

ЛАБОРАТОРЬЙ ПРАКТИКУМ ПО ФИЗИКЕ

Лабораторная Работа 2.01Д

ЭФФЕКТ ХОЛЛА В ПОЛУПРОВОДНИКЕ

В.В. Романов, М.П. Фараджева, Н.И. Руль.

Работа 2.01Д
ЭФФЕКТ ХОЛЛА В ПОЛУПРОВОДНИКЕ

В.В. Романов, М.П. Фараджева, Н.И. Руль.

Цель работы

Изучение влияния магнитного поля на движущиеся электрические заряды, определение постоянной Холла, концентрации и подвижности носителей заряда.

Объект исследования

Датчик Холла HW 101А на основе антимонида индия (InSb).

Задачи

1. В отсутствие внешнего магнитного поля измерить вольтамперную характеристику полупроводникового образца.
2. Измерить зависимость холловской электродвижущей силы (ХЭДС) от индукции внешнего магнитного поля.
3. Вычислить удельную проводимость образца, постоянную Холла, концентрацию и подвижность носителей заряда.

Введение

Гальваномагнитными эффектами в твердых телах называются кинетические явления, возникающие при одновременном воздействии на носители заряда электрического и магнитного полей, причем эти явления подразделяются на продольные и поперечные в зависимости от относительного направления приложенных полей.

Наиболее ярким представителем поперечных гальваномагнитных эффектов является эффект Холла. Следует заметить, что в настоящей работе речь пойдет об исследовании так называемого *классического* эффекта, поскольку впоследствии были обнаружены и исследованы эффекты, получившие названия квантовый, дробный, спиновый эффекты Холла, наблюдаемые в структурах пониженной размерности, называемых также наноструктурами.

В 1879 г. американский физик Эдвин Г. Холл (Edwin Herbert Hall), пропускал электрический ток через золотую фольгу, помещенную в магнитное поле. Он обнаружил, что в направлении, перпендикулярном направлениям тока и магнитного поля, возникает разность потенциалов U_H . Это явление получило

название эффекта Холла, а величина U_H стала называться ЭДС Холла (ХЭДС) [1]. Для ХЭДС было найдено эмпирическое соотношение:

$$U_H = R_H \frac{IB}{h} \quad (1)$$

Здесь I – сила тока, пропускаемого через образец, h – геометрический размер исследуемого образца в направлении, вдоль которого приложено магнитное поле, B – индукция магнитного поля. Коэффициент пропорциональности R_H называется постоянной Холла.

Объяснение этого явления было получено в рамках электронной теории Друде-Лоренца [1]. Его рассмотрение удобно провести, используя образец прямоугольной формы (см. рис. 1).

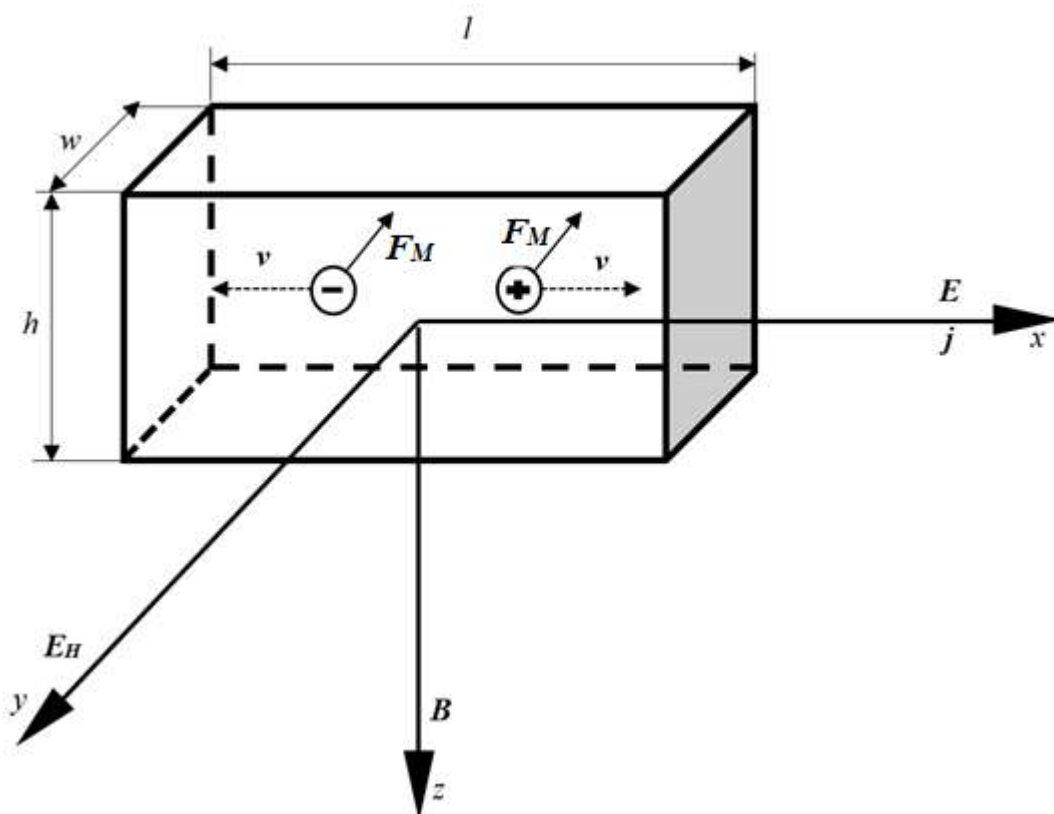


Рис.1. Схема возникновения ХЭДС

Направим вдоль оси x внешнее электрическое поле напряженностью E , поддерживающее ток I , и поместим образец в магнитное поле B , перпендикулярное к направлению тока. На движущуюся заряженную частицу будет действовать сила Лоренца [2], равная:

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} + q[\mathbf{v}, \mathbf{B}] \quad (2)$$

Скорость \mathbf{v} носителей заряда, называемая дрейфовой, магнитное поле \mathbf{B} и магнитную составляющую \mathbf{F}_M силы Лоренца можно записать через их компоненты:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{v} &= (v_x, 0, 0) \\ \mathbf{B} &= (0, 0, B_z) \\ \mathbf{F} &= (0, -|qvB|, 0) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Подчеркнем, что положительные и отрицательные носители заряда будут отклоняться к одной и той же грани образца, дрейфовые скорости в электрическом поле направлены в противоположные стороны, т.е. сила Лоренца будет направлена в одну сторону. Сила \mathbf{F}_M , всегда перпендикулярная \mathbf{v} и \mathbf{B} , ориентирована против оси y .

Под действием силы Лоренца носители заряда будут смещаться против оси y и накапливаться на дальней грани образца, оставляя на ближней грани некомпенсированный заряд противоположного знака, поскольку в целом образец остается электрически нейтральным. Это приведет к возникновению электрического (холловского) поля \mathbf{E}_H , направленного вдоль оси y .

Процесс накопления заряда прекратится (установится стационарное распределение зарядов), когда поперечное электрическое поле \mathbf{E}_H «уравновесит» действие магнитной составляющей силы Лоренца, т. е.

$$q\mathbf{E}_H = q[\mathbf{v}, \mathbf{B}] \quad (4)$$

Заметим, что действие силы Лоренца \mathbf{F}_M в рассматриваемом случае эквивалентно действию постоянного электрического поля $\mathbf{E}_{эфф}$, которое вызывает смещение носителей тока против оси y .

Сила тока определяется выражением

$$I = jS = jhw \quad (5)$$

где $S = hw$ – площадь поперечного сечения образца, а плотность тока j определяется соотношением:

$$j = qnv_x \quad (6)$$

где n – концентрация носителей. Из (5) и (6) получаем x -проекцию средней скорости дрейфа носителей:

$$v_x = \frac{I}{qnhw} \quad (7)$$

и, соответственно:

$$E_H = \frac{IB}{qnhw} \quad (8)$$

Разность потенциалов между ближней и дальней гранями образца:

$$U_H = -E_H w = -\frac{1}{qn} \cdot \frac{IB}{h} \quad (9)$$

Из формул (9) и (1) следует выражение для константы Холла:

$$R_H = -\frac{1}{qn}. \quad (10)$$

Приведенный вывод коэффициента Холла (10) не учитывает разницу между мгновенной скоростью электронов, входящей в выражение магнитной составляющей силы Лоренца, и дрейфовой скоростью, которую электрон приобретает под действием электрического поля. Кроме того, не учитывается распределение электронов по скоростям и механизмы рассеяния носителей.

Формула (10) справедлива для металлов и вырожденных полупроводников (полупроводники с высокой концентрацией примесей и для описания распределения носителей заряда нужно применять статистику Ферми — Дирака. Такой полупроводник начинает вести себя аналогично металлу).

В металлах, где в качестве носителей тока выступают электроны, наблюдение эффекта Холла оказывается осложнено вследствие высокой концентрации «делокализованных» носителей, требуя высокой точности измерительных приборов для случая относительно небольших размеров образца в направлении приложенного магнитного поля. В связи с этим, в качестве объекта исследования при изучении эффекта Холла обычно используют полупроводниковые структуры. В таких структурах может возникать смешанная электропроводность вследствие того, что в процессе переноса электрического тока могут участвовать носители разных типов: как электроны, так и положительные квазичастицы, называемые дырками. При этом подвижности электронов и дырок, вообще говоря, не одинаковы. Хотя при наличии смешанной электропроводности анализ эффекта Холла усложняется, тем не менее в случае использования собственных полупроводников, в которых концентрации электронов и дырок равны, картина существенно упрощается. Если в собственном полупроводнике подвижность одного типа носителя существенно превышает подвижность другого, это условие приводит к выражению константы Холла, эквивалентному случаю металла

Постоянную Холла можно вычислить по измеренным значениям силы тока через образец I , ЭДС Холла U_H , магнитной индукции B , и заданной толщине образца h по формуле (1).

Из выражения (6) и закона Ома, записанного в дифференциальной форме $\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E}$, где σ – электропроводность образца, следует, что $v_x \sim E$. Коэффициент

пропорциональности между ними называется подвижностью носителей заряда μ :

$$\mu = \frac{v_x}{E} \quad (11)$$

Физический смысл подвижности – это средняя скорость дрейфа носителя заряда в электрическом поле напряженностью 1 В/м. Единица измерения подвижности $\frac{\text{м}^2}{\text{В с}}$.

С учетом (12) электропроводность выражается соотношением:

$$\sigma = |q|n\mu \quad (12)$$

Экспериментально определив значение электропроводности σ , с помощью (1) и (12) можно определить подвижность носителей заряда:

$$\mu = |R_H \sigma| \quad (13)$$

Следует отметить, что хотя эффект Холла наблюдается в любых твердых телах и жидкостях, именно для полупроводников он наиболее удобен в качестве инструмента исследования и имеет наибольшие технические применения, в чем можно убедиться, исходя из следующих соображений.

Действительно, для диэлектриков препятствием для применений эффекта Холла является маленькая подвижность носителей заряда в них, что является их достоинством при использовании в качестве изоляторов. Если в формулу (9) подставить значение $I = jhw = |q|n\mu E_x hw = |q|n\mu \frac{U_{\parallel}}{l} hw$, где U_{\parallel} - продольное (между левой и правой гранями образца) напряжение, то выражение для U_H примет вид:

$$U_H = U_{\parallel} \cdot \frac{w}{l} \cdot B \cdot \mu \quad (14)$$

Из формулы (15) следует, что для получения заметных ХЭДС в образцах с малой подвижностью к ним нужно прикладывать огромные продольные напряжения. Из нее следует также, что для применений эффекта Холла в полупроводниковых приборах нужны материалы с большой подвижностью.

В металлах, как известно, носителями заряда являются свободные электроны с зарядом $q = -e$, где e элементарный электрический заряд, равный $1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл. В полупроводниках, с другой стороны, существуют 2 типа носителей заряда: свободные электроны в почти пустой зоне проводимости с зарядом $q = -e$ и так называемые дырки, незаполненные состояния в почти заполненной валентной зоне. Коллективное движение электронов в этой почти заполненной зоне можно описывать как движение «квазичастиц» - дырок с зарядом $q = +e$.

По знаку R_H , или, что то же самое, по знаку U_H , можно определить тип преобладающих носителей заряда.

При этом значения ХЭДС в полупроводниковых материалах значительно превосходят их значения в металлах. Постоянная Холла $R_H = -\frac{1}{qn}$ обратно пропорциональна концентрации, которая для металлов порядка 10^{22} - 10^{23} м⁻³, а для полупроводников может меняться в диапазоне 10^{13} - 10^{19} м⁻³. Поэтому в магнитном поле с индукцией около 0.5 Тл для типичного полупроводника с концентрацией 10^{16} м⁻³ ХЭДС составляет несколько мВ при токе через образец 1 мА, а для металла несколько мкВ при токе 1 А. Измерение малых значений ХЭДС в металлах может быть искажено, например, термо-ЭДС на измерительных контактах. Для жидких проводников измерение ХЭДС затрудняют электрохимические процессы.

Определение концентрации носителей с помощью эффекта Холла имеет гораздо большее значение для полупроводников, чем для металлов. Концентрация носителей заряда в полупроводниках оказывает очень сильное влияние на их свойства и меняется в широких пределах в зависимости от температуры и концентрации введенных примесей, а для металлов она меняется мало и практически не зависит от температуры.

Важным техническим применением эффекта Холла являются устройства для измерения магнитной индукции – датчики Холла. Они представляют собой тонкую пленку полупроводникового материала с 2 парами контактов. Малая толщина пленки h важна при работе датчика в режиме стабилизации тока I , поскольку $U_H \sim \frac{1}{a}$. Наиболее выгодным материалом для изготовления датчиков является антимонид индия $InSb$ из группы полупроводников A^3B^5 , бинарных соединений элементов 3 и 5 групп таблицы Менделеева. $InSb$ имеет самую большую подвижность электронов среди известных полупроводников, что повышает чувствительность датчика Холла в режиме стабилизации продольного напряжения $U_{||}$ (см. формулу (15)).

В настоящей работе эффект Холла исследуется именно с помощью датчика Холла на основе $InSb$.

Описание установки.

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

Объектом исследования в работе является датчик Холла серии HW-101A из антимонида индия ($InSb$). Датчик имеет две пары электрических контактов: одна пара используется для пропускания электрического тока, со второй пары контактов снимается поперечное напряжение U_H (ХЭДС).

Геометрические размеры образца: толщина $h = 130 \pm 8$ нм; $l = 0.65 \pm 0,01$ мм; $w = 0,65 \pm 0,01$ мм.

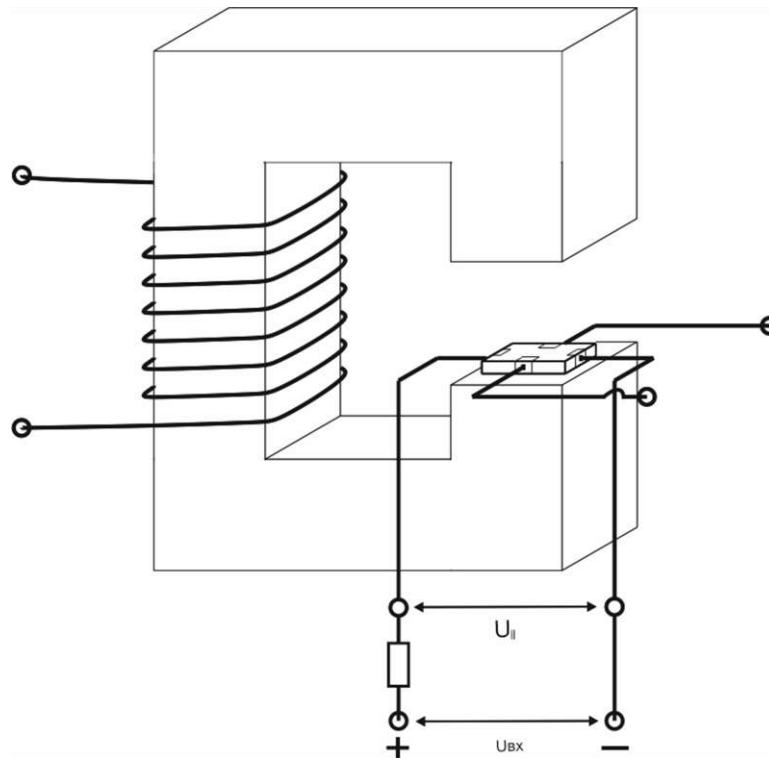
Измерительными приборами в установке являются два программируемых источника питания с индикацией выходных напряжения или тока QJE QJ3005P (см.рис.3 (1), (3)), два мультиметра UNI-T UT803 (см.рис.3 (2),(4)). У мультиметров UNI-T UT803 кнопка включения находится на задней панели. При измерениях переключатель режима работы должен находиться в положении «V».

Следует запомнить некоторые особенности установки:

1. Категорически запрещается ПРИБЛИЖАТЬ любые предметы к электромагниту, вне зависимости от наличия или отсутствия электрического тока в катушке.

2. При длительном (более 3 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 два раза на кнопку «HOLD».

а)



б)

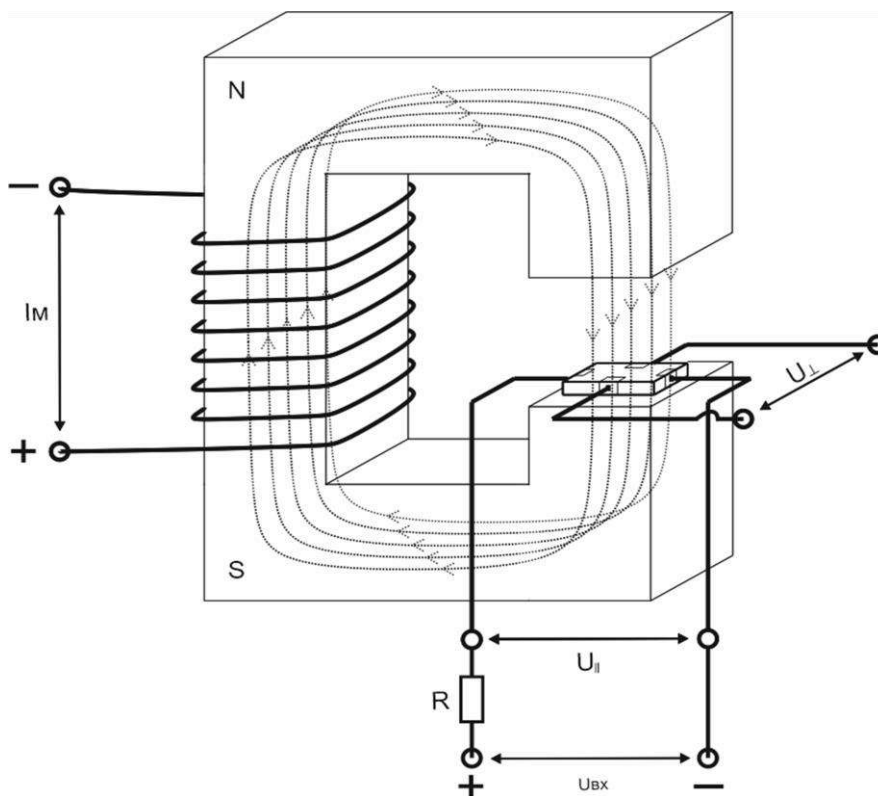


Рис.2. Схема экспериментальной установки: а) подключение при снятии вольтамперной характеристики датчика холла; б) подключение при снятии зависимости ХЭДС от индукции магнитного поля.

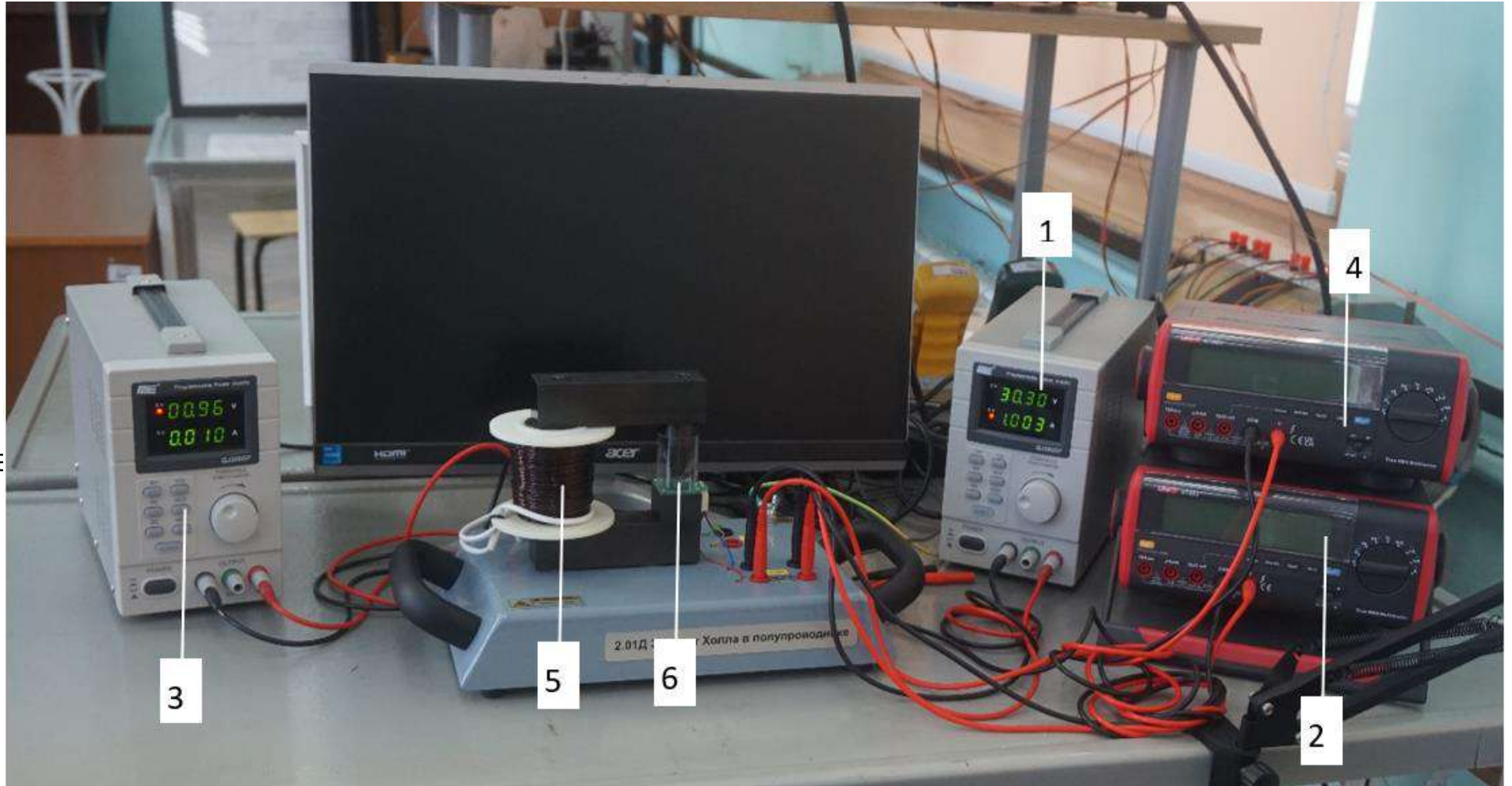


Рис.3. Общий вид экспериментальной установки. 1- программируемый источник питания ($U_{вх}$), 2-мультиметр ($U_{||}$), 3- программируемый источник питания (I_m), 4- мультиметр (U_{\perp}), 5- электромагнит с магнитопроводом, 6- Датчик Холла.

На рисунке 4 приведена лицевая панель программируемого источника питания QJE QJ3005P. Источники питания включаются нажатием кнопки «POWER» на передней панели см. рис.4 (1).

Для выбора работы источника питания в режиме напряжения/силы тока нажимаем на кнопку «V/A» см.рис.4 (2). О правильном выборе режима сигнализирует подсветка индикатора на экране «CV/CC» см.рис.4 (3).

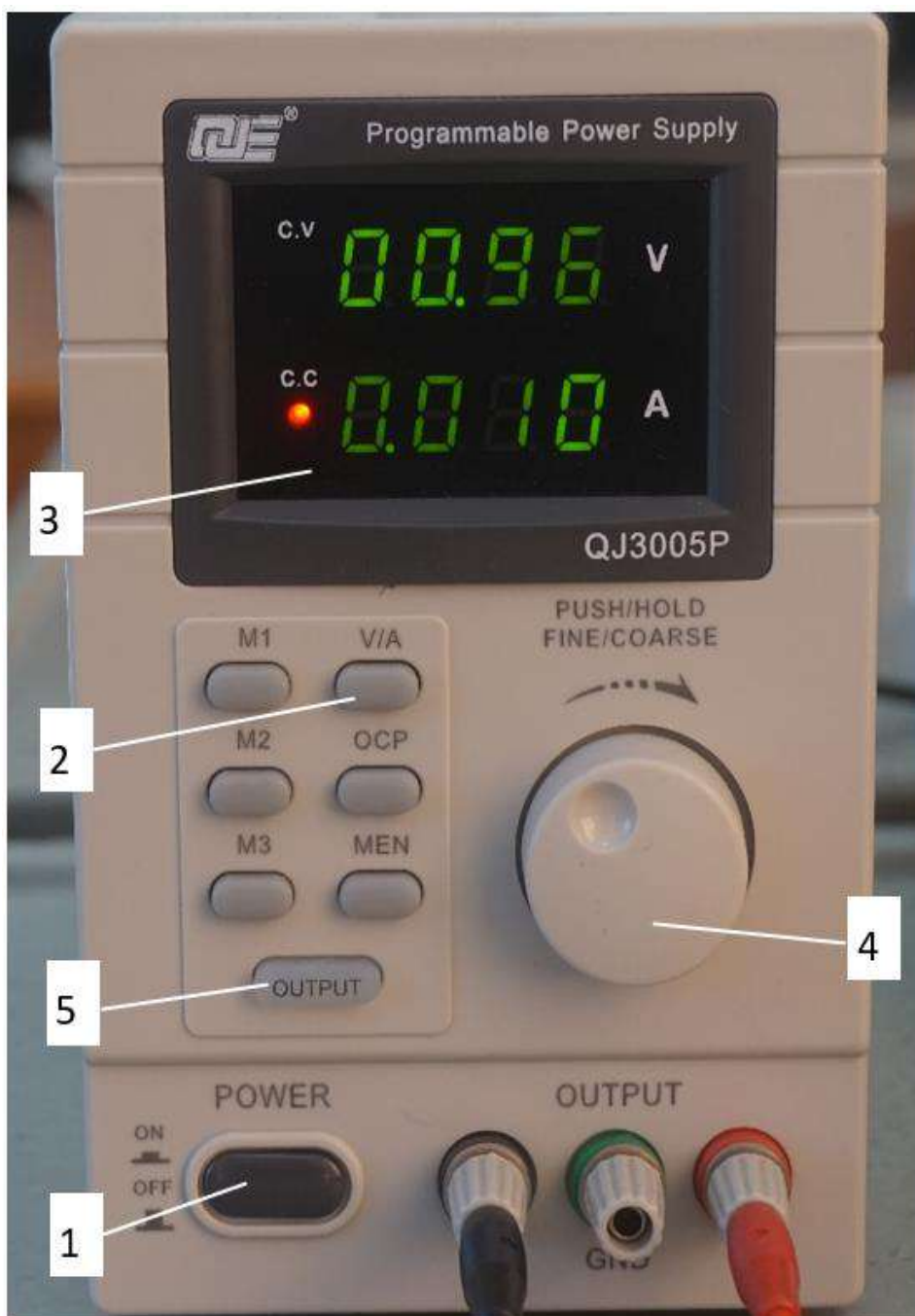


Рис.4. Лицевая панель источника питания QJE QJ3005P

Далее работаем с большой круглой кнопкой «FINE /COARSE» или «PUSH/HOLD» см. рис.4 (4). Эта кнопка имеет две функции:

1) выбор десятичного разряда, в котором в дальнейшем будем изменять напряжение/силу тока. Однократное отрывистое нажатие кнопки переносит мигающую индикацию на один из 4 доступных десятичных разрядов налево.

2) вращение кнопки по часовой стрелке увеличивает значение в выбранном разряде, а против часовой стрелки – уменьшает. При остановке вращения в течение 3 секунд действие этой функции прекращается и программируемый источник питания автоматически переходит в режим стабилизации.

Когда нужное значение напряжения/силы тока выставлено, то нужно нажать на кнопку «OUTPUT» см рис.4 (5), чтобы подавалось выставленное значение. При измерениях эта кнопка всегда должна быть подсвечена.

Порядок проведения работы

СНЯТИЕ ВОЛЬТАМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДАТЧИКА ХОЛЛА.

1. Включите измерительные приборы (кнопка POWER).

2. На программируемом источнике питания (1) см.рис.3 установите напряжение $U_{вх}$ на датчике Холла 1В согласно инструкции, приведенной в описании установки. Когда нужное напряжение выставлено, нажмите на кнопку «OUTPUT».

3. Изменяя напряжение $U_{вх}$ на программируемом источнике питания (1) см.рис.3 (1÷10В с шагом 1В), проведите 10 измерений продольного напряжения $U_{||}$ на датчике Холла по мультиметру (2) см.рис.3.

Зная сопротивление $R=4,6 \text{ кОм}$, по формуле $I = \frac{U_{вх}-U_{||}}{R}$ рассчитайте силу тока через датчик и внесите результаты измерений в таблицу 1.

Таблица 1. ВАХ образца

№	$U_{вх}, \text{ В}$	$U_{ }, \text{ В}$	$I = \frac{U_{вх}-U_{ }}{R}, \text{ мА}$
1			
2			
3			
...			
10			

СНЯТИЕ ЗАВИСИМОСТИ ХЭДС ОТ ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ.

1. Установите на программируемом источнике питания (1) см.рис.3 напряжение $U_{вх}$ на датчике Холла 10В. Измерьте продольное напряжения $U_{||}$ по мультиметру (2) см.рис.3.

И по формуле $I = \frac{U_{вх} - U_{||}}{R}$ рассчитайте ток $I_{обр}$ через датчик Холла.

2. Изменяя силу тока I_m через обмотку электромагнита на источнике питания (3) см.рис.3 ($0.3 \div 0.6$ А с шагом 0.03А) измерьте поперечное напряжение U_H (ХЭДС) по мультиметру (4) см.рис.3.

ВНИМАНИЕ!!! При работе с электромагнитом сначала установите нужное значение силы тока и только после этого нажмите на кнопку «OUTPUT». При выставлении следующего значения сначала отключите БП-2, нажав кнопку «OUTPUT», затем выставите нужное значение и включите БП-2, нажав кнопку «OUTPUT». Каждый раз при выставлении нового значения, отключайте БП, нажав кнопку «OUTPUT» во избежание остаточной намагниченности сердечника при ошибочно выставленных значениях.

3. По формуле $B = KI_m$, зная силу тока в катушке, определите значение магнитной индукции через известный коэффициент $K = 15.6$ мТл/А.

Результаты измерений запишите в таблицу 2.

Таблица 2. Зависимость ХЭДС от индукции магнитного поля

№	I_m, mA	$B = KI_m, Tл$	U_H, B
1			
2
10			

4. Выключите приборы.

5. Выключите клавишу «сеть» на блоке розеток.

Обработка результатов

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

2. Методом парных точек (по 4÷5 парам точек из Табл.1) определите удельную проводимость образца по формуле $\sigma = \frac{l \Delta I}{S \Delta U_{||}}$. Вычислите ее погрешность $\Delta \sigma$. Вычисления представьте в виде таблицы 3.

Таблица 3. Вычисление удельной проводимости образца

№-№ точек	ΔI , мА	ΔU_{\parallel} , В	σ , (Ом м) ⁻¹	$\sigma - \langle \sigma \rangle$, (Ом м) ⁻¹	$(\sigma - \langle \sigma \rangle)^2$, (Ом м) ⁻²
1-6					
2-7					
3-8					
....					
			$\langle \sigma \rangle =$	$\Sigma =$	$\Sigma =$

3. По данным Табл.2 постройте график зависимости ХЭДС от величины магнитной индукции $U_H = U_H(B)$.

4. Методом парных точек (по 4÷5 парам точек из Табл.2) определите величину постоянной Холла по формуле $R_H = \frac{\Delta U_H h}{\Delta B I}$. Вычислите ее погрешность ΔR_H .

Вычисления представьте в виде таблицы 4.

5. По формуле (10) найдите концентрацию носителей заряда n и вычислите ее погрешность.

6. По формуле (13) найдите подвижность носителей заряда μ и вычислите ее погрешность.

7. Проанализируйте полученные результаты, сравните их со значениями из справочной литературы, сделайте выводы.

Таблица 4. Вычисление константы Холла

№-№ точек	ΔI_m , мА	ΔU_H , В	R_H , $\frac{M^3}{Kл}$	$R_H - \langle R_H \rangle$, $\frac{M^3}{Kл}$	$(R_H - \langle R_H \rangle)^2$, $\frac{M^6}{Kл^2}$
1-6					
....					
			$\langle R_H \rangle =$	$\Sigma =$	$\Sigma =$

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_H , 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?

Литература

1. Калашников С.Г., Электричество. –М.: Физматлит, 1977.
2. Иродов И.Е., Электромагнетизм. Основные законы. М.: БИНОМ. Лабораторные знания, 2007.
3. Иванов В. К., Физика. Электромагнетизм: учеб. пособие / Иванов В.К. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. – 265 с

Работа 2.01Д при дистанционном доступе к лабораторной установке

Введение

Данный вариант работы используется в случае невозможности очного проведения занятий. Для успешного выполнения необходимо присутствие преподавателя или лаборанта в зале лабораторных работ. Студентам понадобится персональный компьютер с установленным программным обеспечением, позволяющим удаленно управлять рабочим столом. Допуск к работе осуществляется через видеоконференцию в режиме управления удаленным рабочим столом. Для записи результатов измерений может использоваться как бумажный, так и электронный протокол, по решению преподавателя. Факт выполнения фиксируется видеозаписью собрания.

Описание установки, имеющей возможность дистанционного доступа

Установка, предназначенная для выполнения работы в дистанционном режиме, идентична установке для очного выполнения (рис. 2,3). В дополнение к основным элементам установки установка снабжается компьютером и

видеокамерой, позволяющими управлять работой приборов и наблюдать за ними.

Порядок проведения работы

Подготовку стенда к работе осуществляет преподаватель или лаборант. Для работы в дистанционном режиме необходимо:

1. Включить компьютер, запустить видеоконференцию, закрепить на столе камеру (смотри инструкцию на стр. 98).
2. Начать собрание на лабораторном компьютере и пригласить туда студентов и, при необходимости, преподавателя.
3. После получения студентами допуска к работе необходимо включить стенд и измерительные приборы, а также запустить программу управления приборами.
4. Передать одному из студентов управление рабочим столом.

После передачи управления студенты самостоятельно выполняют работу.

Порядок выполнения идентичен очному варианту работы:

1. Запустите программу управления приборами (вид рабочего стола приведен на рис.5)
2. Для снятия вольтамперной характеристики датчика холла изменяя напряжение $U_{вх}$ на источнике питания (**Е – QJ3005P**) проведите 10 измерений продольного напряжения $U_{||}$ (**V1**). По формуле $I=(U_{вх}-U_{||})/R$ рассчитайте силу тока через датчик и внесите результаты измерений в таблицу 1.
3. Для снятия зависимости ХЭДС от индукции магнитного поля:
 - а) Установите ток через датчик холла $I_{обр}$. Для этого на источнике питания (**Е – QJ3005P**) установите напряжение $U_{вх}$ 30В и по формуле $I=(U_{вх}-U_{||})/R$ рассчитайте силу тока $I_{обр}$.
 - б) изменяя силу тока через электромагнит на источнике питания (**Ж-QJ3005P**), измерьте поперечное напряжение U_{H} (ХЭДС) (**V2**). Результаты измерений запишите в таблицу 2.
4. Выключите программу.

По окончании выполнения работы, выключение приборов и компьютера осуществляется преподавателем.

2.01Д - Эффект Холла в полупроводнике

J QJ3005P

Задание параметров
 03,00 В 0,100 А

00,00 В
0,000 А

Активация выхода

E QJ3005P

Задание параметров
 05,00 В 0,005 А

00,00 В
0,000 А

Активация выхода

V1 UT803

HOLD MAX MIN OverLoad

-0,012В

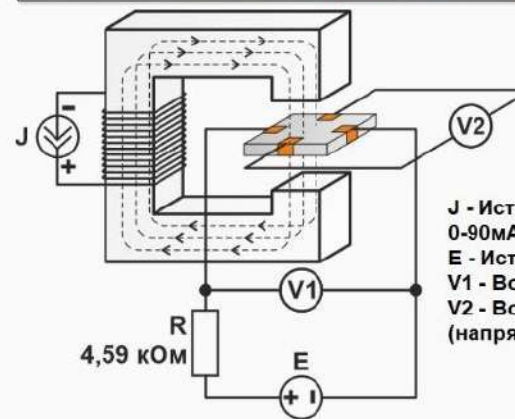
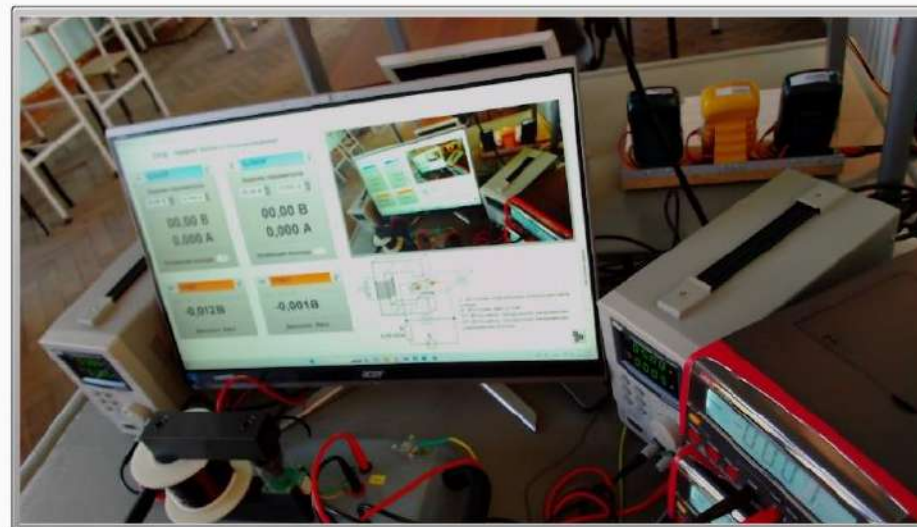
Диапазон: Авто

V2 UT803

HOLD MAX MIN OverLoad

-0,001В

Диапазон: Авто



- J - Источник тока катушки электромагнита, 0-90мА
- E - Источник ЭДС 0-30В
- V1 - Вольтметр, продольное напряжение
- V2 - Вольтметр, поперечное напряжение (напряжения Холла)

Рис. 5. Общий вид рабочего стола с запущенной программой управления