



НЕУПОРЯДОЧЕННЫЕ СИСТЕМЫ

Авторы: А. Л. Эфрос

НЕУПОРЯДОЧЕННЫЕ СИСТЕМЫ, вещества в конденсиров. состоянии, в которых отсутствует дальний порядок. Н. с. являются жидкие и аморфные вещества, сплавы, твёрдые растворы (в них атомы замещения располагаются неупорядоченно), высокотемпературные фазы некоторых соединений, в которых анионы располагаются упорядоченно, а катионная подрешётка «расплавлена» (напр., AgI). Легированные кристаллич. полупроводники при низких темп-рах тоже являются Н. с. с точки зрения их электронных свойств, поскольку хаотически расположенные заряженные примеси создают случайный потенциал, который может сильно влиять на движение электронов и препятствовать переносу заряда.

Расположение атомов в жидкостях и аморфных веществах нельзя считать некоррелированным. Радиальная функция распределения, описывающая ср. число соседей на заданном расстоянии от случайно выбранного атома, имеет в этих веществах несколько чётко выраженных максимумов, отражающих корреляцию в расположении соседних атомов в пределах нескольких координационных сфер. На больших расстояниях максимумы исчезают. Ближний порядок определяется взаимодействием соседних атомов и зависит от характера связи между ними. Напр., в ряде аморфных металлов ближний порядок хорошо описывается в рамках модели твёрдых шаров со случайной плотной упаковкой. Ср. число ближайших соседей в такой модели близко к 12. Для атомов с ковалентным типом связи (типичные полупроводники) характерна фиксация углов между связями. Так, в аморфных Ge и

Si (см. [Аморфные и стеклообразные полупроводники](#)) четыре ближайших соседних атома расположены в вершинах тетраэдра, в центре которого находится исходный атом, т. е. точно так же, как в соответствующих кристаллах. Однако, в отличие от ковалентных кристаллов, соседние тетраэдры повёрнуты относительно друг друга на

случайные углы, так что дальний порядок отсутствует (см. [Дальний и ближний порядок](#)).

Аморфное состояние вещества не является термодинамически равновесным. Оно метастабильно, и время его жизни может быть очень большим. Термодинамич. свойства аморфных диэлектриков при низких темп-рах определяются специфич. элементарными возбуждениями, свойственными атому или группе атомов, которые могут занимать две близкие по энергии, но разнесённые в пространстве позиции. Переход из одной позиции в другую происходит за счёт туннелирования. Эти образования называют двухуровневыми системами. Энергия возбуждений может меняться в широких пределах, причём при малых энергиях соответствующая функция распределения слабо зависит от энергии. Это обеспечивает почти линейную температурную зависимость электронной теплоёмкости при низких темп-рах T в противоположность решёточной (фононной) теплоёмкости (свойственной кристаллич. диэлектрикам), которая пропорциональна T^3 (см. [Дебая закон теплоёмкости](#)). Двухуровневые системы приводят также к низкотемпературным аномалиям теплопроводности.

Благодаря существованию ближнего порядка возможно приближённое описание электронных свойств Н. с. в терминах разрешённых и запрещённых энергетич. зон (см. [Зонная теория](#)). Н. с. могут быть диэлектриками, полупроводниками и металлами.

Свойственные Н. с. многочисл. нарушения кристаллич. решётки приводят к дополнит. механизму рассеяния электронов в аморфных металлах, а в аморфных полупроводниках возникают электронные состояния в запрещённой зоне, так что плотность состояний не обращается в нуль на границе разрешённых зон, а монотонно убывает в глубь запрещённой зоны, как правило, экспоненциально. Однако в целом электронные зоны в аморфных и кристаллич. полупроводниках одного химич. состава различаются не очень сильно.

Нарушения кристаллич. структуры приводят в определённой части энергетич. спектра к локализации электронных и фононных состояний. В аморфных полупроводниках локализованными оказываются электронные состояния, лежащие в запрещённой зоне там, где плотность состояний относительно мала. Электроны, находящиеся в

локализованных состояниях, могут переносить ток лишь путём «прыжков» из одного состояния в другое (см. [Прыжковая проводимость](#)). Т. к. состояния имеют разную энергию, «прыжки» осуществляются лишь с поглощением или испусканием фононов.

В твёрдых растворах неупорядоченность играет относительно малую роль, т. к. обычно потенциалы замещающих атомов не сильно отличаются от потенциалов замещаемых атомов. Поэтому в первом приближении можно считать твёрдый раствор идеальным кристаллом, параметры которого являются промежуточными между параметрами смешиваемых компонентов (приближение виртуального кристалла). Однако в ряде свойств проявляются пространственные флуктуации состава раствора. Они вызывают, напр., рассеяние носителей заряда, уширение экситонных линий. Наблюдается также вызванная флуктуациями состава локализация экситонов в твёрдых растворах.

В твёрдых растворах и сплавах, содержащих магнитные атомы, возникает неупорядоченность в расположении их спинов. Энергия спин-спинового взаимодействия сильно зависит от расстояния и может менять знак при небольших изменениях межатомного расстояния. Системы, обладающие таким свойством, называют [спиновыми стёклами](#). Расположение спинов в осн. состоянии спиновых стёкол является неупорядоченным, но вполне определённым для заданного расположения атомов.

Литература

Лит.: Шкловский Б. И., Эфрос А. Л. Электронные свойства легированных полупроводников. М., 1979; Лифшиц И. М., Гредескул С. А., Пастур Л. А. Введение в теорию неупорядоченных систем. М., 1982; Мотт Н., Дэвис Э. Электронные процессы в некристаллических веществах. М., 1982; Займан Д. Модели беспорядка. М., 1982; Векилов Ю. Х. Беспорядок в твердых телах // Соросовский образовательский журнал. 1999. № 6.