

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

10^{13} — 10^{14} Н·с/м², обычно называют *аморфными твердыми телами* (типичное значение вязкости для жидкости вблизи температуры плавления 10^{-3} Н·с/м²). Многочисленные экспериментальные исследования показали, что аморфные твердые тела, подобно кристаллическим, могут быть диэлектриками, полупроводниками и металлами.

Существование металлов, полупроводников и диэлектриков, как известно, объясняется зонной теорией твердых тел, полностью основанной на существовании дальнего порядка. Открытие того, что аморфные вещества могут обладать теми же электрическими свойствами, что и кристаллические, привело к переоценке роли периодичности. В 1960 г. А. Ф. Иоффе и А. Р. Регель высказали предположение, что электрические свойства аморфных полупроводников определяются не дальним, а ближним порядком. На основе этой идеи была разработана теория неупорядоченных материалов, которая позволила понять многие свойства некристаллических веществ. Большой вклад в развитие физики твердых тел внесли советские ученые А. Ф. Иоффе, А. Р. Регель, Б. Т. Коломиец, А. И. Губанов, В. Л. Бонч-Бруевич и др. Губановым впервые дано теоретическое обоснование применимости основных положений зонной теории к неупорядоченным веществам.

13.1. СТРУКТУРА АМОРФНЫХ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Данные о структуре аморфных веществ получают обычно из опытов по дифракции рентгеновских лучей или электронов. Введем понятие плотности $\rho(r)$ атомов на расстоянии r от начального атома. Число атомов в сферическом слое толщиной dr на расстоянии от r до $r+dr$ от некоторого начального равно $4\pi r^2 \rho(r) dr$. Это выражение называют *радиальной функцией распределения атомов*. Функция $4\pi r^2 \rho(r) dr$ имеет максимумы на расстояниях, соответствующих межатомным. Площадь под каждым пиком радиальной функции распределения определяет координационное число.

На рис. 13.1 в качестве примера приведена кривая радиального распределения для аморфного кремния, полученная С. Моссом и Д. Грачиком. Там же показана соответствующая кривая для кристаллического кремния. Найденные из данных, представленных на этом рисунке, координационные числа z_i , средние расстояния r_i от заданного атома до атома на координационной сфере с номером i , а также средние квадраты отклонения μ_i^2 атома i -й координационной сферы от среднего его положения сгруппированы в табл. 13.1, из которой видно, что первые координационные сферы в аморфном и кристаллическом кремнии практически одинаковы. Вторая координационная сфера в аморфном кремнии определена менее четко: значение

μ_i^2 здесь существенно больше, чем в кристаллическом материале. Наиболее ярким отличием структуры аморфного кремния от кристаллического является полное исчезновение третьего координационного максимума кривой радиального распределения, присутствующего на соответствующей зависимости $\rho(r)$ для кристалла. Другими словами, структура аморфного кремния характеризуется таким же ближним порядком, что и структура кристалла, однако область, где строгий ближний порядок сохраняется, ограничена лишь первой координационной сферой. Аналогичная ситуация имеет место и в других аморфных веществах.

В 1932 г. В. Захариасеном было высказано предположение, что атомы в аморфном твердом теле располагаются в виде *трехмерной непрерывной сетки*, сходной с кристаллической решеткой соответствующего кристалла. Однако в отличие от кристаллической решетки эта сетка неправильная: каждая ячейка немного деформирована. Случайные искажения длин связей и углов между ними, постепенно накапливаясь, приводят к исчезновению дальнего порядка. При этом, например, в тетраэдрической структуре каждый атом по-прежнему расположен в центре тетраэдра, деформированного случайным образом. Исчезновение дальнего порядка может быть связано, кроме того, с разрывами связей, а также с нарушениями порядка, обусловленными случайными флуктуациями состава (композиционный беспорядок в аморфных соединениях). На рис. 13.2 схематически изображены структуры кристаллического и аморфного твердых тел.

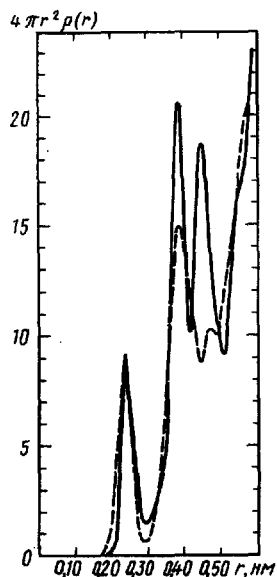


Рис. 13.1. Кривые радиального распределения для аморфного (пунктирная линия) и кристаллического (сплошная линия) кремния

Таблица 13.1.

Аморфный кремний				Кристаллический кремний		
i	z_i	$r_i \cdot 10^{-8}$, см	μ_i^2	z_i	$r_i \cdot 10^{-8}$, см	μ_i^2
1	$4,0 \pm 0,1$	2,35	0,014	4	2,35	0,010
2	$11,6 \pm 0,5$	3,86	0,051	12	3,86	0,020

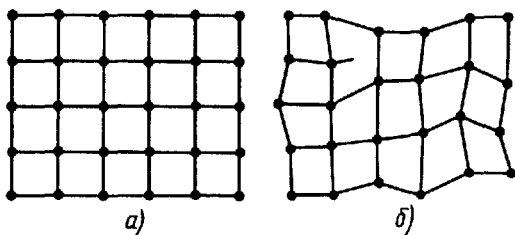


Рис. 13.2. Структуры кристалла (а) и аморфного твердого тела (б)

Несколько другое представление о структуре аморфных твердых тел было развито А. А. Лебедевым. Он предположил, что некристаллические вещества состоят из мельчайших «кристаллитов» или областей с максимально упорядоченным расположением атомов.

13.2. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СПЕКТР НЕКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Полученные к настоящему времени многочисленные экспериментальные данные свидетельствуют о существовании в аморфных твердых телах, так же как и в кристаллах, разрешенных и запрещенных участков энергетического спектра, т. е. о наличии разрешенных и запрещенных зон. Однако в запрещенной зоне аморфных веществ имеются какие-то разрешенные состояния, отчасти подобные обычным локальным уровням в кристаллических твердых телах, связанные, например, с примесями или дефектами. В то же время эксперименты дают основание утверждать, что уровни, расположенные в запрещенной зоне некристаллического материала, могут быть обусловлены не только атомами примеси, но и другими причинами, связанными со структурой данного вещества.

Таким образом, эксперимент достаточно определенно свидетельствует о том, что, несмотря на отсутствие дальнего порядка в аморфных веществах, хотя бы отдельные черты зонной теории сохраняют смысл. В то же время ясно, что из-за отсутствия дальнего порядка в рассматриваемых системах состояния с заданными значениями квазиимпульса не стационарны. По существу, это означает, что рассеяние носителей заряда в неупорядоченном поле столь интенсивно, что квазиимпульс не сохраняется даже приближенно. В связи с этим перестает иметь смысл представление о законе дисперсии как функциональной связи между энергией и квазиимпульсом. Это значит, что для неупорядоченных твердых тел нельзя ввести понятие поверх-