

шает  $10^5$  В/см, электроны проводимости приобретают энергию, достаточную для ионизации атомов. В результате ионизации образуются электронно-дырочные пары, которые ускоряются полем до высоких энергий и тоже могут ионизовать атомы. Таким образом, концентрация свободных носителей *лавиннообразно* нарастает. Этот процесс и получил название *ударной ионизации*. Ударная ионизация не приводит к немедленному пробое вещества, поскольку электроны (и дырки), рассеиваясь на фононах, передают свою энергию решетке и могут рекомбинировать.

**Эффект Зинера.** Его наблюдают в очень сильных полях (больше  $10^7$  В/см). Увеличение концентрации носителей в этом случае осуществляется за счет туннельного перехода электронов из валентной зоны в зону проводимости. У полупроводника, помещенного в электрическое поле, наблюдается наклон энергетических зон, тем больший, чем выше напряженность электрического поля (рис. 8.15). Переход  $AB$  через запрещенную зону не требует затрат энергии и осуществляется за счет туннельного эффекта. Ширина барьера  $AB$  уменьшается с увеличением напряженности поля. Вследствие этого увеличивается вероятность туннельного перехода.

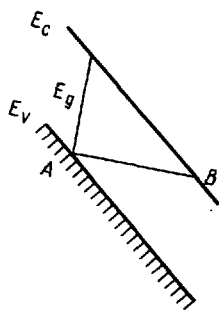


Рис. 8.15. Энергетические зоны полупроводника в сильном электрическом поле.

## 8.7. ЭФФЕКТ ХОЛЛА

Кинетические явления, возникающие в твердых телах при совместном действии на них электрического и магнитного полей, называются *гальваномагнитными явлениями*. Рассмотрим одно из наиболее изученных гальваномагнитных явлений, получившее название *эффекта Холла*.

Предположим, что образец прямоугольной формы, по которому течет ток с плотностью  $\vec{j}$ , помещен в магнитное поле, направленное перпендикулярно вектору  $\vec{j}$  (рис. 8.16). Пусть носителями заряда являются электроны. Электрическое поле  $\vec{E}$  ускоряет электрон, и он приобретает дрейфовую скорость:

$$\vec{v}_d = \mu \vec{E}. \quad (8.77)$$

На движущуюся с этой скоростью частицу действует сила Лоренца:

$$\vec{F}_\Lambda = -e[\vec{v}_d \cdot \vec{B}], \quad (8.78)$$

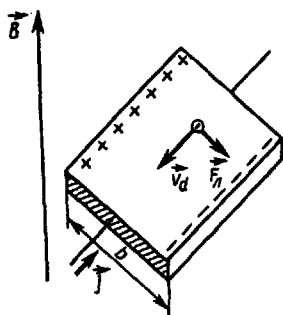


Рис. 8.16. Возникновение холловской разности потенциалов

направленная перпендикулярно векторам  $\vec{v}_d$  и  $\vec{B}$ . Под действием сил —  $eE$  и  $F_L$  электрон движется по траектории, получающейся в результате сложения двух видов движения: перемещения вдоль образца и вращения (обусловленного действием силы Лоренца). Такой траекторией является обычно циклоида. Магнитное поле, при котором радиус кривизны траектории много больше длины свободного пробега электрона, называют слабым. Будем считать магнитное поле слабым.

Под действием силы Лоренца электроны отклоняются к боковой поверхности образца, в результате чего на ней создается избыток отрицательного заряда. На противоположной стороне появится недостаток отрицательного заряда, т. е. избыток положительного. Разделение зарядов будет происходить до тех пор, пока сила, действующая на электроны со стороны возникшего электрического поля  $\vec{E}_H$ , направленного от одной боковой поверхности к другой, не скомпенсирует силу Лоренца. Поле  $\vec{E}_H$  получило название *поля Холла*, а само явление возникновения в образце с текущим по нему током поперечного электрического поля под действием магнитного поля было названо эффектом Холла. Итак, разделение зарядов прекратится при условии

$$e v_d B - e E_H = 0. \quad (8.79)$$

Отсюда легко найти разность потенциалов  $V_H$  между боковыми гранями, называемую э. д. с. Холла. Если ширина образца равна  $b$ , то

$$V_H = E_H \cdot b = v_d B b. \quad (8.80)$$

Находя  $v_d$  из выражения для плотности тока

$$j = -e \cdot n \cdot v_d \quad (8.81)$$

и подставляя в (8.80), получаем

$$V_H = - \frac{1}{ne} j B b = R \cdot j \cdot B b. \quad (8.82)$$

Видно, что  $V_H$  пропорциональна плотности тока и величине магнитного поля. Коэффициент пропорциональности  $R$  называется *постоянной Холла*:

$$R = - \frac{1}{ne}. \quad (8.83)$$

Если носителями заряда являются дырки, то, как нетрудно заметить, действующая на них сила Лоренца отклоняет их в ту же сторону, куда отклоняются электроны. При этом для постоянной Холла имеем

$$R = \frac{1}{pe}. \quad (8.84)$$

Произведение постоянной Холла на проводимость определяет подвижность носителей заряда:

$$R\sigma = \mu_H, \quad (8.85)$$

которая получила название *холловской подвижности*. Она может немного отличаться от подвижности, определяемой по величине проводимости, т. к. время релаксации  $\tau$  входит в теорию эффекта Холла и проводимости несколько различным образом.

Измерение эффекта Холла совместно с измерениями проводимости образца позволяют получать информацию о знаке носителей заряда концентрации носителей и их подвижности.

В 1980 г. К. фон Клитцинг, изучая эффект Холла на кремниевом полевом транзисторе, сделал неожиданное открытие. Он обнаружил, что при некоторых условиях холловское сопротивление  $R_H$ , определяемое отношением холловского напряжения  $V_H$  к току  $I$ , текущему через образец, становится квантованным и выражается при этом лишь через комбинацию фундаментальных физических постоянных — постоянной Планка и заряда электрона  $\frac{h}{e^2}$  — и целое число  $i$ :

$$R_H = \frac{h}{ie^2}, \quad i = 1, 2, 3, \dots$$

Таким образом, измерение квантового эффекта Холла позволяет определить фундаментальную физическую постоянную — отношение  $\frac{h}{e^2}$ . За это открытие в 1985 г. К. фон Клитцинг был удостоен Нобелевской премии.

Для наблюдения квантового эффекта Холла необходимо, чтобы электронный газ находился в двумерном состоянии. Что такое двумерный электронный газ и как его получить?

Свободный электрон может перемещаться в любом направлении, например, вдоль любой из осей координат  $x$ ,  $y$  и  $z$ . Электроны двумерного электронного газа вдоль двух осей, например,  $x$  и  $y$ , движутся как свободные частицы, а движение вдоль оси  $z$  им запрещено. Таким образом, электронный газ является двумерным в том смысле, что движение электронов в нем является двумерным.

Двумерный электронный газ обычно получают на поверхности полупроводника, граничащей с диэлектриком. В диэлектри-

ке имеются положительные заряды, создающие электрическое поле, перпендикулярное поверхности полупроводника. Электроны полупроводника, имеющие отрицательный заряд, притягиваются к границе, т. к. их энергия здесь понижается.

Если ширина потенциальной ямы, в которую «скатываются» электроны, мала по сравнению с дебройлевской длиной волны электронов, их энергетический спектр становится дискретным. Именно дискретность энергетических уровней двумерного электронного газа является причиной квантования эффекта Холла и фундаментальности его свойств.

### **8.8. ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ УРОВНЕЙ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ ТЕЛ**

Выше было показано, что ограничение кристалла поверхностью приводит к появлению в запрещенной зоне локализованных состояний. Эти поверхностные уровни, так же как уровни примесей и дефектов, могут оказывать существенное влияние на физические свойства твердых тел. Это влияние может сказываться в следующих явлениях.

1. Поверхностные уровни, так же как уровни примесей или дефектов, могут быть донорами или акцепторами электронов. Следовательно, они могут изменять концентрацию носителей заряда. Через них может также осуществляться рекомбинация носителей.

2. При высокой плотности поверхностных состояний возможно образование поверхностной двумерной зоны. Если эта зона заполняется электронами частично, то должна возникнуть поверхностная проводимость металлического типа. В случае металлов она не может конкурировать с большей объемной проводимостью, но в диэлектриках и полупроводниках, особенно приготовленных в виде тонких пленок, поверхностная проводимость может давать существенный вклад в общую проводимость образца.

3. В поликристаллических образцах поверхностные зоны могут существовать на поверхностях кристаллов. Если размеры последних малы, то поверхностная проводимость может доминировать над объемной.

4. Поверхностные уровни могут захватывать электроны и создавать большой отрицательный поверхностный заряд. В приповерхностном слое кристалла образуется недостаток электронов, т. е. создается избыточный положительный заряд. Возникающее таким образом электрическое поле может достигать  $10^7 \div 10^8$  В/см. Оно искривляет энергетические зоны вблизи поверхности кристалла. Искривление зон приводит к изменению работы выхода электронов и ряда других свойств.

Кроме перечисленных явлений поверхностные уровни могут оказывать влияние на поглощение света, процессы адсорбции атомов на поверхности твердых тел и т. д.