

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ И ПОДВИЖНОСТИ НОСИТЕЛЕЙ ТОКА В ПОЛУПРОВОДНИКЕ

**Цель лабораторной работы:** изучение эффекта Холла в полупроводниках, определение коэффициента Холла, концентрации и подвижности носителей тока.

### Задание по лабораторной работе.

1. Получить задание.
2. Определить коэффициенты Холла, концентрации и подвижности носителей тока.
3. Проанализировать результаты лабораторной работы, сформулировать краткие выводы.

### Теоретическая часть

В технике датчики Холла широко используются для измерения магнитных полей. Датчики Холла часто применяют для бесконтактного измерения токов в отдельных участках цепи, а также для измерения тока в пучках заряженных частиц. Существуют возможности создания на основе эффекта Холла магнитометров и усилителей.

Эффектом Холла называется возникновение в образце с током плотностью  $J$ , помещенном в магнитное поле напряженностью  $B$ , электрического поля напряженностью  $E$  в направлении, перпендикулярном  $B$  и  $J$ .

В опытах по изучению этого явления в образцах различных веществ измеряемой величиной является разность потенциалов Холла, однозначно связанная с электрическим полем.

Свойства полупроводников в основном определяются концентрацией носителей тока. Наиболее точный метод определения концентрации носителей заряда основан на эффекте Холла.

Пусть по пластине с площадью сечения  $S$  протекает электрический ток  $J$  в направлении, указанном на рис. 2.17 (направление движения электронов обратное). Разность потенциалов при отсутствии магнитного поля между электродами  $a$  и  $c$ , лежащими на одном из эквипотенциальных сечений пластины, равна нулю. Если создать магнитное поле  $B$ , перпендикулярное направлению тока, то между боковыми гранями (электродами  $a$  и  $c$ ) возникает разность потенциалов Холла.

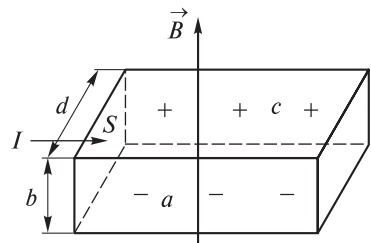


Рис. 2.17. Иллюстрация эффекта Холла

Экспериментально установлено, что разность потенциалов Холла  $U$  пропорциональна индукции магнитного поля  $B$ , силе тока  $I$  и обратно пропорциональна толщине пластины  $b$ :

$$U = R_x \frac{IB}{b}.$$

Множитель  $R_x$ , зависящий от вида вещества, называется коэффициентом Холла. Рассмотрим механизм появления разности потенциалов  $U$ . Как известно, на движущийся с дрейфовой скоростью  $V$  заряд  $e$  в магнитном поле действует сила Лоренца, перпендикулярная скорости движения и направлению поля:  $F = q_eVB$ .

Под действием силы Лоренца носители тока отклоняются к ближней грани пластины, заряжая ее отрицательно. На дальней грани при этом возникает равный по величине положительный заряд. Внутри пластины появляется поперечное электрическое поле  $\mathcal{E}$ , а между гранями — разность потенциалов  $U$ .

Отклонение носителей продолжается до тех пор, пока возбужденное ими поле  $\mathcal{E}$  не уравнивает отклоняющее действие магнитного поля, т. е.  $\mathcal{E}q_e = q_eVB$ .

Умножив обе части этого равенства на концентрацию носителей  $n$ , получим:  $\mathcal{E}q_en = q_eVBn = JB$ , где  $J$  — плотность тока в образце.

Учитывая, что

$$j = \frac{J}{S} = \frac{J}{bd},$$

а  $U = \mathcal{E}d$ , имеем

$$U = \frac{1}{nq_e} \frac{JB}{b} = R_x \frac{JB}{b}.$$

Коэффициент Холла

$$R_x = \frac{1}{nq_e}.$$

Это выражение справедливо для металлов или вырожденных полупроводников, у которых носители тока подчиняются распределению Ферми — Дирака.

Учет статистического распределения скоростей носителей тока в невырожденных полупроводниках приводит к появлению добавочного множителя  $A$ , называемого холл-фактором. Значение  $A$  зависит от механизма рассеяния носителей тока. При рассеянии на ионизированных примесных атомах  $A = 1,93$ , при рассеянии на тепловых колебаниях решетки  $A = 3\pi/8$ .

В используемом датчике Холла из арсенида индия

$$R_x = \frac{3\pi}{8nq_e}.$$

Зная  $R_x$ , можно найти концентрацию носителей:

$$n = \frac{3\pi}{8R_x q_e}.$$

Одновременное измерение  $R_x$  и электропроводности  $\sigma$  позволяет вычислить подвижность носителей  $u$ . Действительно, электропроводность

$$\sigma = q_e n u.$$

Исключив концентрацию носителей, после преобразований получим

$$u = \frac{8R_x \sigma}{3\pi}.$$

Кроме возможности определения концентрации носителей, эффект Холла позволяет определить знак носителей и тип проводимости. Для электронных полупроводников  $R_x < 0$ , для дырочных  $R_x > 0$ .

При выполнении работы, как правило, не удается расположить электроды  $a$  и  $c$  (см. рис. 2.17) на эквипотенциальном сечении образца. Вследствие этого имеется некоторая разность потенциалов  $U_0$  между электродами  $a$  и  $c$  при отсутствии магнитного поля  $B$ . Ее знак не зависит от направления  $B$ . Для исключения  $U_0$  проводят два измерения  $U$  при противоположных направлениях  $B$ . Для этого изменяют направление тока через электромагнит и берут среднее значение  $U$ :

$$U' = U + U_0 \text{ (прямое поле);}$$

$$-U'' = -U + U_0 \text{ (обратное поле).}$$

Вычитая из первого выражения второе, получаем, что холловская разность потенциалов

$$U = \frac{|U'| + |U''|}{2}.$$

Работа сводится к измерению значений  $U'$  и  $U''$  для различных токов, пропускаемых через электромагнит, и вычислению среднего значения  $U$ . По значению  $U$  находят коэффициент Холла:

$$R_x = \frac{U b}{J B}.$$

Концентрация носителей

$$n = \frac{3\pi}{8R_x q_e}.$$

По прилагаемым к конкретному лабораторному макету характеристикам датчика Холла (данные можно получить у преподавателя) находят электропроводность:

$$\sigma = \frac{l}{RS},$$

где  $l$ ,  $R$ ,  $S$  — соответственно длина, сопротивление и площадь поперечного сечения датчика.

Зная  $R_x$  и  $\sigma$ , по формуле

$$u = \frac{8R_x\sigma}{3\pi}$$

вычисляют подвижность носителей  $u$ .

Области приложения эффекта Холла в науке и технике достаточно разнообразны. В научной практике эффект Холла используют для определения концентрации и типа носителей, для оценки ширины запрещенной зоны, энергии ионизации носителей (по температурной зависимости  $R_x$  в полупроводниках). В комплексе с измерениями электропроводности эффект Холла позволяет вычислять ее температурную зависимость и подвижность носителей тока.

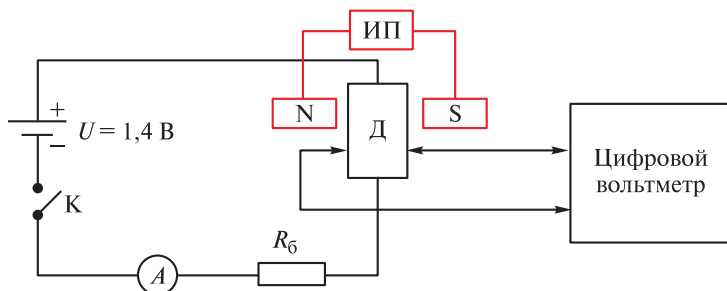
### Экспериментальная часть

Объектом исследования является полупроводниковый датчик Холла, установленный на магнитопроводе электромагнита.

Используемые приборы и оборудование:

- источник постоянного тока типа АТН-2031 или его аналог — 1 шт.;
- лабораторный макет — 1 шт.;
- цифровой вольтметр или мультиметр — 1 шт.;
- соединительные провода.

Для выполнения лабораторной работы используют стенд (рис. 2.18), состоящий из источника постоянного тока ИП, электромагнита NS, цифрового вольтметра, миллиамперметра и соединительных проводов.



**Рис. 2.18.** Схема стенда для определения концентрации и подвижности носителей тока в полупроводнике

Перед выполнением лабораторной работы необходимо собрать электрическую схему в соответствии с рис. 2.18.

После завершения сборки схемы преподаватель проверяет правильность подключения.

Категорически запрещается включать питание источника постоянного тока без разрешения преподавателя.

### **Внимание!**

**Перед включением питания источника постоянного тока  
обе ручки регулятора напряжения (грубо и точно)  
повернуть против хода часовой стрелки до упора.**

### **Порядок выполнения лабораторной работы**

1. Включить питание источника постоянного тока. Перед включением убедиться, что обе ручки регулятора напряжения повернуты против хода часовой стрелки до упора.

2. Установить напряжение на источнике питания, питающего датчик Холла, 1,4 В, при этом через датчик Холла начнет протекать постоянный ток, значение которого необходимо рассчитать по закону Ома, учитывая, что сопротивление датчика Холла 354 Ом.

3. Установить напряжение на источнике питания, питающего электромагнит, 1 В.

4. Замерить напряжение  $U'$  и записать его значение в журнал.

5. Далее выполнить серию экспериментов по определению  $U'$ , последовательно увеличивая напряжение, питающее электромагнит, с шагом 1 В до достижения последнего значения 10 В, записывая измеренные значения.

6. Поменять на блоке питания полярность подключения электромагнита путем перестановки проводов.

7. Замерить напряжение  $U''$  при напряжении, питающем электромагнит, равном 10 В, записать измеренное значение.

8. Выполнить серию экспериментов по определению  $U''$ , последовательно уменьшая напряжение, питающее электромагнит, с шагом 1 В до достижения последнего значения 1 В, записывая измеренные значения.

### **Завершение работы**

После завершения эксперимента выключить питание всех приборов, соблюдая следующий порядок:

1) убедиться, что обе ручки регулировки напряжения на источнике постоянного тока повернуты в крайнее левое положение (против хода часовой стрелки до упора);

2) выключить питание источника постоянного тока;

3) выключить питание цифрового вольтметра;

4) разобрать схему.

После проведения измерений выполнить обработку результатов измерений.

1. Заполнить в журнале таблицу с экспериментальными данными.

2. Построить график зависимости напряжения, снимаемого с датчика Холла, от тока электромагнита.

3. Рассчитать постоянную Холла, концентрацию и подвижность носителей тока в полупроводнике.

### Содержание отчета

Отчет должен быть оформлен в виде журнала лабораторных работ. Содержание отчета:

- 1) цель и задачи работы;
- 2) ответы на контрольные вопросы;
- 3) схема стенда;
- 4) графики зависимости напряжения, снимаемого с датчика Холла, от тока электромагнита;
- 5) расчетные значения;
- 6) выводы.

### Контрольные вопросы и задания

1. В чем заключается эффект Холла?
2. Какие типы проводимости имеются в полупроводниках?
3. Какие данные о проводниках и полупроводниках можно получить на основе исследования эффекта Холла?
4. Поясните схему включения приборов.
5. Почему на боковых гранях проводника с током в поперечном магнитном поле появляются электрические заряды?
6. Как исключить влияние разности потенциалов между электродами датчика при отсутствии магнитного поля?
7. Что называется подвижностью носителей тока? Какова ее размерность?
8. Как вычисляют концентрацию и подвижность носителей тока?
9. Приведите примеры применения эффекта Холла.
10. Эффект Холла характерен только для полупроводников, или он наблюдается также для металлов? Ответ обосновать.