, \text{ мА}$	$U_1, \text{ мВ}$	$U_2, \text{ мВ}$	$U, \text{ мВ}$	$B, \text{ мТл}$
1	10				
2					
...	...				
10	100				
		Средняя точка			

4. Кнопками установки напряжения «0...15 В» (поз.14, рис. 1, стр. 93) установите ток в цепи электромагнита $I_{эм} \approx 10 \text{ мА}$.
5. Измерьте с помощью мультиметра 5 напряжение U_1 (при

данном направлении тока в обмотке электромагнита).

6. Переключателем 8 измените направление тока $I_{\text{эм}}$ и измерьте напряжение U_2 .

7. Увеличивая с помощью кнопок установки напряжения «0...15 В» (поз.14, рис. 1, стр. 93) ток в обмотке электромагнита $I_{\text{эм}}$, через каждые ≈ 10 мА измерьте напряжения U_1 и U_2 по пп. 5, 6. Результаты измерений запишите в таблицу.

8. Выключите кнопками «Сеть» питание блока генераторов напряжения и блока мультиметров.

Обработка результатов измерений

1. Рассчитайте значения магнитной индукции B для каждого значения $I_{\text{эм}}$, используя формулу (11). Результаты расчетов запишите в таблицу.

2. Для каждого значения магнитной индукции B по формуле (12) вычислите напряжение Холла U . Результаты расчетов запишите в таблицу.

3. По полученным данным постройте график зависимости $U = f(B)$.

4. Проведите прямую через среднюю точку и нулевую: известно, что $U = 0$ при $B = 0$.

5. Определите угловой коэффициент K экспериментальной прямой и его относительную погрешность δ_K .

6. Используя формулу (10), найдите значение постоянной Холла для исследуемого полупроводника:

$$R = K \frac{d}{I} = \dots \text{ 1/м}^3$$

7. Оцените относительную погрешность величины R :

$$\delta_R = \sqrt{\delta_K^2 + \delta_I^2}$$

8. На основании выражения (8) или (9) вычислите концентрацию дырок n в исследуемом полупроводнике:

$$n = \frac{r}{Re} = \dots \text{ м}^3/\text{Кл}$$

9. Найдите доверительный интервал величины n , принимая, что относительная погрешность $\delta_n = \delta_R$

10. В выводе отметьте, какие закономерности эффекта Холла исследованы в работе и укажите возможные применения датчика Холла.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается эффект Холла?
2. Какие условия необходимы для наблюдения явления Холла?
3. Укажите причину появления напряжения Холла.
4. Как направлена сила Лоренца, действующая на движущийся электрон? → →
5. Покажите на рисунке направление векторов E и B для электрического и магнитного полей в пластинке полупроводника при наблюдении эффекта Холла.
6. Между какими гранями пластинки появляется напряжение Холла? Укажите положение граней по отношению к току I и магнитному полю B .
7. Для измерения каких величин используют в данной работе:
 - а) миллиамперметр, б) цифровой вольтметр?
8. К каким граням датчика Холла подключают приборы:
 - а) миллиамперметр, б) цифровой вольтметр?
9. Какие величины и параметры явления Холла изменятся, если изменить:

- а) величину и направление рабочего тока датчика,
б) величину и направление тока в обмотке электромагнита?
10. Какой размер пластинки полупроводника необходим для вычисления постоянной Холла?
11. Каким способом измеряют напряжение Холла?
12. Запишите формулы, которые используются в данной работе для расчета концентрации электронов проводимости в полупроводнике.

Лабораторная работа № 8.

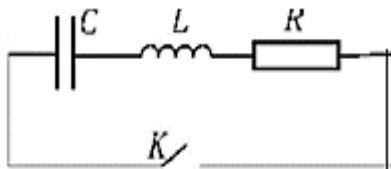
ИЗУЧЕНИЕ ЗАТУХАЮЩИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

ЦЕЛЬ: исследование затухающих электрических колебаний, измерение характеристик колебательного контура: периода колебаний T , логарифмического декремента затухания λ , критического сопротивления контура $R_{кр}$.

ОБОРУДОВАНИЕ: генератор сигналов специальной формы; миниблоки «Конденсатор», «Индуктивность» и «Реостат»; осциллограф.

Введение

Колебательный контур – это электрическая цепь (рис. 1), содержащая индуктивность L и емкость C .



*Рис. 1. Колебательный контур:
 C – конденсатор, L – катушка индуктивности, R – активное сопротивление, K – ключ*

Если конденсатор зарядить и тем самым сообщить ему некоторую энергию, а затем ключом K замкнуть контур, то конденсатор начнет разряжаться. Как показывает опыт, в цепи