

HIGH PRESSURE PHYSICS

E. S. ITSKEVICH

The principles of investigation of physical properties of solids under pressure and their applications are considered. The polymorphism under pressure for example the graphite → diamond transformation is described as well as the properties of conducting electrons in solids and the electron transitions under pressure.

Описаны методы исследования физических свойств твердых тел под высоким давлением и их приложения. Изложены сведения о двух главных составляющих этот раздел физики: о полиморфизме (фазовых переходах) под давлением, включая превращение графита в алмаз, и об электронах проводимости в металлах и полупроводниках, включая электронные переходы.

ФИЗИКА ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЙ

Е. С. ИЦКЕВИЧ

Институт физики высоких давлений РАН,
Троицк Московской обл.

Физика высоких давлений (ФВД) использует давление для изучения физических свойств различных (в основном твердых) тел и, таким образом, характеризуется общим методом исследования. Этим ФВД отличается от других областей физики, например магнетизма (общая природа явлений) или физики полупроводников (общий объект исследования).

Мы расскажем о некоторых проблемах современной ФВД, о главном ее вопросе – о превращении вещества под давлением, ибо именно превращение графита дает искусственные алмазы, а получение металлического водорода – это пример превращения диэлектрика в металл.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТВЕРДЫХ ТЕЛ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Единицей давления СИ является паскаль: $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$. В физике обычно используют единицу давления килобар: $1 \text{ кбар} = 0,1 \text{ ГПа}$. Доступный в настоящее время интервал давлений распадается на две области. В первой, простирающейся до 20–30 кбар (2–3 ГПа) одинаковое давление на образец со всех сторон обеспечивает жидкость. Это так называемое гидростатическое давление. При более высоких давлениях – выше 30 кбар жидкое состояние не может сохраняться и в качестве среды для передачи давления к изучаемым образцам используются возможно более пластичные твердые тела. Гидростатическое давление получить уже не удастся, и эту область давлений называют квазигидростатической, в которой достигают давлений в несколько сот килобар. Лишь немногие лаборатории мира, в том числе Институт физики высоких давлений Российской Академии наук (ИФВД), перешагнули в мегабарную область ($1 \text{ Мбар} = 10^3 \text{ кбар} = 100 \text{ ГПа}$).

Основным методом получения гидростатического давления является использование системы цилиндр–поршень (рис. 1). Движущийся под внешним усилием, например гидравлического пресса, поршень 1 уменьшает объем V среды 2 и создает тем самым давление в цилиндрической камере. Так как в объеме V находится жидкость под высоким давлением, то необходимо предотвратить ее просачивание между стенкой цилиндра и поршнем. Запирание жидкости легко осуществить остроумным способом, предложенным родоначальником современной ФВД американским физиком П.У. Бриджменом. Суть способа состоит в следующем: в твердой прокладке 3 (рис. 1) за счет меньшей по сравнению с диаметром поршня l площадью опоры автоматически

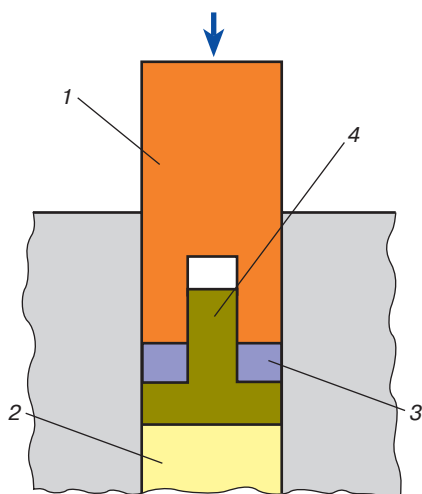


Рис. 1. Схема цилиндра-поршня с уплотнением Бриджмена: 1 – поршень, 2 – среда, в которой создается давление, 3 – прокладка, 4 – нижняя часть поршня грибовидной формы – грибок

создается более высокое давление, чем в жидкости. Для этого поршень делается составным: со стороны высокого давления имеется отдельная, похожая на грибок часть 4; длина ножки грибка с надетой на нее прокладкой делается меньше, чем глубина соответствующего отверстия в основной части поршня. Способ так и называется – принцип некомпенсированной площади.

Максимальное значение давления зависит от прочности узлов камеры и особенно цилиндра. Прочность может быть увеличена за счет предварительного сжатия и изготовления всех частей (за исключением прокладок 3) из специальных сталей и сплавов с высоким пределом прочности.

В такой камере можно измерять объемную сжимаемость, то есть изменение объема, помещенного внутрь вещества, при повышении давления на единицу. Для этого надо знать смещение поршня и значение давления. Давление можно определить по соотношению площадей поршня камеры и поршня пресса, зная давление в цилиндре пресса, измеряемое обычным манометром. Однако даже у специальных материалов при давлении $p > 1$ ГПа наступает существенная деформация, что приводит к возникновению трения между стенками цилиндра и движущимися деталями. Часть внешнего усилия расходуется на преодоление силы трения, и измерение давления по соотношению площадей оказывается неверным. Поэтому для измерения давления используются манометры. Самый распространенный манометр в области гидростатики – катушка из марганцовой (медно-марганцевый сплав) проволоки. Электропротивление проволоки зависит от давления – пропорционально относительному изменению.

Для измерения различных физических величин в камеру вводят электроды, делают в ней окна и вводы для разного рода излучений. В камерах высокого гидростатического давления можно изменять и температуру в пределах от $+500^{\circ}\text{C}$ и до температуры вблизи абсолютного нуля. Гидростатическое давление в последнем случае получается и фиксируется (закрепляется) при комнатной температуре и сохраняется при охлаждении.

В области квазигидростатики существует несколько существенно различающихся методов создания давления. Кратко расскажем о трех из них, получивших широкое распространение. Первый метод (разработанный учеными США) основан на использовании некоего подобия системы поршень–цилиндр (рис. 2, б). Имеются два конических поршня 1, входящие с противоположных сторон в кольцо (пояс-белт) 2, в которое выродился цилиндр. Пластичная твердая среда 3 для передачи давления вместе с образцом 4 помещается в этот цилиндр. Для запираения среды между поясом и поршнями применяется специальное уплотняющее вещество. Все основные части камеры находятся при нормальном давлении в состоянии сильного упругого сжатия, создаваемого внешними стальными кольцами (поддержками). При нагрузке поршней они, а следовательно, и пояс 2 могут расширяться почти до двойной предельной величины и максимальное давление сильно повышается. Для изготовления поршней (пуансонов) используются твердые сплавы (например, на основе карбида вольфрама) с очень высоким предельным напряжением сжатия. Часто пластичная среда выбирается так, чтобы у нее был большой коэффициент трения (например, минерал пирофиллит), тогда она, вытекая через зазор между пуансоном и кольцом, создает им поддержку и уплотняет камеру.

В отличие от белта (объемная камера) Бриджмен еще ранее применил для получения квазигидростатических давлений два усеченных конуса (наковальни) из твердых сплавов с большим углом при вершине. Давление возникает в тонком слое среды, находящемся между рабочими торцами конусов. Среда и запирающие играют ту же роль и имеют тот же состав, что и у белта. Тонкий образец или пленка помещаются между двумя пластинками среды.

Третий тип камеры разработан основателем ИФВД Л.Ф. Верещагиным и его сотрудниками. Это объемная камера, однако без пояса. Ее легче всего представить в виде наковален из твердого сплава со сферическими лунками на рабочих торцах. Лунки достаточно глубоки, в их центре помещается исследуемый образец, окруженный твердой средой для передачи давления. Самым распространенным веществом такого рода является хлористое серебро, дающее достаточную гидростатичность. В остальной части лунки находится запирающая среда – пирофиллит (рис. 2, в). Камеры такого типа

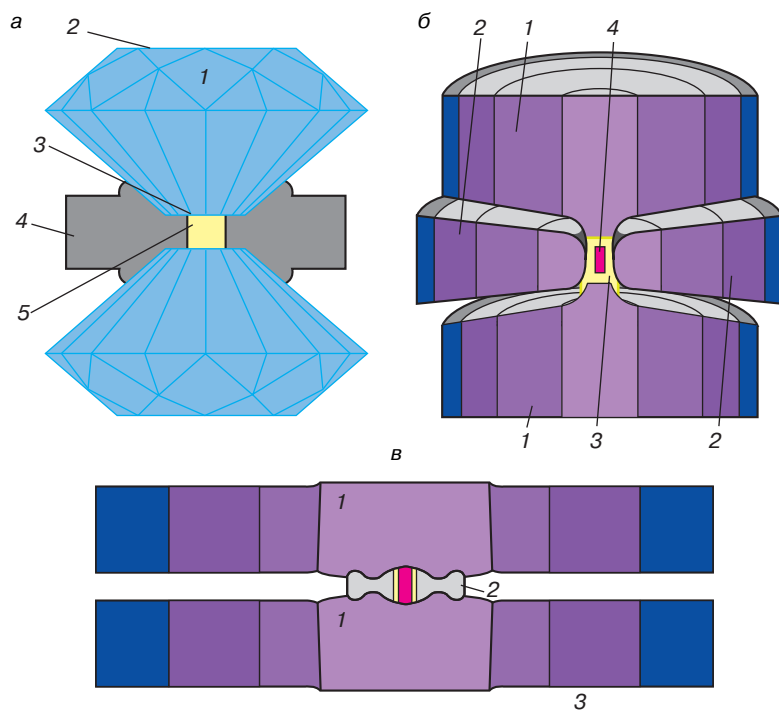


Рис. 2. Квазигидростатические камеры высокого давления. а – алмазная камера высокого давления: 1 – алмазные наковальни с плоской площадкой (калеттой), 2 – основание наковальни, 3 – калетта, 4 – металлическая прокладка, 5 – пространство для образца; б – установка “белт”: 1 – поршни (пуансоны) с поддержками, 2 – кольцо с поддержками, 3 – среда, в которой создается давление, 4 – образец; в – камера Верещагина с тороидом: 1 – пуансоны; 2 – тор-лунка с образцом в центральной части; 3 – поддержки

позволяют получать давление до 10,0–20,0 ГПа. В объемных квазигидростатических камерах можно расположить внутренний нагреватель, поэтому их используют для превращений вещества под давлением, например при синтезе искусственных алмазов и других важных материалов (нагрев ускоряет превращение). Усилие к таким камерам создается гидравлическими прессами.

Камеры всех трех типов применяются для исследований, в них можно измерять электросопротивление, магнитную восприимчивость, вводить и выводить разного рода излучения. Миниатюрные камеры Бриджмена и Верещагина охлаждаются до $T = 4,2$ К.

Для измерения давления в квазигидростатических камерах наиболее распространен следующий прием. Отмечают скачки электросопротивления образцов, находящихся в камере, обусловленные полиморфным превращением (см. ниже). В качестве образцов (реперов) чаще всего используют металлы (рис. 3). Давления, при которых происходят превращения, заранее известны. Их определяют специальными способами. Одновременно с фиксацией превращения с помощью пресса измеряется сила, приложенная к камере. Сила измеряется манометром пресса. По полученным данным строят зависимость силы от давления в камере.

Давление выше 100 ГПа получают с помощью алмазных камер высокого давления, разработанных американским физиком Мао (1976). Ему принадлежит рекорд – 270–280 ГПа.

В камере (рис. 2) используются алмазы ювелирной огранки 1–2 с плоской площадкой 3. Чтобы избежать раскалывания алмазов применяется металлическая прокладка 4 с цилиндрическим

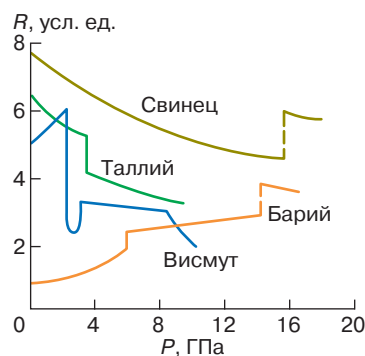


Рис. 3. Зависимость электросопротивления некоторых металлов от давления. Давления, соответствующие скачкам электросопротивления, используют как реперные точки

отверстием 5. В таких камерах измеряют все виды излучения и электросопротивления в широком интервале температур. Усилие создается с помощью рычагов или гаек. На рис. 2, а изображена главная часть камеры. Измерение давления осуществляется с помощью спектра люминесценции рубинового кристалла.

ПОЛИМОРФИЗМ И РЕНТГЕНОСТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

При уменьшении объема твердого тела под давлением, то есть при повышении плотности, атомы, составляющие кристаллическую решетку, сближаются. Кроме того, может наблюдаться и перестройка кристаллической решетки. Обычно сближение атомов по мере повышения давления идет постепенно, но иногда скачком, без изменения кристаллической структуры (изоморфное превращение).

Однако обычно при некотором давлении происходит перестройка взаимного расположения атомов решетки с одновременным изменением межатомных расстояний (плотность меняется скачкообразно). При этом изменяется число соседних атомов, окружающих любой атом решетки (изменение координационного числа), — это и есть полиморфное превращение.

Твердое тело с новым расположением атомов (с новой структурой) обладает и новыми, зачастую кардинально отличающимися свойствами по сравнению с исходной структурой. Так, например, слоистая структура одной из модификаций углерода — графита определяет его металлические и смазочные свойства. Получающийся при полиморфном превращении алмаз имеет структуру с пространственно симметрично расположенными четырьмя жесткими связями, обуславливающими твердость и диэлектрические свойства. Основной задачей ФВД и является поиск новых и важных превращений веществ.

Часто наблюдается, что после получения новой структуры при полиморфном превращении можно уменьшить давление до атмосферного, а структура останется той же, что и была под давлением. Такие превращения называются необратимыми (например, переход графит → алмаз). Они лежат в основе получения новых, важных для техники веществ.

Твердое тело характеризуется различными свойствами: структурой кристаллической решетки, энергетическими спектрами электронов, проводимостью, сверхпроводимостью, магнитными свойствами и т.п. В настоящее время почти все эти свойства мы умеем изучать под давлением, но первой задачей является изучение структуры решетки.

Основной метод определения структуры и сжимаемости фаз высокого давления — это рентгеноструктурный анализ (РСА). В этом методе дифракция рентгеновских лучей на кристаллической решетке (так как длина волны рентгеновских лучей и расстояние между атомами в решетке — величины

примерно одного порядка) используется для определения взаимного расположения и расстояний между атомами в решетке.

Методика РСА под давлением была разработана российскими и американскими физиками. Были созданы камеры высокого давления, с окнами для входа рентгеновского излучения. Поглощение излучения мало у первых шести элементов Периодической таблицы, из которых и делают окна. В гидростатике работают с монокристаллами, а в квазигидростатике — с поликристаллами. В последнее время применяется новый метод РСА EXAFS-спектроскопия (Ведринский П.В. EXAFS-спектроскопия — новый метод структурного анализа // Соросовский Образовательный Журнал. 1996. № 5. С. 79–84). Кроме того, применяют нейтронографию, в которой медленные нейтроны используются как рентгеновские лучи.

Чтобы наполнить конкретным содержанием наше изложение, рассмотрим пример полиморфных превращений у щелочного металла цезия. Цезий при нормальном давлении имеет объемно-центрированную кубическую (ОЦК) решетку с восемью атомами в вершинах куба и одним атомом в центре. Под давлением 2,4 ГПа цезий переходит в гранецентрированную кубическую (ГЦК) структуру. Эта структура является плотнейшей кубической упаковкой. Ее можно представить в виде модели, состоящей из одинаковых шариков, расположив вокруг центрального шара шесть в одной с ним плоскости и по три сверху и снизу. Так как дальнейшее увеличение числа соседей невозможно, то при последующих переходах структура не меняется. При давлении 4 ГПа у цезия происходят еще два перехода. После первого перехода, как показал РСА, возникает также ГЦК-структура, но с периодом решетки на ~3% меньше. Структура второго перехода еще не расшифрована. Изоморфный переход с уменьшением объема может происходить, если уменьшается “радиус” атома. Это и наблюдается на опыте. Размер атома, обусловленный его валентными электронами, уменьшается за счет перехода электрона в состояние с меньшим радиусом электронной оболочки.

В качестве примеров полиморфных превращений у диэлектриков рассмотрим переходы у воды (льда). Если сжимать лед при определенной температуре, то на плавной кривой зависимости объема от давления увидим скачки объема. Зависимости давлений переходов P от температуры T называются T – P (фазовой) диаграммой, линии которой суть границы соответствующих фаз, а области, ограниченные этими линиями, суть области стабильности этих фаз.

На рис. 4 приведена фазовая диаграмма льда. Лед I имеет меньшую плотность, чем вода, поэтому при увеличении давления он (при достаточной температуре) плавится. Все остальные модификации

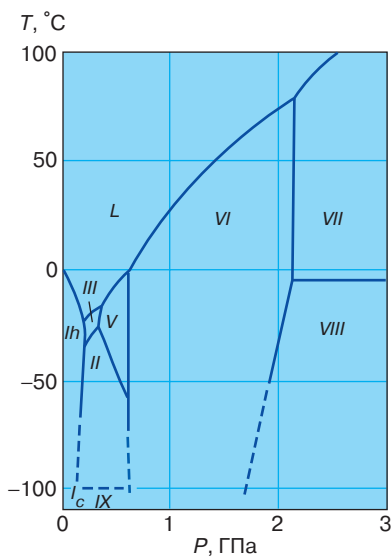


Рис. 4. Фазовая диаграмма льда. Сплошные линии – экспериментальные результаты, штриховые – экстраполяция

льда плотнее воды. Этому соответствуют наклоны линий на диаграмме: температуры переходов для всех фаз, кроме I, растут под давлением. У самой плотной среди известных фаз льда, у льда VI, $T_{пл} = 442^\circ\text{C}$ при $P = 17,0$ ГПа. Все полиморфные превращения льда обратимы, а кристаллические структуры у всех модификаций характеризуются обычным для льда типом связи.

Если твердое тело является соединением из элементов двух сортов, то в зависимости от отношения “радиусов” компонент получаются разные структуры. Это легко представить используя модель с шариками двух разных радиусов. Под давлением один из шариков (обычно больший) сжимается сильнее, что при определенном соотношении радиусов, а значит, и давлений приводит к перестройке структуры.

Очень важен для выяснения особенностей строения мантии Земли полиморфизм минералов. Обнаруженная при исследованиях под давлением так называемая плотная модификация кварца ($4,35 \text{ г/см}^3$) соответствует плотности находящегося перед жидким ядром Земли последнего твердого слоя. Это же исследование послужило разгадке тайны Аризонского метеорита (США). В метеоритном веществе были найдены вкрапления неизвестных в земных условиях кристаллитов. Эти кристаллы и оказались плотной модификацией кварца.

Исследования под давлением являются одним из основных направлений экспериментов, которые необходимы для построения теории, позволяющей предсказывать кристаллическую структуру и обусловленные ею свойства конкретного твердого тела.

В этом случае следует отметить, что РСА стал чуть ли не определяющим методом этого исследования.

ПРЕВРАЩЕНИЕ ГРАФИТ \rightarrow АЛМАЗ

Интерес человека к алмазам можно сравнить только с интересом к золоту. Недаром история насчитывает огромное число попыток добыть алмаз искусственным путем. Однако в отличие от золота для синтеза алмазов были научные основания, и они привели к успеху. Синтез алмазов, как это часто бывает в науке, привел к бурному развитию ФВД и вообще физики твердого тела. После первых удачных опытов началась работа по развитию и усовершенствованию методики, созданию промышленной технологии, чтобы поставить алмаз и его технические возможности на службу человеку.

Но вернемся к физике превращения графит \rightarrow алмаз. Фазовая диаграмма углерода ясно показывает, что для осуществления полиморфного превращения графит \rightarrow алмаз необходимо сочетание давления и температуры. Существенное различие структур графита и алмаза приводит к тому, что переход графит \rightarrow алмаз затруднен. Поэтому превращение необходимо проводить при достаточно высокой температуре. Ход процесса таков. Сначала надо было бы поднять температуру в камере высокого давления, наполненной графитом, чтобы переход шел быстро, а затем поднять давление до области стабильности алмаза. Однако на практике неудобно сначала повышать температуру, а затем давление. Процесс ведут в обратном порядке: сначала поднимают давление до такого значения, чтобы оказаться в области устойчивости алмаза, и затем поднимают температуру до значения, обуславливающего небольшое время превращения (порядка минут), а потом охлаждают камеру и снимают давление. Описанный процесс требует температуры $\sim 3000^\circ\text{C}$ и давления ~ 12 ГПа. При синтезе используют объемные камеры с внутренним нагревом.

Естественно, что промышленное получение алмазов из графита будет тем выгоднее, чем ниже параметры процесса. Поэтому внимание исследователей сразу было направлено на проведение процесса с катализаторами. Применение переходных металлов позволило вести превращение под давлением ~ 5 ГПа и при температуре, соответствующей плавлению катализатора. Этот процесс был осуществлен почти одновременно учеными России (ИФВД), Швеции, США и некоторых других стран.

Следует еще упомянуть, что ученые сумели осуществить и синтез (примерно при тех же параметрах процесса) практически такой же твердой модификации нитрида бора (BN). При нормальных условиях нитрид бора имеет много общего с графитом, но в алмазоподобном виде в природе он неизвестен. Оба сверхтвердых материала нашли применение в различных отраслях промышленности.

ПОВЕДЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ ПРОВОДИМОСТИ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Теперь расскажем об электронах, обуславливающих электропроводность металлов и полупроводников.

При сближении атомов в процессе образования твердого тела может произойти перекрытие внешних электронных оболочек соседних атомов. В этом случае валентные электроны обобществляются, становятся почти свободными. При этом эквивалентные уровни энергии электронов отдельных атомов слегка сдвигаются друг относительно друга и образуют систему уровней, сгруппированных в полосы (зоны). В каждой из этих зон количество уровней равно числу атомов решетки. Зоны, как и исходные уровни, отделены друг от друга интервалом запрещенных энергий (E_g).

Если электроны заполняют не все уровни в зоне, то кристалл является металлом. Если нет частично заполненных зон, то вещество является диэлектриком или полупроводником. Когда энергия E_g между свободной и заполненной зонами велика по сравнению с энергией, обусловленной тепловым движением атомов, то вещество — диэлектрик, когда того же порядка — полупроводник. Максимальное значение энергии электронов называется энергией Ферми (E_F).

Проводимость и многие другие свойства металла определяются электронами, находящимися вблизи уровня Ферми, ибо только эти электроны имеют лежащие рядом по энергии свободные состояния, на которые они могут переходить, когда приложена разность потенциалов (перенос заряда).

Почти то же самое можно сказать и об электронах в полупроводниках. Основное отличие их от металлов связано с тем, что в полупроводниках электроны полностью заполняют все уровни в зонах. Следующая за последней заполненной (в порядке возрастания энергии) зона со всеми свободными уровнями находится недалеко, и энергетическая щель E_g мала. Поэтому такое разделение зон на полностью заполненные электронами и полностью свободные у полупроводников имеет место лишь вблизи абсолютного нуля температур. Если энергия теплового движения атомов полупроводника (температура кристалла) имеет примерно то же значение, что и E_g , то говорят, что полупроводник находится в области собственной проводимости. Эта проводимость обеспечивается, с одной стороны, электронами, преодолевающими щель E_g за счет своей энергии, и, с другой — остающимися в заполненной зоне освобожденными состояниями (дырками). Такая картина означает разрыв связи между соседними атомами, осуществляемой спариванием валентных электронов, при разрыве связи возникают свободные электроны. Концентрация электронов (дырок) быстро возрастает с ростом температуры.

Если температура низкая, а энергия теплового движения много меньше E_g , то полупроводник должен был бы вести себя как настоящий диэлектрик, то есть у него не должно быть носителей тока. Но это не так. В решетке всегда присутствует некоторое количество инородных атомов, что приводит к возникновению либо электронов в пустой зоне, либо дырок в заполненной. Это связано с тем, что энергетические уровни электронов примесного атома располагаются либо вблизи потолка последней заполненной зоны, либо вблизи дна первой пустой зоны. Эти электроны могут совершать переходы между примесными уровнями и зоной. Обычный энергетический зазор примесного электрона соответствует температуре в несколько десятков кельвин. Концентрация носителей определяется числом примесных атомов.

Если бы валентные электроны в металле можно было считать свободными, то зависимость энергии электронов от их импульса следовала бы закону $E = p^2 / (2m)$. Соответствующие поверхности постоянной энергии в пространстве импульсов будут сферами (сфера Ферми). Учет влияния кристаллической решетки превращает сферу Ферми в поверхность Ферми, вид которой определяется конкретными характеристиками металла.

В качестве примера сильного воздействия давления на металлы возьмем электронные переходы. Они могут быть нескольких типов. Мы уже рассматривали изоморфное превращение у цезия, связанное с переходом валентного электрона из состояния с большим радиусом электронной оболочки в состояние с меньшим радиусом при одной и той же структуре (ГЦК). Такие переходы наблюдаются и у других металлов.

Второй тип электронных переходов у металлов связан с изменениями в данной зоне (без переходов в другую зону). Примером металла, в котором экспериментально наблюдался переход, служит кадмий, металл с гексагональной решеткой. Переход приводит к изменению топологии поверхности Ферми и как следствие этого к изменению ряда характеристик, например проводимости в магнитном поле. При нулевом давлении траектории электронов в магнитном поле будут круговыми, локализованными в базисной плоскости элементарной ячейки кристалла. При $P = 2$ ГПа они проходят по всей этой плоскости. Есть еще полуметаллы, характеризующиеся малой концентрацией свободных электронов $\sim 10^{17} - 10^{20}$ см⁻³, при $T = 0$ у обычных металлов она $\sim 10^{22}$ см⁻³. Эксперимент показал, что полуметалл висмут под давлением 2,5 ГПа становится полупроводником. Чтобы наблюдать квантовые эффекты, дающие прямую информацию об электронном спектре, необходимы качественные монокристаллы и измерения при низких температурах. Исследования могут проводиться лишь до давления 3 ГПа. При больших давлениях в кристаллах появляются

дефекты. Основным методом в этом случае является использование гидростатических камер с фиксированным давлением. Так как такие камеры были впервые применены в России, то приоритет в большинстве исследований квантовых явлений при низких температурах имеют российские ученые.

Богатый экспериментальный материал собран в результате исследования зависимости электрического сопротивления от давления. Рассмотрим два примера: переходы диэлектрик → металл и переходы в сверхпроводящее состояние. Часто возникает электронный переход, когда у диэлектрика щель E_g уменьшается под давлением до нуля и он превращается в металл. На кривых электросопротивления в зависимости от давления P наблюдаются скачки или другие особенности. Электронный переход такого типа может быть связан с полиморфным превращением, то есть изменением кристаллической структуры, и тогда возникает скачок на несколько порядков. Для известных полупроводников – германия, кремния и алмаза этот скачок примерно на шесть порядков наблюдался у германия ($P = 12$ ГПа), кремния ($P = 19,5$ ГПа) и при $P \sim 100$ ГПа у алмаза. Скачок у германия и кремния связан с изменением кристаллической структуры: алмазная структура,

которой они обладают в нормальных условиях, превращается в структуру, характерную для белого олова – обычного металла. Алмаз, кремний, германий и серое олово – полупроводники с уменьшающейся в порядке перечисления величиной $E_g = 5,3; 1,2; 0,7; 0,1$ эВ. Белое олово – хороший металл. Под давлением они все становятся металлами.

Очень интересным превращением типа диэлектрик → металл является переход водорода в металлическое состояние. Твердый водород ($T_{пл} = 14$ К) – молекулярный кристалл-диэлектрик, в котором слабо связанные друг с другом двухатомные гантелеобразные молекулы образуют при температуре вблизи абсолютного нуля гексагональную плотноупакованную решетку. Водород кардинально отличается от щелочных металлов – своих соседей по группе Периодической таблицы.

Физики-теоретики уже давно предположили, что под давлением в мегабарном диапазоне ($> 10^2$ ГПа) водород должен перейти в металлическую фазу. Давление сближает атомы водорода, и электроны после этого могут перемещаться по всему кристаллу. Были рассчитаны структура и свойства этой фазы.

H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr	
Лантаноиды																	
Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu				

Рис. 5. Сверхпроводимость элементов Периодической таблицы. В квадратах, обведенных жирной линией, отмечены сверхпроводники, возникающие под давлением, и указаны их критические температуры. Сиреневым цветом выделены сверхпроводники, существующие при нормальном давлении. Наличие нескольких цифр в одном квадрате указывает на разные сверхпроводящие модификации (фазы)

Несколько лет тому назад группа американских физиков под руководством профессора Мао наблюдала изменения свойств водорода в области давлений выше 100 ГПа, связываемые с возникновением металлического состояния.

И наконец, о роли давления в изучении сверхпроводимости элементов. Сверхпроводимость, как известно, одно из самых интересных и важных свойств твердого тела. Явление это состоит в исчезновении электросопротивления при температурах T , близких к 0 К.

Применение камер, рассчитанных на давление 20–25 ГПа, для исследования металлов и полупроводников при низких температурах дало интересный результат. Оказалось, что почти все исследованные металлы при высоком давлении обладают сверхпроводимостью; полуметаллы и полупроводники переходят в нормальное металлическое состояние или состояние с почти нормальной концентрацией электронов проводимости, зачастую также становятся сверхпроводниками. На рис. 5 изображена Периодическая система элементов с соответствующими данными. Видно, что использование высоких давлений увеличило в полтора раза число сверхпроводящих элементов. Получается, что тот

набор сверхпроводников, который мы имеем в земных (скорее наземных) условиях, случаен. На самом деле сверхпроводимость — явление достаточно всеобщее. Изучение ее под давлением оказалось важным и для построения более близкой к реальным веществам теории сверхпроводимости и получения высокотемпературных сверхпроводников, изучения их свойств.

Изменения в кристаллических структурах под давлением отражаются на всех свойствах твердого тела.

* * *

Ефим Соломонович Ицкевич, Заслуженный Соросовский профессор, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Института физики высоких давлений РАН (Троицк Московской обл.), Заслуженный деятель науки РФ. Специалист в области физики низких температур и высоких давлений. Автор около 180 научных статей и открытия электронных фазовых переходов 2,5-го рода в металлах.