

8.6. СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ ТЕЛ В СИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЯХ

До сих пор, рассматривая электропроводность твердых тел, мы считали, что время релаксации τ не зависит от величины электрического поля. В этих условиях плотность тока пропорциональна напряженности поля $\vec{j} = \sigma \vec{E}$, т. е. электропроводность σ является не зависящей от поля величиной. Опыт показывает, однако, что независимость σ от \vec{E} наблюдается лишь в полях, напряженность которых меньше некоторой критической величины. При $\vec{E} > \vec{E}_{кр}$ электропроводность изменяется по мере роста \vec{E} , т. е. закон Ома перестает выполняться. Это является следствием изменения либо концентрации носителей заряда, либо их подвижности.

Явления, приводящие к отступлению от закона Ома в сильных электрических полях, можно разделить на две группы. К первой относятся явления, изменяющие время релаксации, а следовательно, подвижность носителей. Это разогрев электронного газа и эффект Ганна. Вторая группа явлений, в которую входят ударная ионизация и эффект Зинера, вызывает изменение концентрации носителей.

Разогрев электронного газа. Подвижность носителей заряда определяется временем релаксации, которое связано с длиной свободного пробега и скоростью частицы $\tau = \frac{\lambda}{v}$. В случае невырожденного электронного газа результирующая скорость движения электрона складывается из скорости дрейфа и скорости теплового движения:

$$\vec{v} = \vec{v}_d + \vec{v}_T. \quad (8.73)$$

В слабых полях $\vec{v}_d \ll \vec{v}_T$ и результирующая скорость определяется тепловой скоростью \vec{v}_T . Она не зависит от напряженности поля, вследствие чего не зависит от \vec{E} и подвижность. Поскольку концентрация электронов также не зависит от поля, электропроводность является постоянной величиной.

По мере увеличения напряженности поля \vec{E} возрастает скорость дрейфа. Когда \vec{v}_d становится сравнимой с тепловой скоростью, результирующая скорость начинает зависеть от \vec{E} . Это приводит к зависимости подвижности и электропроводности от \vec{E} , т. е. к отклонению от закона Ома.

Увеличение результирующей скорости электронов в сильных

полях приводит к возрастанию энергии электронов, т. е. к увеличению температуры электронного газа. Поэтому данный эффект называют *разогревом электронного газа*, а сами электроны в этом случае называют *горячими электронами*.

Заметим, что разогрев электронного газа наблюдается в полупроводниках и практически не имеет места в металлах. Причиной этого является невозможность создать в металле сильные поля из-за высокой концентрации свободных электронов и эффекта экранирования.

Эффект Ганна. В 1963 г. Дж. Ганн, изучая поведение арсенида галлия в области сильных полей, обнаружил новое явление, заключающееся в возникновении колебаний тока с частотой $10^9 \div 10^{10}$ Гц при приложении к кристаллу постоянного электрического поля. Этот эффект наблюдался позднее в фосфиде галлия, фосфиде индия и ряде других полупроводников и получил название эффекта Ганна. Он также связан с изменением подвижности носителей заряда в сильных полях. Однако механизм изменения μ отличен от рассмотренного выше.

Многие полупроводники, в частности, арсенид галлия, имеют достаточно сложную зонную структуру. Так, зона проводимости арсенида галлия кроме минимума $E(\kappa)$ при $\kappa=0$ имеет второй минимум в направлении $[100]$ при $\kappa=0,8\kappa_0$, где κ_0 — волновой вектор, соответствующий границе зоны Бриллюэна в направлении $[100]$. Схематически зонная структура GaAs изображена на рис. 8.11. Второй минимум (Б) расположен выше первого (А) на 0,36 эВ. Поскольку кривизна зависимости $E(\kappa)$ в области этих двух максимумов различна, различна и эффективная масса электронов, находящихся в этих минимумах. В области минимума А $m_A^* \approx 0,7 m$, т. е. электроны легкие. В области минимума Б $m_B^* \approx 1,2 m$, т. е. электроны тяжелые. Подвижность легких электронов составляет $\mu_A \approx 4000 \div 8000$ см²/В·с, подвижность тяжелых $\mu_B \approx 100 \div 200$ см²/В·с.

Изменение подвижности носителей в сильных полях связано с переходом электронов из минимума А в минимум Б. При слабых полях электроны находятся в термодинамическом равновесии с решеткой. Поскольку энергия электронов в обычных условиях много меньше расстояния (по шкале энергий) между минимумами $\kappa_B T \ll \Delta E$, практически все электроны занимают уровни в минимуме А, т. е. $n_A = n_0$. Плотность тока в этом случае

$$\vec{j} = e n_0 \mu_A \vec{E}. \quad (8.74)$$

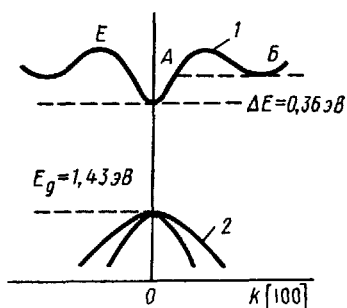


Рис. 8.11. Зонная структура арсенида галлия: 1 — зона проводимости, 2 — валентная зона

С ростом напряженности поля энергия электронов повышается и при некоторой критической величине $E_{кр}$ становится возможным их переход из минимума А в минимум В, где подвижность значительно ниже. Плотность тока при этом падает и в конечном итоге становится равной

$$\vec{j}_2 = e n_0 \mu_B \vec{E}. \quad (8.75)$$

В результате на зависимости $\vec{j}(\vec{E})$ появляется участок с отрицательной дифференциальной проводимостью (рис. 8.12).

Рассмотрим более подробно механизм электрической неустойчивости, приводящей к высокочастотным осцилляциям тока: Это удобно сделать на примере опыта Ганна. Предположим, что к образцу полупроводника, имеющему форму параллелепипеда длиной L приложено внешнее напряжение. Если полупроводник однороден, то электрическое поле в образце будет также однородным. Однако любой реальный кристалл содержит некоторые неоднородности. Наличие неоднородности с повышенным сопротивлением приводит к тому, что в этом месте образца напряженность электрического поля будет иметь повышенное значение. При увеличении напряженности внешнего поля значение $E_{кр}$ здесь будет достигнуто раньше, чем в остальной части образца. Вследствие этого в области неоднородности начинаются переходы из минимума А в минимум В, т. е. появляются тяжелые электроны. Подвижность здесь уменьшается, а сопротивление дополнительно возрастает. Это приводит к увеличению напряженности поля в месте локализации неоднородности и более интенсивному переходу электронов в минимум В. Поле в образце становится резко неоднородным. Образовавшаяся зона с сильным электрическим полем получила название электрического домена.

Домен, содержащий тяжелые электроны, под действием поля перемещается вдоль образца с относительно низкой скоростью (т. к. подвижность тяжелых электронов мала). Легкие электроны также перемещаются в поле, причем с большей скоростью. Те легкие электроны, которые движутся сзади домена, догоняют его и образуют область отрицательного объемного заряда, а те, которые движутся впереди, уходят от домена, и, таким образом, формируется область, обедненная электронами, т. е. область положительного объемного

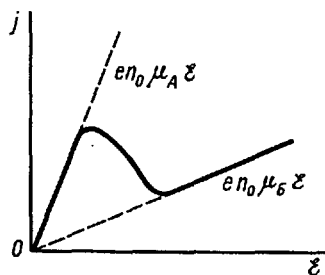


Рис. 8.12. Зависимость плотности тока от напряженности электрического поля для полупроводника, имеющего зонную структуру, изображенную на рис. 8.11

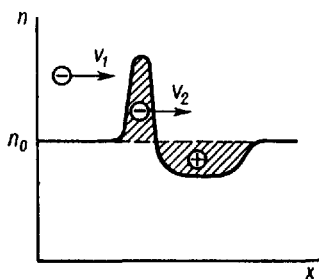


Рис. 8.13. Структура электрического домена

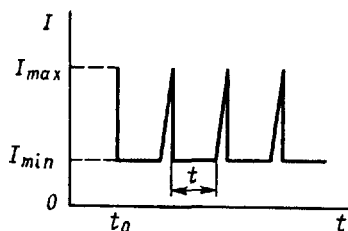


Рис. 8.14. Осцилляции тока в эффекте Ганна

заряда (рис. 8.13). Через некоторое время устанавливается стационарное состояние, при котором скорость движения домена будет равна скорости перемещения электронов вне домена. Это происходит потому, что поле внутри домена сильно возросло и вследствие этого возрастает скорость движения электронов в нем. Поле вне домена, наоборот, резко уменьшилось. Поэтому дрейфовая скорость электронов за пределами домена снижается. Когда домен достигает границы образца, он разрушается.

Пусть внешнее напряжение прикладывается к образцу в момент времени t_0 . При этом возникает ток, имеющий некоторое максимальное значение силы тока I_{max} (рис. 8.14). Сразу же на одной из неоднородностей начинается образование домена. Этот процесс протекает очень быстро, т. к. постоянная времени, связанная с переходом электронов из минимума А в минимум Б, составляет $\sim 10^{-12}$ с. Сила тока резко уменьшается до значения I_{min} . Величина I_{min} определяется скоростью движения домена. Это значение тока сохраняется до тех пор, пока домен не разрушится на границе образца. Очевидно, что время движения домена

$$t' = \frac{L}{v_d}, \quad (8.76)$$

где v_d — скорость движения домена. Сила тока снова возрастает до значения I_{max} , снова образуется домен и ток уменьшается. Так возникают колебания тока. Частота колебаний определяется длиной образца. Например, при $L=50$ мкм она составляет 2 ГГц. Скорость движения домена не зависит от внешнего поля и составляет 10^7 см/с. Поле лишь изменяет толщину домена.

Эффект Ганна используется при создании генераторов СВЧ колебаний.

Ударная ионизация. Увеличение электропроводности твердого тела в сильных полях связано с увеличением концентрации носителей заряда. При полях, напряженность которых превы-

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 *АВ* через запрещенную зону не требует затрат энергии и осуществляется за счет туннельного эффекта. Ширина барьера *АВ* уменьшается с увеличением напряженности поля. Вследствие этого увеличивается вероятность туннельного перехода.

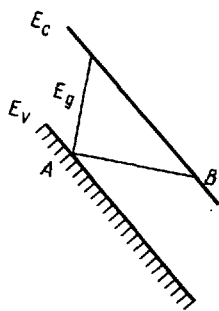


Рис. 8.15. Энергетические зоны полупроводника в сильном электрическом поле.

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:

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