

АЛЕКСЕЕВА
Лариса Ивановна

Эффект Холла в полупроводниках

Методические рекомендации.

Министерство образования Российской Федерации
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования

**Эффект Холла
в полупроводниках**
Методические рекомендации.

Иркутск 2002

Печатается по решению
научно-методического совета
Иркутского государственного университета

Дана краткая теория эффекта Холла. Описана установка и метод определения концентрации носителей заряда в полупроводниках.

Предназначена для студентов 1 и 2 курсов
естественных факультетов

Библиогр.3 назв. Ил.3.

Составитель: к.ф.-м.н., доц. Л.И.Алексеева

Рецензент: д.ф.-м.н., проф. Л.А.Щербаченко.

2

$$n = \frac{3p}{8e} \frac{J_g B}{Ua} = 7,4 \cdot 10^{18} \frac{J_g B}{aU} \quad (8)$$

Все величины подставляйте в формулу (8) в единицах системы Си. Для данного датчика $a=0,4\text{мм}=4 \cdot 10^{-4}\text{м}$.

9. Подсчитайте среднее значение n и оцените среднеквадратичную погрешность результатов измерений.

Контрольные вопросы

1. Расскажите о собственной и примесной проводимости полупроводников.
2. Расскажите о движении заряженных частиц в электрическом и магнитном полях. По какой траектории движется заряженная частица в скрещенных электрическом и магнитном полях?
3. Зачем нужен сердечник в электромагнитах? Из какого материала он изготавливается?
4. В чем заключается явление Холла? В каких единицах измеряется постоянная Холла?

Литература

1. Трофимова Т.И. Курс физики: Учебное пособие для вузов. — М.: Высш.шк. 1994. — 542 с.
2. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. — М.: Наука. Гл. ред. Физ-мат. Лит., 1979. — 944 с.
3. Элементарный учебник физики. Учебное пособие в 3-х т. / Под ред. Г.С.Ландсберга т.2. «ШРАЙК» 1995 г.

Может оказаться, что вольтметр покажет возникновение небольшой разности потенциалов благодаря остаточному магнитному полю в сердечнике электромагнита.

3. Схема I. Включите источник питания BC-26. С помощью ручек «Пределы выходного напряжения», «грубо» и «плавно», а также регулируя сопротивление R_1 , установите на амперметре A_1 ток $J_{эм}=0,25A$, затем 0,5 и 1,0 A.

Убедитесь, что показания вольтметра резко возросли и увеличиваются при увеличении тока $J_{эм}$.

4. Вновь установите ток $J_g=1 mA$. При трех значениях тока $J_{эм}=0,25A$, затем 0,5 и 1,0A возьмите отсчет по вольтметру и показания всех приборов запишите в таблицу.

Таблица.

N n/n	J_g, mA	$J_{эм}, A$	U, B	B, T	n, m^{-3}
1		0.25			
2	1,0	0.50			
3		1.00			

5. Проведите весь цикл аналогичных измерений для значений тока в датчике $J_g=2,0 mA$ и $2,4 mA$, задавая значения тока $J_{эм} 0,25A$, $0,50A$ и $1.0 A$, возьмите отсчет U по вольтметру, внесите в таблицу.

Таким образом, должно получиться 9 значений U – холловской разности потенциалов.

6. На приборе BC-26 ручками «Плавно» и «Грубо» уменьшите ток в электромагните до нуля. Выключите «сеть».

7. По прилагаемому к работе графику зависимости индукции магнитного поля от величины тока в электромагните $B=f(J_{эм})$ найдите величину B для каждого из значений тока $J_{эм}$ и внесите в таблицу.

8. Для каждого из девяти опытов рассчитайте концентрацию носителей заряда по формуле

10

Эффект Холла в полупроводниках

Цель работы:

1. Изучить процессы движения зарядов в полупроводниках в скрещенных электрическом и магнитном полях.

2. Измерить с помощью эффекта Холла концентрацию носителей заряда в полупроводниках.

Приборы и принадлежности:

Источник постоянного тока BC-26; аккумуляторная батарея на 3В; датчик Холла (5); электромагнит: катушка (6) с сердечником (7); реостат R_1 ; реостат R_2 ; амперметр A_1 на 1,5А; mA на 3 mA; цифровой mV B7-38.

Краткая теория

Наиболее широко распространенными полупроводниковыми элементами являются кремний и германий, имеющие решетку типа алмаза, в которой каждый атом связан ковалентными связями с четырьмя ближайшими соседями. Упрощенная плоская схема расположения атомов в кристалле Ge дана на рис.1а, где каждая черточка обозначает связь, осуществляемую одним электроном. Валентность Ge и Si обеспечивается четырьмя внешними электронами.

В идеальном кристалле при 0 К такая структура представляет собой диэлектрик, так как все электроны участвуют в образовании связей и не участвуют в проводимости. При повышении температуры (или под действием других внешних факторов) тепловые колебания решетки могут привести к разрыву некоторых валентных

связей, в результате чего часть электронов отщепляется и они становятся свободными. В покинутом электроном месте возникает дырка, заполнить которую могут электроны из соседней пары.

Дырки и электроны могут двигаться по кристаллу хаотически в отсутствие электрического поля. Число электронов и дырок одинаковое.

Если же к кристаллу приложить электрическое поле, то электроны начнут двигаться против поля, дырки — по полю, что приведет к возникновению собственной проводимости германия, обусловленной в равной мере, как электронами, так и дырками.

Рис.1а

Рис.1 б

Рис. 1 в

Примесная проводимость полупроводников возникает в том случае, если в кристаллы Si или Ge вводятся атомы с валентностью, отличающейся на единицу от валентности основных атомов. Например, при замещении атома Ge пятивалентным атомом мышьяка (рис. 1б), один электрон не может образовать ковалентной связи, но легко может стать свободным. При этом дырка не образуется.

В таких полупроводниках возникает избыточная электронная примесная проводимость n-типа, а примеси называются донорами.

Если в решетку Si и Ge введен атом с тремя валентными электронами, например, В или In (рис.1 в.), одна из связей примесного атома остается неупакованной и

изображенное на рис.3 пунктирными силовыми линиями. Величина индукции магнитного поля определяется по графику $B = f(J_{эм})$, который имеет вид кривой с насыщением и фактически представляет собой начальный участок петли Гистерезиса.

На другой стороне железного сердечника вырезан узкий зазор, в который помещен пластмассовый держатель с пластинкой исследуемого полупроводника весьма малых размеров: ширина $a=0,4$ мм.

Датчик Холла имеет четыре вывода: 1-2 и 3-4 (рис.2)

Схема II. Выводы датчика 3-4 обеспечивают протекание по полупроводнику от аккумуляторной батареи Б на 3В постоянного тока J_g , величина которого регулируется реостатом R_2 и измеряется mA .

Схема III. Выводы 1-2 являются зондами на датчике Холла (рис.2). С помощью чувствительного цифрового вольтметра измеряется разность потенциалов, возникающая на гранях полупроводниковой пластинки.

Порядок выполнения работы

1. Схема III. Щупы 1-2 от датчика Холла подсоедините к цифровому вольтметру. Переключатель вольтметра поставьте в положение для измерения постоянного напряжения. Точка слева на экране означает величину напряжения 0.0..... В.

2. Схема II. Соедините последовательно батарею аккумуляторов Б, миллиамперметр на 3 mA , реостат R_2 и датчик Холла (красный провод к плюсу батареи). Изменяя сопротивление R_2 , установите на mA ток $J_g=1 mA$, затем 2 mA и 2,4 mA .

Убедитесь, что напряжение на цифровом вольтметре отсутствует, т.е. отсутствует U — холловская разность потенциалов, т.к. электромагнит в схеме I не включен.

- 3) измерять индукцию постоянного магнитного поля с помощью датчика Холла, для которого концентрация носителей тока известна.

Описание установки

Рис.3

Экспериментальная установка, представленная на рис.3, состоит из трех независимых участков электрической цепи.

Схема I предназначена для питания катушки электромагнита постоянным током от стабилизирующего выпрямителя ВС-26.

Величина тока $J_{эм}$ измеряется амперметром A_1 и регулируется ручками «грубо» и «плавно» на панели прибора, а также реостатом R_1 .

Ток $J_{эм}$, протекая по многослойной катушке электромагнита, надетой на одну из сторон квадратного сердечника, создает в нем постоянное магнитное поле,

8

четвертый электрон может быть захвачен от соседнего атома основного вещества, где, соответственно, образуется дырка. Последовательное заполнение образующихся дырок электронами эквивалентно движению дырок в противоположном направлении, т.е. дырки не остаются локализованными, а перемещаются в решетке кристалла как свободные положительные заряды.

В таких полупроводниках возникает избыточная дырочная примесная проводимость р-типа, примеси называются акцепторами.

При наложении внешнего электрического поля возникает направленное движение электронов в полупроводнике n-типа и движение дырок в полупроводнике р-типа. т.е. электрический ток.

Количественной мерой электрического тока являются сила тока J (скалярная физическая величина, определяемая электрическим зарядом, проходящим через поперечное сечение проводника в единицу времени), а также \vec{j} – вектор плотности тока:

$$J = \frac{dQ}{dt} \quad \text{и} \quad \vec{j} = \frac{J}{S} \quad (1)$$

Если концентрацию носителей тока обозначить n , элементарный заряд e , то за время dt через поперечное сечение S переносится заряд

$$dQ = nev = nelS = neVSdt \quad (2)$$

Здесь v — объем проводника, \vec{V} — скорость направленного движения зарядов, тогда

$$J = neVS; \quad \vec{j} = ne\vec{V}; \quad \vec{V} = \frac{J}{neS} \quad (3)$$

Если пластинку проводника (или полупроводника) поместить в однородное магнитное поле ($\dot{B} = \text{Const}$) так, чтобы вектора \dot{V} и \dot{B} оказались взаимно перпендикулярными, то и сила Лоренца, действующая на заряд, движущийся в магнитном поле; тоже окажется к ним перпендикулярной в соответствии с формулами:

$$\mathbf{F}_\Lambda = e[\dot{V} \dot{B}]; \quad F_\Lambda = eVB \sin\left(\frac{\mathbf{r} \wedge \mathbf{r}}{VB}\right); \quad F_\Lambda = eVB. \quad (4)$$

На рис. 2 показано взаимное расположение векторов \dot{j} , \dot{V} , \dot{B} и \dot{F}_Λ для полупроводника n-типа.

Рис.2

В данном случае на электроны действует сила Лоренца, направленная вверх. У верхнего края пластины возникает повышенная концентрация электронов (зарядится отрицательно), у нижнего края появится недостаток электронов (зарядится положительно).

В результате этого между краями пластины возникает дополнительное поперечное электрическое поле, действие которого уравнивает силу Лоренца. Устанавливается стационарное распределение зарядов в поперечном направлении. Тогда

$$F_k = F_\Lambda; \quad eE = \frac{\Delta j}{d} e = eVB$$

$$\text{или } \Delta j = UBd \quad (5)$$

Δj — холловская разность потенциалов, которую можно измерить с помощью зондов 1 и 2 (рис.2.).

Учитывая формулу (3), где $S = a \cdot d$ — площадь поперечного сечения пластинки полупроводника, получим

$$U = \Delta j = \frac{J}{enS} Bd = \frac{1}{en} \frac{JB}{a} = R \frac{JB}{a}, \quad (6)$$

здесь $R = \frac{1}{en}$ — постоянная Холла, зависящая от вещества; U, B, J — измеряются экспериментально.

При выводе формулы (6) предполагалось, что электроны в полупроводнике движутся с одинаковыми скоростями. Что вообще говоря, является грубым приближением. Более точный учет распределения электронов по скоростям требует введения некоторого коэффициента в формулу для постоянной Холла и поэтому правильнее будет в нашей работе использовать следующее выражение

$$R = \frac{3p}{8} \cdot \frac{1}{ne} \quad (7)$$

При изменении типа носителей заряда в полупроводниках знаки зарядов, возникающих на гранях пластины и снимаемых зондами 1-2 (рис.2), изменяются на противоположные.

Эффект Холла был обнаружен на металлах в 1879 г. С помощью этого эффекта можно

- 1) определять концентрацию носителей тока в проводнике или полупроводнике;
- 2) судить о природе проводимости в полупроводниках;