

заряда. Действительно, при достаточно сильном искривлении зон границы их могут пересекать уровень Ферми (рис. 19.7). При этом в материале возникают области *n*- и *p*-типа, случайно распределенные по объему образца. Вероятность возникновения их может

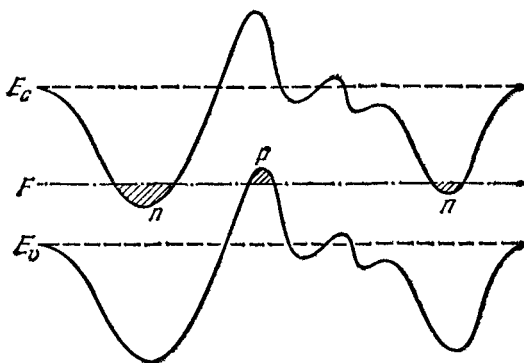


Рис. 19.7. Сильное флуктуационное искривление зон. Буквами *n* и *p* отмечены заштрихованные области, в которых при низких температурах образуются «капли» электронов и дырок.

оказаться достаточно большой, так что при низких температурах практически все носители заряда собираются в этих областях. Последние получили название электронных и дырочных «капель».

§ 6. Междузонные оптические переходы в сильно легированных полупроводниках

Особенности сильно легированных полупроводников приводят к некоторым изменениям их оптических характеристик по сравнению с тем, что наблюдается в сравнительно чистых материалах.

а). Переходы в глубину разрешенной зоны. Из-за вырождения газа носителей заряда в некомпенсированных материалах красная граница поглощения в них сдвигается на величину $\Delta\omega_n = \frac{F - E_c}{\hbar}$

или $\Delta\omega_p = \frac{E_v - F}{\hbar}$, соответственно, в *n*- и *p*-типа. Это есть сдвиг Бурштейна — Мосса, обсуждавшийся в § XVIII. 7. В соответствии со сказанным в § 3, случайное поле примеси сравнительно слабо влияет на вероятность рассматриваемых переходов. Коэффициенты поглощения и рекомбинационного излучения здесь в основном описываются формулами гл. XVIII. Использование последних для определения ширины запрещенной зоны привело к выводу, что в сильно легированных полупроводниках она несколько меньше, чем в чистом материале. Этот эффект может быть обусловлен

как небольшим изменением постоянной решетки при сильном легировании, так и взаимодействием между электронами.

б). *Переходы с участием хвостов плотности состояний.* Третья теорема о корреляции указывает на возможность оптических переходов с участием хвостов плотности состояний. В силу быстрого убывания плотности состояний по мере удаления от границ запрещенной зоны эти переходы следует рассматривать как междузонные. Тем не менее энергия соответствующих фотонов $\hbar\omega$ может оказаться меньше ширины запрещенной зоны $E_g = \hbar\omega_m$. Об излучении или поглощении таких фотонов говорят как о хвосте коэффициента рекомбинационного излучения или поглощения (или «оптическом

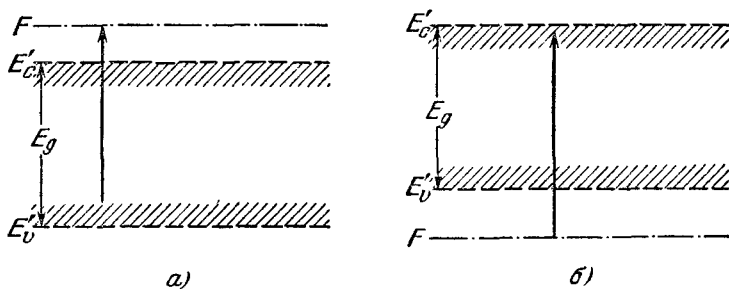


Рис. 19.8. Происхождение хвоста коэффициента поглощения в некомпенсированном полупроводнике. Заштрихованы области энергии, в которых плотность состояний на хвосте достаточно велика. Стрелкой указан один из возможных переходов, ответственных за поглощение фотонов с энергией, меньшей E_g . а) *n*-тип; б) *p*-тип.

хвосте»). «Величина» этого хвоста, т. е. значение коэффициента рекомбинационного излучения или поглощения света при $\hbar\omega < E_g$, зависит от степени компенсации. При сильном вырождении в отсутствие инжекции переходы в область энергий ниже уровня Ферми практически запрещены принципом Паули. По этой причине в поглощении фотонов с частотой $\omega < \omega_m$ здесь могут участвовать в основном самые глубокие уровни на хвостах плотности состояний (рис. 19.8); при этом в образцах *n*-типа существен хвост плотности состояний вблизи валентной зоны, а в образцах *p*-типа — вблизи зоны проводимости. В результате значения коэффициента поглощения при $\omega < \omega_m$ в некомпенсированных сильно легированных полупроводниках оказываются очень малыми. С другой стороны, хвост коэффициента рекомбинационного излучения в этих материалах может быть вполне заметен. Действительно, при инжекции носителей заряда квазиуровень Ферми может попасть в область соответствующего хвоста плотности состояний.

В компенсированных полупроводниках принцип Паули практически не ограничивает возможность электронных переходов из хво-

ста у валентной зоны в хвост близ зоны проводимости (рис. 19.9). Действительно, уровень Ферми здесь расположен между этими хвостами, в результате чего дозволённые состояния вблизи E'_v почти заполнены, а вблизи E'_c — почти все свободны. Соответственно коэффициент поглощения в области $\omega < \omega_m$ оказывается довольно заметным.

Спектральная зависимость коэффициентов поглощения и рекомбинационного излучения при $\omega < \omega_m$ удовлетворительно описывается формулой

$$\gamma = C \exp\left(-\frac{E_g - \hbar\omega}{E_0}\right). \quad (6.1)$$

Здесь C — сравнительно медленно меняющаяся функция частоты, E_0 — величина размерности энергии.

Соотношение (6.1) называется правилом Урбаха. Оно было найдено эмпирическим путем при исследовании поглощения света в ионных кристаллах. В этих материалах характерная энергия E_0 оказалась пропорциональной температуре:

$$E_0 = cT, \quad (6.2)$$

где c — некоторая постоянная. Это указывает на взаимодействие электронов с фононами (а не с примесью) как на возможную причину эффекта. Чтобы совершить междузонный переход, электрон должен получить энергию, не меньшую E_g ; часть ее $\hbar\omega$ электрон получает непосредственно от фотона, а дефицит $E_g - \hbar\omega$ покрывается фононами. При этом правая часть равенства (6.1) приблизительно воспроизводит просто вероятность соответствующего многофононного перехода. Объяснение правила Урбаха на основе представления об оптических переходах, сопровождаемых поглощением многих фононов, было дано А. С. Давыдовым. Соотношение (6.2) выполняется и в сильно легированных полупроводниках, но лишь при достаточно высокой температуре (в арсениде галлия — при $T \gtrsim 100$ К *). При более низких температурах величина E_0 перестает зависеть от T . Вместо этого она становится зависящей от концентрации примеси, возрастая вместе с ней. Именно тогда наблюдаются переходы с участием хвостов плотности состояний. Теорию этих переходов удается построить в условиях сильного легирования (3.3). При этом приблизительно воспроизводится как спектральная зависимость (6.1), так и

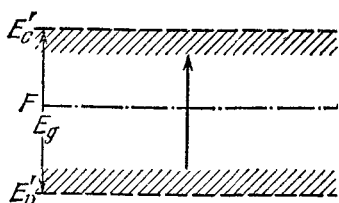


Рис. 19.9. Происхождение хвоста коэффициента поглощения в компенсированном полупроводнике. Заштрихованы области энергии, в которых плотность состояний на хвосте достаточно велика. Стрелкой указан один из возможных переходов, ответственных за поглощение фотонов с энергией, меньшей E_g .

*) Цифра взята из работы [4].

зависимость E_0 от концентрации примеси в образце. По существу, мы здесь имеем дело с аналогом эффекта Келдыша — Франца, обусловленного, однако, не внешним электрическим полем, а случайным полем примесей. Последнее, однако, неоднородно в пространстве. Даже в условиях (3.3) оно, будучи плавным в среднем, быстро изменяется вблизи каждого из примесных ионов. По этой причине здесь нельзя воспользоваться формулами § XVIII.10, заменяя в них напряженность поля \mathcal{E} некоторым эффективным ее значением. Подробное изложение расчетов, выполненных в условиях сильного легирования, можно найти в обзоре [5].

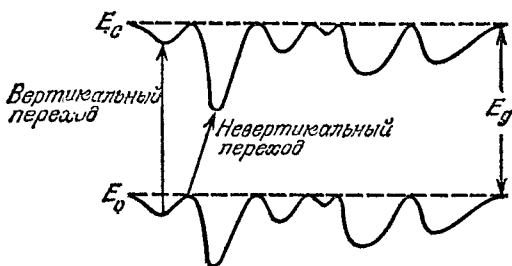


Рис. 19.10. Вертикальные и неvertикальные переходы в пространстве «энергия — координата».

Следует заметить, что форма оптического хвоста, т. е. частотная зависимость коэффициента поглощения или рекомбинационного излучения света, вообще говоря, не воспроизводит плотность состояний как функцию энергии. Суть дела легко понять из рис. 19.10, на котором схематически представлена картина искривленных зон; положения их границ зависят от координаты, отложенной вдоль горизонтальной оси. Обе зоны — валентная и проводимости — одинаково искривляются электрическим полем. По этой причине в каждой точке пространства расстояние между их границами E_c и E_v остается неизменным и равным E_g . Электронные переходы с затратой меньшей энергии могут происходить только между точками, разделенными в пространстве: это — «невертикальные» переходы на диаграмме «энергия — координата». Они связаны с туннелированием электрона через запрещенную зону, вероятность чего сильно зависит от энергии поглощаемого или испускаемого фотона.

Возможны и условия, когда вид функции $\gamma(\omega)$ приближенно воспроизводит функцию $N(E)$ вблизи той или иной зоны. Так, например, обстоит дело, если одно из двух состояний, между которыми происходит переход, мало изменяется случайным полем примеси. Однако такая возможность не носит общего характера.