

3.3.4А ЭФФЕКТ ХОЛЛА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Цель работы: измерение подвижности и концентрации носителей заряда в полупроводниках.

В работе используются: электромагнит с регулируемым источником питания; вольтметр; амперметр; миллиамперметр; миллитесламетр; источник питания, образцы легированного германия, программное обеспечение.

Перед выполнением работы необходимо ознакомиться с основами элементарной теории движения носителей заряда в металлах и полупроводниках (п. 4 введения к разделу).

Во внешнем магнитном поле B на заряды действует сила Лоренца:

$$F = qE + qu \times B \quad (1)$$

Эта сила вызывает движение носителей, направление которого в общем случае не совпадает с E . Действительно, траектории частиц будут либо искривляться, либо, если геометрия проводника этого не позволяет, возникнет дополнительное электрическое поле, компенсирующее магнитную составляющую силы Лоренца. Возникновение поперечного тока электрического поля в образце, помещённом во внешнее магнитное поле, называют эффектом Холла.

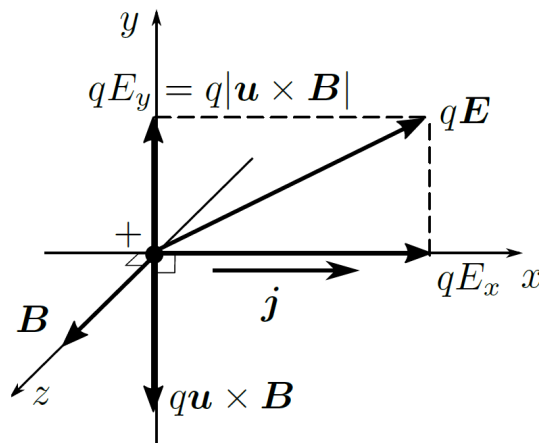


Рис. 1: Силы, действующие на положительный носитель заряда в проводящей среде при наличии магнитного поля

Пусть система содержит носители только одного типа (например, электроны, как в большинстве металлов). Рассмотрим случай плоской геометрии: пусть ток течёт вдоль оси x , а магнитное поле направлено вдоль оси z (см. рис. 1). Магнитное поле действует на движущиеся заряды с силой $F_y = -qu_x B_z$ по оси y . Ток сможет течь строго вдоль оси x , если заряды в среде перераспределятся таким образом, чтобы полностью скомпенсировать магнитную силу, создав в направлении y электрическое поле:

$$E_y = u_x B_z = \frac{j_x}{nq} B_z \quad (2)$$

называемое холловским (здесь n — концентрация носителей). По оси x носители будут двигаться так, как если бы магнитного поля не было: $j_x = \sigma_0 E_x$ ($j_y = j_z = 0$), где $\sigma_0 = qn\mu$ — удельная проводимость среды в отсутствие B .

Для исследования зависимости проводимости среды от магнитного поля в данной работе используется мостик Холла (рис. 2). В данной схеме ток вынуждают течь по оси x вдоль

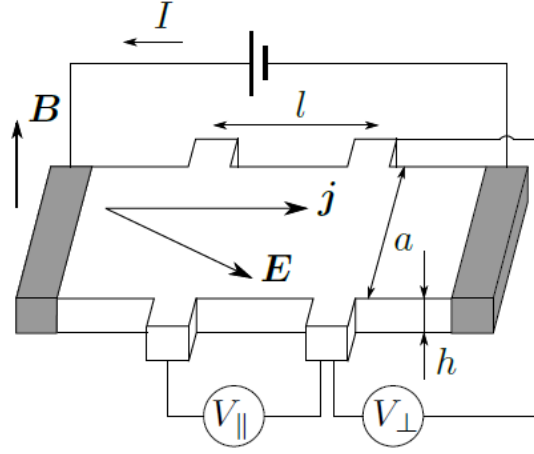


Рис. 2: Схема для исследования влияния магнитного поля на проводящие свойства - мостик Холла

плоской пластинки (ширина пластинки a , толщина h , длина l). Сила Лоренца, действующая со стороны перпендикулярного пластинке магнитного поля, «прибивает» носители заряда к краям образца, что создаёт холловское электрическое поле, компенсирующее эту силу. Поперечное напряжение между краями пластинки (холловское напряжение) равно $U_{\perp} = E_y a$, где, согласно уравнению (2):

$$E_y = u_x B_z = \frac{j_x}{nq} B \quad (3)$$

Плотность тока, текущего через образец, равна $j_x = I/ah$, где I — полный ток, ah — поперечное сечение. Таким образом, для холловского напряжения имеем

$$U_{\perp} = \frac{B}{nqh} \cdot I = R_H \cdot \frac{B}{h} \cdot I, \quad (4)$$

где константу

$$R_H = \frac{1}{nq} \quad (5)$$

называют **постоянной Холла**. Знак постоянной Холла определяется знаком заряда носителей. Продольная напряжённость электрического поля равна

$$E_x = j_x / \sigma_0 \quad (6)$$

и падение напряжения $U_{\parallel} = E_x l$ вдоль пластинки определяется омическим сопротивлением образца $R_0 = l/(\sigma_0 ah)$:

$$U_{\parallel} = IR_0 \quad (7)$$

Работа выполняется при помощи программного обеспечения, связь с приборами осуществляется через цифровой интерфейс RS-232 при помощи USB-портов.

В работе изучаются особенности проводимости полупроводников в геометрии мостика Холла. Ток пропускается по плоской полупроводниковой пластинке, помещённой в перпендикулярное пластинке магнитное поле. Измеряется разность потенциалов между краями пластинки в поперечном к току направлении. По измерениям определяется константа Холла, тип проводимости (электронный или дырочный) и вычисляется концентрация основных носителей заряда на основе соотношения:

$$R_H = \frac{1}{nq}, \quad (8)$$

где n - концентрация основных носителей заряда, R_H - постоянная Холла, q - заряд носителя.

Экспериментальная установка

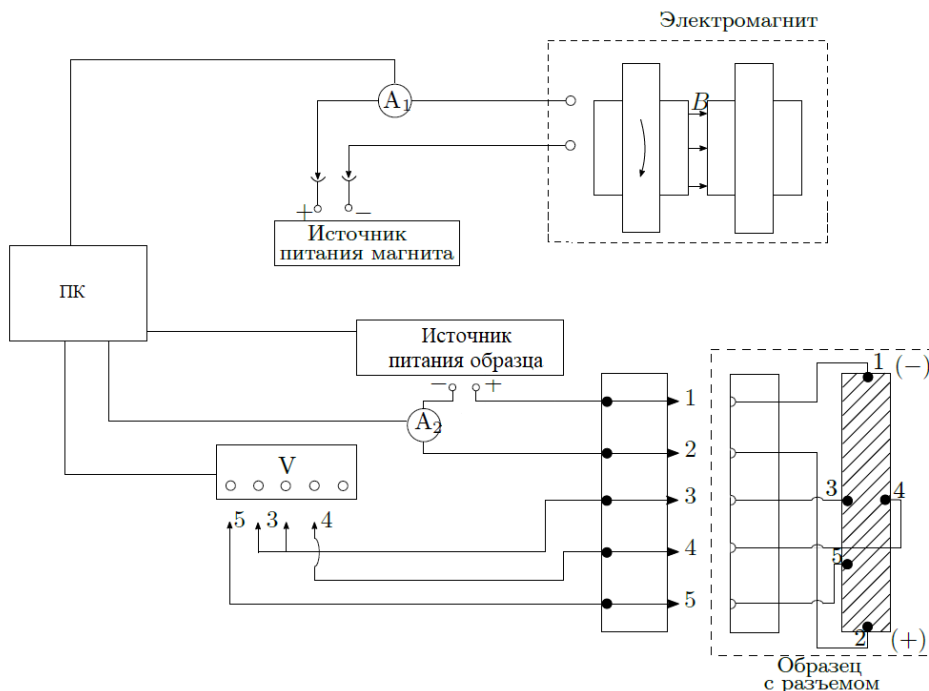


Рис. 3: Схема установки для исследования эффекта Холла в полупроводниках

Электрическая схема установки для измерения ЭДС Холла представлена на рис. 3. В зазоре электромагнита (рис. 3) создаётся постоянное магнитное поле, величину которого можно менять с помощью регулятора источника питания электромагнита. Ток питания электромагнита измеряется внешним амперметром A1.

Градуировка электромагнита (связь тока с индукцией поля) проводится при помощи милитесламетра на основе датчика Холла.

Прямоугольный образец из легированного германия, смонтированный в специальном держателе (рис. 3), подключается к источнику питания образца. Вдоль длинной стороны образца течёт ток, величина которого регулируется на источнике питания образца и измеряется миллиамперметром A2.

В образце, помещённом в зазор электромагнита, между контактами 3 и 4 возникает разность потенциалов 34, которая измеряется с помощью вольтметра V.

Контакты 3 и 4 вследствие неточности подпайки могут лежать не на одной эквипотенциали. Тогда напряжение между ними связано не только с эффектом Холла, но и с омическим падением напряжения вдоль пластинки. Исключить этот эффект можно, если при каждом значении тока через образец измерять напряжение между точками 3 и 4 в отсутствие магнитного поля. При фиксированном токе через образец это дополнительное к ЭДС Холла напряжение U_0 остаётся неизменным. От него следует (с учётом знака) отсчитывать величину ЭДС Холла:

$$U_{\perp} = U_{34} - U_0 \quad (9)$$

При таком способе измерения нет необходимости проводить повторные измерения с противоположным направлением магнитного поля.

По знаку U_{\perp} можно определить характер проводимости — электронный или дырочный. Для этого необходимо знать направление тока в образце и направление магнитного поля.

Измерив ток I в образце и напряжение U_{35} между контактами 3 и 5 в отсутствие магнитного поля, можно, зная параметры образца, рассчитать проводимость материала образца по формуле

$$\rho_0 = \frac{U_{35}ah}{Il} \quad (10)$$

где l — расстояние между контактами 3 и 5, a — ширина образца, h — его толщина.

ЗАДАНИЕ

В работе предлагается исследовать зависимость ЭДС Холла от величины магнитного поля при различных значениях тока через образец для определения константы Холла; определить знак носителей заряда и проводимость материала образца.

1. Работа будет состоять из 4 частей: градуировка электромагнита, измерение ЭДС Холла, определение знака носителей, измерение удельной проводимости.
2. Соберите установку согласно схеме на рис. 3, подключите к вольтметру контакты 3 и 4. Убедитесь, что источник питания электромагнита выключен, включите амперметры и вольтметр.
3. Запустите программу «Эффект Холла».
4. Введите фамилию в поле «Введите фамилию», нажмите клавишу ENTER.

I. Градуировка электромагнита.

5. Для проведения градуировки электромагнита ознакомьтесь с устройством и принципом работы измерителя магнитной индукции АТЕ-8702. Техническое описание (ТО) расположено на установке. Включите измеритель индукции кнопкой «POWER»; через 2-3 секунды последовательным нажатием кнопки «MODE» установите режим измерения в постоянном поле « a_1 » (см. рис. 2 ТО).

Снимите защитный колпачок с сенсорной головки датчика и коснитесь головкой поверхности магнита в зазоре.

Для удержания показаний дисплея нажмите кнопку «HOLD»; повторное нажатие этой кнопки возвращает прибор в режим измерений.

6. Установите ручки регулировки источника питания электромагнита в минимальное положение и нажмите на кнопку «Градуировка электромагнита». Для начала эксперимента нажмите кнопку «Старт».

Получите калибровочную кривую электромагнита: измерьте магнитную индукцию миллитесламетром, полученное значение введите в поле «Индукция», нажмите клавишу ENTER, измените ток питания электромагнита (на 5 – 7 В). Повторите для 15-20 значений тока питания электромагнита.

7. После окончания градуировки уберите миллитесламетр в коробку, выйдите в меню программы с помощью клавиши «Меню».

II. Определение ЭДС Холла.

8. Вставьте образец в зазор электромагнита. Перейдите к определению ЭДС Холла кнопкой «Определение ЭДС Холла».

9. Введите a в поле «Введите a », нажмите клавишу ENTER. Установите ручки регулировки источника питания электромагнита в минимальное положение, нажмите кнопку «Старт». Подождите, пока с приборов будет получено 15 значений.
10. Необходимо следить за ходом программы: получение данных может остановлено при слишком больших значения тока или после получения 15 точек.
11. Остановите процесс кнопкой «Стоп», измените ток на источнике питания электромагнита (на 8 – 12 В). Запустите получение данных кнопкой «Новое напряжение». Повторите для 10-12 значений тока на источнике питания электромагнита.

III. Определение знака носителей.

12. После окончания основного эксперимента выйдете в основное меню программы кнопкой «Меню». Перейдите к определению знаку носителей заряда кнопкой «Знак носителей».

13. Определите знак носителей заряда в образце. Для этого необходимо знать направление тока через образец, направление магнитного поля и знак ЭДС Холла.

Направление тока в образце показано знаками «+» и «-» на рис. 3. Направление тока в обмотках электромагнита при установке разъёма K_1 в положение 1 показано стрелкой на торце магнита.

Измерьте разность потенциалов без магнитного поля (установите ручки регулировки источника питания электромагнита в минимальное положение, нажмите кнопку «Без поля»). Подайте небольшое напряжение на электромагнит (10 В), нажмите кнопку «С полем». Зафиксируйте результаты.

IV. Измерение удельной проводимости.

14. Выключите источник питания электромагнита, перейдите в основное меню программы кнопкой «Меню». Перейдите к измерению удельной проводимости соответствующей кнопкой.
15. Удалите держатель с образцом из зазора электромагнита; подключите к клемма «U» и «0» вольтметра провода 3 и 5; введите параметры образца в соответствующие поля (после ввода обязательно нажать клавишу «ENTER»). Введите L в поле «Введите L » и l в поле «Введите l », нажмите кнопку «Старт».

V. Обработка результатов.

16. Перейдите в основное меню программы. Для получения графиков и постоянных из эксперимента нажмите на кнопку «Обработка данных».
17. Разберите установку, все полученные данные и графики хранятся в папке с вашей фамилией, сохраните их себе, например, на флешку.

VI. Выводы.

18. Определите характер проводимости образца (дырочный или электронный) по направлению тока и по знаку постоянной Холла.

19. Сделайте вывод об адекватности полученных констант. При необходимости обработайте данные самостоятельно.

Контрольные вопросы.

1. Какие вещества называют диэлектриками, проводниками, полупроводниками? Чем объясняется различие их электрических свойств? Как зависит от температуры проводимость металлов и полупроводников?
2. Дайте определение константы Холла. Как зависит константа Холла от температуры у металлов и полупроводников?
3. Зависит ли результат измерения константы Холла от геометрии образца?
4. Зависит ли сопротивление образца от магнитного поля в условиях опыта?
5. Как устроен милливеберметр? Зависят ли его показания от сопротивления измерительной катушки? Каким должно быть это сопротивление по сравнению с сопротивлением катушки прибора?
6. По результатам измерений оцените частоту столкновений, длину пробега и коэффициент диффузии носителей тока в образце.
7. Получите выражение константы Холла для материалов с двумя типами носителей. Указание: воспользуйтесь условием равенства нулю поперечного тока.