



**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**Белорусский национальный
технический университет**

Кафедра «Техническая физика»

ИЗУЧЕНИЕ ЭФФЕКТА ХОЛЛА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

*Методические указания
к выполнению лабораторной работы*

**Минск
БНТУ
2013**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Техническая физика»

ИЗУЧЕНИЕ ЭФФЕКТА ХОЛЛА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Методические указания
к выполнению лабораторной работы

Минск
БНТУ
2013

УДК 621.315.416
ББК 22.37
И 39

Составители:

И. А. Хорунжий, А. В. Федотенко

Рецензент

Д. С. Доманевский

В методических указаниях рассмотрена теория эффекта Холла, наблюдаемого при протекании электрического тока в металлах и полупроводниках, помещенных в магнитное поле. Приведено описание экспериментальной установки для изучения этого эффекта в полупроводниках и подробно описан порядок проведения измерений. Приведены примеры применения эффекта Холла в технике.

© Белорусский национальный
технический университет, 2013

Цель работы: изучить физические основы и теорию эффекта Холла; экспериментально исследовать зависимость холловской разности потенциалов от силы тока в исследуемом образце полупроводника и индукции магнитного поля.

Приборы и принадлежности: образец исследуемого полупроводника; стабилизированный источник тока для исследуемого образца полупроводника; универсальный цифровой миллиамперметр для измерения тока в исследуемом образце; универсальный цифровой милливольтметр для измерения холловской разности потенциалов; электромагнит для создания магнитного поля; стабилизированный источник питания электромагнита.

Краткие теоретические сведения

Эффект Холла

Американский физик Эдвин Холл в 1879 году провел эксперимент, в котором пропускал постоянный электрический ток I через тонкую пластинку прямоугольной формы, изготовленную из золота, и измерял разность потенциалов $\Delta\varphi = \varphi_A - \varphi_C$ между противоположными точками A и C (рис. 1), расположенными на верхней и нижней гранях в одном и том же поперечном сечении исследуемого проводника. На рисунке это сечение обозначено наклонной штриховкой. Перпендикулярные к направлению тока в проводнике плоскости являются эквипотенциальными, поэтому, как и следовало ожидать, разность потенциалов между точками A и C оказалась равной нулю $\Delta\varphi = \varphi_A - \varphi_C = 0$.

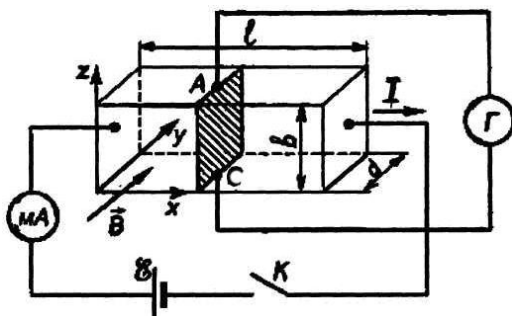


Рис. 1

Однако, когда Холл поместил исследуемый образец в однородное магнитное поле, вектор магнитной индукции B которого был направлен перпендикулярно его боковым граням, как показано на рис. 1, то потенциалы точек A и C стали разными. При прекращении воздействия магнитного поля на пластинку эта разность потенциалов становилась равной нулю.

Физическое явление возникновения поперечной разности потенциалов в проводнике с током, помещенном в однородное магнитное поле, перпендикулярное направлению электрического тока в проводнике, получило название эффект Холла, а возникающая в проводнике с током, помещенном в магнитное поле, поперечная разность потенциалов $\Delta\varphi = \varphi_A - \varphi_C = U_H$ была названа холловской разностью потенциалов или ЭДС Холла.

Экспериментальные исследования, выполненные Холлом на тонких пластинках прямоугольной формы различной длины l , ширины b и толщины d , изготовленных из тонкой фольги из золота, показали, что для всех образцов разность потенциалов $\Delta\varphi$ между точками A и C пропорциональна силе тока I , индукции B магнитного поля и обратно пропорциональна толщине d пластинки:

$$\Delta\varphi = \varphi_A - \varphi_C = U_H = \frac{R_H IB}{d}, \quad (1)$$

где R_H – коэффициент пропорциональности, получивший название **постоянной Холла**.

Дальнейшие исследования показали, что эффект Холла наблюдается не только в пластинках из золота, но и во всех других твердых проводниках и полупроводниках независимо от их материала. При этом изменение направления тока I или вектора индукции B магнитного поля на противоположное вызывает изменение знака холловской разности потенциалов $\Delta\varphi = \varphi_A - \varphi_C = U_H$, а числовое значение постоянной Холла R_H зависит от материала, из которого изготовлена пластинка, причем этот коэффициент для одних веществ имеет положительное значение, а для других – отрицательное.

Объяснение механизма возникновения холловской разности потенциалов

В классической электронной теории электропроводности возникновение холловской разности потенциалов объясняется действием со стороны магнитного поля силы Лоренца на упорядоченно движущиеся носители тока в веществе.

Пусть ток I в исследуемой пластинке прямоугольной формы длиной l , шириной b и толщиной d (см. рис. 1) обусловлен упорядоченным движением носителей тока – заряженных частиц, заряд которых равен e . Если их концентрация равна n , а средняя скорость упорядоченного движения v , то сила тока I выразится формулой

$$I = jS = envS = envbd, \quad (2)$$

где $j = env$ – плотность тока;

$S = bd$ – площадь поперечного сечения пластинки;

v – проекция вектора средней скорости \vec{v} упорядоченного движения носителей тока на ось OX , совпадающей с направлением тока I .

Эта формула одинаково пригодна для носителей тока, имеющих как положительный, так и отрицательный заряд. Действительно, если заряд частиц, образующих ток I в исследуемом образце, положительный $e > 0$ (полупроводник p -типа), то их скорость \vec{v} совпадает с направлением тока и $v_x = v$. Если же заряд носителей тока отрицательный $e < 0$ (проводник из металла или полупроводник n -типа), то их скорость \vec{v} противоположна направлению тока I и $v_x = -v$. Отсюда следует, что независимо от знака заряда носителей тока входящее в формулу (2) произведение

$$ev > 0.$$

При воздействии на исследуемый образец магнитного поля, индукция которого равна \vec{B} , на носители тока, движущиеся со скоростью упорядоченного движения \vec{v} , действует сила Лоренца

$$\vec{F}_L = e[\vec{v} \vec{B}]$$

или в скалярном виде

$$F_{\perp} = evB \sin \alpha,$$

где α – угол между векторами \vec{v} и \vec{B} .

Для указанных на рис. 1 направлений тока I , вектора \vec{B} и скорости \vec{v} упорядоченного движения носителей тока перпендикулярна вектору \vec{B} , поэтому $\sin \alpha = 1$ и

$$F_{\perp} = evB.$$

Под действием этой силы в соответствии с правилом левой руки носители тока независимо от знака их заряда будут смещаться к верхней грани исследуемого образца и на его верхней грани образуется избыток зарядов, а на нижней грани – недостаток. В результате между верхней и нижней гранями исследуемого образца возникнет поперечная разность потенциалов $U_H = \varphi_A - \varphi_C$, а внутри пластины – перпендикулярное к току и магнитному полю поперечное электрическое поле \vec{E}_H , направленное сверху вниз (рис. 2, а), если носители тока имеют положительный заряд e , и снизу вверх, если они имеют отрицательный заряд e (рис. 2, б).

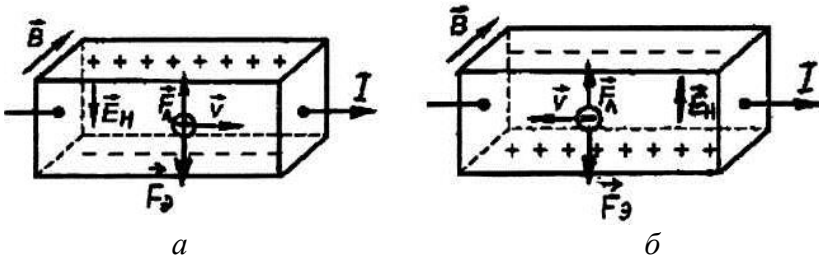


Рис. 2

Таким образом, направление возникшего поперечного электрического поля \vec{E}_H , а следовательно, и знак поперечной (холловской) разности потенциалов $U_H = \varphi_A - \varphi_C$ зависят от знака носителей тока в исследуемом проводнике.

Если носители тока имеют положительный заряд e , то на верхней грани образца возникает положительный потенциал, а на нижней – отрицательный (см. рис. 2, *a*). Если же носители тока имеют отрицательный заряд e , то на верхней грани образца возникает отрицательный потенциал, а на нижней – положительный (см. рис. 2, *б*).

Следовательно, по знаку холловской разности потенциалов $U_H = \varphi_A - \varphi_C$ можно определить знак носителей тока в исследуемом образце.

Сила $\vec{F}_\ominus = e\vec{E}_H$, действующая со стороны возникшего поперечного электрического поля \vec{E}_H на заряд e , направлена в сторону, противоположную направлению силы Лоренца $\vec{F}_\text{Л}$ (см. рис. 2), и в установившемся стационарном состоянии эти силы уравновешивают друг друга:

$$\vec{F}_\ominus + \vec{F}_\text{Л} = 0.$$

Из выражения для проекций этих сил на ось O_z с учетом знака заряда носителей тока следует, что

$$eE_H = evB$$

или

$$E_H = vB. \quad (3)$$

При достаточно длинной и широкой исследуемой пластине (это условие выполняется при ее малой толщине d) возникшее поперечное электрическое поле можно считать однородным, поэтому напряженность поля E_H и поперечная разность потенциалов $U_H = \varphi_A - \varphi_C$ между точками A и B связаны соотношением

$$E_H = \frac{(\varphi_A - \varphi_C)}{b} = \frac{U_H}{b},$$

где b – ширина пластины.

Отсюда следует, что

$$U_H = bE_H$$

или с учетом (3)

$$U_H = bvB. \quad (4)$$

Из формулы (2) следует, что средняя скорость v упорядоченного движения носителей тока

$$v = \frac{I}{enbd}.$$

Подставив полученное выражение для v (4) получаем

$$U_H = \frac{bIB}{enbd} = \frac{IB}{end}. \quad (5)$$

Сопоставляя полученное теоретически выражение (5) для холловской разности потенциалов с экспериментальной формулой (1) получаем

$$\frac{R_H IB}{d} = \frac{IB}{end}.$$

Из сравнения этих выражений следует, что постоянная Холла связана с параметрами токопроводящего образца соотношением

$$R_H = \frac{1}{en},$$

где e – заряд носителей тока в исследуемом веществе;
 n – концентрация носителей тока.

Отсюда следует, что знак постоянной Холла совпадает со знаком заряда e носителей тока, обуславливающих проводимость данного материала. Поэтому на основании измерений постоянной Холла для полупроводника можно судить о природе его проводимости: если $R_H < 0$, то проводимость электронная, если $R_H > 0$, то дырочная. Если в полупроводнике одновременно осуществляются оба типа проводимости, то по знаку константы Холла можно судить о том, какой из них является преобладающим.

Анализ выражения (5) показывает, что холловская разность потенциалов обратно пропорциональна концентрации носителей тока, поэтому эффект Холла трудно наблюдаем в металлах и легко в полупроводниках, где концентрация носителей тока на много порядков меньше, чем в металлах. Холловская разность потенциалов для полупроводников имеет достаточно большие значения. Для ее измерения не требуется применение высокочувствительной измерительной аппаратуры.

По измеренному значению постоянной Холла можно также определить концентрацию n носителей заряда, если характер проводимости и величина их заряда известны (например, для металлов):

$$n = \frac{1}{eR_H}.$$

Результаты экспериментальных исследований для одновалентных металлов показали, что концентрация электронов проводимости практически совпадает с концентрацией атомов. Это означает, что для одновалентных металлов на каждый атом приходится примерно один свободный электрон, участвующий в электропроводности такого проводника.

Для опытного определения значения постоянной Холла необходимо воспользоваться формулой (1), из которой следует, что

$$R_H = \frac{U_H d}{IB}. \quad (6)$$

Подставив в эту формулу результаты измерений холловской разности потенциалов U_H , индукции B магнитного поля, в котором находится образец исследуемого вещества, толщины d исследуемого образца для направления, в котором действует магнитное поле, и силы тока I в образце, вычисляется значение постоянной Холла R_H .

Для определения знака постоянной Холла необходимо знать направление тока I в исследуемом образце и направление вектора индукции \vec{B} магнитного поля относительно исследуемого образца. Задав направление тока I в исследуемом образце и направление вектора индукции \vec{B} магнитного поля относительно исследуемого образца, например, согласно рис. 2, а, и применив правило левой руки, считая, что носители тока имеют положительный заряд, определяем полярность холловской разности потенциалов U_H .

Если при этом условии холловское напряжение U_H на верхней грани исследуемого образца имеет положительную полярность, а на нижней грани – отрицательную, как это показано на рис. 2, а, то основные носители тока в исследуемом образце имеют положительный заряд и являются дырками.

Если полярность холловской разности потенциалов U_H на верхней грани исследуемого образца будет иметь отрицательную полярность, а на нижней грани – положительную, как это показано на рис. 2, б, то основные носители тока в исследуемом образце имеют отрицательный заряд и являются электронами.

При выводе формулы для холловской разности потенциалов U_H предполагалось, что все носители тока имеют одинаковую скорость движения. Если учитывать распределения носителей тока по скоростям и брать усредненное значение скорости, то в выражении для постоянной Холла появляется дополнительный множитель, отличный от единицы и равный $3\pi/8$. Тогда выражение для постоянной Холла принимает следующий вид:

$$R_H = \frac{3\pi}{8en}.$$

Отсюда следует, что более точным в сравнении с формулой (6) для концентрации носителей тока является выражение

$$n = \frac{3\pi}{8eR_H}.$$

Одновременное измерение постоянной Холла R_H и удельного сопротивления ρ позволяет определять подвижность u носителей тока исследуемого вещества.

Подвижностью u носителей тока вещества называется величина, равная отношению скорости v упорядоченного движения носителей тока к напряженности E электрического поля, действующего на эти носители тока:

$$u = \frac{v}{E}, \quad (7)$$

так как плотность тока j согласно закону Ома, записанному в дифференциальной форме, равна

$$j = \sigma E = \frac{E}{\rho}, \quad (8)$$

где $\sigma = 1/\rho$ – удельная проводимость вещества.

С другой стороны, плотность тока j , выраженная через скорость v упорядоченного движения носителей тока, согласно формуле (2) равна

$$j = env. \quad (9)$$

Из сравнения выражений (8) и (9) для плотности тока следует, что

$$\frac{E}{\rho} = env. \quad (10)$$

Из формул (7) и (10) следует выражение для подвижности u носителей тока

$$u = \frac{v}{E} = \frac{1}{\rho en} = \frac{R_H}{\rho} = \sigma R_H. \quad (11)$$

Удельное сопротивление ρ или удельная проводимость σ исследуемого образца могут быть определены по результатам измерений его электрического сопротивления R и известным значениям его длины l , ширины b и толщины d . Для этого необходимо измерить ток I через исследуемый образец и падение напряжения U на нем, создаваемое током, когда он находится в магнитном поле.

Электрическое сопротивление R исследуемого образца равно

$$R = \frac{\rho l}{S} = \frac{\rho l}{bd} = \frac{U}{I}.$$

Отсюда следует, что

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{Ubd}{II}$$

или удельная проводимость σ равна

$$\sigma = \frac{II}{Ubd}. \quad (12)$$

Таким образом, подставив в формулу (11) полученные опытным путем с помощью формулы (6) значение постоянной Холла R_H и с помощью формулы (12) – значение удельной проводимости σ , получим значение подвижности u носителей тока для исследуемого образца:

$$u = \sigma R_H.$$

Эффект Холла имеет широкое практическое применение. На его основе созданы полупроводниковые датчики Холла, с помощью которых проводятся бесконтактные измерения напряженности и индукции магнитного поля, величина и мощность тока, преобразование постоянного тока в переменный и переменного в постоянный, в воспроизводящих головках систем звукозаписи. Особый интерес представляет применение датчиков Холла в бесконтактных системах зажигания двигателей внутреннего сгорания, например, автомобилей. Эффект Холла широко применяется в полупроводниковой промышленности для определения типа проводимости, концентрации и подвижности носителей тока полупроводниковых материалов, используемых в производстве полупроводниковых приборов.

Описание лабораторной установки

Принципиальная электрическая схема лабораторной установки для изучения эффекта Холла приведена на рис. 3.

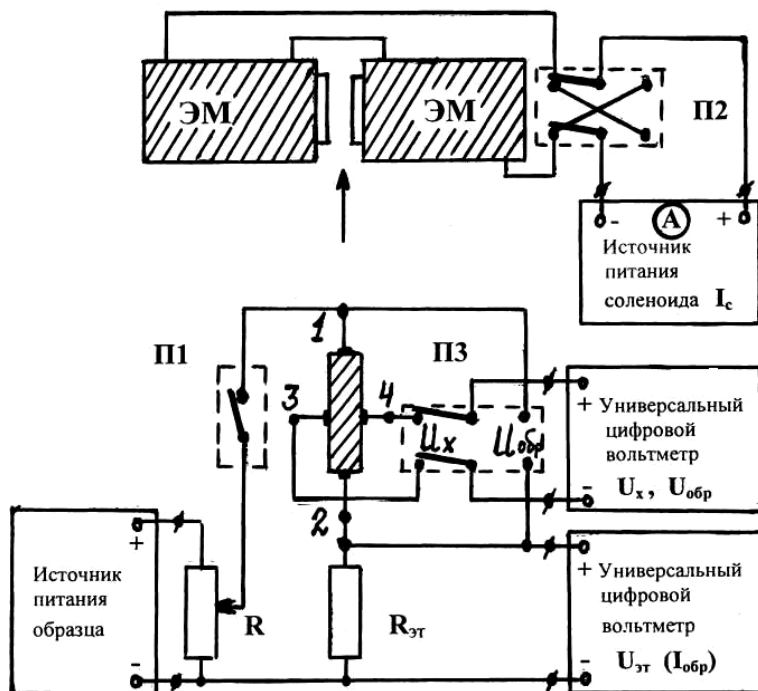


Рис. 3

В состав установки входят следующие приборы.

1. Измерительный стенд, на котором установлены исследуемый датчик Холла, электромагнит, коммутирующие устройства и гнезда для подключения источников питания и измерительных приборов.

2. Источник тока питания датчика Холла.

3. Универсальный цифровой вольтметр, включенный в режим измерения тока датчика Холла на предел измерения 100 мА.

4. Универсальный цифровой вольтметр, включенный на предел измерения 100 мВ, для измерения напряжения Холла на исследуемом датчике.

5. Источник тока питания соленоида.

В качестве исследуемого образца в работе используется датчик Холла промышленного изготовления, который находится в зазоре между полюсами электромагнита, установленного в измерительном стенде.

Если через контакты 1, 2 исследуемого датчика Холла пропустить ток от источника питания, то при воздействии магнитного поля на контактах 3 и 4 должна возникнуть холловская разность потенциалов. Величина тока в исследуемом образце регулируется переменным резистором R , установленном на передней панели измерительного стенда.

На передней панели измерительного стенда также расположены:

- переключатель «П1», который в положении «ВКЛ» обеспечивает подачу с блока питания тока на датчик Холла;
- разъем, на который с помощью соединительных проводников подается напряжение с блока питания на датчик Холла, установленный в измерительной установке;
- переменный резистор R «РЕГУЛИРОВКА ТОКА», с помощью которого устанавливается необходимое значение тока, подаваемого на датчик Холла;
- гнезда « \pm мА» для подключения универсального цифрового вольтметра, обеспечивающего измерение величины тока, подаваемого на датчик Холла;
- гнезда « \pm мВ» для подключения с помощью переключателя «П3» цифрового вольтметра в положение, обеспечивающее измерение величины холловской разности потенциалов U_H на исследуемом датчике Холла и напряжение питания U датчика Холла;
- гнезда «ЭМ» для подключения электропитания катушек электромагнита от регулируемого источника тока;
- переключатель «П2», имеющий три положения переключения полярности тока в катушках электромагнита:
 - «1» – ток в катушках электромагнита протекает в прямом направлении;
 - «2» – ток в катушках электромагнита протекает в обратном направлении;
 - «0» – катушки электромагнита отключены от источника тока питания электромагнита.

Подготовка приборов к работе

1. Установить тумблеры «СЕТЬ» на блоках питания и цифровых вольтметрах в положение «ВЫКЛ».

2. Переключатели «П1» и «П2» на панели измерительной установки в положение «ВЫКЛ».

3. Ручку переменного резистора «РЕГУЛИРОВКА ТОКА» вернуть против часовой стрелки до состояния легкого упора в положение «0».

4. Для подачи напряжения на датчик Холла подсоединить с помощью соединительных проводов источник напряжения к разъему «Р» измерительного стенда.

5. Подготовить цифровой вольтметр к измерению тока, текущего через датчик Холла. Для этого ручку переключения пределов измерения вольтметра поставить в положение «100 мА», соответствующее измерению силы тока, и подсоединить его с помощью соединительных проводов к гнездам «мА» измерительного стенда.

6. Подготовить второй цифровой вольтметр к измерению холловской разности потенциалов. Для этого ручку переключения пределов измерения цифрового вольтметра нужно поставить в положение «100 мВ» и подключить его с помощью соединительных проводов к гнездам «мВ» измерительного стенда.

7. За 10–15 мин до начала измерений установить тумблеры «СЕТЬ» на блоках питания и цифровых вольтметрах в положение «ВКЛ».

Порядок выполнения работы

1. Измерить зависимость холловской разности потенциалов U_H от силы тока $I_{обр}$, подводимого к датчику Холла.

Для этого переключатель «П2» на передней панели измерительного стенда нужно поставить в положение «1». Установить на блоке питания величину тока и напряжения на катушках электромагнита $I_{эм} = 0,2$ А и $U_{эм} \approx 12,0$ В и приступить к измерениям. Вращая ручку переменного резистора «РЕГУЛИРОВКА ТОКА» по часовой стрелке, установить указанные в таблице значения тока $I_{обр}$ в исследуемом образце и выполнить измерения соответствующих значений холловской разности потенциалов U_{H1} .

Результаты измерений занести в таблицу.

Примечание! Допускается установка тока $I_{\text{обр}}$ с отклонением $\pm 5\%$ от значений, указанных в таблице.

2. Установить на блоке питания значение тока в катушках электромагнита $I_{\text{ЭМ}} = 0,3 \text{ А}$, $U_{\text{ЭМ}} \approx 18,0 \text{ В}$.

Выполнить аналогичные измерительные операции как и в пункте 1. Результаты измерений $U_{\text{Н2}}$ в зависимости от $I_{\text{обр}}$ занести в таблицу.

После завершения измерений, вращая ручку переменного резистора «РЕГУЛИРОВКА ТОКА» против часовой стрелки, установить в состояние легкого упора в положение «0».

3. Поставить переключатель «П2» в положение «2», при этом происходит изменение направления тока в катушках электромагнита.

Установить снова на блоке питания величину тока и напряжения в катушках электромагнита $I_{\text{ЭМ}} = 0,2 \text{ А}$ и $U_{\text{ЭМ}} \approx 12,0 \text{ В}$ и выполнить измерения, аналогичные измерениям в пункте 1.

Результаты измерений $U_{\text{Н3}}$ в зависимости от $I_{\text{обр}}$ занести в таблицу.

Примечание! В таблицах указывайте знак холловской разности потенциалов $U_{\text{Н}} (+ / -)$.

По результатам выполненных измерений построить графики зависимости холловской разности потенциалов $U_{\text{Н}}$ от тока. Убедиться в линейном характере зависимости холловской разности потенциалов $U_{\text{Н}}$ от силы тока $I_{\text{обр}}$ для разных значений индукции B магнитного поля.

Таблица

Зависимость холловской разности потенциалов от силы тока через исследуемый образец

№	$I_{\text{обр}}$, мА	$I_{\text{ЭМ}} = 0,2 \text{ А}$ $U_{\text{ЭМ}} \approx 12,0 \text{ В}$	$I_{\text{ЭМ}} = 0,3 \text{ А}$ $U_{\text{ЭМ}} \approx 18,0 \text{ В}$	$I_{\text{ЭМ}} = 0,2 \text{ А}$ $U_{\text{ЭМ}} \approx 12,0 \text{ В}$
		$U_{\text{Н1}}$, мВ	$U_{\text{Н2}}$, мВ	$U_{\text{Н3}}$, мВ
1	2,0			
2	5,0			
3	8,0			
4	10,0			
5	15,0			
6	18,0			

7	20,0			
8	24,0			
9	28,0			
10	30,0			

4. Вычислить постоянную Холла R_H по формуле

$$R_H = \frac{U_H b}{I B}, \text{ м}^3/\text{Кл},$$

где U_H измеряется в вольтах;

b – метрах (указана на установке);

I – амперах;

B – в теслах.

Определить среднее значение R_H . По измеренному значению постоянной Холла R_H определить концентрацию n носителей заряда в исследуемом образце полупроводника по формуле

$$n = \frac{3\pi}{8eR_H}.$$

Индукция B магнитного поля между полюсами электромагнита рассчитывается по формуле

$$B = k I_M,$$

где I_M – ток электромагнита в амперах;

k – постоянная электромагнита (указана на установке).

5. Оформить отчет.

Требования к оформлению отчета

1. Краткое описание задачи, поставленной в работе.
2. Схема измерительной установки.
3. Заполненная таблица измерений.
4. График зависимости $U_H(I)$.
5. Расчеты определяемых величин.

6. Анализ полученных результатов.
7. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Объяснить физическую сущность эффекта Холла.
2. Какими физическими величинами определяется ЭДС Холла?
3. Объяснить назначение контактов на полупроводниковом образце для холловских измерений.
4. Какими параметрами полупроводника определяется постоянная Холла?
5. Объяснить, используя схему, принцип действия измерительной установки.
6. Объяснить зависимость холловской разности потенциалов U_H от величины силы тока в исследуемом образце и индукции магнитного поля.
7. Какую физическую информацию об исследуемом образце можно получить при исследовании эффекта Холла?
8. Привести примеры применения эффекта Холла в технике, которые Вам известны.

Учебное издание

**ИЗУЧЕНИЕ ЭФФЕКТА ХОЛЛА
В ПОЛУПРОВОДНИКАХ**

Методические указания
к выполнению лабораторной работы

Составители :

ХОРУНЖИЙ Игорь Анатольевич
ФЕДОТЕНКО Анатолий Владимирович

Редактор *Т. В. Грищенкова*
Компьютерная верстка *А. Г. Занкевич*

Подписано в печать 06.02.2013. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 1,10. Уч.-изд. л. 0,86. Тираж 100. Заказ 1179.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет. ЛИ № 02330/0494349 от 16.03.2009. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.