
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.03

ЭФФЕКТ ХОЛЛА В ПРИМЕСНОМ ПОЛУПРОВОДНИКЕ

ЦЕЛИ РАБОТЫ

1. Измерение вольт - амперной характеристики (ВАХ) полупроводникового образца с примесной проводимостью
2. Измерение зависимости холловской электродвижущей силы (ХЭДС) от индукции магнитного поля
3. Определение величин:
 - 3.1 удельной проводимости материала образца
 - 3.2 концентрации и подвижности основных носителей заряда
4. Определение значения константы Холла

ВВЕДЕНИЕ

В 1879 г. американский физик Эдвин Г. Холл (Edwin Herbert Hall), поместив тонкую золотую фольгу в магнитное поле, обнаружил, что при протекании электрического тока в фольге возникает дополнительное электрическое поле в направлении, поперечном вектору магнитной индукции и вектору плотности электрического тока. Данное явление впоследствии было названо его именем.

Эффект Холла занимает важнейшее место в группе так называемых **гальваномагнитных эффектов** — эффектов, связанных с воздействием магнитного поля на электрические свойства проводников (металлов и полупроводников) по которым течёт ток. Величина эффекта Холла непосредственно связана с подвижностью и концентрацией носителей заряда, а знак (направление) ЭДС Холла (ХЭДС) зависит от знака заряда. По данной причине эффект Холла находит широкое применение при исследовании электрических

свойств и используется для контроля качества промышленных полупроводниковых и ферромагнитных материалов.

Изучение температурной зависимости эффекта Холла дает важную информацию о механизмах рассеяния носителей заряда, о ширине запрещенной зоны материала и энергии ионизации различных примесей. Большое значение эффект Холла имеет в современной технике, являясь основой для создания приборов различного назначения: усилителей постоянного и переменного тока, датчиков магнитного поля (магнитометров), приборов автоматики и контроля, элементов вычислительной техники и многого другого. Физическое явление возникновения поперечной ЭДС лежит в основе принципа работы магнитогидродинамических (МГД) генераторов, непосредственным образом преобразующих тепловую энергию в электрическую.

ФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА ЭФФЕКТА ХОЛЛА

Подвижными носителями заряда в полупроводниках являются как электроны, так и дырки. Дырка – это фактически частично заполненная валентная связь, которая проявляет себя как подвижный положительный заряд, численно равный заряду электрона. Для определенности рассмотрим поведение в эффекте Холла подвижных положительных зарядов. Этот подход будет применим для тех полупроводников, в которых преобладает концентрация примесей акцепторного типа. Например, для кремния и германия такими примесями являются бор, алюминий, галлий, индий. Для полупроводниковых материалов с преобладанием донорных примесей (фосфор, мышьяк, сурьма) качественное рассмотрение будет полностью аналогичным, за исключением противоположного знака основных носителей заряда.

При приложении к проводящему материалу внешнего электрического поля \vec{E} (в дальнейшем мы будем называть его продольным и обозначать E_{\parallel}), возникает направленное движение

заряженных частиц — электрический ток, сила которого определяется законом Ома:

$$I = \frac{U_{\parallel}}{R} = E_{\parallel} \cdot l \cdot \left(\rho \frac{l}{S} \right)^{-1} = \frac{E_{\parallel} \cdot S}{\rho} \quad [3.1]$$

где $U_{\parallel} = E_{\parallel} \cdot l$ - электрическое напряжение, ρ - значение удельного сопротивления материала образца, S - площадь поперечного сечения, l - длина образца.

При преобладании дырочного типа проводимости положительные носители заряда движутся со средней дрейфовой скоростью \vec{v} в направлении вектора плотности тока $j = I/S$:

$$\vec{j} = en\vec{v} \quad [3.2]$$

где n — концентрация носителей, $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл - элементарный заряд.

Величина скорости направленного дрейфа носителей заряда и напряженность продольного электрического поля \vec{E} при не слишком больших значениях напряженности ($E_{\parallel} \ll 10^6$ В/м) могут быть связаны простым соотношением пропорциональности:

$$\vec{v} = \mu \vec{E}_{\parallel} \quad [3.3]$$

где μ — коэффициент, называемый подвижностью носителя заряда. Величина подвижности зависит от температуры и от типа носителя заряда. Подвижности электронов и дырок в различных полупроводниках могут отличаться более чем на порядок.

Из соотношений [3.2] и [3.3] следует:

$$\vec{j} = en\mu \vec{E}_{\parallel} \quad [3.4]$$

Удельная проводимость материала образца (величина, обратная к удельному сопротивлению $\sigma = \rho^{-1}$) будет равна:

$$\sigma = en\mu \quad [3.5]$$

При известной концентрации носителей n , можно определить их подвижность:

$$\mu = \frac{\sigma}{en} \quad [3.6]$$

Удельную же проводимость при известной вольт-амперной характеристике образца можно найти как коэффициент пропорциональности в соотношении, непосредственно следующего из формулы [3.1]:

$$I = \sigma \cdot \frac{S}{l} U_{\parallel} \quad [3.7]$$

Поместим теперь наш образец с электрическим током в однородное постоянное магнитное поле, вектор индукции \vec{B} которого направлен перпендикулярно вектору плотности тока \vec{j} . В данном магнитном поле на заряды, движущиеся со скоростью \vec{v} , действует сила Лоренца:

$$\vec{F}_L = e(\vec{v} \times \vec{B}) \quad [3.8]$$

Эта сила ориентирована перпендикулярно к векторам \vec{v} и \vec{B} . Под ее действием поток зарядов отклоняется в сторону от первоначального направления вектора \vec{j} (рис. 1). В результате на одной грани образца накапливается некоторый положительный электрический заряд, а на противоположной грани возникает такой же по модулю избыточный отрицательный заряд. Данная поляризация образца приводит к

возникновению поперечного электрического поля \vec{E}_\perp , направленного перпендикулярно и току и магнитному полю.

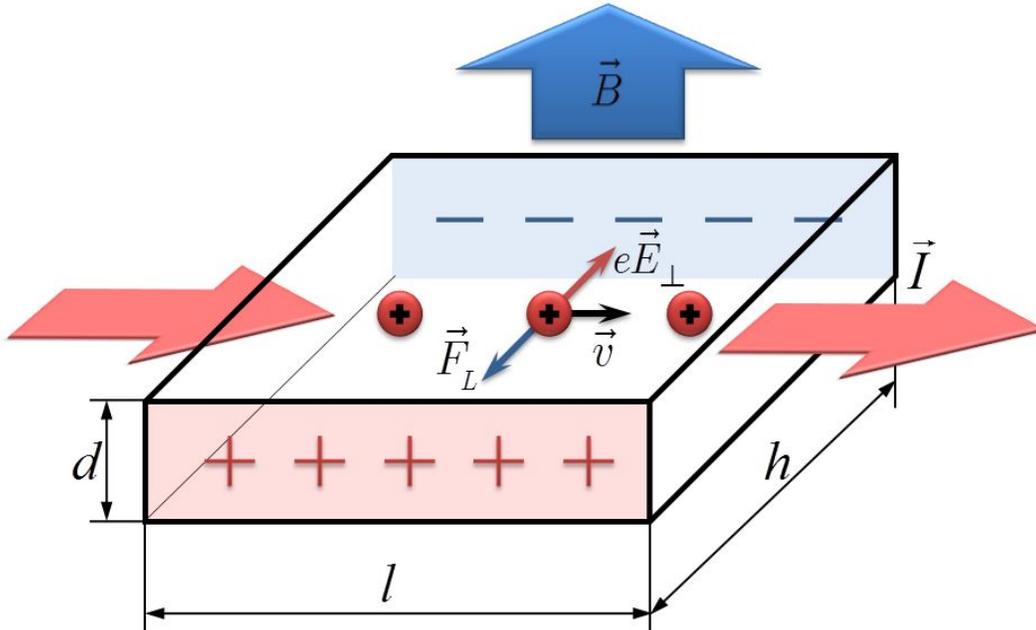


Рис. 1 Принцип возникновения ХЭДС

Если же свободными носителями заряда являются преимущественно электроны, то ближняя к нам по рис.1 грань образца заряжается отрицательно, а дальняя – положительно, так как направление силы Лоренца, поляризующей образец, останется прежним — в формуле [3.8] изменится знак, как у заряда носителя, так и у вектора дрейфовой скорости. Таким образом, направление поля Холла \vec{E}_\perp при заданных направлениях магнитного поля и тока зависит от знака основных носителей заряда.

Отметим, что при наличии в полупроводнике носителей зарядов разных знаков в сопоставимом количестве, эффект Холла будет отсутствовать при выполнении следующего условия:

$$n_e \mu_e^2 = n_h \mu_h^2,$$

где $n_{e,h}$, $\mu_{e,h}$ - концентрации и подвижности электронов и дырок.

Процесс разделения электрических зарядов противоположных знаков продолжается до тех пор, пока напряженность поля \vec{E}_\perp не возрастет до значения, при котором электрическая сила $\vec{F}_E = e\vec{E}_\perp$ станет равна силе Лоренца:

$$\begin{aligned}\vec{F}_E &= -\vec{F}_L \\ eE_\perp &= evB, \\ E_\perp &= vB\end{aligned}\quad [3.9]$$

после чего наступает равновесное состояние. Если наряду с условием равновесия [3.9] учесть соотношение [3.2], то для холловского поля можно записать выражение:

$$E_\perp = \frac{jB}{en} \quad [3.10]$$

Разность потенциалов между ближней и дальней гранями образца равна напряженности электрического поля E_\perp , умноженной на размер образца h . Таким образом, значение измеряемого в данной работе поперечного (холловского) напряжения можно представить как $U_\perp = E_\perp h$. Как было определено выше, площадь поперечного сечения равна $S = d \cdot h$, где d - толщина образца в направлении линий индукции магнитного поля, а плотность тока $j = \frac{I}{S} = \frac{I}{d \cdot h}$, следовательно, выражение [3.10] может быть записано в виде

$$U_\perp = \frac{1}{en} \cdot \frac{IB}{d} \equiv R \cdot \frac{IB}{d}, \quad [3.11]$$

где коэффициент $R = \frac{1}{en}$ носит название константы Холла.

Определив R , можно непосредственно рассчитать величину концентрации носителей заряда n в материале образца:

$$n = \frac{1}{eR} \quad [3.12]$$

С учетом [3.6] подвижность носителей определяется как произведение проводимости материала на значение константы Холла:

$$\mu = \sigma R \quad [3.13]$$

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Общая схема экспериментальной установки представлена на рис. 2.

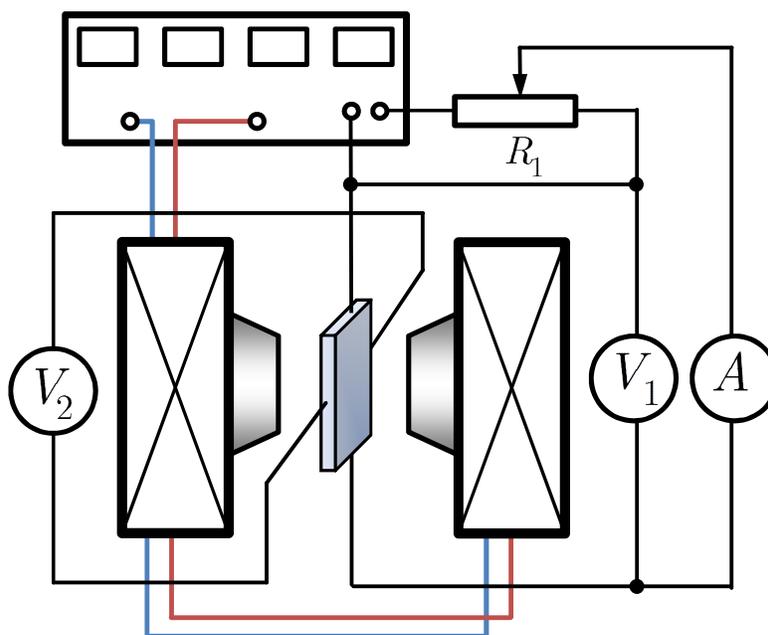


Рис. 2 Схема экспериментальной установки

Трехканальный лабораторный блок питания НУ3005D-3 используется как для создания продольного тока в исследуемом образце, так и для питания электромагнита, создающего магнитное поле. Два первых канала блока питания обеспечивают выходное напряжение от 0 до 30 вольт с током нагрузки от 0 до 5 ампер каждый, а третий имеет фиксированное выходное напряжение 5 вольт с максимальным током 3 ампера. В данной лабораторной работе два первых канала, питающие электромагнит, соединены последовательно для увеличения максимального выходного напряжения блока питания.

Сила тока в катушках магнита измеряется с помощью контрольного амперметра с жидкокристаллическим индикатором на лицевой панели корпуса блока питания. Коэффициент

пропорциональности K между силой тока в катушках и величиной индукции магнитного поля указан на информационном стенде установки.

В качестве объекта исследования в данной работе используется стандартный датчик Холла ДХК-0.5 (рис. 3), установленный между полюсными наконечниками электромагнита. Датчик представляет собой планарную кремниевую структуру n -типа проводимости на изолирующей подложке, которая имеет две пары электрических контактов: одна пара используется для пропускания электрического тока, со второй пары контактов снимается поперечное напряжение U_{\perp} (ХЭДС). Ток в образце регулируется реостатом R_1 . Геометрические размеры образца указаны непосредственно на стенде установки.

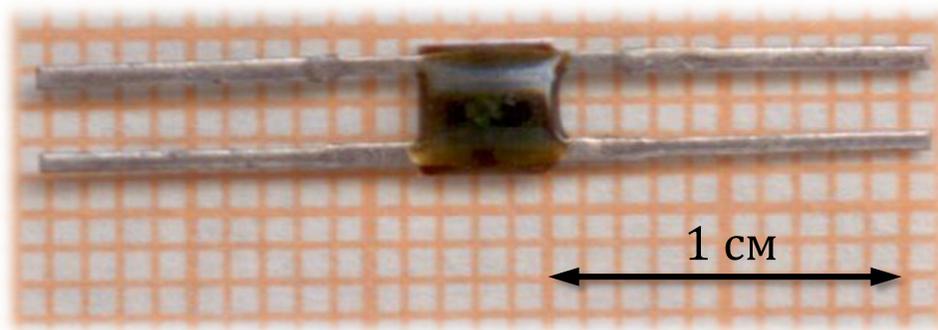


Рис. 3 Внешний вид датчика ДХК-0.5

Измерительными приборами в данной лабораторной работе являются три универсальных цифровых комбинированных мультиметра УТ33А. Один из них, измеряя ток через образец, выступает в роли амперметра, а два других – в роли вольтметров для измерения напряжений U_{\parallel} и U_{\perp} .

ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

1. Во время выполнения измерений следует неукоснительно соблюдать общие требования правил техники безопасности при работе с электроустановками с напряжением питания 220 Вольт.
2. Категорически запрещается приближать любые предметы к межполюсному пространству электромагнита, вне зависимости от наличия или отсутствия электрического тока в катушках.
3. Запрещается извлекать блоки питания измерительных приборов из сетевой колодки.
4. При длительном (более 5 мин) отсутствии изменений в величине входного сигнала мультиметры UT33A могут перейти в энергосберегающий режим, о чем сигнализируют звуковым сигналом. Вывести мультиметр из данного режима можно последовательно выключив и включив его.
5. При обнаружении любых неисправностей установки или при наличии подозрений на их присутствие следует незамедлительно обращаться к лаборанту зала или преподавателю.

ПРОВЕДЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ

- 1.1 Запишите в протокол значения габаритных размеров образца и коэффициент пропорциональности между силой тока в катушках магнита и магнитной индукцией.
- 1.2 Перед включением установки необходимо проверить, что все потенциометры (1-4) лицевой панели блока питания NY3005D-3 находятся в крайнем левом положении (см. рис. 4а). Кнопочные переключатели выбора режима соединения каналов блока питания («tracking») должны находиться в положении последовательного соединения каналов «series»: левый – утоплен, правый – отжат.
- 1.3 Измерительные приборы перед включением установки должны находиться в выключенном состоянии (переключатели режима работы в положении «OFF»).



(а) перед включением



(б) в процессе измерения ХЭДС



(в) перед выключением

Рис. 4 Положения потенциометров на лицевой панели блока питания 1,3 – ограничение силы тока, 2, 4 – управление выходным напряжением

- 1.4 Включите общий тумблер питания установки на сетевой колодке. Проконтролируйте включение блоков питания измерительных приборов – на их корпусах должны загореться индикаторные светодиоды.
- 1.5 Включите измерительные приборы: у амперметра переключатель режима работы должен находиться в положении «mA \simeq », у вольтметров – в положении «V= \Rightarrow ».
- 1.6 Включите блок питания НУ3005D-3 с помощью большого кнопочного выключателя, находящего на нижней левой части его лицевой панели.
- 2.1 Проведите измерение зависимости силы тока в образце от величины продольного напряжения, изменяя силу тока с помощью потенциометра R_1 от 0.1 мА до 2.0 мА с шагом 0.1 мА. Заполните Таблицу 1 (см. Приложение).
- 2.2 Проведите измерения поперечного напряжения (ХЭДС) от величины магнитного поля. Для этого первоначально установите некоторое фиксированное значение силы тока в образце из диапазона 1.0÷2.0 мА. Запишите это значение в протокол.
- 2.3 Плавно выведите потенциометры ограничения силы тока 1 и 3 обоих каналов блока питания НУ3005D-3 в крайнее правое положение (см. рис. 4б).
- 2.4 Регулировка силы тока в электромагните осуществляется с помощью крайнего правого потенциометра напряжения 4 правого (управляющего) канала блока питания (см. рис. 4б). Значение силы тока в магните определяется по показаниям контрольного амперметра на лицевой панели корпуса блока питания.
- 2.5 Изменяя ток в магните от 0.05 А до 0.85 А с шагом 0.05 А, записывайте в протокол показания вольтметра поперечного напряжения. Заполните Таблицу 2 (см. Приложение).
- 2.6 Завершив измерения, плавно уменьшите силу тока в электромагните до нуля и верните потенциометры ограничения силы тока обоих каналов блока питания в исходное положение (см. рис. 4в).

- 2.7 Уменьшите силу тока через образец до нулевого значения. Выключите основной блок питания установки НУ3005D-3 и измерительные приборы, вернув их переключатели режима работы в положение «OFF».
- 2.8 Полностью обесточьте лабораторный стенд, выключив общий тумблер питания лабораторной установки на сетевой колодке.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

1. По данным Таблицы 1 постройте график зависимости силы тока в образце от величины продольного напряжения при нулевом магнитном поле $I = I(U_{\parallel})$.
2. Методом парных точек по (по 4÷5 парам точек из Таблицы 1) определите величину проводимости $\sigma = (\Delta I / \Delta U_{\parallel}) \cdot \frac{l}{S}$.
Оцените ее погрешность $\Delta\sigma$.
3. По данным Таблицы 2 постройте график зависимости ХЭДС от величины от магнитной индукции $U_{\perp} = U_{\perp}(B)$.
4. Методом парных точек по (по 4÷5 парам точек из Таблицы 2) определите величину постоянной Холла $R = (\Delta U_{\perp} / \Delta B) \cdot \frac{d}{I}$.
Оцените ее погрешность ΔR .
5. По формуле [3.12] найдите величину концентрации носителей заряда n . Оцените ее погрешность: $\Delta n = n \cdot \frac{\Delta R}{R}$.
6. По формуле [3.13] найдите величину подвижности носителей заряда μ . Оцените ее погрешность:

$$\Delta\mu = \mu \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta R}{R}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\sigma}{\sigma}\right)^2}.$$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Будет ли эффект Холла наблюдаться в компенсированном полупроводнике (при равенстве концентраций электронов и дырок)?
2. Чем объясняется то, что у полупроводников константа Холла на несколько порядков больше, чем у металлов?
3. Каковы единицы измерения подвижности и константы Холла в СИ?
4. Как изменится холловская разность потенциалов U_{\perp} , если все геометрические размеры образца (длина, ширина, толщина) уменьшить вдвое, а ток через образец оставить прежним?
5. Почему для изучения эффекта Холла используется измерение ЭДС, а не силы тока?
6. Можно ли по значению константы Холла (не имея никакой другой информации о данном образце) определить концентрацию носителей тока в полупроводнике?
7. Каким образом в лабораторной работе производится измерение величины проводимости материала образца? Прямыми или косвенными являются данные измерения?
8. Как при измерении ХЭДС определяется значение индукции магнитного поля, в котором находится образец?
9. Какова роль каждого электроизмерительного прибора в данной лабораторной работе?
10. Перечислите основные требования правила техники безопасности при работе на экспериментальной установке.

ПРИЛОЖЕНИЕ

ФОРМЫ ПРОТОКОЛА ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Таблица 1

Геометрические размеры образца:

Длина $l = \dots \pm \dots$, мм, высота $h = \dots \pm \dots$, мм

Толщина $d = \dots \pm \dots$, мкм

Площадь поперечного сечения $S = d \cdot h = \dots \pm \dots$, мм²

	Сила тока в образце	Продольное напряжение	Проводимость
№	I , мА	U_{\parallel} , В	$\sigma = \frac{\Delta I}{\Delta U_{\parallel}} \cdot \frac{l}{S}$, (Ом·м) ⁻¹
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			
19			
20			

$$\langle \sigma \rangle = \dots \text{ (Ом}\cdot\text{м)}^{-1}$$
$$\Delta \sigma = \dots \text{ (Ом}\cdot\text{м)}^{-1}$$

Таблица 2

Толщина образца $d = \dots \pm \dots$, мкм

Ток через образец $I = \dots$, мА

Коэффициент пропорциональности между магнитным полем и током в катушках электромагнита:

$K = \dots$, Тл/А

	Сила тока в магните	Магнитная индукция	ХЭДС	Константа Холла
№	$I_M, \text{А}$	$B = K \cdot I_M, \text{Тл}$	$U_{\perp}, \text{мВ}$	$R = \frac{\Delta U_{\perp}}{\Delta B} \cdot \frac{d}{I}$
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				
14				
15				
16				

$\langle R \rangle = \dots$
 $\Delta R = \dots$