

Лабораторная работа №12

ЭФФЕКТ ХОЛЛА В ПРИМЕСНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Цель работы: Изучить эффект Холла в примесных полупроводниках. Ознакомиться с методом измерения концентрации и подвижности основных носителей тока в примесных полупроводниках с помощью эффекта Холла.

Требуемое оборудование, входящее в состав модульного учебного комплекса МУК-ТТ1:

1. Блок амперметра-вольтметра АВ1– 1 шт.
2. Блок генератора напряжений ГНЗ – 1шт.
3. Стенд с объектами исследования СЗ-ЭХ01 – 1 шт.
4. Соединительные провода с наконечниками – 6 шт.

Краткое теоретическое введение

Пусть, по образцу, имеющего форму прямоугольного параллелепипеда, протекает электрический ток силой I , поддерживаемый источником (рис.1). Найдем на нижней и верхней гранях точки 3 и 4, лежащие на одной эквипотенциальной поверхности (т. е. точки, разность потенциалов между которыми при протекании тока равна нулю), и припаяем к ним измерительные зонды. Поместим образец в поперечное магнитное поле, как показано на рис.1. Теперь на движущиеся носители тока будет действовать сила Лоренца, в результате между точками 3 и 4 возникнет разность потенциалов. Это напряжение U_x называется напряжением Холла, а само явление – поперечным эффектом Холла.

Опыт показывает, что

$$U_x = R_x \frac{IB}{b}, \quad (1)$$

где I – сила тока, протекающего через образец;

B – индукция магнитного поля;

b – толщина образца (размер по магнитному полю);

R_x – постоянная Холла, зависящая от рода вещества.

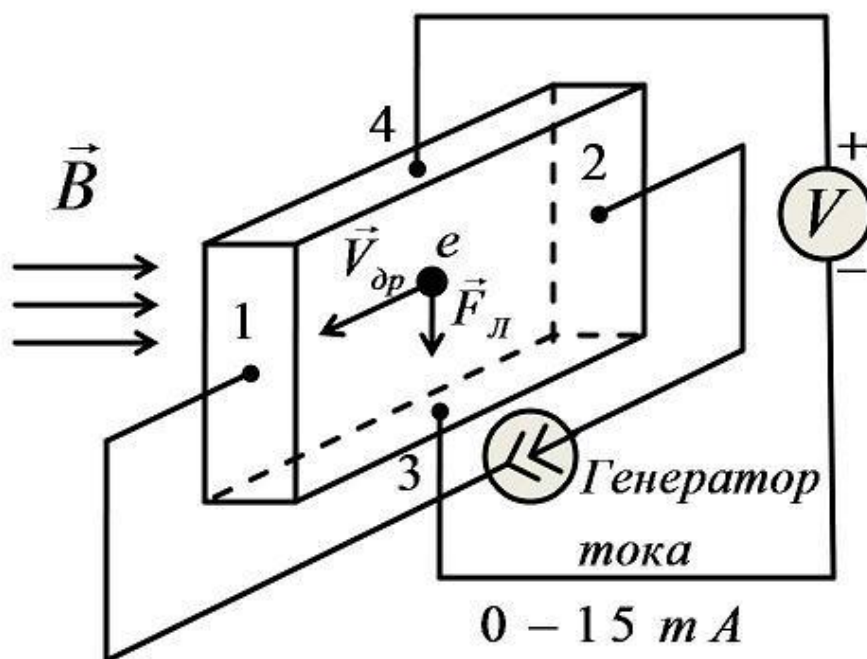


Рис. Возникновение ЭДС Холла

Рассмотрим механизм появления поперечной разности потенциалов в примесном полупроводнике. Если носителями тока в образце являются отрицательно заряженные электроны (полупроводник n -типа), их дрейфовая скорость $\vec{v}_{др}$ направлена против направления тока. Сила Лоренца $\vec{F}_л$, действующая на каждый электрон, перпендикулярна как вектору дрейфовой скорости, так и вектору магнитной индукции \vec{B} и равна

$$\vec{F}_л = q_e [\vec{v}_{др}, \vec{B}],$$

где q_e – заряд электрона.

Сила Лоренца для ситуации, которая изображена на рис.1, будет смещать электроны к нижней грани образца (точка 3), в результате чего грань получит избыточный отрицательный заряд. На верхней грани за счет оттока от нее электронов возникнет нескомпенсированный положительный заряд ионов донорной примеси. Перераспределение заряда приведет к появлению в пространстве между гранями электрического поля, вектор напряженности которого \vec{E} направлен от положительно заряженной грани к отрицательно заряженной. Электроны будут испытывать со стороны этого электрического поля действие силы:

$$\vec{F}_{эл} = -q_e \vec{E}.$$

Из сказанного следует, что на электрон внутри образца действуют одновременно две поперечные противоположно направленные силы: сила Лоренца и сила со стороны электрического поля. Накопление избыточного

заряда на гранях образца прекратится, когда векторная сумма этих сил станет равной нулю. Достигнутое при этом состояние называется стационарным, т.е. неменяющимся со временем. Для этого состояния выполняется равенство

$$F_{\text{л}} = q_e E_x,$$

где E_x – напряженность электрического поля, которая связана с разностью потенциалов U_x между точками 3 и 4 образца формулой

$$E_x = \frac{U_x}{d}.$$

Если для изготовления исследуемого образца используется примесный полупроводник p -типа, в котором основными носителями тока являются положительно заряженные дырки, то направление их движения будет совпадать с направлением тока. Сила Лоренца, действующая на дырки со стороны магнитного поля \vec{B} (рис.1) будет направлена по-прежнему к нижней грани. Следовательно, нижняя грань такого датчика получит избыточный положительный заряд, а верхняя – отрицательный. Знак заряда граней легко установить по знаку разности потенциалов между гранями, то есть по знаку величины U_x .

Любой примесный полупроводник при достаточно высокой для него температуре становится собственным. У собственного полупроводника концентрации свободных электронов и дырок одинаковы. Чтобы быть уверенными, что исследуемый образец содержит один тип носителей тока, необходимо определить рабочий диапазон температур. Для этого достаточно экспериментально получить зависимость $\ln \sigma$ от $\frac{1}{T}$, где σ – электропроводность полупроводникового образца при абсолютной температуре T . Из теории известно, что эта зависимость имеет вид, представленный на рис.2.

Здесь первый участок зависимости, который наблюдается при низких температурах, соответствует примесной проводимости, второй при средних температурах – насыщению примесной проводимости (уменьшение проводимости при увеличении температуры происходит за счёт уменьшения подвижности носителей из-за рассеяния на ионизованных примесях), а третий (при высоких температурах) соответствует собственной проводимости.

Для измерений подходит диапазон температур, соответствующий области примесной проводимости и области насыщения примесной проводимости. В этом диапазоне температур концентрация носителей тока одного знака существенно превышает концентрацию носителей другого знака.

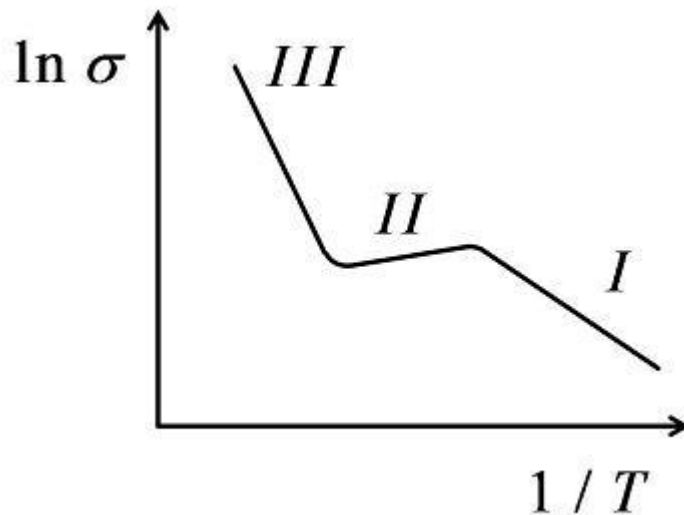


Рис. 2. Зависимость проводимости полупроводника от температуры

Если, как предполагалось выше, датчик изготовлен из донорного полупроводника, то его электропроводность определяется формулой

$$\sigma = q_e n \mu, \quad (2)$$

где n – концентрация свободных электронов, μ – подвижность носителей тока, которая равна:

$$\mu = \frac{v_{др}}{E},$$

где $v_{др}$ – дрейфовая скорость носителей тока при напряженности электрического поля E .

Постоянная Холла в области температур, для которой концентрация свободных электронов много больше концентрации дырок, определяется формулой

$$R_x = a \frac{1}{q_e n}, \quad (3)$$

где a – поправочный множитель учитывает механизм рассеяния носителей тока в полупроводнике. Для низких температур, когда основным является рассеяние на ионах примеси, $a = 1,93$.

Все эти характеристики зависят от температуры T и от типа рассеяния. При низких температурах

$$\mu \sim T^{\frac{3}{2}};$$

$$n = n_0 \exp\left(\frac{-\Delta E_a}{k_B T}\right),$$

где ΔE_a – энергия активации примеси; k_B – постоянная Больцмана.

Методика эксперимента

Электропроводность образца σ – величина обратная его удельному сопротивлению ρ :

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

Удельное сопротивление входит в формулу для сопротивления образца между точками 1 и 2:

$$R_{12} = \rho \frac{L_{12}}{bd}$$

где L_{12} – расстояние между точками 1 и 2 образца (10 мкм);

bd – площадь поперечного сечения образца (2 на 2 мм).

По закону Ома сопротивление, сила тока и продольное напряжение между точками 1 и 2 связаны между собой соотношением:

$$IR_{12} = U_{12}.$$

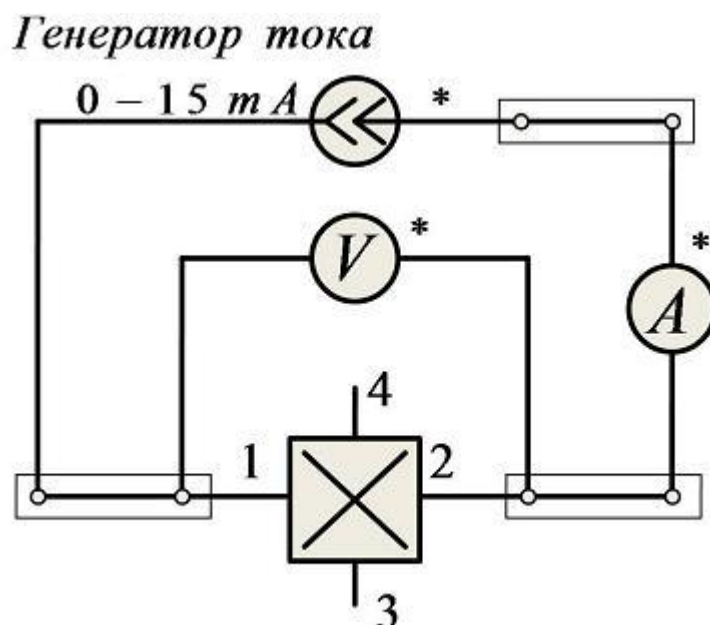


Рис. 3 Рабочая схема для исследования электропроводности образца

Из полученной системы уравнений следует рабочая формула для экспериментального определения электропроводности:

$$\sigma = \frac{IL_{12}}{U_{12}bd}; \quad (4)$$

На рис.3 представлена схема для измерения электропроводности образца.

Рабочая схема для измерения ЭДС Холла показана на рис 4. ЭДС Холла U_x измеряется между точками 3 и 4 образца. Эти точки должны быть эквипотенциальны при нулевом значении индукции магнитного поля \vec{B} . Однако, практически расположить точки 3 и 4 на одной эквипотенциальной поверхности невозможно.

Поэтому между этими точками, кроме ЭДС Холла U_x , имеется дополнительная продольная разность потенциалов ΔU , сравнимая по величине. Эту погрешность необходимо исключить. Воспользуемся для этого тем, что при изменении направления вектора магнитной индукции \vec{B} на противоположное, при сохранении направления тока I , знак ЭДС Холла U_x изменяется, а знак продольной разности потенциалов ΔU не изменяется. Следовательно, при одном направлении \vec{B} напряжение между точками 3 и 4, будет составлять.

$$U'_{34} = U_x + \Delta U.$$

А при обратном направлении \vec{B} :

$$U''_{34} = -U_x + \Delta U.$$

Вычтем из первого выражения второе и выразим U_x :

$$U_x = \frac{U'_{34} - U''_{34}}{2} \quad (5)$$

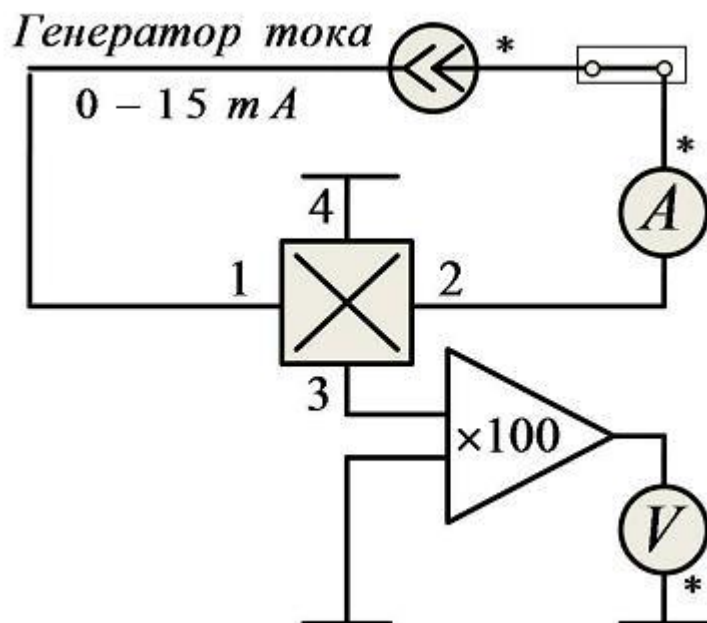


Рис. 4. Рабочая схема для измерения ЭДС Холла

Для усиления сигнала с датчика Холла используется неинвертирующий усилитель с коэффициентом усиления 100. Вольтметр необходимо подключить к выходу этого усилителя.

Рекомендуемое задание

1. Соберите электрическую схему (рис.3). В качестве источника подключите генератор тока. Рекомендуемое значение силы тока 1 мА. Изменяя температуру T от комнатной до максимальной (380K), измерьте продольное напряжение U_{12} . Режим измерения напряжения – 2 В, режим измерения тока – 2000 мкА. Заполните таблицу 1.

Таблица 1. $I = 1\text{ мА}$.

Измерить	T, K			
	$U_{12}, \text{В}$			
Вычислить	$1/T \quad 1/K$			
	σ сименс			
	$\ln\sigma$			

2. Вычислите электропроводность σ по формуле (4) и величину $\ln\sigma$ для каждого значения T .

3. Постройте график зависимости $\ln\sigma$ от величины $\frac{1}{T}$. Определите по графику диапазон температур, соответствующий одному типу проводимости.

4. Исследуйте зависимость ЭДС Холла U_x от величины магнитного поля B при постоянной силе тока и постоянной температуре из выбранного диапазона. Измерения проводите, пользуясь методикой, приводящей к формуле (5). Режим измерения напряжения – 20 В., режим измерения тока – 2000 мкА. Заполните таблицу 2.

Таблица 2. $T = \quad K, I = \quad \text{мкА}$.

Измерить	$B, \text{мТл}$			
	$U'_{34}, \text{В}$			
	$U''_{34}, \text{В}$			
Вычислить	$U_x, \text{В}$			

5. Исследуйте зависимость ЭДС Холла U_x от величины тока I при постоянной величине магнитного поля B и постоянной температуре T из выбранного диапазона. Измерения проводите, пользуясь методикой, приводящей к формуле (5). Режим измерения напряжения – 2 В, режим измерения тока – 2000 мкА. Заполните таблицу 3.

Таблица 3. $T = \quad \text{К}$, $B = \quad \text{мТл}$.

Измерить	$I, \text{мкА}$			
	U'_{34}, B			
	U''_{34}, B			
Вычислить	U_x, B			

6. Исследуйте зависимость ЭДС Холла U_x от температуры при постоянной величине магнитного поля B и постоянном токе I . Измерения производите в найденном диапазоне температур. Измерения ЭДС Холла U_x проводите, пользуясь методикой, приводящей к формуле (5). Результаты измерений запишите в таблицу 4.

Таблица 4. $I = \quad \text{мкА}$, $B = \quad \text{мТл}$.

Измерить	$T, \text{К}$			
	U'_{34}, B			
	U''_{34}, B			
Вычислить	U_x, B			

7. Оцените по формуле (1) значения R_x для различных температур;
8. Оцените по формуле (3) значения n для различных температур;
9. Оцените по формуле (2) значения μ для разных температур;
10. По знаку U_x определите тип полупроводника (n или p).

Литература

1. Иродов И.Е. Квантовая физика. Основные законы: Учеб. пособие для вузов. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2014. – 272с.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. Учебное пособие . В 3-х томах. Том 3. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твёрдого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц . Учебное пособие. Гриф МО РФ. – СПб.:Лань, 2016. – 308с.
3. Детлаф А. А., Яворский Б. М. Курс физики: учебное пособие для вузов – 8-е изд., стер. – М. : Издательский центр "Академия", 2009. – 720с.
4. Курепин В.В., Баранов И.В. Обработка экспериментальных данных: Методические указания к лабораторным работам. – СПб, 2012. – 57 с.