

---

## 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,  $\rho$  - 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  $\mu$  — 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.

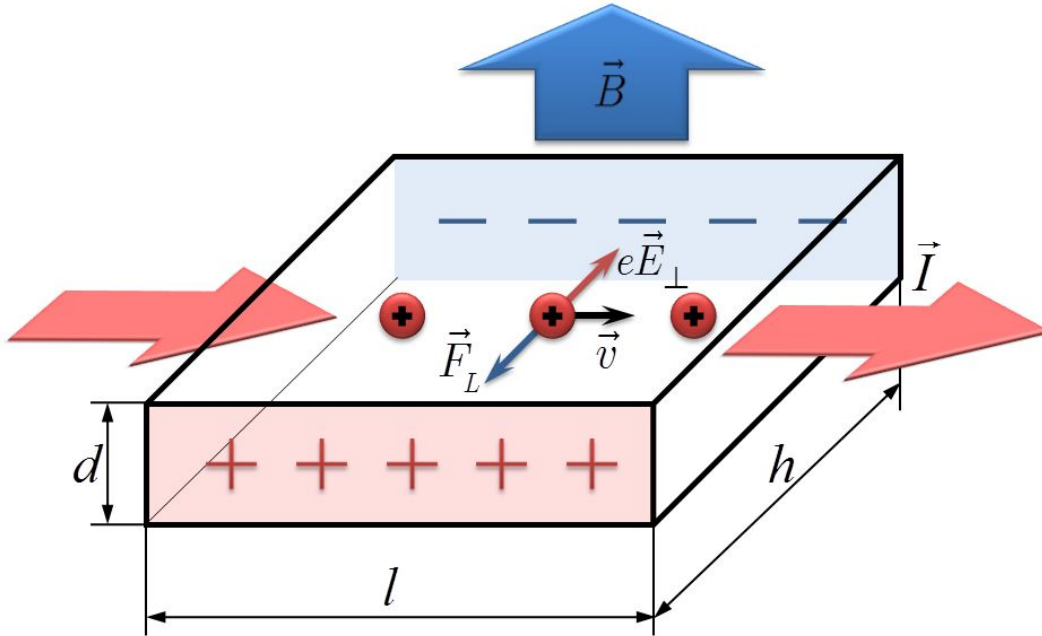


Рис. 1 Принцип возникновения ХЭДС

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:

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

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

$$E_{\perp} = \frac{jB}{en}\tag{3.10}$$

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

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

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.

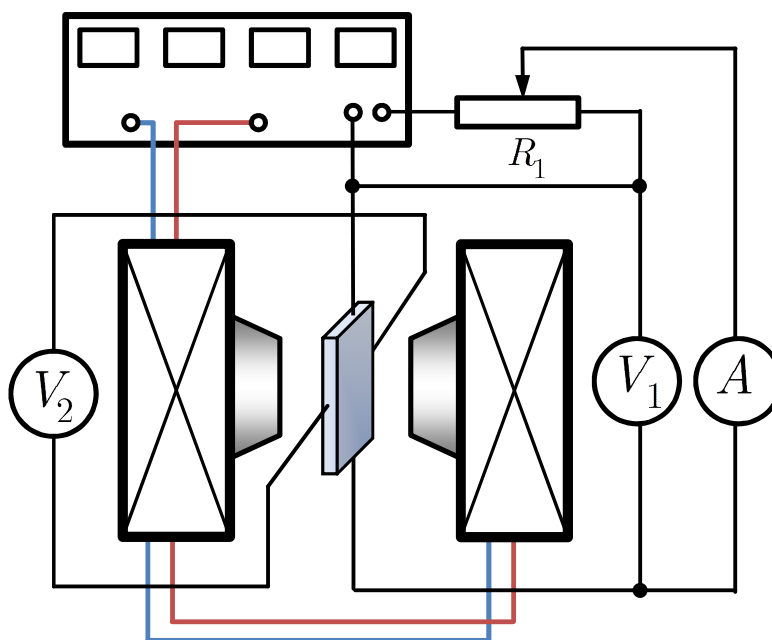


Рис. 2 Схема экспериментальной установки

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.

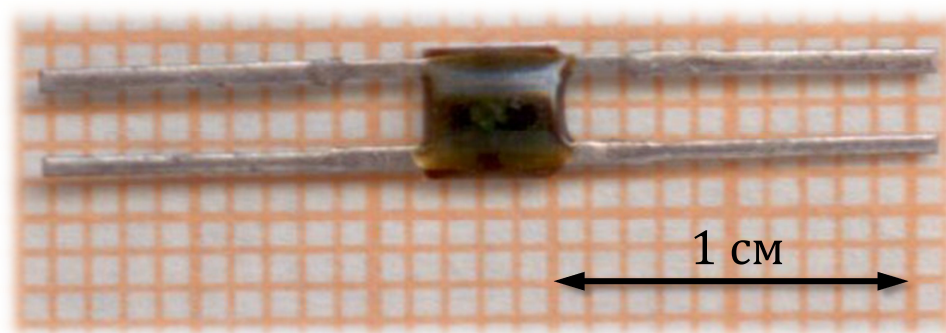


Рис. 3 Внешний вид датчика ДХК-0.5

Измерительными приборами в данной лабораторной работе являются три универсальных цифровых комбинированных мультиметра UT33A. 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 HY3005D-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  $\Delta R$ .
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  $\mu$ . 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  $S = d \cdot h = \dots \pm \dots$ , мм<sup>2</sup>

	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) <sup>-1</sup>
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			
19			
20			

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

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

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
№	$I_M$ , А	$B = K \cdot I_M$ , Тл	$U_{\perp}$ , мВ	$R = \frac{\Delta U_{\perp}}{\Delta B} \cdot \frac{d}{I}$
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				$\langle R \rangle = \dots$ $\Delta R = \dots$
10				
11				
12				
13				
14				
15				
16				