

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
Национальный исследовательский университет**

ЭФФЕКТ ХОЛЛА

Практикум

Рекомендовано методической комиссией радиофизического факультета
для студентов ННГУ, обучающихся по направлениям подготовки
03.03.03 «Радиофизика»,
10.05.02 «Информационная безопасность телекоммуникационных систем»,
02.03.02 «Фундаментальная информатика и информационные технологии»,
11.05.02 «Специальные радиоэлектронные системы»

Нижний Новгород,
2015

УДК 537.633.2
ББК 22.379
П11

П11 ЭФФЕКТ ХОЛЛА: Практикум. Авторы: Павельев В.Г., Оболенский С.В., Волкова Е.В., Савинов Д.А., Тарасова Е.А., Чурин А.Ю. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2015. – 14 с.

Рецензент: кандидат физико-математических наук **А.С. Пузанов**

Предлагаемое описание содержит краткое изложение вопросов движения носителей заряда в скрещенных электрических и магнитных полях. Рассмотрена теория эффекта Холла в полупроводниковых структурах и указана информация, которую можно извлечь из результатов измерений. Приведена методика наблюдения эффекта Холла. Описание предназначено для студентов дневного и вечернего отделений, изучающих курсы «Физика полупроводников и полупроводниковых приборов», «Твердотельная электроника».

Ответственный за выпуск:
зам. председателя методической комиссии радиофизического факультета
ННГУ,
д.ф.-м.н., профессор **Е.З. Грибова**

УДК 537.633.2
ББК 22.379

© Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского, 2015

ВВЕДЕНИЕ

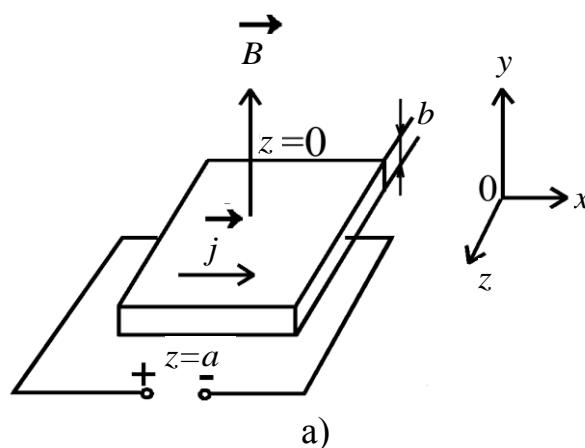
Концентрация носителей заряда и их подвижность в полупроводниках являются важными физическими величинами, определяющими многие свойства полупроводниковых материалов, таких как электропроводность, теплопроводность, термо-ЭДС и др.

Эффект Холла позволяет экспериментально определить тип носителей заряда, их концентрацию и подвижность в заданном полупроводниковом образце. Этот эффект широко используется на практике как для определения трех указанных характеристик материала, так и в различных датчиках, которые могут быть использованы для измерения силы тока и мощности в цепях постоянного и переменного токов вплоть до очень высоких частот, для измерения напряженностей постоянных и переменных магнитных полей, преобразования сигналов, анализа спектров и т.д.

1. ЭЛЕМЕНТАРНАЯ ТЕОРИЯ ЭФФЕКТА ХОЛЛА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Эффект Холла представляет собой *поперечный гальваномагнитный эффект*, суть которого заключается в следующем: если поместить полупроводниковую пластину во внешнее магнитное поле \vec{B} (рис. 1) и пропустить вдоль нее ток, создав скрещенное с магнитным электрическое поле, то вследствие смещения движущихся зарядов к одной из граней пластины возникает поперечная разность потенциалов, называемая *ЭДС Холла*.

Рис. 1. Схема эксперимента по наблюдению эффекта Холла



Обратите внимание, что при этом *носители различных знаков смещаются к одной и той же боковой грани полупроводника* (см. рис. 2 а, 2 б), поэтому с изменением типа электропроводности материала меняется и знак возникающей ЭДС.

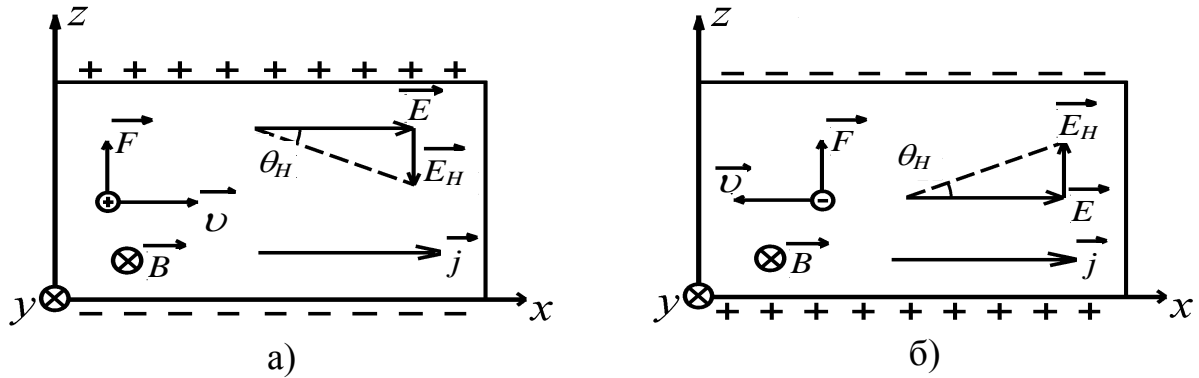


Рис. 2. Смещение основных носителей заряда в дырочном (а) и электронном (б) полупроводниках, соответственно. В обоих случаях показан холловский угол θ_H , который образует с осью x вектор напряженности суммарного электрического поля

Рассмотрим эффект Холла более подробно. На рис. 1 показан полупроводниковый образец, две грани которого подключены через омические (т.е. невыпрямляющие) контакты к внешней батарее. Выберем ось x в направлении плотности тока \vec{j} . Магнитное поле \vec{B} при том пусть будет приложено в направлении оси Oy . Рассмотрим для примера свободный электрон, двигающийся в отрицательном направлении оси Ox со средней скоростью \vec{v} . На движущийся в магнитном поле электрон действует, как известно, сила Лоренца:

$$\vec{F} = -e \left[\vec{v}, \vec{B} \right], \quad (1)$$

где e – абсолютная величина заряда электрона. В результате действия этой силы траектория электрона будет искривляться в направлении оси z , и, поскольку в этом направлении ток протекать не может, электроны будут накапливаться на боковой поверхности ($z=a$, см. рис. 1.) до тех пор, пока не установится электрическое поле Холла \vec{E}_H , достаточное для создания силы, равной силе Лоренца по величине, но противоположной по направлению. Приравнявая эти силы, получим:

$$\vec{E}_H = \left[\vec{v}, \vec{B} \right]. \quad (2)$$

Воспользуемся законом Ома в дифференциальной форме:

$$\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E}, \quad (3)$$

где $\sigma = e \cdot n \cdot \mu_n$ – удельная электропроводность образца, n – концентрация носителей заряда (в данном случае – электронов), $\mu_n = \frac{\langle v \rangle}{E}$ – так называемая *подвижность* электронов, т.е. величина, численно равная средней дрейфовой скорости их направленного движения в электрическом поле с напряженностью, равной единице. Соотношение (3) перепишем в следующем виде:

$$\vec{j} = e \cdot n \cdot \mu_n \cdot \vec{E} = -e \cdot n \cdot \vec{v}. \quad (3a)$$

Исключая v из соотношения (2), получим:

$$\vec{E}_H = -\frac{1}{en} \cdot \left[\vec{j}, \vec{B} \right] = R \cdot \left[\vec{j}, \vec{B} \right]. \quad (4)$$

Учитывая, что полный ток через образец $I = jab$, а поперечная ЭДС $U_H = E_H a$, получим соотношение, связывающее ЭДС Холла с величиной электрического тока в образце:

$$U_H = R \cdot \frac{I \cdot B}{b}. \quad (5)$$

Величина R называется *постоянной Холла* и для полупроводника n-типа определяется как

$$R = -\frac{1}{e \cdot n}. \quad (6)$$

Поперечную ЭДС U_H , ток I , напряженность магнитного поля B (для немагнитных образцов) и толщину образца b можно измерить. Это позволяет найти численное значение постоянной Холла в заданном полупроводнике.

В действительности, произведенный элементарный вывод коэффициента Холла (6) неточен: в нем не учтена разница 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. Приведенное выражение (6) оказывается справедливой только для металлов и вырожденных полупроводников (вырожденным называется полупроводник, электронно-дырочный газ в котором не описывается с помощью классической статистики, что наблюдается в случае очень высокой, $\geq 10^{19} \text{ см}^{-3}$, концентрации примеси). Более строгий анализ дает для невырожденных полупроводников значение R , которое отличается от выражения (6) множителем A , который имеет порядок единицы. Например, если учитывать рассеяние носителей только на кристаллической решетке (так называемое, взаимодействие с фононами), то $A = \frac{3\pi}{8}$. В общем виде постоянная

Холла может быть записана как:

$$R = -\frac{A}{n \cdot e} \quad (\text{для полупроводника } n\text{-типа}), \quad (7a)$$

$$R = \frac{A}{p \cdot e} \quad (\text{для полупроводника } p\text{-типа}), \quad (7b)$$

где множитель A может принимать значения от 1 до 1.7. Различные знаки в формулах (7a, 7b) демонстрируют, что ЭДС Холла для электронного и дырочного полупроводников имеют противоположные полярности.

Знание электропроводности и постоянной Холла позволяет найти как концентрацию носителей, так и их подвижность.

Обозначим через холловский угол θ_H малый угол, который образует с осью x вектор напряженности суммарного электрического поля (см. рис. 2):

$$\theta_H \cong \operatorname{tg} \theta_H = \frac{E_H}{E} \quad (8)$$

Из (8.) с учетом (3) и (5) получим:

$$\theta_H = \mu_{nH} \cdot B \quad (9)$$

где θ_H - холловский угол в полупроводнике n -типа, а μ_{nH} - так называемая, *холловская подвижность* электронов (индекс H указывает на метод определения подвижности). Численное значение холловской подвижности может расходиться с величиной подвижности, определенной другими методами, например, прямым способом, основанным на измерении времени распространения носителей заряда по полупроводнику на определенное расстояние в известном ускоряющем поле. Определенная таким образом подвижность называется дрейфовой. Ее можно определить из выражения (4), если преобразовать его к виду:

$$\vec{E}_H = -\frac{A}{en} \cdot \left[\vec{j}, \vec{B} \right] = -A \cdot \mu_{nd} \cdot \left[\vec{E}, \vec{B} \right], \quad (10)$$

где индекс d при μ_{nd} указывает, что это дрейфовая подвижность электронов.

Сравнивая холловскую и дрейфовую подвижности, получим, что для электронов $\mu_{nH} = A \cdot \mu_{nd}$, а для дырок $\mu_{pH} = A \cdot \mu_{pd}$. Используя выражения (7а, 7б), получим:

$$\mu_{(n,p)H} = R \cdot \sigma. \quad (11)$$

Приведенные выше выражения относились к полупроводникам, у которых концентрация неосновных носителей пренебрежимо мала по сравнению с концентрацией основных (т.е. к материалам с униполярной проводимостью). Расчет постоянной Холла для полупроводника со смешанной проводимостью приводит к формуле:

$$R = \frac{A}{e} \cdot \frac{n \cdot \mu_{nd}^2 - p \cdot \mu_{pd}^2}{\left(n \cdot \mu_{nd} + p \cdot \mu_{pd} \right)^2}. \quad (12)$$

Для собственного полупроводника ($n=p=n_i$) получим:

$$R = \frac{A}{e} \cdot \frac{\mu_{nd} - \mu_{pd}}{\mu_{nd} + \mu_{pd}} \cdot \frac{1}{n_i}. \quad (13)$$

У собственных полупроводников постоянная Холла обычно отрицательна, т.к. подвижность электронов чаще всего больше подвижности дырок (в силу большей эффективной массы последних). Например, для Si $\mu_n \cong 1200 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, $\mu_p \cong 500 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, хотя встречаются и исключения (бор, черный фосфор). На рис. 3 показаны зависимости подвижности электронов и

дырок от концентрации примесей в наиболее распространенных полупроводниках.

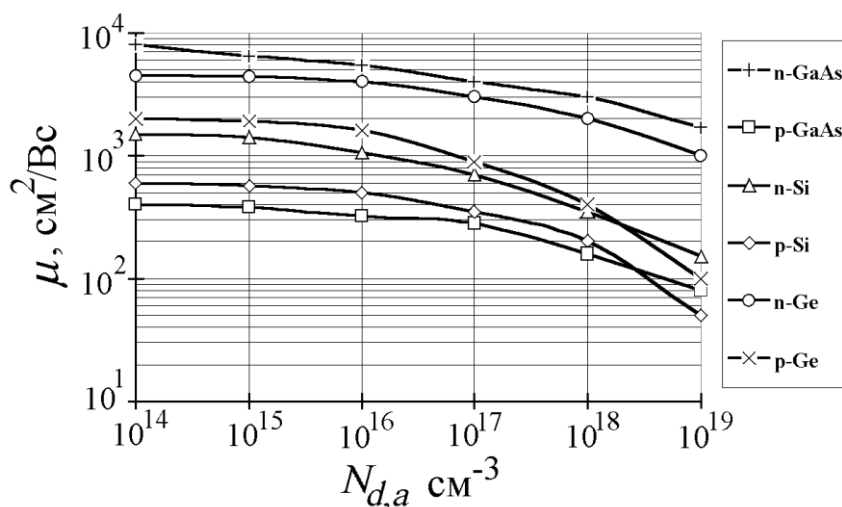


Рис. 3. Зависимость дрейфовой подвижности электронов и дырок в Si и Ge и холловской подвижности в GaAs от концентрации атомов легирующей примеси ($T = 300$ К)

2. ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

2.1. Оборудование

Состав лабораторной установки для исследования эффекта Холла изображен на рисунке 4. Как пользоваться стандартными приборами из приведенного набора, можно прочитать на сайте кафедры электроники www.rf.unn.ru/eleder в разделе «Студентам → Лабораторные работы → Инструкции», подробное описание имеется у зав. лабораторией.

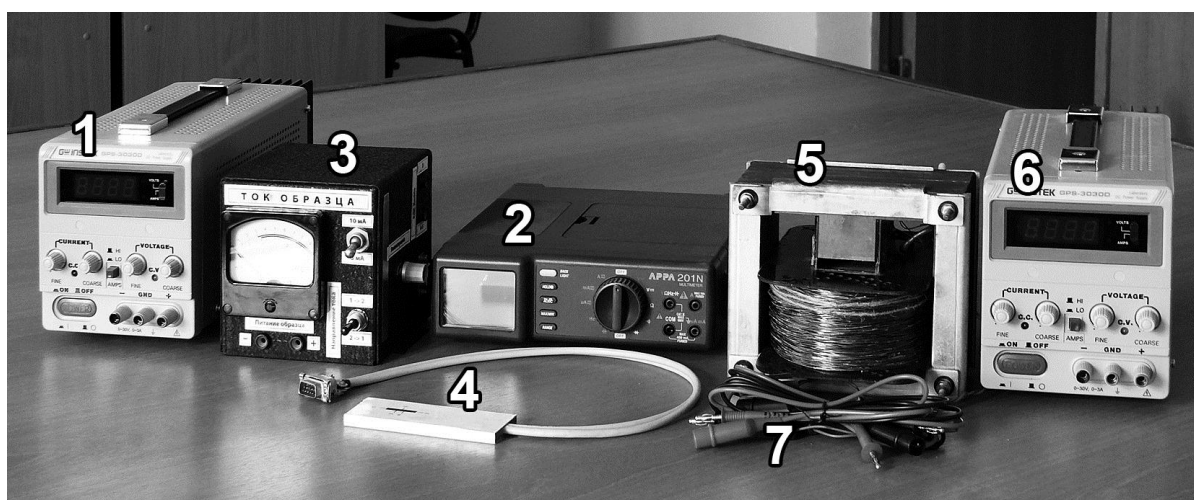


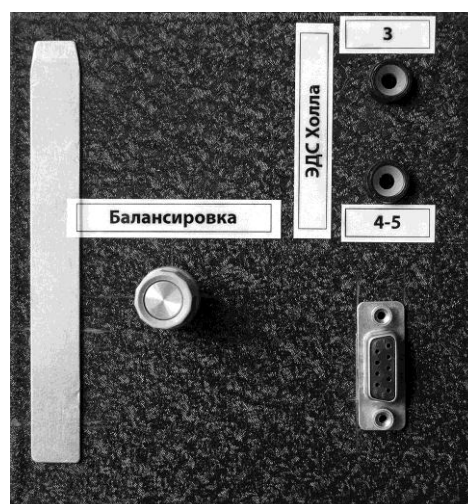
Рис. 4. Оборудование для исследования эффекта Холла: 1 – источник питания образца, 2 – милливольтметр, 3 – согласующий модуль, 4 – исследуемый образец, 5 – электромагнит, 6 – источник питания электромагнита, 7 – соединительные провода

Установка включает в себя следующие элементы:

- *Источник питания образца.* Для питания образца используется источник питания GPS-3030D, включённый в режиме стабилизации напряжения.
- *Милливольтметр.* Для измерения ЭДС Холла и балансировки схемы применён мультиметр APPA201N, работающий в режиме измерения постоянного напряжения на пределе 200 мВ.
- *Согласующий модуль.* Согласующий модуль обеспечивает соединение исследуемого образца, измерительных и питающих приборов в единую схему, позволяет осуществить балансировку измерительной схемы, а также служит для ограничения и стабилизации тока, протекающего через образец. На лицевой панели согласующего модуля (рис. 5 а) расположены: миллиамперметр, измеряющий ток образца, клеммы для подсоединения источника питания образца, переключатель пределов измерения миллиамперметра, переключатель направления тока образца. На правую боковую панель модуля (рис. 5 б) вынесены: ручка регулятора балансировки схемы, клеммы для подключения милливольтметра, измеряющего ЭДС Холла, и разъём для подсоединения образца.



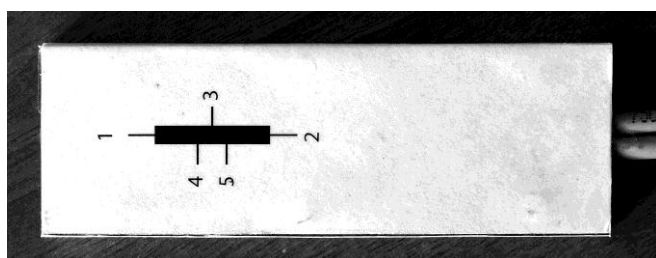
а)



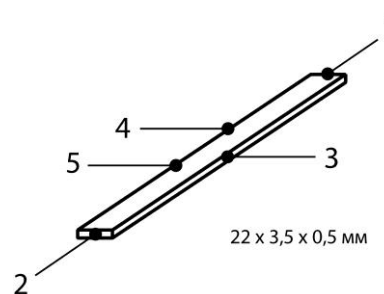
б)

Рис. 5. Лицевая панель согласующего модуля

- *Исследуемый образец.* Представляет собой полупроводниковую пластину длиной 22 мм, шириной 3,5 мм, толщиной 0,5 мм (рис. 6 а, б).



а



б

Рис. 6. Схематическое изображение исследуемого образца

Образец помещен в бокс, изготовленный из диамагнитных материалов и обеспечивающий её экранировку, размещение в центре электромагнита и защиту от механических повреждений.

- *Электромагнит.* Создаёт постоянное магнитное поле. Конструктивно выполнен в виде катушки с обмоткой из медного провода, размещённой на Ш-образном ферромагнитном сердечнике. В центральном стержне сердечника выполнен зазор высотой 12 мм для размещения в нём образца. Максимальная напряжённость магнитного поля около 0,25 Тл. Величина магнитного поля зависит от тока, проходящего через обмотку. Расчётный коэффициент написан на электромагните.

- *Источник питания электромагнита.* Для питания электромагнита используется источник питания GPS-3030D, включённый в режиме стабилизации тока.

2.2. Схема лабораторной установки

Принципиальная схема лабораторной установки изображена на рис. 7.

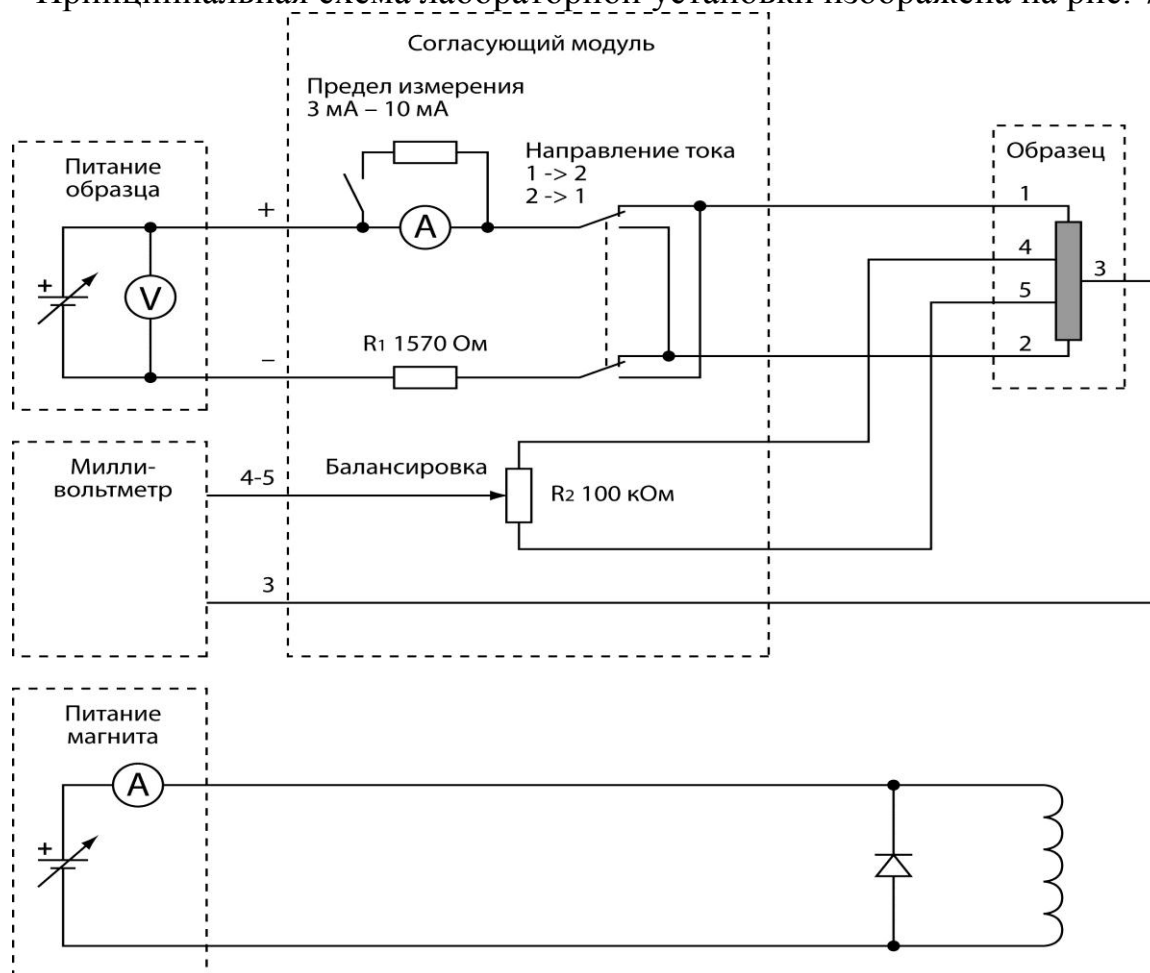


Рис. 7. Принципиальная схема лабораторной установки для исследования эффекта Холла

Напряжение с источника питания GPS-3030D, работающего в режиме стабилизации напряжения, подаётся на образец через ограничительный резистор R_1 . Измерение тока образца производится стрелочным миллиамперметром, находящимся на передней панели согласующего модуля. Переключение пределов

измерения миллиамперметра (10 мА – 3 мА) позволяет увеличить точность измерения тока образца. Сопротивление миллиамперметра при работе на пределе «3 мА» – 171 Ом, на пределе «10 мА» – 51 Ом. Для изменения направления тока через образец служит переключатель «Направление тока», имеющий среднее положение, в котором образец отключён от источника питания.

Для измерения ЭДС Холла используется мультиметр в режиме измерения постоянного напряжения на пределе 200 мВ. Один из выводов мультиметра подсоединяется к контакту 3 образца, другой – к резистору R_2 «Балансировка». Необходимость последней объясняется тем, что при подсоединении измерительных контактов к образцу их невозможно расположить абсолютно точно друг напротив друга. В результате между этими выводами появится обусловленная током образца паразитная разность потенциалов, которая будет давать систематическую ошибку измерения ЭДС Холла. Чтобы её уменьшить, с одной из сторон делаются два контакта (4 и 5), к которым подсоединяются крайние выводы переменного резистора R_2 . Изменяя положение движка резистора R_2 , можно найти точку с потенциалом, равным потенциалу контакта 3. При этом показания мультиметра в идеале должны быть равны нулю, а в эксперименте – минимальны.

Для создания магнитного поля используется электромагнит, ток через который обеспечивается источником питания GPS-3030D, работающим в режиме стабилизации тока. Диод, включённый во встречном направлении параллельно обмотке электромагнита, предназначен для уменьшения ЭДС самоиндукции, которая, напомним, возникает при резких скачках тока электромагнита (например, при разрыве цепи или выключении источника питания).

2.3 Техника безопасности

1. В цепи питания электромагнита **возможно возникновение мощных импульсов напряжения до нескольких сотен вольт**. Это связано с большой индуктивностью катушки электромагнита и может произойти при резких изменениях тока, протекающего через электромагнит. **Эти напряжения опасны для человека и могут привести к выходу из строя лабораторной установки.** Для предотвращения опасной ситуации:

- ни при каких обстоятельствах **не отсоединяйте, не подсоединяйте и не поправляйте провода, подводящие питание к электромагниту**, если источник питания включён;
- перед выключением и включением источника питания электромагнита **выведите на ноль регуляторы тока**.

2. Сборку, разборку и любые изменения в схеме следует производить только при выключенном питании.

3. После сборки схемы перед её включением следует пригласить заведующего лабораторией. Он проверит правильность сборки и проведёт инструктаж по технике безопасности на рабочем месте.

4. ЗАДАНИЯ

1. Соберите схему (рис. 7).
2. Проведите измерение вольтамперной характеристики образца в диапазоне токов 0–10 мА.
3. Установите ток образца 4–5 мА, регулировкой «Балансировка» добейтесь минимального значения паразитного напряжения между измерительными контактами образца. Его величина должна быть не более 200 мкВ. Измерьте зависимость паразитного напряжения от тока образца. В дальнейшем нужно будет устанавливать значения тока образца, которые были выбраны при выполнении этого задания.
4. Определите тип основных носителей в образце.
5. Измерьте зависимость ЭДС Холла от магнитного поля при токе образца 1–1,3 мА, 2–2,5 мА, 3,5–4,5 мА и 7–8 мА.
6. Измерьте зависимость ЭДС Холла от тока образца при магнитном поле 200–250 Гс, 350–400 Гс, 600–700 Гс, 900–1000 Гс.
7. Постройте графики зависимостей, измеренных в заданиях 2, 5, 6. Вычислите ЭДС Холла с учетом паразитного напряжения, измеренного в задании 3.
8. Вычислите для любых 10 точек постоянную Холла R , концентрацию основных носителей и их подвижность μ .

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Объясните характер движения носителей заряда при наличии скрещенных электрического и магнитного полей.
2. Объясните появление и знак ЭДС Холла в зависимости от типа носителей заряда в полупроводниках.
3. Может ли постоянная Холла быть равна нулю?
4. Какую физическую информацию можно получить при исследовании эффекта Холла?
5. Какие физические свойства полупроводников влияют на значение ЭДС Холла?
6. Объясните, почему повышение температуры примесного дырочного полупроводника сопровождается изменением знака ЭДС Холла?
7. Как измерить индукцию магнитного поля с помощью эффекта Холла?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оболенский С.В., Демарина Н.В., Волкова Е.В. Основы физики полупроводников. Транспорт носителей заряда в электрических полях: учебное пособие. – Н. Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета им. Н.И. Лобачевского, 2007. – 67 с.
2. Зи С.М. Физика полупроводниковых приборов. – М.: Сов. Радио, 1984. – 567 с.
3. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников. М.: Наука, 1977. – 672 с.
4. Орешкин П.Т. Физика полупроводников и диэлектриков. – М.: Высшая школа, 1977. – 448 с.
5. Кучис Е.В. Методы исследования эффекта Холла. – М.: Сов. Радио, 1974. – 328 с.

Свойства Ge, Si и GaAs (при 300 К)

Свойства	Ge	Si	GaAs
Концентрация атомов решетки, см^{-3}	$4.42 \cdot 10^{22}$	$5.0 \cdot 10^{22}$	$2.21 \cdot 10^{22}$
Атомный вес	72.6	28.08	144.63
Поле пробоя, В/см	$\sim 10^5$	$\sim 3 \cdot 10^5$	$\sim 4 \cdot 10^5$
Кристаллическая структура	алмаза	алмаза	цинковой обманки
Плотность, $\text{г} \cdot \text{см}^{-3}$	5.3267	2.328	5.32
Диэлектрическая проницаемость	16	11.8	10.9
Эффективная плотность состояний в зоне проводимости N_c , см^{-3}	$1.04 \cdot 10^{19}$	$2.8 \cdot 10^{19}$	$1.7 \cdot 10^{17}$
Эффективная плотность состояний в валентной зоне N_v , см^{-3}	$6.1 \cdot 10^{18}$	$1.02 \cdot 10^{19}$	$7.0 \cdot 10^{18}$
Эффективные массы m^* / m_0 электронов дырок	$m_l^* = 1.600$ $m_t^* = 0.082$ $m_{lh}^* = 0.04$ $m_{hh}^* = 0.30$	$m_l^* = 0.97$ $m_t^* = 0.19$ $m_{lh}^* = 0.16$ $m_{hh}^* = 0.5$	0.068 0.12 ; 0.5
Ширина запрещенной зоны при 300 К, эВ	0.803	1.12	1.43
Собственная концентрация (теория), см^{-3}	$2.5 \cdot 10^{13}$	$1.6 \cdot 10^{10}$	$1.1 \cdot 10^7$
Постоянная решетки, А	5.65748	5.43086	5.6534
Температурный коэффициент линейного расширения $\Delta L / L \Delta T$, $^{\circ}\text{C}^{-1}$	$5.8 \cdot 10^{-6}$	$2.6 \cdot 10^{-6}$	$5.9 \cdot 10^{-6}$
Точка плавления, $^{\circ}\text{C}$	937	1420	1238
Время жизни неосновных носителей, с	10^{-3}	$2.5 \cdot 10^{-3}$	10^{-8}
Подвижность дрейфовая, $\text{см}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$ подвижность электронов μ_n подвижность дырок μ_p	3900 1900	1500 600	8500 400
Энергия оптических фононов, эВ	0.037	0.063	0.035
Удельная теплота, Дж/(кг·К)	0.31	0.7	0.35
Теплопроводность, Вт/(см·К)	0.64	1.45	0.46
Коэффициент тепловой диффузии, $\text{см}^2 / \text{с}$	0.36	0.9	0.44
Работа выхода, эВ	4.4	4.8	4.7

Авторы:
Владимир Геннадьевич **Павельев**
Сергей Владимирович **Оболенский**
Екатерина Валерьевна **Волкова** и др.

ЭФФЕКТ ХОЛЛА

Практикум

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского».
603950, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23.