

Переход квантовой системы из возбужденного состояния в основное может быть осуществлен как самопроизвольно, так и под влиянием внешних воздействий. В первом случае переход называют *спонтанным*, во втором — *индуцированным* (или *вынужденным*). Вынужденные переходы могут происходить, например, под действием фотонов, энергия которых $h\nu = E_2 - E_1$ (здесь E_2 — энергия возбужденного состояния, E_1 — энергия основного состояния). Как спонтанные, так и индуцированные переходы могут быть излучательными. Излучение, возникающее при спонтанных переходах, называют *спонтанным*, а при вынужденных — *индуцированным* (или *вынужденным*).

Спонтанные переходы в различных частях системы осуществляются неодновременно и независимо, поэтому фазы излучаемых при этих переходах фотонов не связаны между собой. Кроме того, направление распространения излучаемого фотона и его поляризация тоже носят случайный характер. Таким образом, спонтанное излучение является некогерентным.

Индукцированное излучение, наоборот, обладает такими же характеристиками, что и вынуждающее излучение. Индуцированные фотоны имеют ту же частоту, направление распространения, фазу и поляризацию, что и фотоны, вызвавшие вынужденные переходы.

На явлении индуцированного излучения электромагнитных волн возбужденными квантовыми системами основана работа оптических квантовых генераторов (*лазеров*). Принцип работы лазера можно понять, рассматривая квантовые переходы между двумя энергетическими уровнями E_2 и E_1 ($E_2 > E_1$).

В состоянии термодинамического равновесия вероятность заполнения какого-либо энергетического уровня уменьшается с увеличением его энергии. Таким образом, в квантовой системе число частиц n_2 , находящихся в состоянии E_2 меньше, чем число частиц n_1 , находящихся в состоянии E_1 . Другими словами, населенность верхнего уровня меньше, чем населенность нижнего. Кроме спонтанного и индуцированного излучения в такой системе может также происходить и поглощение электромагнитной энергии. Фотоны с энергией $h\nu = E_2 - E_1$ поглощаются, а частицы с уровня E_1 переходят на уровень E_2 . Так как $n_1 > n_2$, поглощение является доминирующим. Индуцированные переходы $E_2 \rightarrow E_1$ в этом случае лишь уменьшают коэффициент поглощения.

Ситуация, однако, изменится, если в системе создать условия, при которых $n_2 > n_1$. О таком состоянии говорят как о состоянии с *инверсной населенностью*. В этом случае процесс испускания индуцированного излучения доминирует над процессом поглощения до тех пор, пока населенность верхнего уровня

не сравнивается с населенностью нижнего. Таким образом, в среде с инверсной населенностью можно получить *усиление света*. Основная проблема состоит в том, как создать инверсную населенность. Одно из остроумных решений этой системы состоит в использовании трехуровневой системы.

На рис. 12.9 изображена трехуровневая система. Если на данную систему действует излучение с частотой $\nu = \frac{E_2 - E_0}{h}$, то она переходит в возбужденное состояние. Кванты света поглощаются, а частицы переходят из состояния с энергией E_0 в состояние с энергией E_2 . Такое заселение уровня E_2 получило название *оптической накачки*. Инверсия населенности здесь может быть получена либо между уровнями E_2 и E_1 (т. е. $n_2 > n_1$), либо между уровнями E_1 и E_0 ($n_1 > n_0$). В первом случае усиление возникает на переходе $E_2 \rightarrow E_1$, во втором — на переходе $E_1 \rightarrow E_0$. Ясно, что для создания инверсной населенности между уровнями E_2 и E_1 необходимо, чтобы уровень E_2 за счет переходов $E_2 \rightarrow E_1$ опустошался медленнее, чем уровень E_1 за счет переходов $E_1 \rightarrow E_0$. Тогда в состоянии E_2 будет накапливаться больше частиц, чем в состоянии E_1 . Однако для осуществления этого процесса необходимо также, чтобы вероятность перехода $E_2 \rightarrow E_0$ была достаточно мала.

По трехуровневой схеме работают твердотельные лазеры на кристаллах рубина. Рубин — это кристалл корунда Al_2O_3 с примесью ионов хрома Cr^{3+} . Инверсная населенность и индуцированные переходы осуществляются здесь между уровнями хрома.

В полупроводниковых лазерах наиболее распространенным методом создания инверсной населенности является *инжекция* неравновесных носителей заряда через p - n -переходы. Электронно-дырочный переход (p - n) — это переходная область, с одной стороны которой полупроводник имеет дырочную (p) проводимость, а с другой — электронную (n). Необходимо отметить, что речь идет об одном образце, а не о контакте между двумя образцами p - и n -типа.

При образовании p - n -перехода электроны из n -областей диффундируют в p -область, а дырки из p -области — в n -область. В результате этого в p -области вблизи p - n -перехода образуется отрицательный объемный заряд, а в области n -типа — положительный заряд. Таким образом возникает электрическое поле p - n -перехода, которое препятствует дальнейшей диффузии носителей. Объемные заряды приводят к смещению энергетических зон. Результирующая энергетическая диаграмма p - n -

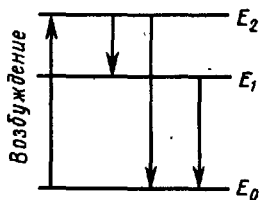


Рис. 12.9. Трехуровневая схема переходов

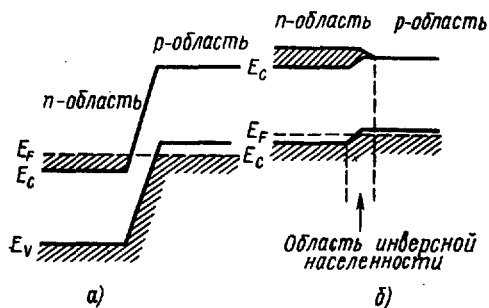


Рис. 12.10. Энергетическая диаграмма вырожденного p - n -перехода

ские уровни, занятые электронами, заштрихованы.

Если к p - n -переходу приложить внешнее напряжение в прямом направлении, т. е. напряжение, создающее поле, противоположное полю p - n -перехода, то потенциальный барьер между p - и n -областями уменьшится. Если внешнее поле достаточно велико, энергетическая диаграмма p - n -перехода принимает вид, изображенный на рис. 12.10, б. При этом электроны из n -области могут переходить в p -область, т. е. в p -область инжектируются носители заряда, которые являются неосновными. Таким образом, вблизи p - n -перехода создается инверсная населенность. Инжектированные электроны рекомбинируют с дырками валентной зоны. При этом излучаются фотоны с энергией, близкой к ширине запрещенной зоны. Естественно, что через p - n -переход в n -область переходят дырки из p -области. Они рекомбинируют с электронами в n -области. В зависимости от относительной концентрации примеси, подвижности и времени жизни неосновных носителей доминирует тот или иной процесс.

Излучение, возникающее при переходах с верхних уровней на нижние, является спонтанным. В среде с инверсной населенностью это спонтанное излучение индуцирует дополнительные переходы. Для того, чтобы создать квантовый генератор, в среде с инверсной населенностью необходимо обеспечить условия автоколебательного режима. Такой режим достигается за счет помещения активной среды, т. е. вещества, в котором создается инверсная населенность, в резонатор, выполняющий роль положительной обратной связи. Резонатор обеспечивает также пространственную и временную когерентность излучения. Простейший резонатор представляет собой два плоскопараллельных зеркала, одно из которых является полупрозрачным. В рубиновом лазере резонатором служат отполированные торцы рубинового стержня, покрытые тонким слоем металла, в полупроводниковом инжекционном лазере на арсениде гал-

перехода показана на рис. 12.10. Условия инверсной населенности означают, что верхние уровни должны быть заполнены более чем наполовину по отношению к нижним. Следовательно, в случае p - n -перехода носители заряда должны быть в вырожденном состоянии. На рис. 12.10, а) энергетиче-

лия — это тщательно полированные боковые грани, перпендикулярные плоскости p — n -перехода.

При спонтанных переходах фотоны излучаются равновероятно во всех направлениях. Однако те фотоны, которые распространяются в направлении, перпендикулярном плоскости зеркал, отражаются от них и снова направляются в среду с инверсной населенностью. Выполняя роль индуцирующего излучения, они вызывают вынужденные переходы, затем повторно отражаются от зеркал и т. д. При каждом проходе излучения через вещество интенсивность излучения нарастает. Часть световой энергии выходит через частично прозрачное зеркало, образуя когерентный световой поток. Резонатор «выбирает» из всех излученных фотонов только те, которые имеют определенные частоты и направление распространения. Излучение имеет только такие частоты, при которых между зеркалами укладывается целое число полувольт.

К созданию оптических квантовых генераторов привели фундаментальные исследования, выполненные примерно одновременно в СССР и США. Заслуги в этой области советских физиков Н. Г. Басова и А. М. Прохорова, а также американского физика Ч. Таунса отмечены Нобелевской премией.

ГЛАВА 13

ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АМОРФНЫХ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

В последние годы исключительно интенсивно развивается физика некристаллических веществ, к которым относятся жидкие металлы и полупроводники, стекло, аморфные металлические сплавы и т. д. Основной отличительной чертой кристалла является то, что атомы или молекулы, составляющие его, образуют упорядоченную структуру, обладающую периодичностью с дальним порядком. Из-за математических упрощений, связанных с этой периодичностью, физические явления в кристаллических твердых телах были хорошо поняты сразу после создания квантовой механики.

подавляющее большинство окружающих нас веществ представляет собой *неупорядоченные системы*, в которых отсутствует дальний порядок, но в то же время существует ближний порядок в расположении атомов. Такие вещества называют *аморфными, некристаллическими* или *неупорядоченными*. Среди неупорядоченных веществ имеются такие, которые обладают механическими свойствами, сходными с механическими свойствами кристаллических твердых тел. Некристаллические вещества, в которых коэффициент сдвиговой вязкости превышает