

лая полоса при меньших частотах. В зависимости от величины S максимум поглощения приходится на бесфононную линию или многофононные полосы.

В этом параграфе мы сосредоточимся исключительно на связи нормальных фононов с электронным переходом. Однако с ним также могут быть связаны локализованные фононы и резонансы. На структуру полос поглощения и испускания оказывает влияние не только то, является ли электрон-фононная связь слабой или сильной, но также и то, слабым или сильным является искажение решетки в окрестности дефекта. В последнем случае локализованные фононы и резонансы играют важную роль.

§ 23. Связанные экситоны

Центры рекомбинации делают возможным переход электрона из зоны проводимости полупроводника в валентную зону в два этапа. Сначала электрон связывается в центре рекомбинации, а затем переходит в одно из состояний валентной зоны. В обычной модели полупроводника этот переход описывается как рекомбинация пары электрон — дырка на дефекте: электрон захватывается центром, затем дырка рекомбинирует со связанным электроном (или наоборот: захватывается дырка и затем рекомбинирует с электроном).

Этому процессу может предшествовать промежуточное состояние, в котором электрон и дырка совместно связаны около центра рекомбинации. Такое состояние можно интерпретировать как *связанный экситон*.

Существование связанных экситонов легко осознать. Известно, что возможно присоединение к атому водорода электрона с образованием иона H^- (стабильного в его основном состоянии). Нейтральные водородоподобные дефекты могут присоединять соответствующие носители заряда подобным образом. Донор может захватывать второй электрон, акцептор — вторую дырку. Остановимся вкратце на примере донора. Захват электрона на нейтральном атоме — доноре происходит за счет короткодействующего взаимодействия. Возникающий таким образом комплекс сам может образовать связанное состояние с дыркой: $\oplus \equiv +$. Такая структура имеет сходство с молекулой H_2 . Помимо того что этот комплекс находится в кристаллической решетке, единственное важное отличие от молекулы H_2 состоит в малой эффективной массе дырки. Энергия связи сильно зависит от отношения массы электронов m_e к массе дырок m_h . Тем не менее при любом отношении масс имеются связанные состояния. На рис. 32 показана энергия связи для различных возможных случаев связанных электронов и дырок около атома — донора.

Экситон может также быть связанным на попьюванном доноре D^+ : $\oplus - +$. Это соответствует молекулярному иону H_2^+ . Связанные