

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК**ДЕЙСТВИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ НА МАТЕРИАЛЫ***Дж. Слэтер*)*

Излучение с высокой энергией, корпускулярное—в виде заряженных ионов, электронов и нейтронов—и электромагнитное, может оказывать разрушающее действие на материалы, используемые при сооружении ядерных реакторов. В данной статье типы нарушений, производимых в твёрдых телах различного рода излучением, рассматриваются с точки зрения теории строения твёрдого тела, а также обсуждаются опыты, которые были или могут быть поставлены с целью исследования разрушающего действия излучения.

Разрушающее действие излучения является следствием вызванного им смещения атомов твёрдого тела, застревания частиц в теле в виде примесей и, наконец, ионизации, производимой излучением. Для понимания рассматриваемого явления следует знать, какое влияние оказывают на свойства твёрдого тела смещения атомов и появление примесей и насколько это влияние независимо от того, вызываются ли эти изменения излучением или какой-либо другой причиной. Начнём поэтому с краткого обзора современного состояния учения о твёрдом теле, обратив особое внимание на роль атомных смещений и примесей. После рассмотрения теорий этих явлений и опытных методов их изучения мы перейдём к случаю нарушений, производимых излучением.

Основная характеристика твёрдого тела состоит в том, что при обычных условиях его свойства являются однозначной функцией расположения атомов, независимо от того, как атомы пришли в эти положения. Твёрдое тело образовано двумя составными частями: ядрами атомов и электронами. При данном положении ядер электроны могут иметь большое число стационарных состояний, но их переходы из одного состояния в другое происходят так быстро, что они достигают положения, отвечающего термическому равновесию, за время, короткое в сравнении с продолжительностью наших опытов. Это и служит основанием для утверждения, что свойства твёрдого тела однозначно определяются положением

*) J. Appl. Phys. 22, № 3, 237 (1951).

его атомов (т. е. ядер). Единственными исключениями являются: во-первых, случаи, когда мы имеем дело со столь короткими промежутками времени, как время прохождения быстрой частицы через вещество. За это время электроны могут не успевать придти в состояние равновесия, несмотря на быстроту их приближения к этому состоянию. Во-вторых—случай очень хорошего изолятора, когда электронная проводимость настолько мала, что неравновесное распределение зарядов может сохраняться в течение измеримых промежутков времени. Мы будем особо отмечать эти случаи. За названными исключениями высказанное утверждение остаётся правильным.

Очевидно, что любое исследование твёрдого тела, имеющего нарушения, удобно разделить на две части: а) выяснение вопроса о том, как атомы попали в те положения, где они находятся, и б) выяснение влияния расположения атомов на свойства материала. Общей для этих двух вопросов является проблема определения расположения атомов. Конечно, в отличие от электронов, нельзя считать, что атомы находятся в положении термического равновесия, ибо многие процессы перемещений атомов при низких температурах совершаются столь медленно, что атомы могут оставаться в неустойчивых или метастабильных положениях в течение очень длительного времени. Наиболее прямой путь определения положения атомов заключается в непосредственном изучении структуры при помощи дифракции рентгеновских лучей, электронов или нейтронов. Эти методы не так наглядны, как, например, зрительное восприятие видимых предметов, однако в последнем разделе мы покажем, что эти методы дают очень много для определения природы атомных смещений в твёрдых телах. Данные всех других методов являются менее прямыми; большинство из них основывается на наблюдении изменений различных физических свойств при смещениях атомов, и достоверность получаемых таким образом данных зависит от того, насколько хороши теории, объясняющие эти физические свойства.

Перейдём к рассмотрению твёрдого состояния и ответим на вопрос: какие свойства имеет твёрдое тело при данном расположении атомов? Затем вернёмся к другому вопросу: как изменяют своё положение атомы в результате процесса облучения?

1. СВОЙСТВА ТВЁРДОГО ТЕЛА С НЕСОВЕРШЕННОЙ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЁТКОЙ

Интересующие нас типичные свойства зависят от несовершенств кристаллической решётки. Однако лучше начать с рассмотрения случая совершенного кристалла. Здесь применяют два метода, основанные либо на атомной модели, либо на зонной картине, и представляющих собой два возможных теоретических приближения, дающих сходные результаты. Каждый из методов полезен в своей области.

1. Атомная и зонная модели твёрдого тела

Атомная модель особенно пригодна для обсуждения механических свойств твёрдых тел. В этой модели принимается, что каждый атом взаимодействует со своими соседями. В случае ионов это электростатические силы. Если атомы имеют общие электроны, то взаимодействие осуществляется с помощью ковалентных сил. Когда атомы приведены в слишком плотное соприкосновение и электронные облака, окружающие атомы, начинают проникать друг в друга, то возникает электронное отталкивание. На больших расстояниях между любой парой атомов действуют слабые силы притяжения Ван-дер-Ваальса. Силы всех этих категорий действуют как между двумя атомами в двухатомной молекуле, так и между двумя сталкивающимися атомами в газе. Нельзя, однако, считать, что в твёрдом теле имеет место простое наложение сил, действующих между двумя атомами, ибо присутствие атомов, связанных с данным, будет менять способность последнего действовать на другие атомы. Насыщение валентности является наиболее знакомым примером этого явления: атом, у которого число связей с соседями равно его валентности, не может иметь добавочных связей с другими атомами. Если валентные связи атома насыщены, то его электронная структура является в некотором смысле застывшей и не способной к лёгкому изменению. В то же время, если атом имеет ненасыщенные валентные связи, то он очень легко образует другие связи, т. е. его электронная структура обладает известной гибкостью.

В кристаллах валентных соединений валентные связи между атомами молекул обычно насыщены, так что их электронные структуры довольно жёсткие и электроны не могут переходить от одних молекул к другим. Поэтому такие кристаллы не являются проводниками электричества. Молекулы связаны друг с другом только слабыми межмолекулярными силами (Ван-дер-Ваальса). Таким образом, эти вещества являются изоляторами и при повышении температуры плавятся и возгоняются в молекулярный газ. В металле, с другой стороны, валентные связи атомов не насыщены, молекулы не образуются, электроны перемещаются довольно свободно от одной валентной связи к другой или от одной части кристалла к другой, поэтому такое вещество является проводником электричества. Ионные кристаллы, такие как NaCl или окислы вроде BeO или BaO , построены из ионов, имеющих замкнутые электронные оболочки. Эти ионы связаны силами электростатического притяжения, уравниваемыми силами электронного отталкивания; здесь нет валентных связей, нет подвижности электронной структуры и нет электрической проводимости.

Эта атомная модель пригодна для рассмотрения механических свойств твёрдого тела. При наиболее простых типах деформаций, как, например, при однородном сжатии, атомы сближаются,

силы отталкивания начинают превышать силы притяжения и оказывают противодействие давлению. При однородном упругом сдвиге атомные плоскости стремятся скользить одна относительно другой. Рассматривая изменение сил с расстоянием, можно определить сопротивление сдвигу. При значительно больших смещениях когда отдельные атомы попадают между узлами или вырываются из решётки, можно рассуждать таким же образом. Но во всех случаях нужно учитывать изменение простых межатомных сил и принимать во внимание насыщение валентностей. Таким образом очевидно, что если атом в кристалле имеет достаточно соседей для насыщения валентных связей, то приближение к нему добавочного атома даст иной результат, чем если бы данный атом имел меньшее число соседей.

В отношении электрических свойств, как мы уже видели, атомная картина даёт правильное представление об электропроводности веществ.

Можно в известной степени объяснить также магнитные свойства: внутренние электронные оболочки некоторых элементов не заполнены и имеют нескомпенсированный магнитный момент. Незаполненность оболочек придаёт им определённую гибкость, проявляющуюся в возможности ориентации магнитного момента в различных направлениях, что вызывает магнитные эффекты. С другой стороны, ряд электрических свойств трудно поддаётся объяснению с помощью атомной модели. В качестве типичных примеров можно упомянуть три вещества — С (алмаз), Si, Ge. Все три вещества кристаллизуются в одной и той же алмазной решётке, которая является, повидимому, типичной для структур с насыщенной валентностью. Каждый атом образует четыре хорошо определённые валентные связи с четырьмя ближайшими соседями, насыщающими его валентности. Согласно изложенному выше, следует ожидать, что эти вещества будут изоляторами, это справедливо для алмаза, но не для кремния и германия, которые являются наиболее хорошо известными полупроводниками. Для объяснения этого и ряда других подобных случаев нужна зонная модель.

Энергетический электронный уровень в изолированном атоме очень узок. Это значит, что электрон, находящийся на таком уровне, всегда имеет одну и ту же энергию. Если два атома приведены в соприкосновение, то этот уровень смещается, величина смещения зависит от межатомного расстояния. Если два атома одинаковы, так что каждый из них имеет один и тот же энергетический уровень, то взаимодействие атомов проявится не только в смещении этого уровня, но и в расщеплении его на два уровня, расстояние между которыми увеличивается по мере сближения атомов. Если множество атомов сведено в кристалл, то подобное явление наблюдается во много большем масштабе. Все первоначально одинаковые уровни одинаковых атомов расщепляются так, что образует-

ся столько уровней, сколько имеется одинаковых атомов в кристалле, но величина полного расщепления будет почти такой же, как в случае двух атомов. Таким образом, при большом числе атомов в кристалле группа уровней будет располагаться практически непрерывно и образует энергетическую зону (полосу). Каждый из первоначальных энергетических уровней расщепляется в полосу и, так как эти полосы расширяются по мере сближения атомов, то может случиться, что они перекроются и образуют сплошной ряд уровней. С другой стороны, если расщепление будет мало, то между зонами могут остаться разрывы.

Сравним число уровней в каждой зоне с числом электронов, действительно присутствующих в кристалле. В валентных и ионных кристаллах, как правило, мы найдём, что имеется как раз достаточно электронов для заполнения определённого числа наиболее низких зон, тогда как более высокие зоны остаются пустыми. Напротив, в металле некоторые зоны только частично заполнены, и выше располагаются незанятые уровни. В этом случае материал проводит электричество и электрическое поле будет ускорять электроны, незначительно увеличивая их энергию. Итак, проводимость только тогда имеет место, когда, как в металле, непосредственно над занятыми уровнями имеются пустые уровни, на которые электроны могут переходить из занятых зон. В валентных и ионных кристаллах, где имеются разрывы между энергетическими зонами, нет проводимости. Изложенное соответствует выводам атомной модели, но появляется ещё добавочная особенность, позволяющая здесь разобрать случаи Si и Ge. В алмазе между валентным и следующим незанятым уровнем имеется очень широкий разрыв и поэтому материал является хорошим изолятором. В Si и Ge этот разрыв очень мал. При высоких температурах электроны могут быть возбуждены тепловым движением и переброшены из занятой валентной полосы в верхнюю полосу — зону проводимости, в результате чего материал становится проводником. Появится так называемая внутренняя проводимость, быстро увеличивающаяся с температурой. Имеется ещё и другой, более важный механизм проводимости. Если кристалл содержит атомы примесей, то их энергетические уровни не будут включаться в главные полосы, так как эти полосы возникают только при взаимодействии энергетических уровней одинаковых атомов. Некоторые из этих примесных уровней могут находиться в разрыве между валентной зоной и зоной проводимости. Исследование показывает, что имеются две возможности. В некоторых случаях умеренное повышение температуры может возбудить электрон с уровня примеси в верхнюю незаполненную полосу проводимости, что и приведёт к появлению проводимости. Такой атом примеси называется атомом-донором. Результирующая проводимость называется электронной (или проводимостью n -типа), так как носителями являются

отрицательно заряженные электроны, переведённые на верхний уровень. В другом случае уровень примеси нормально не занят и умеренное повышение температуры возбуждает электрон из нижней валентной зоны на этот уровень, который называется акцепторным уровнем. Результирующая проводимость называется дырочной (или проводимостью p -типа), так как носители связаны с дырками в валентной зоне, которые, как можно показать, имеют свойства, характерные для положительно заряженных частиц.

Интересный случай, промежуточный между проводником и полупроводником, представляет графит — исключительное в своём роде вещество с необычной кристаллической структурой. В графите электроны заполняют полностью нижнюю валентную зону, но к ней непосредственно примыкает следующая зона. Плотность электронных состояний падает до нуля на границе между зонами и затем увеличивается опять, т. е. эта плотность равна нулю только в одной точке. В результате этого графит имеет электрические свойства, промежуточные между проводником и полупроводником.

2. Механические свойства твёрдых тел

Мы уже упоминали, что механические свойства твёрдых тел хорошо объясняются атомной моделью, позволяющей вполне удовлетворительно объяснить такие свойства, как сжимаемость. Хорошо известно, однако, что существует ряд механических свойств, таких как прочность, сопротивление разрыву, твёрдость и ползучесть, являющихся структурно-чувствительными. Эти свойства нельзя понять без исследования роли зацеплений (дислокаций)*) и примесей в решётке. Повидимому, наиболее поразительным является их влияние на сопротивление сдвигу. Если учесть межатомные силы и рассчитать силу, необходимую для того, чтобы заставить одну атомную плоскость скользить над другой и, следовательно, вызвать сдвиг в кристалле, то мы получим чрезвычайно большую величину. В действительности сила, необходимая для образования сдвигов в кристалле, равна около одной тысячной рассчитанной величины. Объяснение этому было дано некоторое время тому назад и, в известной мере, аналогично объяснению того, что кусок бумаги легко разорвать, тогда как та же бумага выдерживает значительный вес подвешенной к ней гири. Начавшийся разрыв распространяется, так как надрыв оказывается наиболее слабым местом, и почти вся сила разрыва может быть сконцентрирована в этой единственной точке. Подобным же образом полагают, что в скалываемом кристалле так называемые зацепле-

*) См. статью Коттрелля, Теория зацеплений в кристаллической решётке, УФН 45, вып. 2, 179, 1952. (Прим. перев.)

ния могут вызывать особый тип атомных смещений, которые приводят к концентрации скалывающей силы в одной точке, так что действие силы во много раз увеличивается, и относительно малая сила может вызвать сдвиг в кристалле. Зацепление распространяется в кристалле так же, как надрыв распространяется в куске бумаги.

Теория зацеплений объясняет не только лёгкость сдвига в кристалле, но также позволяет понять упрочнение. Все, что препятствует движению зацеплений, может остановить сдвиг, так же как полосы, наклеенные крест на крест на бумагу, увеличивают её прочность, ибо надрыв останавливается, достигнув этих полосок. Простейшей формой упрочнения является упрочнение обработкой, которое возникает при искажении решётки кристалла. Предполагается, что хотя каждое зацепление движется через кристалл довольно свободно, скольжение, которое оно вызывает, оставляет после себя след в виде области нарушения. Если возникает всё больше и больше нарушенных областей, то наступает момент, когда последующее зацепление при прохождении через кристалл встречается с одним из этих следов нарушения и останавливается. По мере увеличения числа нарушений, эти замороженные смещения решётки всё более и более препятствуют движению следующих зацеплений, в результате чего материал получает упрочнение обработкой. К моменту, когда зацепления распределяются в решётке так плотно, что они начинают заметно мешать друг другу, наступает насыщение и достигается оптимум холодной обработки с наибольшим изменением физических свойств и наибольшим количеством энергии, поглощённой в решётке, как это будет видно в следующем параграфе. Из кривой растяжения в зависимости от времени видно, что непрерывное приложение силы будет производить деформацию со всё меньшей и меньшей скоростью и наконец настолько медленно, что мы можем говорить о ней, как о ползучести.

Другие механизмы упрочнения — это упрочнение легированием и упрочнение при дисперсионном твердении. Очевидно, что всё, нарушающее однородность кристаллической решётки, будет препятствовать движению зацеплений и приводить к упрочнению; подобное действие будут оказывать атомы примеси или включения другого материала. В твёрдых растворах атомы растворителя обычно заметно отличаются по своим размерам от растворённых атомов. Когда эти атомы расположены неупорядоченно, то они нарушают периодичность решётки, что приводит к упрочнению. При дисперсионном твердении выделения вызывают напряжения в маточной среде, из которой они выделяются, что опять нарушает правильность решётки и приводит к упрочнению.

Эти механические свойства сильно зависят от температуры. Искривлённая решётка обычно термодинамически неустойчива. Если

атомы могут свободно двигаться, то они принимают положения, соответствующие термодинамическому равновесию, и решётка становится более правильной, что приводит обычно к уменьшению твёрдости. Это и есть явление отжига. При низких температурах атомы не могут свободно двигаться, потому что каждый из них удерживается в положении равновесия возвращающими силами. Но может оказаться, что при перемещении на относительно короткое расстояние эти силы могут переменить знак и вытолкнуть атом в более устойчивое положение. Энергия, необходимая для преодоления этого барьера, носит название энергии активации. Для необратимого перехода в положение более устойчивого равновесия температура должна быть поднята настолько, чтобы тепловая энергия стала сравнимой с энергией активации. Чем выше температура, тем больше вероятность для перехода атома через барьер и тем чаще происходит этот процесс. Энергию активации можно определять хорошо известным способом по измерению скоростей отпуска. При этом часто находят, что различные атомы в искажённой решётке имеют различные энергии активации.

С атомами, находящимися в неустойчивых положениях, связана энергия внутренних напряжений, накопленная решёткой. Если атом может перейти в положение с более низкой энергией, то он теряет при этом процессе энергию, которую поглотил, находясь в неустойчивом положении. Имеются два основных способа измерения этой поглощённой энергии. Один из них сводится к постепенному нагреванию материала. При прохождении через температурную область, в которой атомы легко перескакивают из неустойчивых положений в устойчивые, они выделяют избыточное количество тепла, которое можно измерить по добавочному повышению температуры. Другой метод состоит в измерении теплоты растворения. Как холоднообработанный, так и отожжённый образцы имеют одну и ту же конечную энергию после растворения, а так как их первоначальные энергии различны и холоднообработанный образец имеет большую энергию, то разница энергий может быть измерена по теплотам растворения.

Имеется ряд других чрезвычайно важных явлений, непосредственно связанных с изменениями в расположении атомов в решётке и обнаруживающих большое влияние расположения атомов на механические и термические свойства тела. Хорошо понятны переходы из упорядоченного в неупорядоченное состояние в некоторых сплавах: ниже температуры перехода атомы в сплавах (например, Cu_3Au) образуют упорядоченную структуру, в то время как выше этой температуры тепловые колебания приводят к неупорядоченному размещению атомов в узлах первоначальной кристаллической структуры. Это можно исследовать с помощью рентгеновских лучей, тепловых измерений и, в ряде случаев, электрическими и магнитными методами.

Другое интересное явление — затухание акустических или механических колебаний. Так, для звуковых волн может наблюдаться большое поглощение или рассеяние энергии в определённой области частот, связанное, как можно показать, с различными необратимыми процессами в кристаллах. Другая важная область исследования — это диффузия, включающая как самодиффузию, т. е. диффузию атомов в кристалле, состоящем из атомов того же сорта, так и собственно диффузию атомов примесей. Изучение энергии активации диффузии может пролить свет на процесс обмена атомов местами в решётке.

3. Электропроводность и теплопроводность

Электропроводность зависит от двух величин: от числа носителей тока (электронов — в обычной металлической проводимости или ионов в ионной проводимости) и подвижности этих носителей (или скорости, приобретаемой ими при единичной напряжённости электрического поля). Рассмотрим, как эти величины зависят от температуры и от нарушений в решётке для различных видов проводников.

Прежде всего в металле число носителей тока почти не зависит ни от температуры, ни от физического состояния образца и является структурно нечувствительным. Оно имеет величину порядка одного электрона на атом. Если зона проводимости не очень заполнена, то носителями являются электроны, но если она почти заполнена, то роль носителей тока выполняют дырки, которые ведут себя подобно положительным зарядам. Число носителей и их знак могут быть найдены из эффекта Холла, т. е. из поперечной разности потенциалов, которая появляется в проводнике при помещении его в магнитное поле, перпендикулярное току. К сожалению, коэффициент Холла для металлов очень мал и трудно измерим; его истолкование усложняется, когда часть носителей заряжена положительно, а другая — отрицательно. Вследствие этого мы не располагаем сколько-нибудь полными сведениями о числе свободных электронов в металле, как этого нам бы хотелось.

Подвижность электронов в чистом металле приблизительно обратно пропорциональна температуре. Причина этого простая. Электроны в совершенном кристалле, как показано зонной теорией, ведут себя подобно волнам, так же как в случае электронной дифракции. Если решётка совершенно правильная, то электроны проходят через кристалл без рассеяния — подвижность их будет бесконечной. Они, однако, рассеиваются на неоднородностях решётки, возникающих вследствие тепловых колебаний. Количество этих неоднородностей пропорционально температуре. Возникающая сила трения, обратно пропорциональная подвижности электронов, пропорциональна температуре. В любом чистом метал-

ле, не представляющем собой совершенного кристалла, имеется добавочное сопротивление, так как появляется дополнительное рассеяние электронов на неоднородностях решётки, что уменьшает их подвижность так же, как это сделало бы повышение температуры. Таким образом, измерение электрического сопротивления является чувствительным способом для определения несовершенства решётки. Это особенно касается удельного сопротивления при очень низких температурах, ибо здесь исчезает зависимость сопротивления от температуры и остаточное сопротивление целиком является результатом неправильностей решётки. Такое остаточное сопротивление возникает в металлах при холодной обработке. Ещё большее остаточное сопротивление, обусловленное неправильностями кристаллической структуры, имеют сплавы. Интересно отметить, что в некоторых сплавах типа замещения, в которых при некоторой определённой температуре упорядоченное расположение атомов в решётке сменяется разупорядоченным, остаточное сопротивление много больше в разупорядоченном, чем в упорядоченном состоянии.

Сопротивление току очень высоких частот в микроволновой области имеет некоторые интересные особенности, которыми не обладает сопротивление постоянному току. При высоких частотах электромагнитные волны проникают в металл только на очень небольшую глубину. Это явление носит название скин-эффекта. Глубина проникновения уменьшается с увеличением частоты и проводимости материала, вследствие чего материал становится менее прозрачным. Глубина проникновения тока при скин-эффекте может быть порядка 10^{-4} или 10^{-5} см. Тогда измерениями проводимости микроволновыми методами можно определить её значение в этом тонком слое.

Иногда считают, что холодная обработка поверхности металлов приводит к полному искажению решётки в поверхностном слое. Микроволновый метод будет чувствителен к такому изменению состояния поверхности, которое трудно исследовать другими методами. Из этих же измерений получаются добавочные интересные данные, которые нельзя добыть измерениями при низких частотах. Так, при низкой температуре проводимость повышается и глубина проникновения тока может стать меньше средней длины свободного пробега электрона. В свою очередь длина свободного пробега электрона возрастает с уменьшением температуры и увеличением проводимости. Когда эти две величины становятся равными, механизм проводимости изменяется и измеряемая проводимость уже не будет увеличиваться с понижением температуры. Наблюдая это явление, можно получить данные о средней длине свободного пробега электронов в поверхностных слоях, а отсюда—об их подвижности. Сопоставляя эти данные с проводимостью, можно определить число носителей тока.

Рассмотрим, далее, электропроводность полупроводников. Уже было указано, что носители тока в таких материалах при умеренном повышении температуры появляются с донорных или акцепторных уровней примесей, а при более высоких температурах — прямым возбуждением из валентной зоны в зону проводимости. Это приводит к типичной зависимости проводимости от температуры, являющейся характерным свойством полупроводников. Эту зависимость легко исследовать с помощью эффекта Холла, который для полупроводников много больше, чем для металлов. Подвижность в полупроводниках можно найти, исходя из аналогии с металлами. Здесь имеется сопротивление, возникающее за счёт тепловых колебаний и пропорциональное температуре, как и в металлах, а также добавочное сопротивление, обусловленное искажениями решётки присутствием атомов примесей. Тщательный анализ проводимости и эффекта Холла, проведённый недавно Ларк-Горовицем и др., дал очень много для понимания зонной структуры и проводимости твёрдых тел.

Изоляторы во многом сходны с полупроводниками, за исключением отсутствия у первых атомов примесей и наличия большого разрыва между зоной валентности и зоной проводимости. Изоляторы будут вести себя подобно полупроводникам с внутренней проводимостью, если их нагреть до достаточно высокой температуры так, чтобы термически возбудить электроны до зоны проводимости. Но обычно необходимая температура настолько высока, что материал расплавится до появления такой проводимости или (если это ионный кристалл) возникнет ионная проводимость. С другой стороны, любой механизм, способный возбудить электроны в зону проводимости, ведёт к появлению проводимости; подвижность электронов в этой зоне у изолятора намного ниже, чем у проводника. Примерами могут служить фотопроводимость, при которой электрон возбуждается за счёт поглощения света, и проводимость, возбуждаемая бомбардировкой быстрыми частицами, как это имеет место при облучении алмаза и других веществ. Как мы увидим далее, возбуждение большого числа электронов на более высокие энергетические уровни является типичной чертой прохождения быстрых частиц через вещество. В любом веществе, кроме изолятора, число возбуждённых таким образом электронов не настолько велико, в сравнении с нормальным числом электронов в зоне проводимости, чтобы произвести заметное изменение проводимости. В хорошем изоляторе при нормальных условиях число электронов проводимости практически равно нулю, поэтому возбуждённые электроны легко обнаружить.

Теплопроводность имеет два различных механизма. В хорошем проводнике электроны могут легко переносить энергию от одной точки кристалла к другой. Если в одной части кристалла они имеют значительно большую кинетическую энергию, соответствующую

более высокой температуре, то они быстро разнесут эту энергию по всему кристаллу. Хорошо известным следствием электронной теории металлов является постоянство отношения теплопроводности к электропроводности (закон Видемана-Франца). Это показывает, что хорошие электрические проводники также хорошо проводят тепло. Отношение коэффициентов электропроводности и теплопроводности зависит, однако, от температуры: при не очень высоких температурах теплопроводность почти не зависит от температуры, в то время как электропроводность в совершенном кристалле изменяется обратно пропорционально температуре. Неправильности решётки будут рассеивать электроны и изменять их способность переносить как ток, так и тепло и, следовательно, будут уменьшать эту часть теплопроводности. В дополнении к электронной теплопроводности имеется совершенно иной механизм теплопроводности, одновременно с ним действующий и проявляющийся в одинаковой степени как в изоляторах, так и в проводниках. Это — передача тепла, обусловленная колебаниями решётки. Если атом приведён в колебания, то он будет действовать на своих соседей и вынудит их принять участие в колебательном движении так же, как это происходит в системе гирек, соединённых пружинами. Теплопроводность этого типа много меньше электронной теплопроводности и не играет существенной роли в хороших проводниках, тогда как в изоляторах она целиком определяет явление передачи тепла. Теплопроводность решётки обусловлена, в основном, распространением акустических волн, электронная же теплопроводность — распространением электронных волн.

Как рассеяние электронных волн уменьшает электронную теплопроводность, точно так же всё, что ведёт к рассеиванию акустических волн, уменьшает теплопроводность этого типа. Поэтому можно ожидать, что последняя будет значительно уменьшаться за счёт искажений решётки.

Хотя в области теории электрических и тепловых явлений выполнено большое количество работ, их недостаточно. Хорошо поняты явления в германии и кремнии. Вполне удовлетворительное состояние достигнуто в понимании свойств чистых металлов.

Но теория ещё далека от того, чтобы можно было использовать данные по измерениям зависимости проводимости от температуры, полученные для любого материала, для суждения о природе смещений в решётке. Это является следствием не столько неудовлетворительного состояния теории, сколько недостаточной работы над проведением необходимых расчётов и отсутствия опытных данных, необходимых для проверки простых предсказаний теории с целью уверенного её использования для более сложных случаев.

4. Методы экспериментального исследования твёрдых тел

В предыдущих разделах были упомянуты некоторые экспериментальные методы исследования твёрдых тел, а именно, механические испытания: получение кривых напряжение — деформация, измерения твёрдости и ползучести, тепловые измерения энергии внутренних напряжений путём нагревания или растворения, электрические измерения проводимости и эффекта Холла в функции температуры. Можно добавить сюда измерения магнитной восприимчивости, дающие для магнитных веществ некоторые сведения об электронном состоянии атомов и обладающие необычайной чувствительностью для определения малых количеств ферромагнитных веществ. Все перечисленные методы позволяют получить лишь косвенные указания о положении атомов. Если бы имелись достаточно хорошо разработанные теории, связывающие рассматриваемые свойства с нарушениями решётки, то эти измерения можно было бы использовать для определения числа и природы таких нарушений. К сожалению, однако, почти во всех случаях теории недостаточно хорошо разработаны и не получили полной экспериментальной проверки, которая позволила бы доверять их выводам без больших оговорок. Необходимо дальнейшее существенное развитие теории каждого из явлений и обширные измерения различных свойств на одних и тех же образцах. Если картины нарушений решётки, определённые из измерений различных свойств, будут согласоваться, то это позволит доверять теориям этих свойств. Такое сопоставление было проведено, как упомянуто выше, для германия и кремния. Полученное при этом хорошее согласие вселяет в нас уверенность в правильности основных положений теории твёрдого состояния. Подобную работу пора проделать на большем числе материалов различных типов.

В противоположность этим свойствам, изучение которых даёт только косвенные свидетельства о нарушениях решётки, существует ряд опытных методов, позволяющих получить прямые данные. Основным среди них является метод дифракции рентгеновских лучей и полезным вспомогательным средством — методы дифракции электронов и нейтронов. Классическое применение дифракции рентгеновских лучей — это определение структуры кристаллов. Но этот метод может быть использован и для изучения нарушений кристаллической решётки. В результате работ ряда исследователей этот метод даёт значительно более точные данные о нарушениях кристаллической решётки, чем это имело место до недавнего времени. Изучение дифракции рентгеновских лучей на кристалле позволяет представить рассеивающую способность последнего в виде ряда Фурье. К сожалению, этот метод даёт возможность определить только амплитуды, а не фазы членов

ряда Фурье, так что нельзя без дополнительных предположений о фазах *) непосредственно суммировать эти члены и получить изображение полной структуры. Эти предположения требуют правильных представлений и физической интуиции от специалистов в области структурного анализа. Они должны определять структуры в соответствии с известными межатомными расстояниями и некоторыми другими физическими принципами.

Подобным же образом для искажённой решётки из рентгеновской дифракции можно получить ряд Фурье, определяющий смещения атомов из правильных положений в решётке. В этом случае мы опять имеем только амплитуды, но не фазы. Совсем недавно была разработана теория Фурье-изображения нарушений. Работа по синтезу этих рядов, выявляющих нарушения решётки, только начинается, так что исследователи, работающие в этой области, не имеют ещё достаточно опыта для того, чтобы сделать разумные догадки о фазах и о типах возможных смещений. Однако имеются достаточные основания надеяться, что по мере накопления опыта будет возможно определять смещения из синтеза рядов и получать представление о нарушениях в решётках почти настолько же определённое, как наши современные представления о структуре неискажённых кристаллов. При правильном употреблении этот метод должен стать наиболее ценным средством исследования нарушений решётки. Как было подчёркнуто ранее, положения атомов являются в некотором смысле независимыми переменными, т. е. величинами, из которых могут быть прямо рассчитаны все другие свойства искажённой решётки. Обратный процесс определения положений атомов из таких косвенных данных, как электрические или тепловые свойства, является менее надёжным.

Наряду с рентгеновским структурным анализом, являющимся методом непосредственного определения положений атомов и, следовательно, дающим представление об атомной модели твёрдого тела, существует другой рентгеновский метод, применимый для исследования зонной модели. Этот метод **) основан на изучении полос спектров испускания мягких рентгеновских лучей. Если один из электронов атома в кристалле выбит бомбардировкой быстрыми электронами, то внешний электрон того же самого атома может попасть на освободившееся место. Частота излучённых при этом рентгеновских лучей даёт разность энергий соответствующих уровней. Электрон, попадающий на свободное место

*) В последнее время достигнуты крупные успехи в теории структурного анализа, позволяющие подойти к решению задачи прямого определения фаз. (Прим. перев.)

**) Речь идёт о рентгеновской спектроскопии твёрдого состояния. См. более подробно: Э. Е. Вайнштейн, Рентгеновские спектры атомов в молекулах химических соединений и в сплавах. Изд. АН СССР, Москва—Ленинград, 1950. (Прим. перев.)

из валентной зоны кристалла, может притти с любого места этой зоны. Отсюда следует, что распределение энергии излучённых рентгеновских лучей по частотам даёт характеристику распределения уровней в зоне, если учесть поддающиеся определению вероятности переходов. Этот метод, предложенный в 1930 г. О'Брианом и Скиннером, позволил определить зонное строение многих металлов с малыми атомными весами, и полученные результаты в общем хорошо согласуются с теоретическими представлениями и подтверждают правильность теории. Следует применить этот метод к другим металлам, чтобы подтвердить и расширить наши знания в области зонной теории этих материалов. Метод следует применить также к сплавам и химическим соединениям и материалам с нарушениями в кристаллической решётке. Мы уже упоминали, что взаимодействие атома с одинаковыми соседями приводит к расширению энергетических зон. Если в кристалле какой-нибудь атом по той или иной причине окружён различными соседями, например в случае химического соединения, твёрдого раствора или наличия атомов примесей, то расширение соответствующих зон будет, вероятно, совершенно иным, чем в чистом металле. Зоны в искажённой решётке должны сужаться или расширяться в зависимости от характера напряжений. Многие особенности спектральных полос мягких рентгеновских лучей выявят интересные свойства сплавов и холоднодеформированных материалов. Эти явления ещё не были исследованы и применение рассматриваемого метода может быть весьма плодотворным.

К методу спектроскопии мягких рентгеновских лучей весьма близок метод фотоэлектрической эмиссии. В этом методе благодаря поглощению оптического излучения поверхностью материала электроны переводятся из валентной зоны в зону проводимости. Исследование этого явления раскрывает распределение уровней в валентной зоне и определяет ширину разрыва между зонами. Результаты метода хорошо согласуются с данными метода спектроскопии мягких рентгеновских лучей. Эти два метода, совместно с измерениями оптических спектров поглощения и изучением проводимости полупроводников в функции температуры, могут дать полные сведения о зонной структуре твёрдых тел. Однако они были применены пока к очень немногим материалам. Подобным же образом теория была разработана только для немногих материалов. Развитию теории твёрдого состояния должно сильно помочь расширение теоретических и экспериментальных работ в области исследования энергетических зон. Только после того, как природа зон станет известной, можно будет с достаточной уверенностью настолько разработать теории электропроводности и теплопроводности, что с их помощью можно будет предсказывать действие смещений в решётке на эти свойства.

II. ПРИРОДА РАДИАЦИОННЫХ НАРУШЕНИЙ

В предыдущих разделах мы рассмотрели некоторые данные теории твёрдого состояния. При этом особое внимание было уделено эффектам, производимым смещениями атомов. Ряд свойств, таких как плотность, сжимаемость и некоторые другие, сравнительно мало чувствителен к смещениям, в то время как электропроводность (особенно при низких температурах), теплопроводность и твёрдость особенно структурно-чувствительны. Атомные смещения влияют на эти свойства совершенно независимо от того, как были произведены смещения.

Изучение холоднообработанных материалов и их поведения при отжиге позволяет выяснить влияние зацеплений, создаваемых чисто механическим путём, на свойства материалов и дать теорию этих явлений. Когда такое исследование, проведённое методами, описанными в предыдущих разделах, продвинется достаточно далеко, тогда будут точно известны типы смещений, производимых различными видами механической деформации и влияние этих смещений на структурно-чувствительные свойства.

Под действием излучения возникают смещения, с одной стороны, сходные, с другой стороны, несомненно, отличные от смещений, производимых холодной обработкой. Однако ясно, что экспериментальные и теоретические методы исследования радиационных нарушений должны совпадать с методами, используемыми при изучении холодной обработки. Поэтому любая хорошо продуманная программа исследования радиационных нарушений должна быть связана с программой исследования теми же методами нарушений при холодной обработке. Это позволит иметь два независимых способа получения атомных смещений, которые можно изучать не только раздельно, но и сопоставив друг с другом, и этим глубже осветить природу каждого из явлений. Такая объединённая программа исследований должна увеличить наши знания не только в области радиационных нарушений, но также в физике и металлургии твёрдого состояния, что имеет важное значение для получения новых материалов со свойствами, недостижимыми в настоящее время. Подобная серьёзная работа, имеющая значение независимо от проблемы воздействия излучения, к сожалению, пока ещё не выполнена.

Рассматривая нарушения, производимые излучением, мы увидим, что различные виды излучений оказывают на материалы действие, в общих чертах сходное и отличающееся лишь в деталях. Так же как одновременное изучение нарушений, производимых холодной обработкой и излучением, является более плодотворным, чем исследование их в отдельности, так и изучение нарушений, производимых различными сортами первичных частиц — нейтронами, протонами или ускоренными в циклотроне дейтеронами и осколками

деления ядер, может дать больше, чем исследование нарушений, производимых частицами только одного сорта.

Если ограничиться только опытным изучением различных видов излучения, то сопоставление полученных результатов позволило бы определить лишь эмпирический переводный множитель, показывающий, во сколько раз разрушающее действие излучения одного вида больше, чем другого. Но в сочетании с эффективной теорией, объясняющей как различие, так и сходство в действии различных видов излучений, можно получить значительно больше, чем при изучении одного какого-нибудь вида излучения. Подобное исследование позволит применить наши знания к ранее не использовавшимся случаям облучения, например к воздействию быстрых нейтронов с мощностями потока, недостижимыми при современных экспериментальных возможностях.

Перейдём теперь к описанию типов нарушений, предположительно производимых различными видами первичного излучения, и изложению относящейся к этому вопросу теории, а также прямых экспериментальных методов, которые могут быть или были использованы для подтверждения этой теории.

5. Теория радиационного действия

Важными видами излучений, воздействующими на металлы и полупроводники, являются нейтроны и заряженные тяжёлые частицы. Остальные виды излучений, как фотоны, гамма-лучи и электроны, производят очень малое действие, за исключением изоляторов и химических соединений. Мезоны пока недоступны в достаточном количестве, чтобы производимое ими действие представляло собой практический интерес, хотя оно вероятно будет промежуточным между действием протонов и электронов.

Нейтрон почти не действует на атом, пока он не приблизится к ядру настолько, что вступают в действие ядерные силы. Сила взаимодействия между магнитным дипольным моментом нейтрона и магнитными полями, имеющимися в веществе, имеет значение для дифракции и рассеяния нейтронов, но она слишком мала для радиационных нарушений. Следовательно, поперечное сечение нейтрона при столкновении с атомом очень мало и нейтрон может проходить через значительные толщи вещества, испытав только несколько прямых столкновений с атомами, находящимися на значительных расстояниях друг от друга. Эти столкновения можно рассматривать как независимые события. Теория этих столкновений очень проста и хорошо понятна. Здесь могут быть, во-первых, упругие столкновения. Они являются единственным важным типом столкновений с быстрыми нейтронами и имеют значение для любых радиационных нарушений. При таких соударениях нейтрон передаёт значительную долю своей энергии атому, участвующему в соударении. Эта доля

энергии тем выше, чем ближе масса нейтрона к массе атома, испытывающего соударение (т. е. чем легче этот атом). Отскочивший нейтрон движется дальше до следующего столкновения, когда он отдаёт примерно такую же долю энергии (меньшую поэтому по абсолютной величине), и так далее, до полного замедления. В тепловом диапазоне скоростей может быть велика вероятность ядерных реакций, а если участвующий в соударении атом может расщепляться, то существует и вероятность расщепления ядра.

Действие нейтрона при столкновении заключается либо в образовании атома отдачи с большой энергией (часто десятки или сотни тысяч вольт), либо атома-осколка, возникшего при ядерном превращении или расщеплении. Атомы отдачи в большинстве случаев будут иметь заряд, так как часть их электронов теряется при столкновении. Поэтому мы можем начать изучение радиационных действий с рассмотрения действия, производимого атомом отдачи, т. е. тяжёлой заряженной частицей. В таком случае воздействие нейтронной радиации принципиально не отличается от действий, непосредственно производимых тяжёлыми заряженными частицами: протонами, дейтеронами, альфа-частицами из циклотронов или осколками ядер. Другими словами, перед нами проблема прохождения тяжёлой заряженной частицы через твёрдое тело. Если исследовать этот вопрос в общем виде, в зависимости от массы, заряда и энергии падающей тяжёлой частицы, то мы охватим все теоретические основы радиационного действия. Явление, конечно, зависит как от природы падающей частицы, так и от типа рассматриваемого твёрдого тела.

Повидимому, наиболее полное изучение этой проблемы было осуществлено и продолжает осуществляться Бором и его школой. Эта работа в значительно большей степени относится к действию быстрых частиц на газы (например, в камере Вильсона), чем на твёрдые тела, но многие, если не все, рассматриваемые явления будут одинаковы как в газе, так и в твёрдом теле, и сводятся к взаимодействию падающих частиц с отдельными атомами, не зависящему от агрегатного состояния. Рассмотрим поведение быстрых частиц, проходящих через газ. Вначале быстрые частицы сами, вероятно, несут заряд, который очень велик для быстрых частиц (подобно осколкам ядер в начале их пробега), но по мере замедления частицы уменьшается. Быстрые частицы получают этот заряд совершенно независимо от того, имели ли они его вначале или нет. Довольно очевидно, что если очень быстрая частица, например атом, проходит через слой вещества, то внешние, наиболее легко отделяемые электроны при этом отрываются.

Простое и довольно точное правило указывает, какие электроны будут удалены и какие нет: отрываются те электроны, орбитальная скорость которых меньше скорости атома. Электроны, имеющие большую орбитальную скорость, остаются связанными

с атомом. Так как внешние электроны имеют малые орбитальные скорости, а внутренние — большие, то это значит, что внешние электроны будут отрываться. При этом образуется положительный ион, у которого число удалённых электронов уменьшается по мере его замедления. Это уменьшение заряда обусловлено тем, что атом при своём движении через вещество легче приобретает электроны, чем их теряет. Частица находится в равновесии, определяемом тем, что электроны на границе между отрывом и захватом имеют орбитальную скорость, почти равную скорости частицы. Такое равновесие между ионизацией и захватом было известно ещё на заре ядерной физики в приложении к потере и захвату электронов альфа-частицами при прохождении последних через вещество.

Быстрый ион, проходящий через вещество, может действовать двояким образом на атомы, с которыми он сталкивается. Во-первых, он может испытать упругое соударение и передать атому отдачи кинетическую энергию. Этот тип столкновений в принципе мало отличается от упругих соударений нейтронов с атомами, которые мы уже рассматривали. Некоторые результаты будут те же самые; например, тем большая доля энергии падающего атома передаётся ударяемому атому, чем более близки их массы. Но здесь, вследствие заряженности иона, появляется другой процесс, сравнимый по важности с предыдущим: ударяющая частица может ионизовать или возбудить электроны ударяемого атома, что приводит к неупругому столкновению, при котором большая часть энергии падающей частицы переходит к отрываемым электронам, а не к атому отдачи. Можно показать, что вероятность ионизации, кроме других величин, зависит от квадрата заряда ударяющей частицы. Поэтому ясно, что когда падающая частица теряет энергию и поэтому теряет заряд *), то ионизация быстро уменьшается.

Если принять во внимание это уменьшение ионизации с уменьшением энергии, то окажется, что вся энергия быстрой частицы (кроме нескольких процентов рассеянной энергии) расходуется на ионизацию, в то время как при низких энергиях ионизация не имеет значения, и остающаяся энергия передаётся почти целиком атомам отдачи. Как будет показано дальше, именно эти атомы отдачи производят радиационные разрушения. Поэтому наибольшие разрушения будут производиться очень быстрой частицей в конце её пробега, когда она замедляется до сравнительно небольшой скорости, хотя суммарное разрушение, произведённое в ранней стадии движения, может быть также значительным. Граничная энергия, при которой имеет место переход доминирующей роли от процесса ионизации к упругим соударениям (например, когда расходование энергии частицы может быть отнесено наполовину за счёт одного процесса и наполовину за счёт другого) зависит от сорта падаю-

*) Точнее говоря, приобретает электроны. (Прим. перев.)

щей частицы и для лёгкой частицы будет меньше, чем для тяжёлой. Причиной этого является то, что в действительности эта граница ставится не энергией, а скоростью падающей частицы, соответствующая же кинетическая энергия пропорциональна массе частицы. Эта граничная энергия для протона меньше 10 000 эв, для атома среднего веса (например, атома углерода) — около 100 000 эв, в то время как для таких тяжёлых атомов, как осколки деления ядер, она может быть больше миллиона электрон-вольт. Отметим, что эти цифры согласуются с соответствующими данными для электрона, который в 1800 раз легче протона. Неупругие столкновения электрона с возбуждением и ионизацией имеют место при всех энергиях, превышающих несколько электрон-вольт, тогда как упругие соударения с передачей энергии ядрам отдачи происходят при более низких энергиях.

Мы можем теперь принять разумную гипотезу, что только энергия, передаваемая ядрам отдачи и приводящая к смещению атомов, вызывает радиационные нарушения. Позже мы вернёмся к этой гипотезе. Из неё сразу можно сделать некоторые выводы о нарушениях, производимых различными типами частиц. Возьмём сначала нейтрон. Быстрый нейтрон производит на своём пути изолированные атомы отдачи с энергией в десятки тысяч и сотни тысяч электрон-вольт. Эти атомы отдачи имеют промежуточную массу (за исключением очень лёгких или очень тяжёлых элементов) и поэтому сами участвуют в дальнейших столкновениях, при которых они будут расходовать половину своей энергии на ионизацию, а другую половину при упругих столкновениях, создавая вторичные атомы отдачи. Эти вторичные атомы отдачи будут иметь значительно меньшую энергию, настолько малую, что они почти не будут ионизовать, но будут производить третичные и так далее атомы отдачи со всё меньшей и меньшей энергией. Другими словами, значительная доля энергии каждого нейтрона (по крайней мере половина) будет израсходована на атомные смещения. Мы рассмотрим ниже, сколько действительно нарушений произойдёт при этом. Нарушения, произведённые отдельным нейтроном, состоят из некоторого числа изолированных областей, каждая из которых происходит от одного столкновения нейтрона с атомом. Потенциально возможна затрата значительной доли всей энергии нейтрона на образование радиационных нарушений.

Рассмотрим теперь осколок деления ядер. Он является тяжёлым атомом с начальной энергией порядка сотни миллионов электрон-вольт. Округлённо первые 97% энергии рассеиваются на ионизацию и только один или два процента всей энергии идёт на образование нарушений, что имеет место, когда энергия атома уменьшится до порядка миллиона электрон-вольт. Когда остающаяся энергия достигает этой величины, она будет передаваться атомам отдачи, которые в свою очередь будут производить вторичные

и третичные атомы отдачи так же, как и в случае нейтрона, так что полное потенциальное разрушение, производимое осколком деления, сравнимо с нарушением, производимым нейтроном, имеющим энергию в один или два миллиона электрон-вольт. Эффекты нарушения, однако, очень различны потому, что в случае тяжёлого иона они много более концентрированы. Поперечное сечение для столкновения иона с атомом в области упругого рассеяния много больше поперечного сечения для столкновения нейтрона с тем же самым атомом. Причиной этого является то, что ион может действовать на атом электростатическими силами и обычными межатомными силами отталкивания. Эти силы действуют на много больших расстояниях, чем ядерные силы, являющиеся единственными силами взаимодействия между нейтроном и атомом. Таким образом, осколок деления вместо нескольких упругих столкновений с изолированными атомами и образования отдельных областей нарушений на расстояниях до нескольких сантиметров, как это имеет место в случае нейтрона, будет производить атомы отдачи на очень близких расстояниях, образуя практически непрерывный след нарушений, протяжённость которого в твёрдом веществе может быть порядка нескольких сотых долей миллиметра. Разница между этими двумя явлениями обнаруживается в камере Вильсона и на фотопластинках при регистрации следов быстрых частиц. Первый метод является прямым экспериментальным средством исследования радиационных нарушений в газе, второй — в твёрдом теле.

Ускоренные в циклотроне лёгкие атомы (как, например, протон, дейтерон или альфа-частица) имеют начальную энергию в десять или двадцать миллионов электрон-вольт и, как мы уже видели, рассеивают большую часть своей энергии на ионизацию до тех пор, пока их энергия не достигнет порядка 10 000 эв. Соответственно, только около одной тысячной начальной энергии будет израсходовано на образование радиационных нарушений. Атомы отдачи от первичных столкновений будут иметь довольно малые энергии, значительно меньшие, чем атомы отдачи от нейтронов или от осколков деления ядер, и, следовательно, здесь вторичные и третичные атомы отдачи производят меньшие разрушения. Пробег такой ускоренной лёгкой частицы подобен пробегу осколка деления ядер и имеет порядок нескольких сотых долей миллиметра. Доля энергии, расходуемая такой лёгкой частицей на ионизацию, которая, по нашей гипотезе, не вызывает радиационных нарушений, оказывается даже больше, чем в случае осколка деления ядер. Надо вспомнить в связи с этим, что хотя ионизация не влечёт за собой разрушений, она приводит к нагреву образца, и при любом эксперименте по исследованию радиационных нарушений необходимо это тепло удалить.

Разовьём изложенные соображения в нескольких направлениях. Сначала дадим критику современной теории, приложения которой

были нами изложены, и рассмотрим пути улучшения этой теории, а также экспериментальные методы для прямой проверки теории. Далее обсудим относительные свойства и сравним различные виды излучений с точки зрения познания природы радиационных нарушений, принимая во внимание действительно доступные источники излучений. Затем перейдём к более подробному изучению радиационных нарушений в твёрдых телах, отличающихся от нарушений в газах и изолированных атомах и подтверждающих предположение, что только энергия атомов отдачи, а не энергия ионизации обуславливает появление нарушений. В заключение рассмотрим различные типы твёрдых тел и сравним ожидаемые в них нарушения с имеющимися экспериментальными данными.

6. Критика современного состояния теории радиационного действия

Мы уже указывали, что главный вклад в теорию радиационных нарушений был сделан Бором. Имеются также опубликованные материалы и других авторов. Никто из них, однако, не вышел за рамки основной работы Бора, хотя они и расширили её в детальных приложениях к твёрдым телам. В настоящее время теория радиационного действия достаточно хорошо разработана для быстрых частиц. В области же теории медленных частиц необходима большая дальнейшая работа.

Если два ядра, лишённые электронных оболочек и обладающие энергиями в несколько миллионов вольт, приближаются друг к другу, то они оттолкнутся только сблизившись на расстояние, сравнимое с размерами ядер. Теория столкновения оперирует с параметром удара — расстоянием наибольшего сближения при лобовом ударе; эта величина порядка 10^{-13} см. То, что атомы или ионы в действительности окружены электронными оболочками, почти не существенно. Время столкновения, как это можно определить, столь мало, что ядра сближаются и удаляются друг от друга за промежуток времени, короткий в сравнении с периодами вращения электронов по их орбитам, так что перестройка электронов не успевает осуществиться, и их экранирующее действие остаётся неизменённым. Поэтому такие столкновения будут подобны классическим столкновениям альфа-частиц и ядер в опытах Розерфорда по рассеянию. Теория этого опыта, являющаяся хорошо известной теорией столкновений, прямо приложима к описанному ранее случаю. Эта теория столкновений имеет действительно твёрдое обоснование. Поперечное сечение отдачи в этом диапазоне энергий представляет собой круг с радиусом порядка параметра удара, что объясняет очень малое поперечное сечение упругого рассеяния для быстрых частиц.

В том же самом диапазоне энергий очень быстрых частиц очевидно, что, ввиду малости поперечного сечения упругого рассеяния, в большинстве соударений сталкивающиеся ядра не подойдут до-

статочно близко для того, чтобы произошло упругое рассеяние, но пройдут вместо этого через электронные облака. Здесь опять столкновение произойдет настолько быстро, что электроны не смогут перестроиться за время столкновения. Результатом такого столкновения окажется ионизация. Этот вопрос рассматривается с помощью разложения в ряд Фурье электрического поля падающей частицы, быстро меняющегося при прохождении последней через атом, подобно тому, что имело бы место при суперпозиции монохроматических световых волн, и затем рассматривается действие этих волн раздельно, как это делается при исследовании фотоэлектрического эффекта. Этот вопрос, хотя и более сложен, чем рассеяние α -частиц, но вполне разрешим и соответствующие решения точны. В этом диапазоне энергий мы впервые встречаем случай, когда в зависимости от агрегатного состояния мишени возможно различное действие частиц. Как мы уже упоминали, электроны, выбитые из атома, ведут себя подобно фотоэлектронам и переходят на ионизованные или возбужденные энергетические уровни. В твердом теле имеется зонная структура уровней и поэтому расположение возбужденных энергетических уровней резко отличается от расположения уровней в газе. Вероятности ионизации в твердом теле и газе поэтому должны быть совершенно различными. Однако исследование показывает, что при средних энергиях порядка десяти или двадцати электрон-вольт, получаемых ионизованным или возбужденным электроном, различие между распределениями энергетических уровней в твердом теле и газе невелико и, следовательно, в обоих случаях результаты должны быть сходны.

Таким образом, можно ожидать, что теория будет применима для энергий порядка нескольких миллионов вольт. Эти предположения подтверждаются хорошим согласием теории с опытными данными, полученными в камере Вильсона при определении длины пробега и ионизации на единицу пути для осколков деления ядер и других частиц с высокой энергией. Следует провести большее количество таких экспериментов. Следует провести также опыты с твердыми телами, например со стопками тонких фольг. Эти опыты позволяют сравнивать значения теоретически предсказываемого пробега быстрых частиц в твердых телах с экспериментальными данными. Здесь мы должны ожидать скорее подтверждения теории, чем каких-либо неожиданных новшеств.

Иначе обстоит дело для более медленных частиц. К сожалению, как мы уже видели, как раз в этом диапазоне энергий происходят максимальные радиационные нарушения, так как большая часть энергии первичных частиц переходит к атомам отдачи. Совершенно ясна причина, по которой теория столкновений быстрых частиц должна давать плохие результаты в области медленных частиц. Если поперечное сечение упругого рассеяния становится больше, а поперечное сечение ионизации уменьшается, то это соответствует

столкновениям, при которых ядра не сближаются на столь малые расстояния, как в случае столкновения частиц с высокой энергией. Здесь ядро одного атома уже не проникнет во внутренние электронные оболочки другого. В этом случае нельзя рассматривать межатомное отталкивание одних только ядер без учёта электронного экранирования. Бор сделал первую попытку рассмотреть это экранирование, но на основе довольно грубой атомной модели. Зейтц применил несколько более тонкий метод. Можно видеть, что при таких столкновениях, происходящих в течение более длительного промежутка времени, чем столкновения очень быстрых частиц, внутренние электроны могут сделать много оборотов за время столкновения и поэтому способны изменить своё движение, что приводит, в свою очередь, к изменению экранирования и межатомного отталкивания. При достаточно медленных столкновениях расстояния наибольшего приближения сталкивающихся атомов сравнимы с межатомными расстояниями в твёрдых телах, находящихся под давлением. Время таких столкновений сравнимо с периодами вращения наружных электронов. При этих условиях электронная система атома может перестроиться так, что она будет сходна с электронными системами атомов твёрдого тела, находящегося под давлением, или атомов, приближающихся друг к другу во время молекулярных колебаний. Из теории межатомных взаимодействий мы знаем природу сил отталкивания, возникающих при приближении атомов друг к другу. Несмотря на возможность рассмотрения столкновений с такой точки зрения, здесь не было сделано сколько-нибудь полной работы.

Состояние теории медленных частиц таково, что в этой области необходимо проделать ещё большую работу и проверить её экспериментально. Можно ожидать, что действие частиц с малой энергией в твёрдых телах и в газах будет совершенно различным. В твёрдом теле атом, обладающий достаточно малой энергией, при столкновении с соседним атомом не переводит его в атом отдачи, как это происходит в газе, поскольку соударяющийся атом отбрасывается назад своими соседями, которые и поглощают энергию отдачи подобно амортизатору. Здесь мы встречаемся с проблемой столкновений в твёрдых телах, которую разберём ниже. Желательно экспериментально изучить такие столкновения в газе, где относительно легко проверить теорию, которая обещает быть довольно сложной. Эксперименты принципиально нетрудны. Необходимо только ускорять тяжёлые частицы до относительно низких энергий, порядка нескольких сотен тысяч вольт и даже меньше, что можно осуществить во многих типах ускорителей, а затем исследовать их упругое рассеяние в газе и производимую ими ионизацию. Результаты этой теории и экспериментов необходимы для заполнения серьёзных пробелов в теории. Эти пробелы делают сомнительными все современные оценки числа смещённых атомов при радиационных нарушениях.

7. Сравнение различных типов излучений в опытах по радиационным нарушениям

В предыдущих разделах мы видели, что первичное действие различных типов излучений на твёрдые тела совершенно различно. Но в конечном счёте большинство нарушений производится вторичными и третичными атомами отдачи, ибо первичные частицы, замедляясь до достаточно малых скоростей, рассеивают почти всю свою энергию в упругих столкновениях. Это позволяет предположить, что радиационные нарушения, производимые различными типами излучений, не будут сильно различаться. Кажется, что это предположение подтверждается уже проделанными опытами. Надо провести дальнейшую работу по проверке этого предположения. Если оно окажется верным, то вопрос о том, какой тип излучения следует употребить для изучения радиационных нарушений, станет вопросом удобства.

Существенное различие в характере радиационных нарушений ясно из проведённых выше рассуждений. Длина пробега нейтронов велика, так что они могут проходить через образцы обычных размеров и, сталкиваясь с отдельными атомами внутри образца, будут производить отдельные центры нарушений по всему объёму образца. Таким образом, образец, облучённый в реакторе, покажет объёмный эффект, благодаря чему здесь удобно употреблять большие образцы. Частицы, ускоренные в ускорителе, имеют малую длину свободного пробега и поэтому они будут производить нарушения только вблизи поверхности облучённого материала. В этом случае исследование эффектов облучения должно производиться в микроскопическом масштабе. Осколки деления ядер также имеют малые длины свободного пробега, и здесь могут быть два случая, в зависимости от распределения расщепляющихся атомов. Если они рассеяны внутри образца, то осколки деления, даже при наличии короткого пробега, будут возникать повсюду в образце и поэтому эффект будет объёмным. В то же время, если образец не содержит расщепляющихся атомов и помещается вплотную к образцу, испускающему осколки ядерного распада, то результат будет тот же, как при бомбардировке на циклотроне или другом ускорителе: здесь нарушения концентрируются вблизи поверхности. Различные типы облучения отличаются главным образом с практической точки зрения количеством энергии, затрачиваемой на ионизацию (а следовательно, на тепло) по отношению к энергии, получаемой атомами отдачи.

Мы видели, что при нейтронной бомбардировке большая доля энергии бомбардирующих частиц уносится ядрами отдачи и приводит к радиационным нарушениям. В то же время при бомбардировке на циклотроне и осколками деления ядра отдачи получают только небольшую долю энергии и поэтому здесь отвод тепла

становится серьезной проблемой. Эта проблема особенно трудно разрешима, когда расщепляющийся материал распределён по всему образцу, что имеет место при облучении в реакторе, где нейтроны могут производить деление ядер. Практическая проблема отвода тепла из внутренности массивного образца трудно преодолима, так как этот отвод должен осуществляться путём теплопроводности. Проблема отвода тепла при бомбардировке в ускорителях естественно проще разрешима, так как тепло возникает на поверхности и, следовательно, образец достаточно поместить на интенсивно охлаждаемый массивный материал. Во всех этих случаях, однако, проблема контроля температуры сложнее, чем при прямой нейтронной бомбардировке, когда легко сохранять образец холодным. Вопрос температуры становится серьезным, если мы вспомним, что радиационные нарушения легко исчезают при отжиге. При этом скорость отжига сильно зависит от температуры. Поэтому опыты, проводимые при повышенной температуре, что, вероятно, имеет место при плохом охлаждении, могут дать очень неточное представление о том, что будет происходить при низкотемпературном облучении. Контроль температуры при опытах с облучением как в ускорителях, так и в реакторах является очень важной технической проблемой.

Почти вся энергия падающих нейтронов может затрачиваться на образование радиационных нарушений в отличие от малой доли энергии, расходуемой на нарушения ускоренной частицей. Но в ускорителях возможно получить потоки, значительно превосходящие потоки частиц, получаемые в экспериментальных реакторах. Простые соображения показывают, что радиационные нарушения, производимые при облучении в ускорителе, возникают с большей скоростью, чем если бы образец облучался в реакторе. Таким образом, облучение в ускорителе имеет практические преимущества. Эти преимущества частично уравниваются, однако, тем, что в отличие от циклотронов реактор действует в течение долгих промежутков времени. Поэтому в последних долговременное облучение осуществляется очень просто. Все экспериментальные реакторы позволяют также проводить одновременно большее число опытов, чем это возможно в циклотроне. Для образцов, которые по практическим причинам последующих исследований должны быть большими, а их облучение — однородным, очевидно преимущество употребления реактора. Для основных опытов, с другой стороны, имеются преимущества у обоих типов облучателей. Очевидным преимуществом ускорителя является возможность употребления различных типов ускоренных частиц, регулирование их энергии и общее регулирование условий опыта. В реакторе, где многие эксперименты производятся одновременно, где условия во время действия реактора относительно неизвестны экспериментатору, тщательный контроль этих условий является много более трудным.

Что касается употребления разнообразных частиц с различными энергиями в экспериментах с ускорителями, то можно сделать больше, чем было сделано до сих пор. Такая работа была проделана только с циклотроном. Мы уже видели, что это малоприспособленный путь для осуществления эксперимента, так как ускоренная в циклотроне частица с энергией в десять или двадцать миллионов вольт рассеивает очень малую долю своей энергии на радиационные нарушения до тех пор, пока она не замедлится до нескольких десятков киловольт. Вся остальная энергия уходит на нагревание и с точки зрения радиационных нарушений растрачивается напрасно. Это тепло очень трудно удалить при опыте. Для этого типа опытов, кажется, много преимуществ имеет применение частиц с низкими энергиями порядка миллиона вольт, которые можно получить в недорогом генераторе типа Ван-Граафа. Здесь производится почти столько же нарушений на одну частицу, как и на одну частицу, полученную в циклотроне, но в первом случае производится много меньшее количество подлежащего удалению тепла. Кроме того, в генераторе типа Ван-Граафа легче переходить от одного типа частиц к другому. Следует высказаться за применение для исследования радиационных нарушений ускоренных тяжёлых ионов, например ионов аргона или другого подобного элемента, поскольку мы уже видели, что у тяжёлых ионов при энергиях около миллиона вольт много большая доля энергии переходит в радиационные нарушения, чем у лёгкого иона. Конечно, при такой низкой начальной энергии ионов пробег частиц будет соответственно меньшим. Та часть пробега, при которой частицы обладают высокой энергией, расходуемой главным образом на ионизацию, здесь будет исключена. Опыты будут тогда производиться в ещё более микроскопическом масштабе, чем при облучении в циклотроне. Но это не является непреодолимым препятствием. Тяжёлый ион, обладающий энергией в миллион вольт, сталкиваясь с мишенью, при значительно меньшем нагревании производит почти столько же нарушений, как осколок деления с энергией в сто миллионов вольт. Тяжёлые ионы поэтому со многих точек зрения являются желательным типом частиц для исследования радиационных нарушений.

В этой связи удобно упомянуть ещё одну черту радиационных нарушений, которую мы до сих пор оставляли в стороне. Частицы, используемые при бомбардировке, остаются внутри образца, когда достигают конца своего пробега. Если частица является атомом, выбитым первичным нейтроном, то она будет того же сорта, что и атомы вещества, и будет являться смещённым атомом, а не атомом примеси. С другой стороны, осколок деления или атом, выброшенный из ускорителя, может остаться внутри образца как атом примеси, в случае если этот образец не является тонкой фольгой. Тогда после длительного облучения в материале

может оказаться достаточно атомов примеси для заметного изменения его свойств. Этот тип радиационных нарушений может играть очень важную роль. Если атомы примеси растворимы в маточной среде, то получающийся твёрдый раствор будет иметь повышенные твёрдость и удельное электрическое сопротивление. Если растворимость отсутствует, то атомы примесей будут образовывать некоторые области, которые оказывают влияние на твёрдость, электрическое сопротивление и др. свойства. Это влияние в некоторых случаях настолько велико, что сравнимо с влиянием действительного смещения атомов в кристалле. Употребляя описанные выше методы, можно исследовать атомы примесей и оценить производимые ими эффекты. Поразительного со многих точек зрения действия можно ожидать от атомов инертного газа, образованных при делении ядер и совершенно не растворимых в любом твёрдом веществе. Эти атомы могут образовывать газовые карманы, которые будут, очевидно, очень неблагоприятно влиять на свойства материала, особенно на его механическую прочность. Предложенное выше применение ускоренных атомов аргона для исследования радиационных нарушений позволяет задерживать атомы аргона внутри вещества и таким образом моделировать действие осколков деления.

8. Характерные черты радиационных нарушений в твёрдых телах

До сих пор при рассмотрении радиационных нарушений мы употребляли теорию, не учитывающую действительную природу твёрдого состояния. Мы употребляли простое правило, что энергия упругого соударения атомов переходит в радиационные нарушения, в то время как энергия, расходуемая на ионизацию, таких нарушений не даёт. В этом разделе мы рассмотрим это предположение более детально, стараясь получить определённую картину радиационных нарушений и отсюда вероятное состояние материала, имеющего такие нарушения, а также ожидаемые типы нарушений.

Мы уже видели, что исследованию подлежит типичная проблема заряженной частицы с высокой энергией, проходящей через твёрдое тело. При достаточно высоких энергиях (граничная энергия определяется типом частицы) большая часть энергии будет расходоваться на ионизацию. Посмотрим сначала, почему справедливо положение, что эта энергия не расходуется на радиационные нарушения. Первый путь подтверждения этого предположения вытекает из замечания, высказанного в начале обзора, а именно, что состояние твёрдого тела зависит от расположения атомов в веществе. Это связано с тем, что электроны могут менять своё состояние так быстро, что они приходят почти немедленно в равновесную конфигурацию. Отсюда можно предположить, что энергия ионизации некоторого числа электронов, возбуждённых падающей частицей,

очень быстро распространяется по всему твёрдому телу и уменьшается до достаточно низкого значения на единицу объёма, благодаря чему этой энергией можно пренебречь. Другой путь — это сравнение двух механизмов теплопроводности, рассмотренных нами в одном из предыдущих разделов. Вспомним, что электронная теплопроводность играет более существенную роль, чем передача тепла, обусловленная колебаниями решётки. Ионизованные электроны будут способны таким путём очень быстро рассеивать свою энергию, особенно с помощью электронной теплопроводности. То же самое происходит и в изоляторе, так как там ионизованные электроны сами могут переносить тепловую энергию. Всё это происходит за время, короткое в сравнении с промежутком, необходимым для рассеяния энергии атомными колебаниями.

Конечно, этот довод в некотором смысле правдоподобен. Мы знаем, что общие принципы теплового равновесия требуют, чтобы энергия, первоначально переданная определённым степеням свободы в веществе, например электронному движению, с течением времени распределилась по всем другим степеням свободы. Таким образом, энергия ионизации в конечном счёте частично перейдёт в энергию атомных колебаний, т. е. в обычную тепловую энергию. В действительности, в металле, например, почти вся энергия в конечном счёте переходит в тепловую, так как в металле почти вся теплоёмкость заключается в атомных колебаниях и почти нет электронной теплоёмкости. В основном это соблюдается и для других типов твёрдых тел. Нас интересует, однако, не конечное равновесие, а кинетика его достижения. Способ, с помощью которого энергия электронов может переходить в энергию колебания ядер, очевиден. Может случиться, что электроны при их движении вокруг данного атома распределяются так, что они не уравновешены, а это соответствует большему заряду на одной стороне атомного ядра, чем на другой. Это приведёт к неуравновешенному электростатическому притяжению ядер, которое в свою очередь заставит ядра колебаться, и таким путём энергия будет передаваться от электронов к ядрам. Вопрос лишь в том, как быстро протекает этот процесс по сравнению с распространением возбуждения электронов по всей решётке. Такой вопрос не рассматривался теоретически настолько тщательно, как следовало бы это сделать. Имеются указания, что обмен энергией между электронами и ядрами протекает медленно по сравнению с распространением энергии электронов, так что к тому времени, когда ядра воспримут энергию колебаний, электронная энергия будет почти полностью рассеяна. Отдельные атомы получают относительно малую энергию колебаний, но этого количества будет уже достаточно, чтобы возникла проблема охлаждения, о чём мы упоминали в связи с облучением на циклотроне. Но этой энергии всё же недостаточно для производства радиационных нарушений, ибо, как мы увидим

далее, атом должен получить много большую тепловую энергию до того, как он сместится в решётке, и это нарушение делается постоянным.

Таким образом, мы рассмотрели подтверждения нашего предположения о том, что энергия электронов обычно не приводит к радиационным нарушениям. Единственным важным исключением в этом обобщении являются изоляторы. Здесь, как мы уже упоминали в начале нашего обзора, электронная проводимость настолько мала, что электроны могут оставаться в неравновесных состояниях в течение долгих промежутков времени. Мы имеем несколько совершенно различных явлений, повидимому, подтверждающих этот факт. Во-первых, мы можем упомянуть случай кристаллического счётчика, например алмазного счётчика. Частица с большой энергией, проходя через алмаз (например, альфа-частица с энергией порядка миллиона вольт), произведёт, главным образом, возбуждение электронов в зону проводимости. Если алмаз находится в электрическом поле, то эти электроны будут переносчиками тока, который может быть затем усилен, что позволяет применять этот материал для счёта падающих частиц. Электроны собираются в различных частях кристалла, будучи захваченными в «ловушки», и таким образом производят постоянные нарушения типа, который скорее можно отнести к возбуждению электронов, чем к смещению ядер. Определение числа электронов, производимых одной падающей частицей, даёт в действительности ценное подтверждение общей теории ионизации быстрыми тяжёлыми частицами.

Подобное явление наблюдается также в некоторых кристаллах — изоляторах, таких, как щёлочно-галогидные соединения, где, как это хорошо известно, электроны могут захватываться определёнными неоднородностями кристаллической решётки, известными под названием *F*-центров. Электроны в таких кристаллах могут оставаться в течение долгих промежутков времени в *F*-центрах, что приводит к потемнению вещества и другим изменениям физических свойств. Такой захват электронов может вызываться как возбуждением электронов в зону проводимости при прохождении тяжёлой частицы, так и другими механизмами: возбуждением электронов при поглощении света, гамма-лучей или падающих электронов. Это и есть упомянутый в нашем введении случай, когда электроны и фотоны могут производить радиационные нарушения. Здесь эти типы излучений производят радиационные нарушения, хотя их энергия с некоторым заметным коэффициентом отдачи переходит только к электронам. Только потому, что эти вещества являются хорошими изоляторами, захваченные электроны могут оставаться значительные промежутки времени не будучи нейтрализованы проводимостью, как это случилось бы за чрезвычайно короткое время в таком хорошем проводнике, как металл.

До некоторой степени подобным исключением из общего правила, гласящего, что возбуждение электронов не производит радиационных нарушений, является химическое действие излучений. Свойства химических соединений, особенно ковалентных соединений, подобны плохим проводникам: здесь электрон может быть смещён из одной ковалентной связи в другую внутри молекулы. Вероятность его возврата в прежнюю связь настолько мала (молекула является плохим проводником), что в молекуле происходят необратимые изменения, ковалентные связи изменяются или нарушаются, вследствие чего происходит химическая реакция. Это происходит в том случае, если время, необходимое для возвращения электрона в первоначальное положение, велико по сравнению со временем реакции. В действительности большинство химических реакций, вызываемых излучением, имеют такое происхождение и в большей мере обусловлены возбуждением электронов, чем возникновением ядер отдачи, хотя последние также влияют на химические процессы. Имеются достаточные причины думать, что биологическое действие излучения может возникать таким же путём, т. е. в результате изменения одной конфигурации электронов в другую, причём роль ионизации значительно больше, чем появления ядер отдачи. В биологических объектах имеются очень большие молекулы, обладающие очень плохой проводимостью, вследствие чего для перехода метастабильной конфигурации в равновесное состояние требуется чрезвычайно долгое время. Изменения, вызываемые в таких молекулах, могут сохраняться в течение очень долгого времени или даже постоянно.

Хорошие изоляторы, в которых возбуждение электронов может произвести необратимые радиационные нарушения, являются исключением из обычно рассматриваемых случаев. Большинство твёрдых тел является довольно хорошими проводниками, и любой электронный эффект, как мы уже видели, может рассеяться до того, как он сможет произвести необратимое изменение в расположении ядер в веществе. Мы теперь подходим к другой стороне проблемы: каким образом появление ядер отдачи может привести к необратимым смещениям атомов от их правильного расположения в кристаллической решётке.

Мы видели, что к моменту, когда энергия тяжёлой частицы, движущейся через твёрдое тело, уменьшится до определённого уровня (в пределах от 10 000 эв для протона до величины, несколько большей миллиона электрон-вольт для тяжёлого атома), большая часть этой энергии будет рассеиваться в упругих соударениях. Перычная частица передаст значительную долю своей энергии некоторому количеству вторичных частиц. Каждая из этих вторичных частиц в свою очередь представляет собой тяжёлую частицу с низкой энергией, движущуюся через кристаллическую решётку. Каждая из этих частиц порождает третичные частицы и т. д.

Естественно спросить, когда остановится этот процесс? Что станет с частицами первичными, вторичными, третичными и т. д.? Имеются два пути рассмотрения этих вопросов, более или менее дополняющие друг друга и приводящие к сходным результатам. Во-первых, мы можем попытаться проследить историю каждой частицы: первичной, вторичной, третичной и т. д. и просмотреть, сколько каждая из них получает энергии и сколько она производит столкновений при дальнейшем образовании частиц. Мы можем считать, что атом будет выбит из своего положения в решётке, если он получит энергию больше определённого минимума. Этот минимум оценивается, вероятно, величиной порядка двадцати пяти электрон-вольт. Если атом получит энергию, меньшую принятого минимума, то эта энергия будет упругой или тепловой колебательной энергией и атом не оставит положение равновесия и не перейдёт в новое менее устойчивое положение. Таким путём мы можем найти полное число смещённых атомов. Этот метод был использован Зейтцем, Джеймсом и Брауном при теоретическом рассмотрении этой проблемы.

Второе приближение к этой проблеме является более статистическим или термодинамическим. Кинетическая энергия ядер является тепловой энергией. Процесс, при котором быстрый атом сталкивается с соседними и передаёт им свою энергию, является теплопроводностью. Что случится, если мы неожиданно введём большое количество тепла в некоторую локализованную точку решётки? Спросим, как это тепло распространяется и какова скорость, с которой падает температура. Кинетическая энергия не только первичных атомов, но и вторичных, третичных и всех тех атомов, чья энергия превосходит двадцать пять вольт, так велика, что соответствует чрезвычайно высокой температуре порядка нескольких сотен тысяч градусов по шкале Цельсия. Тогда ясно, что значительная область вещества вокруг следа первичной частицы будет нагреваться до очень высокой температуры. Таким образом, если, например, падающая частица передаёт энергию 100 000 электрон-вольт атомам отдачи, то когда эта энергия равномерно распределится по 25 эв на каждый атом, мы будем иметь 4000 таких атомов. Когда средняя энергия на частицу уменьшается до 1 эв, то при обмене этой энергии с соседними атомами мы будем иметь 10^5 частиц, энергия которых будет соответствовать температуре, превышающей точку кипения даже тугоплавкого вещества. Поэтому вокруг следа первичной частицы будет область с высокой температурой и испарённым материалом, что часто называется температурным пиком. С другой стороны, из такого маленького объёма тепло передаётся так быстро или скорость обмена кинетическими энергиями так велика, что область возбуждения очень быстро распространится и температура вещества внутри этой области быстро упадёт ниже точки кипения и начнёт приближаться к комнатной

температуре. Здесь мы имеем очень резкое тепловое колебание в малом объеме материала с последующим очень быстрым затуханием.

Мы можем спросить, далее, каково будет действие этого быстрого локального испарения и размягчения. Если процесс протекает внутри материала, как это будет в том случае, когда первичные атомы отдачи возникают при столкновении с нейтронами из реактора, то результат будет зависеть в некоторой степени от предыдущего состояния области, где происходит процесс. Если это часть совершенной кристаллической решётки, то почти невероятно, что после плавления и последующего затвердевания эта область останется совершенным кристаллом. Во время расплавления атомный порядок совершенно расстраивается, а застывание происходит так быстро, что нет возможности для правильной кристаллизации. Наиболее вероятным результатом будут тогда агрегаты очень маленьких кристаллов или даже аморфного вещества, нарушающие решётку ранее имевшегося кристалла. Это нарушение, повидимому, останется, если окружающая температура достаточно низка, так что отпуск происходит очень медленно, как это будет в случае материалов с высокой температурой плавления. Иначе обстоит дело с легкоплавкими материалами. Если при комнатной температуре отпуск протекает быстро, то нарушенная область быстро рекристаллизуется и по существу исчезает. Таким образом, при отсутствии отпуска мы должны ожидать в облучённом материале изменения свойств под действием зацеплений: упрочнение, увеличенное электрическое сопротивление и уменьшенную теплопроводность. Эти эффекты не наблюдаются, если имеет место отпуск.

Такие доводы наводят на мысль, что при достаточно долгом облучении должен проявляться эффект насыщения. После того, как все части материала однажды претерпели процесс расплавления и рекристаллизации, дополнительное облучение не произведёт дальнейших изменений. Каждое вновь образованное нарушение будет занимать место уже существующего. Будет достигнута максимальная твёрдость, сравнимая с упрочнением обработкой, будет наблюдаться максимальное изменение электропроводности и теплопроводности. Если мы примем, что зацепления, возникающие при радиационных нарушениях, не отличаются от зацеплений, возникающих при упрочнении обработкой, то такое состояние насыщения должно быть примерно тем же самым, как если бы опыт производился либо с материалом, упрочнённым обработкой, либо с материалом, испытавшим отжиг. Этот довод наводит на мысль, что облучение не будет, например, увеличивать скорость ползучести, так как оно приводит только к добавочному упрочнению. Такой вывод может оказаться неверным при рассмотрении ползучести в реальных условиях облучения. Предположим, что материал находится в зоне интенсивного облучения под нагрузкой. Каждый момент образуется

множество маленьких локальных расплавленных областей, в которых напряжение может уменьшаться. Наличие локальных областей делает скорость уменьшения напряжений большей, чем в отсутствии облучения. Это уменьшение напряжений и есть другой способ наблюдения увеличения скорости ползучести. Однако неизвестно, насколько значителен будет этот эффект.

Мы говорили о действии излучения в объёме образца. Однако на поверхности образца при бомбардировке в циклотроне или на поверхности тонкого образца (например, фольги) в любом случае облучения будут наблюдаться другие явления. Если одна из областей с местным повышением температуры проявляется на поверхности, то, очевидно, имеется вероятность испарения некоторого количества вещества, которое и будет потеряно образцом. Этот процесс подобен распылению вещества при катодной бомбардировке, при которой количество распылённого материала можно оценить по определённому количеству материала, доводимого до точки кипения действием падающей частицы. Это наводит на мысль, что большая часть из 10^5 атомов будет доведена до точки кипения падающей частицей и может испариться с поверхности. Это число, вероятно, слишком велико, так как некоторые из этих атомов будут находиться так глубоко внутри материала, что они замёрзнут прежде, чем успеют испариться. Всё же, если оперировать такими цифрами, то можно заключить, что при облучении фольга должна очень быстро разрушаться. Это подтверждается опытами с циклотроном, показывающими, что мишени из тонкой фольги, положенные на подложку из другого материала, совершенно исчезают по прошествии одного или двух дней, а также некоторыми опытами по разрушению обогащённых урановых фольг. Эффекты, о которых мы говорили в настоящем разделе, имеют очень большое значение при исследовании радиационных нарушений, и как раз для них теория особенно недостаточно разработана. Следует проделать большую работу по исследованию кинетики процесса нагрева, охлаждения, рекристаллизации и отпуска областей местных нарушений. Большинство теорий, которые до сих пор использовались, основаны на очень грубых предположениях: в них делаются попытки определить количества вторичных и третичных частиц с энергией выше некоторого принятого предела, например 25 эв , требуемой для смещения атома из узла решётки. Это очень грубое приближение с двух точек зрения. Во-первых, теория столкновения медленных частиц совершенно недостаточно разработана. Во-вторых, ничем не оправдано предположение, что указанный выше энергетический предел имеет какое-нибудь значение. Значительно ближе к истине, повидимому, представление, основанное на термодинамической и статистической модели, но теоретически оно до сих пор совершенно не разработано. В действительности картина будет значительно более сложной, чем мы её описали.

Например, при мгновенном нагревании малого объема внутри твердого тела возникает резкое повышение давления, приводящее к появлению ударной волны, уносящей часть энергии. Амплитуды движения атомов в ударной волне настолько велики, что их нельзя описать линейными законами. В действительности именно нелинейность движения соответствует возможности необратимого смещения атомов. Такая картина будет одним из приближений. Полное рассмотрение этих вопросов представляет собой трудную задачу, которую можно считать главной нерешенной проблемой теории радиационных нарушений.

III. РАДИАЦИОННЫЕ НАРУШЕНИЯ В РАЗЛИЧНЫХ ТИПАХ МАТЕРИАЛОВ

На основании разобранных в предыдущих разделах принципов можно сделать некоторые предположения об ожидаемых типах нарушений в различных материалах. В большинстве случаев имеются данные предварительных опытов, подтверждающие эти предположения. Дадим теперь краткий обзор различных типов материалов, сравнив сделанные предположения и результаты опытов, и рассмотрим пути дальнейшей работы. В нашем обзоре материалы расположены в порядке уменьшения металлических свойств: металлы (включая чистые металлы и сплавы), полупроводники, изоляторы, ковалентные молекулярные вещества.

9. Металлы

Из изложенного выше следует ожидать сходства радиационного действия на металлы с действием холодной обработки, т. е. следует ожидать увеличения твердости, так как облучение приводит к появлению зацеплений, препятствующих деформации сдвига. Эти зацепления также будут рассеивать электронные и тепловые волны, так что облучение приводит к увеличению электрического сопротивления и уменьшению теплопроводности. Максимальное изменение свойств под действием излучения должно быть, однако, сравнимо с максимальным действием холодной обработки. Таким образом, должно иметь место насыщение. Излучение должно действовать в меньшей степени на холоднообработанный образец, чем на отожженный, так как холоднообработанный образец уже имеет много зацеплений, которые просто заменяются другими при облучении. Насыщение при холодной обработке или облучении проявится тогда, когда в основном весь материал испытает такую деформацию, которую он способен выдерживать. Величина этих эффектов в данном материале сильно зависит от скорости процесса отпуска при комнатной температуре. Если металл отпускается, то по существу радиационные нарушения не наблюдаются. Если скорость отпуска очень мала, то действие радиационных нарушений

будет сравнимо с действием холодной обработки и будет уменьшаться при повышенных температурах.

Эти предположения подтверждаются опытными данными. Действие радиационных нарушений не наблюдается в таких металлах, как алюминий, у которого отпуск происходит при комнатной температуре. В то же время у меди, отпуск которой происходит при более высокой температуре, под действием излучения наблюдается упрочнение, сравнимое с максимальным упрочнением при холодной обработке. Наши знания об этих явлениях расширятся, если с помощью рентгеновских методов будет проведена серьёзная работа по определению типов зацеплений, возникающих в металле как под действием излучения, так и при холодной обработке. Сопоставление с относительными изменениями твёрдости и электросопротивления установит правильность предположений, что одинаковый тип зацеплений всегда приводит к одинаковым физическим следствиям, независимо от того, каким способом они были образованы. Это позволит также количественно измерить наибольшее число зацеплений, которое можно накопить в металле. Это должно быть связано с исследованиями отпуска и определениями теплот активации для процессов отпуска. Металлы, отпуск которых происходит при комнатных температурах, можно исследовать при пониженных температурах.

Поведение сплавов будет отличаться от поведения чистых металлов, так как излучение может оказывать влияние на такие процессы, как разупорядочение упорядоченной структуры и дисперсионное твердение, имеющее место в сплавах. В этом направлении проделана незначительная работа, показывающая характер ожидаемых результатов, но совершенно недостаточная для полного понимания вопроса. Так, в отношении разупорядочения хорошо известно, что сплав бывает упорядочен ниже определённой температуры и разупорядочен выше неё. Когда упорядоченный сплав облучается ниже температуры превращения, то он становится неупорядоченным, что проявляется в увеличении как твёрдости, так и электрического сопротивления. Максимальная твёрдость и сопротивление сходны со значениями этих величин для неупорядоченного сплава. Эти изменения остаются неопределённо долгое время, пока сплав находится ниже температуры отпуска. Очень желательно, хотя это до сих пор не было сделано, произвести определение рентгеновскими методами зависимости степени порядка от дозы облучения и отсюда установить прямое соотношение между степенью порядка и некоторыми физическими величинами — электрическим сопротивлением, твёрдостью и др.

Примером сплава с дисперсионным твердением является система Ве-Си. При высокой температуре может быть растворено больше Ве в Си, чем при низкой. Закалка с высокой температуры фиксирует при комнатной температуре твёрдый раствор с составом,

отвечающим более высокой температуре. Термическая обработка при некотором повышении температуры приводит к выделению избытка Be в форме $BeSi$. Включения выпавшей фазы в твёрдом растворе вызывают упрочнение и увеличение сопротивления. Облучение сплавов при различных степенях термической обработки приводит к дальнейшему увеличению твёрдости и сопротивления, значения которых приближаются к предельному насыщению, приблизительно равному максимальным величинам, достижимым при дисперсионном твердении. Из полученных до сих пор результатов совершенно не ясно, появляется ли этот эффект облучения за счёт зацеплений в решётке или из-за выпадения дисперсной фазы, вызванного радиационными нарушениями. Кажется правдоподобным, что последнее должно иметь место (по крайней мере до некоторой степени), так как при облучении имеет место нагрев областей, который при наличии пересыщенного состояния приводит к выпадению дисперсной фазы. С другой стороны, охлаждение локально нагретых областей, как мы уже указывали, соответствует очень быстрой закалке, поэтому вероятно, что благодаря этой закалке дальнейшего выпадения не будет происходить. Необходимо дальнейшее исследование подобных явлений, включая близкий и очень важный случай нержавеющей стали. Эту работу можно сочетать с теоретическими исследованиями с целью попытаться объяснить термическое состояние образца во время облучения.

Облучение металлов не приводит к каким-либо новым поразительным явлениям и не исключает их использование, как конструкционных материалов в реакторах. Ожидаемые относительно малые изменения свойств допустимы при их работе. Действие излучения на металлы проявляется также в ряде эффектов, которые хотя и более трудны для теоретического истолкования, но потенциально имеют важное практическое значение. При облучении увеличиваются скорости диффузии, коррозии и ползучести. Всё это должно иметь большое значение для материалов, используемых в конструкциях контейнеров, содержащих ядерное горючее и продукты распада, в холодильниках или коммуникациях реактора.

Из предыдущего ясно, что не следует ожидать в металле увеличения скорости ползучести после облучения. Но существует вероятность того, что ползучесть может быть большей во время интенсивного облучения, так как облучение может вывести из состояния равновесия достаточное количество атомов вещества и тем самым дать возможность напряжениям релаксировать быстрее нормального. По той же причине облучение будет, естественно, благоприятствовать любому процессу, требующему перемещения атомов. К числу таких процессов относятся диффузия и коррозия. Как теоретически, так и экспериментально не выяснено, будут ли эти эффекты достаточно велики, чтобы иметь серьёзное значение. В этом случае с достаточной уверенностью нельзя полагаться на

теорию, поэтому опыты в этой области очень важны для определения дальнейшего направления работы. Следует отметить, что в этой области намечено проведение большого числа экспериментов.

Специальный случай радиационных нарушений в металлах возникает в образцах, содержащих расщепляющийся материал. Здесь по нескольким причинам могут ожидатьсЯ большие нарушения, чем в подобного рода твёрдых телах, не содержащих делящихся материалов, но также подвергнутых нейтронной бомбардировке. Во-первых, нейтрон, вызывающий ядерный распад, освобождает большое количество ядерной энергии в образце, так что общий запас энергии, потенциально способной произвести нарушения, значительно превосходит энергию, передаваемую одними нейтронами. Во-вторых, в то время как пробег нейтрона довольно велик и он производит только часть возможных нарушений в любом малом объёме, пробег осколка деления так мал, что разрушения, произведённые делением ядер, концентрируются в ближайшем соседстве с распадающимся атомом. В-третьих, осколки деления остаются внутри образца, действуя как атомы примеси и, следовательно, влияя на физические свойства материала, особенно если эти примеси представляют собой газообразные или другие нерастворимые в материале вещества.

Наблюдение, повидимому, подтверждает общие предположения, высказанные нами в связи с радиационными нарушениями в веществах, содержащих делящиеся материалы, обычно употребляемые как ядерное горючее в реакторах. Экспериментальные данные по этому вопросу очень скудны, в большей части из-за чрезвычайных экспериментальных трудностей по наблюдению делящегося материала после облучения вследствие его сильной радиоактивности. Из-за экспериментальных трудностей проблемы в настоящее время работа по исследованию радиационных нарушений в делящемся материале будет носить в большей части программный характер и будет посвящена тому, чтобы ответить на вопрос, вызывают ли большие нарушения какие-нибудь особенные формы ядерно-горючих элементов или нет. Однако после выполнения такой программной работы на различных типах горючих элементов с использованием для экспериментальных исследований лабораторий, оборудованных надлежащей защитой, несомненно, будет возможно получить более ясное и глубокое понимание поведения урана и его сплавов при облучении.

В связи с проблемами радиационных нарушений в металлах и, в особенности, в делящихся материалах, мы должны вспомнить, что было сказано в одном из предыдущих разделов о различии нарушений в массивных материалах и в материалах с большим отношением поверхности к объёму (в тонких фольгах). Напомним, что в последних следует ожидать значительного испарения с поверхности, приводящего к разрушению фольги в довольно короткое время.

10. Полупроводники

К наиболее типичным полупроводникам следует отнести элементы: Si, Ge, Se и Te, а также многие химические соединения, например Cu_2O , имеющие подобные свойства. Из элементов наиболее хорошо изучены Si и Ge вследствие их значительного применения в электронике в качестве выпрямителей и, в последнее время, транзисторов. Мы уже упоминали, что теория прекрасно подтверждается найденной экспериментально зависимостью числа носителей тока и их подвижности от температуры. Эти зависимости представляют особенно хороший материал для проверки основных представлений о природе радиационных нарушений. Однако при исследовании Si и Ge обнаружены по крайней мере два совершенно неожиданных и пока не объяснённых явления. Это обстоятельство требует продолжения работы.

Германий может приготавливаться с примесями типа доноров или акцепторов, т. е. иметь свойства *n*-типа или *p*-типа. В настоящее время установлено, что при бомбардировке германия любого типа возникают добавочные *p*-центры. Когда бомбардируется германий *n*-типа, то число отрицательных носителей уменьшается и сопротивление растёт. Это может быть истолковано в том смысле, что центры *n*-типа нейтрализуются вновь образующимися центрами *p*-типа. По мере увеличения дозы облучения число *p*-центров также увеличивается и образец приобретает проводимость *p*-типа. При дальнейшем увеличении дозы облучения его сопротивление уменьшается и он ведёт себя во всех отношениях как образец *p*-типа. С другой стороны, когда бомбардируется германий *p*-типа, то оказывается, что он просто получает добавочные *p*-центры. Это поведение германия легко объясняется, если принять, что дырка, остающаяся после выбитого из узла решётки атома, ведёт себя подобно центру *p*-типа. Такое предположение подтверждается независимыми данными. Благодаря описанным выше свойствам германия *n*-типа оказывается возможным готовить образцы с границей между *n*- и *p*-частями, облучая только одну половину образца. Таким образом, частично облучённый образец *n*-типа будет обладать выпрямляющими свойствами без необходимости использования точечного контакта *).

Казалось бы, что все эти свойства находятся в хорошем согласии. Но, как мы уже упоминали, при более тщательном изучении данных о поведении Si и Ge обнаруживаются два необъяснимых явления. Первое явление связано с действительным количеством нарушений. Исследование необлучённых образцов позволило установить очень точно число примесей *n*- и *p*-типов и их влияние на удельное сопротивление. Отсюда по изменению удельного сопротивления образца можно определить число центров *p*-типа, возник-

*) См. В. С. Вавилов, УФН 44, вып. 1 (1952). (Прим. перев.)

кающих под действием излучения. Опыты с облучением образцов как на циклотроне, так и в реакторе привели к установлению замечательного факта. При прохождении дейтерона или нейтрона через образец появляется только один центр *p*-типа на частицу вместо многих центров, как это следовало бы ожидать из описанной ранее общей картины радиационных нарушений. Для объяснения такого необыкновенного факта необходимо дальнейшее исследование. Возможно, что это явление связано с тем, что восстановление или отпуск нарушений происходит быстрее ожидаемого и большая часть нарушений исчезает до производства измерений. Однако такое предположение не согласуется с другими наблюдениями. При бомбардировке электронами в германии обнаруживаются нарушения, исчезающие при очень низких температурах. Нарушения, производимые нейтронами и дейтеронами, исчезают лишь при значительном повышении температуры. Здесь замечательно то, что большая часть изменений, производимых в материале падающей частицей, исчезает при комнатной температуре и поэтому эти изменения никогда бы не наблюдались, если бы для исчезновения остаточного эффекта не требовалась высокая температура.

Другое необъяснимое явление обнаруживается при сравнении Ge с Si и другими полупроводниками. Все ранее изученные свойства Ge и Si имеют значительное сходство. Однако при облучении Ge и Si ведут себя совершенно различно. Если облучать Si *p*- или *n*-типа, то сопротивление будет во всех случаях увеличиваться. То же самое найдено для других полупроводников. Это уже само по себе удивительное явление. Эффект увеличения сопротивления полупроводников при облучении настолько значителен, что из них можно сделать очень хорошие изоляторы, а это может иметь практическое значение. Эффект настолько велик, что его нельзя объяснить уменьшением подвижности носителей тока вследствие появления при облучении неоднородностей решётки, а следует отнести за счёт уменьшения числа самих носителей. Повидимому, излучение создаёт в решётке полупроводников ловушки, захватывающие носителей — электроны или дырки — и тем самым уменьшающие электропроводность. Здесь особенно непонятно такое различие в поведении Ge и Si. Хотя поведение Ge и Si при облучении более изучено, чем у других твёрдых тел, описанные выше явления показывают, что необходимо дальнейшее изучение этих материалов. Ряд исследовательских групп ведёт активную работу в этом направлении, однако и здесь остаётся широкое поле деятельности ещё для многих учёных. Например, рентгеновские исследования радиационных нарушений и исследование полос поглощения мягких рентгеновских лучей помогут ещё больше познать зонную структуру и неоднородности решётки. Кремний и германий являются настолько уникальными веществами для изучения целого ряда свойств, что очень желательно их дальнейшее исследование как с точки зрения радиационных нарушений, так и других свойств.

11. Ионные соединения и керамики

В этом разделе мы сгруппируем вместе изоляторы, включив щёлочно-галогидные соединения, типично ионные кристаллы и окислы металлов, карбиды, нитриды и такие соединения, которые имеют частично свойства ионных кристаллов и частично свойства ковалентных соединений. Некоторые элементы, типичным примером которых является алмаз, также являются изоляторами. Эти материалы имеют большие энергетические разрывы между валентной зоной и зоной проводимости. Они обычно не имеют электронов проводимости, а поэтому их электропроводность чрезвычайно низка. Их теплопроводность осуществляется только колебаниями решётки. Они хрупки при низких температурах; при нагревании становятся более пластичными. Действие излучения на щёлочно-галогидные соединения в течение многих лет привлекало внимание исследователей. Работа проводилась главным образом с бомбардировкой электронами или гамма-излучением. Как мы упоминали ранее, в изоляторах эти типы излучений могут вызывать радиационные нарушения. Наблюдаемые эффекты очень сложны и мы можем упомянуть только об их природе. При облучении в веществе образуются так называемые центры окрашивания и кристалл окрашивается или становится непрозрачным. Считают, что это происходит из-за захвата электронов в вакантных узлах решётки, которые обычно существуют в кристалле. Имеется большое разнообразие таких центров окрашивания с различными энергиями активации и различными типами оптического поглощения. При облучении образца светом с различными длинами волн эти центры претерпевают дальнейшие изменения, появляются другие центры. Это очень сложное явление и хотя оно, как мы уже сказали, изучалось в течение многих лет, но до сих пор ещё не полностью понято. Работа Прингсхейма в Аргонне показала, что нейтронное облучение щёлочно-галогидных соединений производит по существу те же самые нарушения, хотя и имеется некоторая разница по сравнению с гамма- или электронным излучением. Следует продолжить дальнейшее изучение этих явлений, так как они важны для основ теории ионных кристаллов.

Поведение щёлочно-галогидных соединений при облучении может дать указание, что следует ожидать в случае оксидов, карбидов и т. д., например, BeO , MgO , Be_2C и других подобных соединений щёлочно-земельных и других элементов, изученных менее полно. Эти материалы являются жаростойкими керамиками, годными для употребления при высоких температурах. Они, вероятно, будут употребляться в высокотемпературных реакторах. Эти материалы не были изучены так фундаментально, как щёлочно-галогидные соединения, и из них только BeO исследовался под облучением. Теплопроводность материалов при облучении уменьшается вследствие рассеяния тепловых волн на возникающих неоднородностях решётки.

Это уменьшение достаточно велико и приводит к большим термическим напряжениям в условиях больших температурных градиентов, что серьёзно ухудшает полезность данного материала. Также наблюдается уменьшение модуля Юнга и сопротивления разрыву, которое может быть результатом присутствия атомов между узлами решётки, приводящего к ослаблению последней. Разрушения в керамиках оказываются значительно большими, чем в большинстве металлов. Это, возможно, связано со способностью металлов к пластическому течению, уменьшающему чрезмерные внутренние напряжения. В керамиках вследствие их хрупкости внутренние напряжения не могут уменьшаться таким путём. Однако надо сделать некоторые оговорки о выводах из экспериментов, произведённых на сравнительно холодных образцах, относительно размеров радиационных нарушений в таких материалах в условиях высокотемпературного облучения. В этих материалах всегда возможно пластическое течение при высоких температурах, так что механические свойства могут быть лучшими при высокотемпературном облучении, чем при низких температурах. Возможна постановка большого числа опытов с керамическими материалами для глубокого выяснения их поведения при облучении. Сюда следует включить рентгеновские исследования, определения поглощённой энергии, удельного электрического сопротивления и эффекта Холла как функций температуры в широком диапазоне до и после отпуска, следующего за облучением. Интересные измерения механической прочности могут быть сделаны не только при высоких температурах, как мы указывали, но и при высоких давлениях. При высоких давлениях многие керамики, например TiO_2 , становятся значительно более пластичными и при испытаниях на разрыв иногда удлиняются до 40 процентов. В соответствии с этим представляет интерес изучение радиационных нарушений в таких материалах при наличии гидростатического давления и без него. Требуемые давления — порядка 20 000 или 30 000 атмосфер. Следовало бы провести оптические исследования, проделанные для щёлочно-галогенидных соединений, также с оксидами, карбидами и т. д. Имеются предварительные указания, что здесь могут быть получены интересные результаты. Оптические исследования желательно сочетать с исследованиями диэлектрической постоянной и потерь в функции температуры и частоты. Такие опыты дадут дополнительные сведения о числе возникающих под действием излучения вакантных узлов. С другой стороны, облучение ионных кристаллов даёт возможность получать образцы с достаточным числом вакантных узлов, поэтому исследования по определению скоростей диффузии в ионных кристаллах могут быть значительно ускорены. Полезные сведения о зонной картине как щёлочно-галогенидных соединений, так и керамических материалов могут дать исследования их электронных зон с помощью спектров мягких рентгеновских лучей. Интересные данные могут дать исследования

изменения электропроводности под действием излучения. Такие эксперименты со временем позволят сделать выбор среди существующих теорий этого явления.

Подводя итоги, следует сказать, что в области исследования изоляторов необходима большая работа, как с точки зрения теории твёрдого состояния, так и в отношении радиационных нарушений. Здесь следует ожидать более интересных и разнообразных результатов, чем в металлах.

12. Молекулярные твёрдые соединения

Мы уже видели, что в молекулярных соединениях радиационное действие, вероятно, должно иметь совершенно отличную природу от большинства твёрдых тел. Здесь радиационные нарушения являются скорее результатом ионизации или возбуждения электронов, производимых излучением, чем образования ядер отдачи. Отсюда, вероятно, должно наблюдаться сходство действия как гамма-лучей и бомбардировки электронами, так и бомбардировки тяжёлыми ионами. Область исследования радиационных нарушений в химических веществах является одной из наиболее богатых и разнообразных из-за огромного числа типов химических веществ. Что касается практических приложений, связанных с конструированием реакторов, то из молекулярных соединений наибольшее значение имеют пластмассы всех типов и смазочные масла. В общем, во всех этих материалах обнаруживаются очень серьёзные и поразительные радиационные нарушения, сильно меняющиеся от одного материала к другому. Причины этого пока ещё не очень хорошо поняты.

Оставив на момент области твёрдых тел, укажем на важную химическую проблему, связанную с использованием воды в реакторах. Вода диссоциирует под действием излучения, что делает её много более активной, чем в обычном состоянии. Излучение поэтому может ускорять химические реакции и коррозию.

Первичным механизмом радиационных нарушений в молекулярных соединениях, как мы уже упоминали, является образование ионов или возбуждённых атомов в веществе. Вероятность их образования составляет часть фундаментальной проблемы исследования ионизационного действия частиц, проникающих в вещество. Как только эти ионы образовались, дальнейший процесс относится к области химической кинетики, при которой происходят последовательные превращения ионов или возбуждённых атомов, образование свободных радикалов, последующее взаимодействие свободных радикалов и образование новых химических веществ. Изучение таких процессов прольёт свет и на другие проблемы кинетики реакций. С другой стороны, любое расширение знаний кинетики химических реакций поможет исследованиям радиационных нарушений в молекулярных соединениях. Исследования газовых реакций часто проводятся с применением масс-спектрометров с целью наблюдения различных

продуктов реакции. Изучение газовых реакций представляет очень удобный путь приближения к общей проблеме радиационных нарушений в молекулярных соединениях. В жидкостях и твёрдых телах эти явления усложнены из-за короткого времени существования свободного радикала с момента его возникновения и до того, как он стабилизируется при столкновении с другим атомом или молекулой. На основании современных экспериментальных работ по исследованию радиационных нарушений в молекулярных соединениях можно сделать несколько обобщений. Первое обобщение касается органических соединений. В ароматических соединениях наблюдается меньше нарушений, чем в алифатических соединениях вследствие того, что бензольное кольцо оказывается в состоянии поглощать значительную энергию электронов без диссоциации.

Имеется область, где радиационные нарушения в химических соединениях проявляются настолько явно, что её можно рекомендовать для дальнейшего изучения. Это—действие излучения на фотографическую пластинку, например типа, применяемого для обнаруживания космических лучей. Хорошо известно, что можно изучать под микроскопом следы частиц, определять число ионов, возникающих на единице длины пути и др. Обычно фотографическая пластинка употребляется просто как инструмент для исследования проблем физики частиц с высокой энергией. Стоит, однако, обратить процесс исследования и рассматривать пластинку как уникальное твёрдое тело, в котором можно получить видимые радиационные нарушения. Здесь можно производить тонкие опыты с нарушениями, вызываемыми частицами с различными массами, зарядами и энергиями, изучая при этом, насколько возможно, как поведение ядер отдачи, так и ионизацию.
