

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.01 ЭФФЕКТ ХОЛЛА В ПОЛУПРОВОДНИКЕ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Определить концентрацию и подвижность носителей заряда в полупроводнике

ЗАДАЧИ

1. Измерить вольтамперную характеристику (ВАХ) полупроводникового образца с примесной проводимостью
2. Измерить зависимость холловской электродвижущей силы (ХЭДС) от индукции магнитного поля
3. Найти значение константы Холла
4. Вычислить:
 - 4.1 удельную проводимость материала образца
 - 4.2 концентрацию и подвижность основных носителей заряда

ВВЕДЕНИЕ

В 1879 г. американский физик Эдвин Холл поместил тонкую золотую фольгу в магнитное поле и обнаружил, что при протекании электрического тока I в фольге возникает разность потенциалов U_{\perp} в направлении, поперечном вектору магнитной индукции \vec{B} и направлению электрического тока.

$$U_{\perp} = R \cdot \frac{IB}{d} \quad (1)$$

Здесь d - толщина образца в направлении магнитного поля. Это явление было названо *эффектом Холла*, а коэффициент R , характеризующий материал проводника, получил название *константы Холла*. Эффект Холла занимает важное место в группе так называемых гальваномагнитных явлений — эффектов, связанных с воздействием магнитного поля на электрические свойства металлов и полупроводников, по которым течёт ток. Величина *ЭДС Холла (ХЭДС)* непосредственно связана с концентрацией носителей заряда, а знак (направление) зависит от знака заряда. Эффект Холла широко применяется при исследовании электрических свойств и 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. Эффект Холла является основой для создания приборов различного назначения: усилителей постоянного и переменного тока, датчиков магнитного поля, приборов автоматики и контроля, элементов вычислительной техники... Возникновение поперечной ЭДС используется в магнитогидродинамических (МГД) генераторах для прямого преобразования тепловой энергии в электрическую.

ФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА ЭФФЕКТА ХОЛЛА

Подвижными *носителями заряда* в полупроводниках могут быть как электроны, так и дырки. Дырка — это 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. Это справедливо для полупроводников, в которых преобладают примеси

акцепторного типа. Для кремния и германия такими примесями являются бор, алюминий, галлий, индий. Для полупроводниковых материалов с донорными примесями (фосфор, мышьяк, сурьма) качественно рассмотрение будет аналогичным, за исключением противоположного знака 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 I , сила которого определяется законом Ома:

$$I = \frac{U_{\parallel}}{r} = E_{\parallel} \cdot l \cdot \left(\rho \frac{l}{S}\right)^{-1} = \frac{E_{\parallel} \cdot S}{\rho} \quad (2)$$

где $U_{\parallel} = E_{\parallel} l$ — продольное (вдоль направления тока) падение напряжения на образце, r — его сопротивление, ρ — удельное сопротивление материала образца, S — площадь поперечного сечения, l — длина образца.

При дырочной проводимости положительные носители заряда движутся со средней дрейфовой скоростью \vec{v} в направлении вектора плотности тока:

$$\vec{j} = en\vec{v} \quad (3)$$

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

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

$$\vec{v} = \mu \vec{E}_{\parallel} \quad (4)$$

где μ — коэффициент, называемый *подвижностью* носителей заряда. Подвижность выражается в $\text{м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, а ее величина зависит от температуры и от типа носителя заряда. Подвижности электронов и дырок в различных полупроводниках могут отличаться более чем на порядок. Из соотношений (3) и (4) следует:

$$\vec{j} = en\mu \vec{E}_{\parallel} \quad (5)$$

Удельная проводимость материала (величина, обратная удельному сопротивлению $\sigma = 1/\rho$) будет равна:

$$\sigma = en\mu \quad (6)$$

При известной концентрации носителей n , можно определить их подвижность:

$$\mu = \sigma / en \quad (7)$$

Удельную проводимость при известной вольтамперной характеристике образца можно найти как коэффициент пропорциональности в соотношении:

$$I = \sigma \cdot \frac{S}{l} \cdot U_{\parallel} \quad (8)$$

Если образец с электрическим током находится в однородном постоянном магнитном поле, вектор индукции \vec{B} которого направлен перпендикулярно вектору плотности тока \vec{j} , то на заряды, движущиеся со скоростью \vec{v} , действует *сила Лоренца*:

$$\vec{F}_L = e [\vec{v}, \vec{B}] \quad (9)$$

Она направлена перпендикулярно векторам \vec{v} и \vec{B} . Под ее действием поток зарядов отклоняется от направления вектора \vec{j} (рис. 1). В результате на одной грани образца накапливается положительный электрический заряд, а на противоположной грани возникает такой же по модулю отрицательный заряд. Такое разделение зарядов приводит к возникновению поперечного электрического поля \vec{E}_\perp , направленного перпендикулярно и току и магнитному полю.

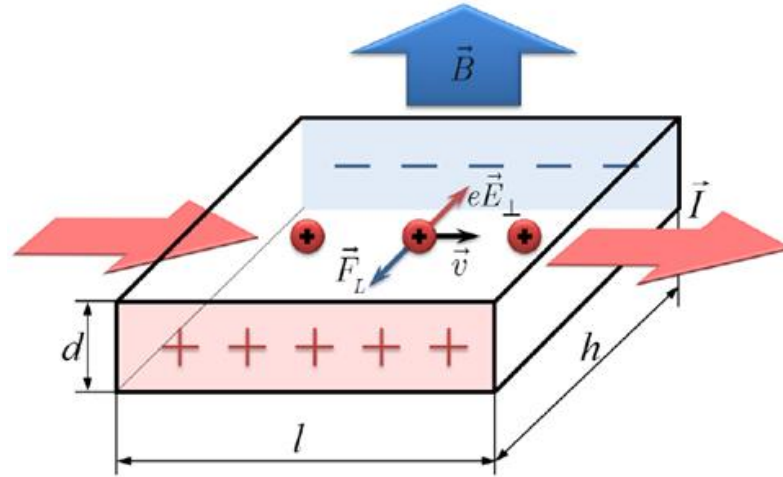


Рис. 1 Схема возникновения ХЭДС для полупроводника с дырочной проводимостью.

Если свободными носителями заряда являются электроны, то передняя по рис. 1 грань образца заряжается отрицательно, а задняя – положительно, так как направление силы Лоренца останется прежним. Таким образом, направление поля Холла \vec{E}_\perp при заданных направлениях магнитного поля и тока зависит от знака основных носителей заряда.

Процесс разделения электрических зарядов противоположных знаков продолжается до тех пор, пока напряженность поля E_\perp не возрастет до значения, при котором электрическая сила $F_E = eE_\perp$ станет равной силе Лоренца:

$$\begin{aligned}\vec{F}_E &= -\vec{F}_L \\ eE_\perp &= evB \\ E_\perp &= vB\end{aligned}\quad (10)$$

после чего наступает равновесное состояние. Если наряду с условием (10) учесть соотношение (3), то для холловского поля получится выражение:

$$E_\perp = \frac{jB}{en} \quad (11)$$

Разность потенциалов между передней и задней гранями образца равна напряженности электрического поля E_\perp , умноженной на размер образца h : $U_\perp = E_\perp h$. Площадь поперечного сечения $S = d h$, а плотность тока $j = \frac{I}{d \cdot h}$ и, следовательно, выражение (11) можно переписать в виде:

$$U_\perp = \frac{1}{en} \cdot \frac{IB}{d} = R \cdot \frac{IB}{d} \quad (12)$$

откуда для константы Холла получается значение $R = \frac{1}{en}$. Константа Холла выражается в м³/Кл и имеет наглядный физический смысл: это объем, в котором 1 Кл носителей заряда. Определив R , можно непосредственно рассчитать величину концентрации носителей заряда n в материале образца:

$$n = \frac{1}{eR} \quad (13)$$

С учетом (7) подвижность носителей определяется как произведение проводимости материала на значение константы Холла:

$$\mu = \sigma R \quad (14)$$

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 2, а ее общий вид показан на рис.3.

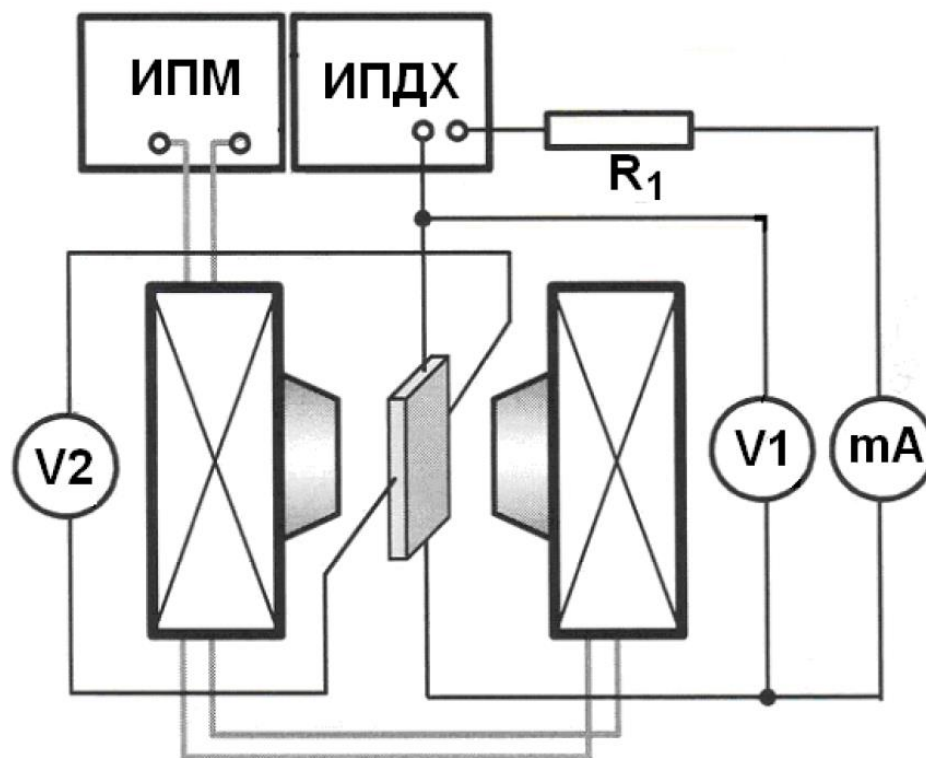


Рис. 2 Схема экспериментальной установки

Объектом исследования в работе является стандартный датчик Холла ДХК-0.5, установленный между полюсными наконечниками электромагнита. Он представляет собой планарную кремниевую структуру n -типа проводимости на изолирующей подложке. Датчик 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 изменением выходного напряжения источника ИПДХ. Геометрические размеры образца указаны непосредственно на стенде установки.

Измерительными приборами в установке являются три универсальных цифровых мультиметра. Один из них, в режиме амперметра, измеряет ток через образец, а два других, в режиме вольтметров, измеряют напряжения U_{\parallel} и U_{\perp} . Кроме того, к измерительным приборам относится ИПМ, который задает значения тока через магнит.



Рис. 3 Общий вид установки

Следует запомнить некоторые особенности описанной выше установки:

1. Категорически запрещается ДАЖЕ ПРИБЛИЖАТЬ любые предметы к межполюсному зазору электромагнита, вне зависимости от наличия или отсутствия электрического тока в катушках.
2. При длительном (более 5 мин) отсутствии изменений входного сигнала мультиметры могут перейти в энергосберегающий («спящий») режим, о чем сигнализируют звуковым сигналом. Вывести мультиметр из спящего режима можно, последовательно выключив и включив его или нажав на желтую кнопку на панели.

ПРОВЕДЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Включите измерительные приборы (кнопка POWER): у амперметра переключатель режима работы должен находиться в положении «mA», у вольтметров – в положении «V».
2. Включите источник питания датчика Холла (ИПДХ).
3. Измерьте зависимость продольного напряжения от силы тока через образец $U_{\parallel} = U_{\parallel}(I)$, изменяя силу тока через образец в пределах от 0.2 до 3.0 мА с шагом 0.2 мА. Изменение тока через образец осуществляется регулировкой выходного напряжения U на приборе ИПДХ. Результаты измерений занесите в Табл.1.
4. Включите источник питания электромагнита (ИПМ).
5. Установите значение силы тока в образце 3 мА. Измерьте зависимость поперечного напряжения U_{\perp} (ХЭДС) от силы тока через обмотку электромагнита. Источник питания

ИПМ должен работать в режиме стабилизации тока. Ток следует изменять в пределах от 0.02 до 0.22 А с шагом 0.02 А. Результаты измерений занесите в Табл.2.

Табл.1 Вольтамперная характеристика образца.

№	I , мА	$U_{ }$, В
1		
2		
3		
....		
....		
....		
16		

Табл.2 Зависимость ХЭДС от индукции магнитного поля.

Толщина образца $d = (\dots \pm \dots)$ мкм, Ток через образец $I = (\dots \pm \dots)$ мА

Коэффициент между индукцией магнитного поля и током магнита: $K = (\dots \pm \dots)$ Тл/А

№	I_M , А	$B = K I_M$, Тл	U_{\perp} , мВ
1			
2			
3			
...			
...			
...			
12			

6. Запишите в протокол размеры образца и коэффициент пропорциональности между силой тока в катушках электромагнита и магнитной индукцией.

7. Выключите приборы, входящие в установку.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

1. По данным Табл.1 постройте график зависимости силы тока в образце от величины продольного напряжения при нулевом магнитном поле $I = I(U_{||})$.

2. Методом парных точек (по 7÷8 парам точек из Табл.1) определите удельную проводимость образца $\sigma = \frac{l}{S} \cdot \frac{\Delta I}{\Delta U_{||}}$. Вычислите ее погрешность $\Delta \sigma$.

Табл.3 Вычисление удельной проводимости образца

Размеры образца: длина $l = (\dots \pm \dots)$ мм, высота $h = (\dots \pm \dots)$ мм, толщина $d = (\dots \pm \dots)$ мкм

Отношение длины образца к площади его поперечного сечения $l/S = l/(d \cdot h) = (\dots \pm \dots) \text{ м}^{-1}$.

№№ точек	ΔI , мА	$\Delta U_{ }$, В	σ , (Ом·м) ⁻¹	$\sigma - \langle \sigma \rangle$, (Ом·м) ⁻¹	$(\sigma - \langle \sigma \rangle)^2$, (Ом·м) ⁻²
1-9					
2-10					
8-16					

$$\langle \sigma \rangle = \dots (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1} \quad \Sigma (\sigma - \langle \sigma \rangle)^2 = \dots (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-2}$$

3. По данным Табл.2 постройте график зависимости ХЭДС от величины магнитной индукции $U_{\perp} = U_{\perp}(B)$.

4. Методом парных точек (по 5÷6 парам точек из Табл.2) определите величину постоянной Холла $R = \frac{\Delta U_{\perp}}{\Delta B} \cdot \frac{d}{I}$. Вычислите ее погрешность ΔR .

Табл.4 Вычисление константы Холла

Толщина образца $d = (\dots \pm \dots)$ мкм, ток через образец $I = (\dots \pm \dots)$ мА, $d/I = (\dots \pm \dots)$ м/А

№№ точек	ΔI_M , мА	ΔU_{\perp} , В	R , м ³ /Кл	$R - \langle R \rangle$, м ³ /Кл	$(R - \langle R \rangle)^2$, м ⁶ /Кл ²
1-7					
2-8					
6-12					

$\langle R \rangle = \dots$ м³/Кл $\Sigma(R - \langle R \rangle)^2 = \dots$ м⁶/Кл²

Прим.: в табл.4 используйте удобный десятичный множитель для значений R .

5. По формуле (13) найдите концентрацию носителей заряда n . Вычислите ее погрешность: $\Delta n = n \cdot \frac{\Delta R}{R}$.

6. По формуле (14) найдите подвижность носителей заряда μ . Вычислите ее погрешность:

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

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Чем объясняется то, что у полупроводников константа Холла на несколько порядков больше, чем у металлов?
2. Каковы единицы измерения подвижности и константы Холла в СИ?
3. Как изменится холловская разность потенциалов U_{\perp} , если все геометрические размеры образца (длина, ширина, толщина) уменьшить вдвое, а ток через образец оставить прежним?
4. Можно ли по значению константы Холла (не имея никакой другой информации о данном образце) определить концентрацию носителей тока в полупроводнике?
5. Какова роль каждого электроизмерительного прибора в данной лабораторной работе?