

На правах рукописи

Кандрина Юлия Александровна

ИЗУЧЕНИЕ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В СЕРЕ И СОЕДИНЕНИЯХ
ТИПА AB ($A = Cd, Zn; B = S, Se$) ПРИ ДАВЛЕНИЯХ 20 – 50 ГПа
МЕТОДОМ ИМПЕДАНСНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

01.04.07 – физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Екатеринбург-2010

Работа выполнена на кафедре физики низких температур ГОУ ВПО «Уральский государственный университет им. А.М. Горького».

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук,
профессор

Бабушкин Алексей Николаевич

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
профессор, член-корреспондент РАН

Хохлов Дмитрий Ремович

доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник

Германенко Александр Викторович

Ведущая организация:

ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный
университет имени первого Президента России
Б.Н. Ельцина»

Защита состоится 9 декабря 2010 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 212.286.01 по защите докторских и кандидатских диссертаций при ГОУ ВПО «Уральский государственный университет им. А.М. Горького» по адресу: 620000, г. Екатеринбург, пр. Ленина, 51, комн. 248.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ГОУ ВПО «Уральский государственный университет им. А.М. Горького».

Автореферат разослан « » ноября 2010 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук, с.н.с.

Кудреватых Н.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Серу, сульфиды и селениды кадмия и цинка объединяет сложность фазовых диаграмм и трудности в объяснении процессов формирования новых состояний при высоких давлениях. Несмотря на большое количество экспериментальных данных о структурных превращениях в этих материалах, окончательное понимание процессов формирования фаз высокого давления, в том числе – устойчивых при нормальном давлении, отсутствует.

Поведение серы при высоких давлениях представляет интерес в связи с очень сложной фазовой диаграммой этого материала, возникновением полимерных фаз, влиянием на свойства предыстории образца. В сере в интервале 5 – 50 ГПа наблюдается целый ряд структурных превращений, в том числе обратимая аморфизация с последующим переходом в кристаллическое состояние.

Исследования, проведенные при высоких давлениях, показали наличие у сульфидов и селенидов кадмия и цинка перехода из фазы низкого давления со структурой типа вюрцита (CdS , $CdSe$) или сфалерита (ZnS , $ZnSe$) в фазу высокого давления со структурой типа каменной соли, сопровождающегося резким снижением электросопротивления.

Сульфиды и селениды кадмия и цинка интенсивно исследуются, в частности, в связи с формированием на их основе нанокристаллических систем с уникальными оптическими и электрическими характеристиками.

В условиях давлений, превышающих 10 ГПа и реализуемых в камерах высокого давления с алмазными наковальнями различных конструкций, образец по разным причинам (возникновение смеси фаз и межфазных границ, распределение механических напряжений, наличие электрических контактов и др.) неоднороден, и поэтому стоит задача выделения различных вкладов в общую электропроводность образца.

Для изучения электрических свойств неоднородных материалов используют, в частности, метод полного комплексного сопротивления (импедансную спектроскопию), позволяющий из отклика материала на внешнее

переменное электрическое поле извлечь вклады, связанные собственно с электропроводностью разных фаз, границами между фазами, электродными процессами, электрической поляризацией в объеме, вкладом измерительной ячейки и т.п. Однако при исследованиях материалов при высоких давлениях из-за сложности интерпретации результатов этот метод широкого применения до сих пор не нашел.

В связи с этим использование метода импедансной спектроскопии для исследования особенностей фазовых превращений при высоких давлениях в сере и соединениях типа AB ($A = Cd, Zn$; $B = S, Se$) представляется актуальным.

Работа выполнена при частичной поддержке программы «Фундаментальные исследования и высшее образование» (грант № $EK-005-X1$) Американского фонда гражданских исследований ($CRDF$), Министерства образования и науки РФ и Правительства Свердловской области в рамках Уральского научно-образовательного центра «Перспективные материалы», грантов РФФИ (№ 01-03-96494-р2001 Урал, № 02-02-27197з, № 05-02-26721з, № 09-02-01316), программы «Научные и педагогические кадры инновационной России» (ГК № П645).

Целью работы является выявление методами импедансной спектроскопии в условиях высоких давлений особенностей поведения электрических характеристик серы и соединений типа AB ($A = Cd, Zn$; $B = S, Se$).

Для достижения данной цели были поставлены следующие **задачи**:

– проанализировать методические особенности применения метода импедансной спектроскопии для исследования материалов в условиях высоких давлений при использовании камер высокого давления с алмазными наковальнями типа «закругленный конус – плоскость»;

– исследовать полное комплексное сопротивление серы, сульфидов и селенидов кадмия и цинка при давлениях 20 – 50 ГПа при комнатной температуре в широком диапазоне частот электрического поля, обратив особое внимание на область известных фазовых превращений;

– установить общие закономерности влияния высокого давления на

электрические свойства изученных материалов и выявить связь особенностей электрических свойств с известными структурными превращениями.

Научная новизна работы состоит в том, что

– показана применимость метода импедансной спектроскопии в условиях высоких давлений при использовании камер высокого давления с алмазными наковальнями;

– впервые показано, что при переходе серы из аморфного в кристаллическое состояние при 37 ГПа в материале возникает спонтанная поляризация, проявляющаяся как «индуктивный» вклад в полное комплексное сопротивление (эффект «отрицательной» емкости).

– показано, что электрические свойства серы, сульфидов и селенидов кадмия и цинка при высоких давлениях на переменном токе коррелируют с данными исследований на постоянном токе и данными структурных исследований.

На защиту выносятся:

– результаты впервые проведенных систематических исследований частотных зависимостей полного комплексного сопротивления серы, сульфидов и селенидов кадмия и цинка, коррелирующие с данными исследований на постоянном токе и данными структурных исследований;

– утверждение, что при давлении около 37 ГПа (по данным структурных исследований – область начала перехода из аморфной фазы в кристаллическую фазу высокого давления) в сере возникает новое состояние с внутренней поляризацией, проявляющейся как «индуктивный» вклад в полное комплексное сопротивление или эффект «отрицательной» емкости.

Практическая ценность работы. В сере при давлениях выше 37 ГПа возникает новое состояние с внутренней поляризацией, проявляющейся как «индуктивный» вклад в полное комплексное сопротивление или эффект «отрицательной» емкости. Сведения о фазовых превращениях в сере, сульфидах и селенидах кадмия и цинка при высоких давлениях могут быть полезны в разработке полупроводниковых датчиков давления.

Достоверность результатов обеспечивается использованием в работе надежных, неоднократно апробированных экспериментальных методов; использованием при интерпретации результатов современных представлений физики высоких давлений и физики конденсированного состояния; корреляцией экспериментальных данных, полученных в данной работе, с данными, полученными другими авторами.

Личный вклад автора состоит в отработке методики измерений, проведении детальных экспериментальных исследований, интерпретации полученных результатов.

Публикации и апробация работы. Основные результаты диссертации опубликованы в 4 статьях и в 17 тезисах международных и российских конференций (Международной конференции “Фазовые переходы и критические явления в конденсированных средах” (Махачкала, 2007); V – VI, IX Межгосударственных семинарах “Структурные основы модификации материалов методами нетрадиционных технологий” (Обнинск, 1999, 2001, 2007, 2009); 8-й международном симпозиуме ОМА-2005 “Фазовые превращения в твердых растворах и сплавах” (Сочи, 2005); Российской конференции “Фазовые превращения при высоких давлениях” (Черноголовка, 2000); 9-ой, 10-ой, 11-ой международных конференциях “Высокие давления” (Украина, Судак, 2006, 2008, 2010); 3 и 4 High Pressure School On Chemistry, Biology, Materials Science and Techniques (Warsaw, 1999, 2001); XVI Уральской международной зимней школе по физике полупроводников (Екатеринбург, 2006, 2010); Joint 21st AIRAPT and 45th EHPRG International Conference on High Pressure Science and Technology (Catania, Italy, 2007); XLVIIth EHPRG Conference on High Pressure Science and Technology (Paris, 2009); 48th EHPRG International Conference on High Pressure Science and Technology (Uppsala, Sweden, 2010)).

Структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав и заключения. Объем диссертационной работы 124 страниц, в том числе 58 рисунков. Список цитируемой литературы содержит 132 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит обоснование актуальности проведенных исследований, постановку целей и вытекающих из них экспериментальных задач, формулировку основных научных положений и результатов, выносимых на защиту.

Первая глава «Фазовые диаграммы и электрические и физические свойства серы, сульфидов и селенидов кадмия и цинка при высоких давлениях» посвящена обсуждению известных результатов оптических, структурных и электрических исследований свойств серы, сульфидов и селенидов кадмия и цинка.

Обзор показал, что свойства серы, сульфидов и селенидов цинка и кадмия хорошо изучены при нормальных и высоких давлениях в широком интервале температур на постоянном токе, и все исследованные материалы при повышении давления переходят в состояния с относительно высокой проводимостью.

При этом рост давления до 50 ГПа приводит к необратимым изменениям кристаллической и электронной структуры соединений ZnS , $ZnSe$, CdS [10-11]. В $CdSe$ наблюдаются индуцированные давлением обратимые переходы в фазу с более высокой проводимостью [12]. Эти переходы сопровождаются гистерезисом.

Несмотря на большое количество экспериментальных данных о структурных превращениях в сере и сульфидах и селенидах кадмия и цинка, окончательного понимания процессов формирования в этих материалах фаз высокого давления нет. Причиной этого могут быть сложность соблюдения в разных исследованиях одинаковых условий, связанных с однородностью образца, распределением механических напряжений, влиянием межфазных границ. На основании проведенного анализа литературных данных поставлены задачи исследований и определены экспериментальные особенности их решения.

Во второй главе «Применение метода полного комплексного сопротивления для исследования электрофизических свойств материалов в алмазных камерах высокого давления «закругленный конус – плоскость»» рассмотрены особенности применения метода импедансной спектроскопии [1] при высоких давлениях. Для создания давлений использовали камеру высокого давления с наковальнями типа «закругленный конус – плоскость», выполненными из искусственных поликристаллических алмазов карбонадо, впервые предложенными Е.Н. Яковлевым, Л.Ф. Верещагиным с соавторами [2].

Измерения полной проводимости проводили при комнатной температуре в диапазоне частот 1 Гц – 100 кГц на измерителе импеданса *FRA-1174* (*Solartron Electronic Group*) с интерфейсом *ECI-1186*. Используемая методика позволяет изучать один и тот же образец при последовательном увеличении и снижении давления, выдерживать под нагрузкой длительное время. Типичные размеры образца – диаметр около 0,2 мм, толщина примерно 20 мкм.

При анализе экспериментальных результатов необходимо учитывать собственный импеданс камеры высокого давления, зависящий от частоты переменного тока. Для оценки этого вклада в измеряемые характеристики проведены предварительные измерения на модельных объектах: «идеальном» проводнике и «идеальном» диэлектрике.

В первом случае наковальни замыкали накоротко (в качестве образца брали алюминиевую фольгу), а во втором – взаимно изолировали наковальни (в качестве изолирующего материала использовали бумагу). Толщины фольги и бумаги (15 – 20 мкм) соответствовали характерным размерам изучаемых образцов. Это позволило определить импеданс собственно ячейки и пути его учета при исследовании материалов.

В третьей главе «Полное комплексное сопротивление серы при давлениях 20 – 50 ГПа на частотах переменного тока 1 Гц – 100 кГц» приведены экспериментальные результаты, полученные на образцах серы квалификации ОСЧ 14-4, и их интерпретация.

Независимые исследования при комнатной температуре показали, что в сере в области давлений 5 – 50 ГПа происходит целый ряд структурных превращений [3-7]. Исходные образцы серы имеют орторомбическую структуру, переходящую в моноклинную фазу при 5 ГПа. Последняя сохраняется до 24 ГПа. При давлениях ~25 ГПа появляется аморфная фаза [3]. После 37 ГПа начинается перекристаллизация из аморфной фазы [4] и наблюдается переход в кристаллическую фазу высокого давления [5-7].

На рис. 1 представлены годографы импеданса экспериментальной ячейки с образцом серы при увеличении давления. Числа на графиках указывают частоту переменного тока, а стрелки – направление увеличения частоты.

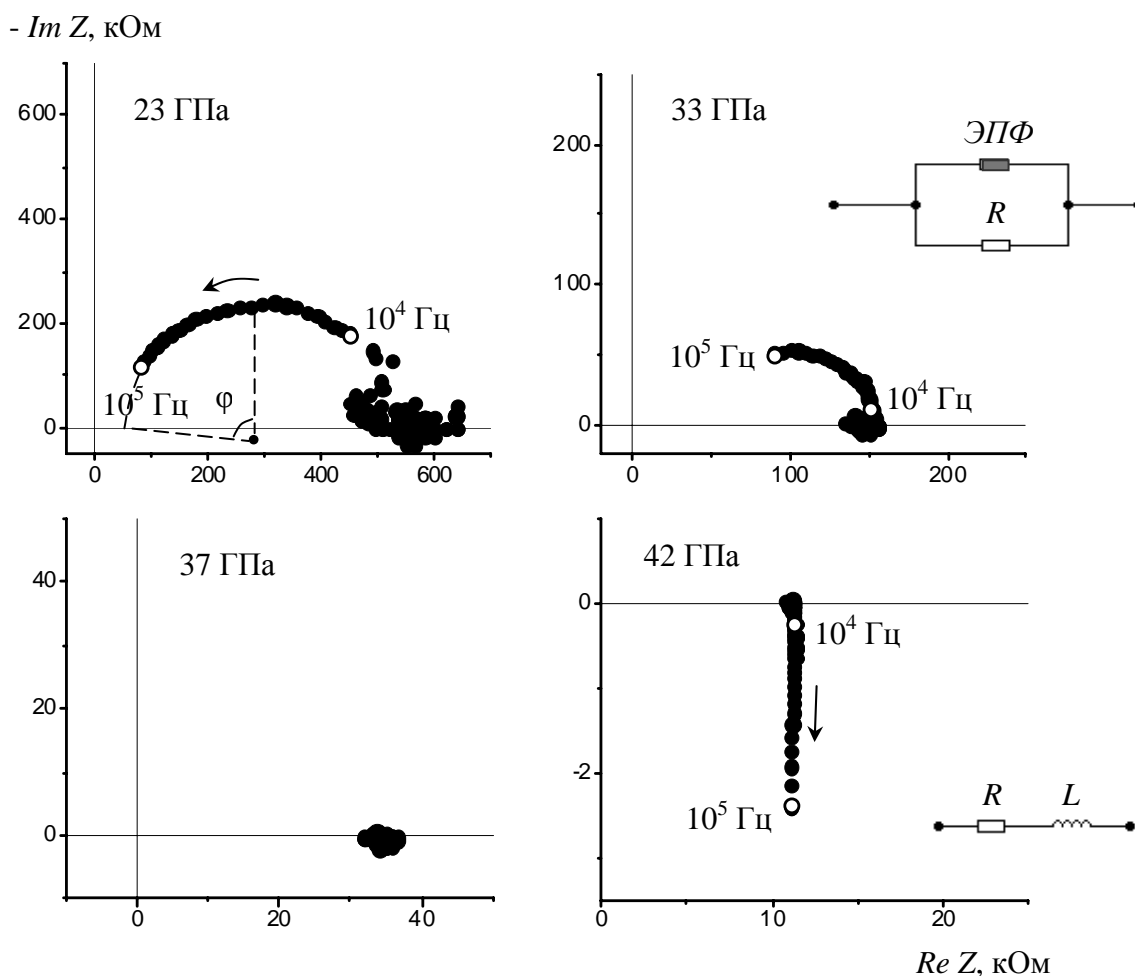


Рис. 1. Годографы импеданса экспериментальной ячейки с образцом серы

При давлениях 23 – 35 ГПа годограф импеданса представляет собой дугу полуокружности, отсекающую высокочастотной частью некоторое сопротивление. Именно в этой области давлений существует аморфная фаза серы.

Центры окружностей дуг сдвинуты вниз относительно оси абсцисс, что может быть связано с особенностями переноса заряда и массы в образце, структуры поверхности контактов, межфазными границами и т.п. Для описания таких процессов используется понятие элемента с постоянным фазовым углом (ЭПФ), проводимость которого описывается выражением $Y = B(i2\pi f)^\alpha$, где f – частота переменного тока, B и α – константы. α – показатель степени элемента с постоянным фазовым углом, $\alpha = 2\varphi/\pi$, φ – фазовый угол, (рис. 1). Величина α в общем случае принимает значения от -1 (идеальная индуктивность) до 1 (идеальная емкость), значение $\alpha = 0$ соответствует идеальному активному сопротивлению.

С увеличением давления дуга полуокружности годографа импеданса укорачивается и исчезает около 37 ГПа, в спектре импеданса остается только вклад, определяемый не зависящим от частоты активным сопротивлением. Именно при давлении ~37 ГПа, по данным структурных исследований [5-7], происходит фазовый переход в кристаллическую фазу высокого давления.

На рис. 2 сопоставлены результаты измерений на постоянном [8] и на переменном токе. Из измерений на постоянном токе известно, что при увеличении давления сопротивление серы монотонно уменьшается. Энергия активации проводимости в интервале давлений 28 – 40 ГПа и при температурах 250 – 370 К уменьшается, а при давлениях выше 40 ГПа – резко возрастает. Из измерений на переменном токе мы обнаружили, что сопротивление серы уменьшается с ростом давления, наклон барической зависимости сопротивления резко уменьшается при ~ 37 ГПа.

При давлениях ~ 37 ГПа знак сдвига фаз между током и напряжением скачком изменяется, проявляется «индуктивный» вклад в полное комплексное сопротивление (эффект «отрицательной» емкости), (рис. 2, в).

Сжимаемый образец становится источником зарядов, стекающих на электроды. Это является косвенным свидетельством возникновения в сере спонтанной поляризации при давлениях выше 37 ГПа.

При снижении давления дуга полуокружности годографа импеданса появляется при давлениях ~ 33 ГПа, образец возвращается в неполяризованную фазу. Во всех последующих циклах увеличения и снижения давления (на одном и том же и разных образцах) вид и характер изменения годографов повторяются.

Особенности годографов импеданса, обнаруженные при давлениях около 37 ГПа на переменном токе, коррелируют с данными предшествующих исследований термоэдс и электропроводности серы на постоянном токе [8].

Приведенные в четвертой главе «Применение импедансной спектроскопии для изучения электрофизических свойств *CdS*, *CdSe*, *ZnS*, *ZnSe*

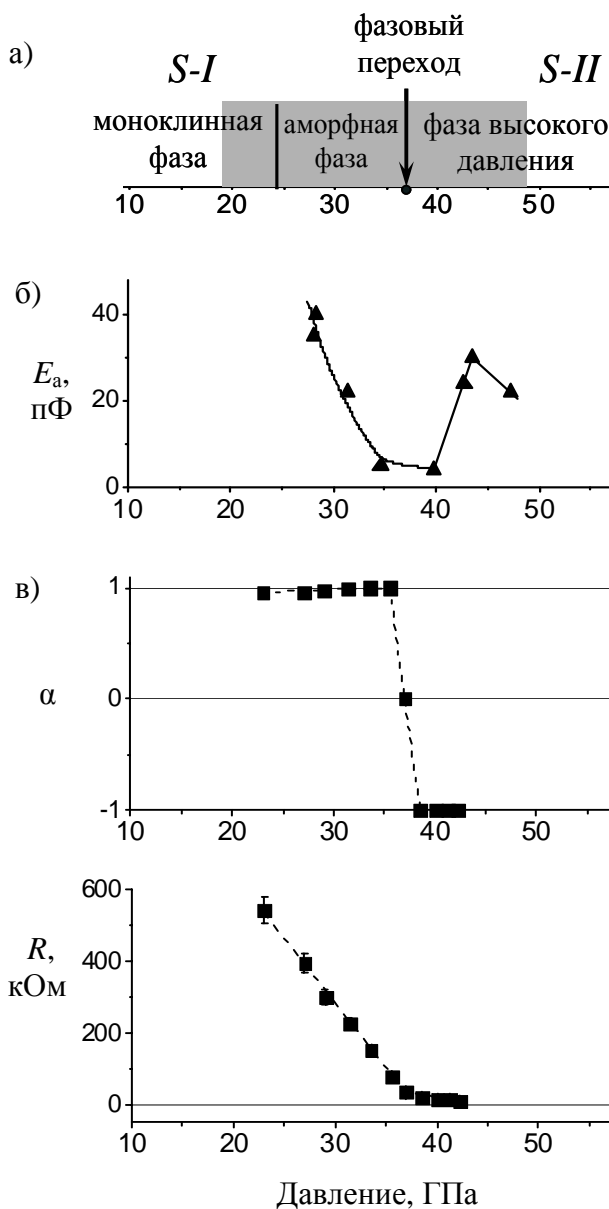


Рис. 2. а) Фрагмент фазовой диаграммы серы при комнатной температуре (заштрихованная область – давления, при которых проводились измерения) б) Барическая зависимость энергии активации проводимости серы на постоянном токе [8] в) Барические зависимости показателя степени элемента с постоянным фазовым углом и сопротивления (без вклада ячейки) серы на переменном токе

при высоких давлениях» основные результаты могут быть сформулированы следующим образом.

Независимые структурные исследования при комнатной температуре показали [9], что в ZnS при давлении ~ 15 ГПа происходит фазовый переход из структуры цинковой обманки в $NaCl$ структуру. При давлениях ~ 65 ГПа структура $NaCl$ испытывает переход в структуру типа $Stct$ (искаженная $NaCl$ структура).

Из измерений на постоянном токе известно [10], что в интервале давлений 41 – 47 ГПа сопротивление ZnS имеет максимум, а энергия активации проводимости резко возрастает (рис. 3, а). На этом же графике приведены барические зависимости показателя степени элемента с постоянным фазовым углом и емкости экспериментальной ячейки с образцом ZnS на переменном токе (рис. 3, б).

Наибольшее изменение величин показателя степени элемента постоянной фазы и емкости происходит при давлении ~ 45 ГПа, на постоянном токе при этом давлении наблюдаются рост электрического сопротивления образца и скачок энергии активации проводимости. Эти эффекты могут быть связаны с изменением внутренней электрической

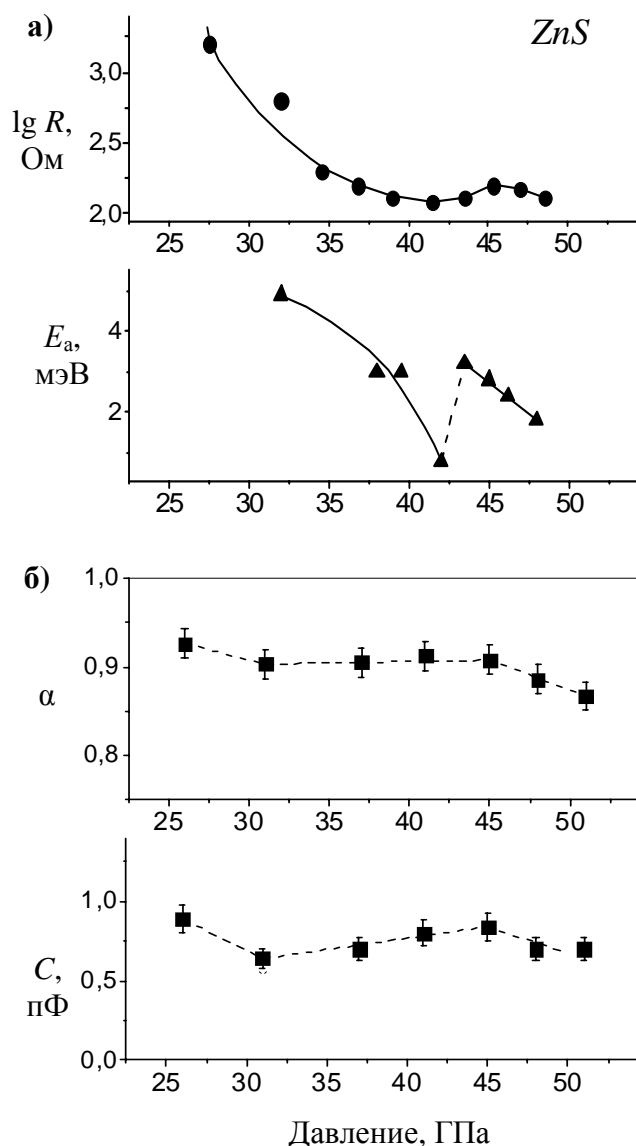


Рис. 3. а) Барические зависимости сопротивления и энергии активации проводимости ZnS на постоянном токе [10]. б) Барические зависимости показателя степени элемента с постоянным фазовым углом и емкости ячейки с образцом ZnS на переменном токе

поляризации, противодействующей движению носителей заряда.

В *CdS* при ~ 2 ГПа происходит фазовый переход из структуры вюрцита в *NaCl* структуру. При 51 ГПа происходит фазовый переход в *Стет* структуру [9].

Из измерений на постоянном токе [11] известно, что зависимости сопротивления и энергии активации проводимости *CdS* от давления имеют сложный характер (рис. 4, а).

Барическая зависимость сопротивления *CdS* имеет максимум при 31 ГПа. На этом же графике приведены барические зависимости показателя степени элемента с постоянным фазовым углом и емкости ячейки с образцом *CdS* (рис. 4, б). Показатель степени элемента с постоянным фазовым углом и емкость изменяются с особенностями при давлениях ~ 31 ГПа и ~ 48 ГПа.

Поляризация проявляется при давлении ~ 31 ГПа, на постоянном токе при этом давлении наблюдается резкий рост электрического сопротивления образца. Возрастание показателя степени элемента с постоянным фазовым углом и емкости при давлениях 48 – 51 ГПа может быть связано с началом известного фазового перехода [9].

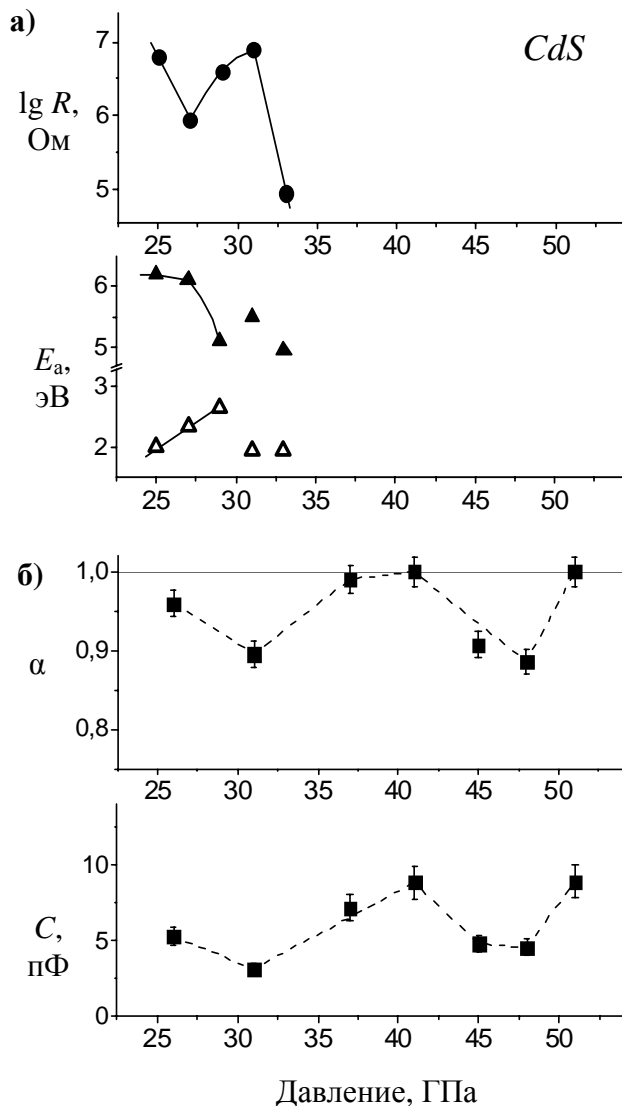


Рис. 4. а) Барические зависимости сопротивления и энергии активации проводимости *CdS* на постоянном токе [11]. б) Барические зависимости показателя степени элемента с постоянным фазовым углом и емкости ячейки с образцом *CdS* на переменном токе

В *ZnSe* при ~13 ГПа происходит фазовый переход из структуры цинковой обманки в *NaCl* структуру. Непрерывный, хотя и очень медленный, переход из структуры *NaCl* в структуру *Стст* обнаружили при ~30 ГПа, дальнейшее искажение возможно при давлениях выше 48 ГПа [9].

Из измерений на постоянном токе известно, что энергия активации проводимости *ZnSe* уменьшается с ростом давления в интервале 20 – 35 ГПа (рис. 5, а). При давлениях выше 35 ГПа резко уменьшается ширина запрещенной зоны. В *ZnSe* при давлениях 35 – 50 ГПа наблюдается металлоподобная фаза.

На этом же графике приведены барические зависимости показателя степени элемента с постоянным фазовым углом и емкости ячейки с образцом *ZnSe* (рис. 5, б). Показатель степени элемента с постоянным фазовым углом уменьшается с давлением до 45 ГПа, а потом возрастает. Наблюдается быстрый рост емкости при давлениях выше 40 ГПа.

В *CdSe* при ~2 ГПа происходит фазовый переход из структуры вюрцита в *NaCl* структуру. Обнаружен непрерывный переход в упорядоченную *Стст* структуру около 27 ГПа и возможное дальнейшее искажение около 36 ГПа [9].

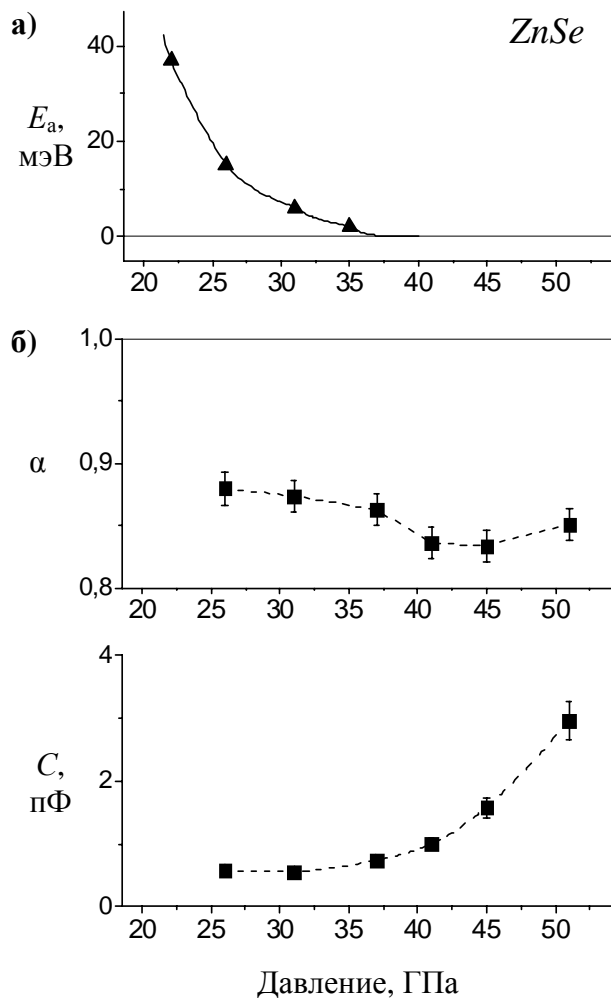


Рис. 5. а) Барическая зависимость энергии активации проводимости *ZnSe* на постоянном токе.

б) Барические зависимости показателя степени элемента с постоянным фазовым углом и емкости ячейки с образцом *ZnSe* на переменном токе

Из измерений на постоянном токе [12] известно, что энергия активации проводимости $CdSe$ уменьшается с увеличением давления в интервале 20 – 35 ГПа, при давлениях выше 40 ГПа начинает возрастать (рис. 6, а). В этом же интервале давлений наблюдаются особенности в поведении барической зависимости показателя степени элемента с постоянным фазовым углом, характеризующего, в частности, процессы, связанные с переносом заряда и массы через границы со сложной структурой (рис. 6, б).

Рост показателя степени элемента с постоянным фазовым углом и емкости с давлением свидетельствует об увеличении распределенного емкостного вклада

в полную проводимость образца, что может быть связано с увеличением площади межзеренных границ в пределах одной кристаллической фазы. Площадь межзеренных границ, по нашим оценкам, в CdS увеличивается не менее чем в 2 раза, в $ZnSe$ – 5 раз, в $CdSe$ – в 6 раз.

Если в образце $CdSe$ при давлениях до ~ 35 ГПа показатель степени элемента с постоянным фазовым углом и емкость практически не зависят от давления, то при более высоких давлениях наблюдается их быстрый рост. То есть именно при ~ 35 – 37 ГПа начинаются изменения, связанные, вероятно, с увеличением площади межзеренных границ. Рост энергии активации

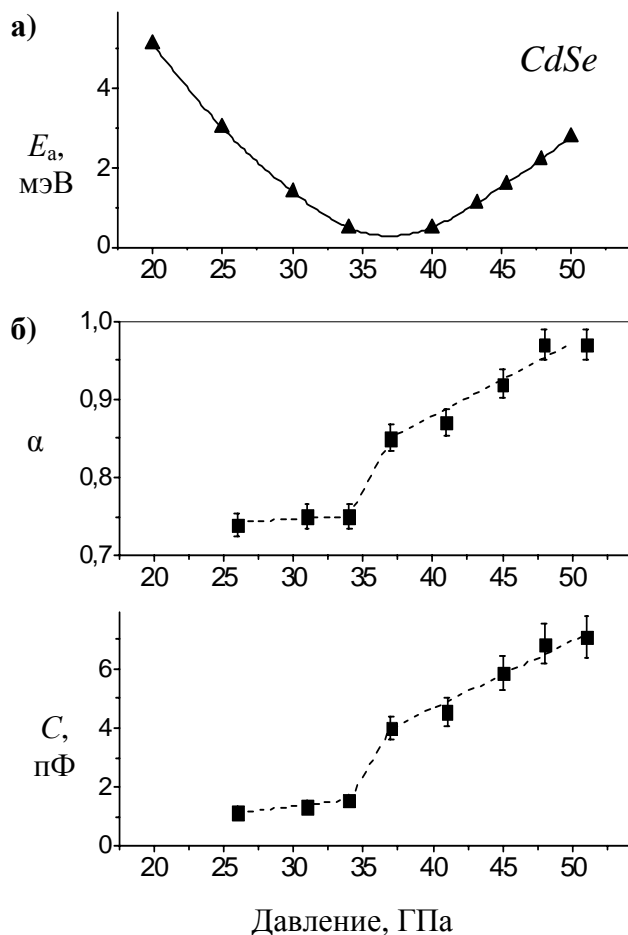


Рис. 6. а) Барическая зависимость энергии активации проводимости $CdSe$ на постоянном токе [12].

б) Барические зависимости показателя степени элемента с постоянным фазовым углом и емкости ячейки с образцом $CdSe$ на переменном токе

проводимости, обнаруженный ранее, в этом случае может быть объяснен увеличением роли дефектов в общей проводимости образца.

Показатель степени элемента с постоянным фазовым углом характеризует процессы, связанные с изменением переноса электрического заряда через межфазные границы при изменении давления.

В соединениях ZnS (при давлениях 20 – 50 ГПа) и $ZnSe$ (при давлениях 20 – 40 ГПа) с исходной кристаллической структурой типа цинковой обманки (сфалерита) с ростом давления общая площадь межзеренных границ в пределах одной фазы уменьшается. В соединениях CdS и $CdSe$ (при давлениях 20 – 50 ГПа) с исходной кристаллической структурой типа вюрцита с ростом давления общая площадь межзеренных границ в пределах одной фазы увеличивается.

В сульфидах и селенидах кадмия и цинка рост и уменьшение дисперсности (т.е. и общей площади межзеренных границ в пределах одной фазы) связаны с исходной кристаллической структурой исследованных материалов.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Проведен детальный анализ возможности применения метода импедансной спектроскопии для исследования материалов в условиях высоких давлений при использовании камер высокого давления с алмазными наковальнями.
2. Показано, что при давлениях около 37 ГПа (по данным структурных исследований – область начала перехода из аморфной фазы в кристаллическую фазу высокого давления) в сере возникает новое состояние с внутренней поляризацией, проявляющейся как «индуктивный» вклад в полное комплексное сопротивление или эффект «отрицательной» емкости.
3. Показано, что при фазовых превращениях в CdS (при давлениях ~ 31 ГПа и ~ 48 ГПа), в $ZnSe$ (~ 40 ГПа), в $CdSe$ (~ 35 ГПа) существенно возрастает распределенный емкостной вклад в полную проводимость образца,

свидетельствующий об увеличении под действием высокого давления площади межзеренных границ в пределах одной кристаллической фазы.

4. Показано, что электрические свойства серы, сульфидов и селенидов кадмия и цинка при высоких давлениях на переменном токе коррелируют с данными исследований на постоянном токе и данными структурных исследований.

Список цитируемой литературы

1. *Стойнов З.Б., Графов Б.М., Савова-Стойнова Б., Елкин В.В.* Электрохимический импеданс / М.: Наука, 1991, с. 30-36.
2. *Верещагин Л.Ф., Яковлев Е.Н., Степанов Т.Н., Бибаев К.Х., Виноградов Б.В.* Давление 2,5 мегабара в наковальнях, изготовленных из алмаза типа карбонадо // Письма в ЖЭТФ, 1972, Т. 16, № 4, с. 240-242.
3. *Luo H. and Ruoff A.L.* X-ray-diffraction study of sulfur to 32 GPa: Amorphization at 25 GPa // *Phys. Rev B*, 1993, V. 48, № 1, p. 569-572.
4. *Luo H., Greene R.G., and Ruoff A.L.* β -Po Phase of Sulfur at 162 GPa: X-Ray Diffraction Study to 212 GPa // *Phys. Rev. Lett*, 1993, V. 71, № 18, p. 2943-2946.
5. *C. Hejny, L.F. Lundegaard, S. Falcony, and M.I. McMahon* Incommensurate sulfur above 100 GPa, *Phys. Rev. B*, 2005, V. 71, p. 020101.
6. *Fujihisa H., Acahama Y., Kawamura H., Yamawaki H., Sakashita M., Yamada T., Honda K., and Bihan T.* Le Spiral chain structure of high pressure selenium-II and sulfur-II from powder x-ray diffraction // *Phys. Rev. B*, 2004, V. 70, p. 134106.
7. *O. Degtyareva* Crystal structure of simple metals at high pressures // *High Pres. Res.*, 2010, V. 30, № 3, p. 343-371.
8. *Бабушкина Г.В., Кобелев Л.Я., Бабушкин А.Н.* Электрические свойства серы при сверхвысоких давлениях вблизи температуры полимеризации // *Высокомолекуляр. Соед.*, 1988, Т.(Б) 30, № 9, с. 643-644.
9. *Mujica A., Rubio A., Munoz A., Needs R.J.* High-pressure phases of group-IV, III-V, and II-VI compounds // *Reviews of Modern Physics*, 2003, V. 75, p. 864-907.

10. *Бабушкин А.Н.* Электропроводность и термоэдс фазы высокого давления сульфида цинка // ФТТ, 1992, Т.34, № 6, с. 1647-1649.
11. *Бабушкин А.Н., Бабушкина Г.В., Урицкий З.И., Кобелев Л.Я.* Электропроводность сульфида кадмия при давлениях выше 25 ГПа // Неорганические материалы, 1991, Т. 27, № 6, с. 1147-1150.
12. *Игнатченко О.А., Бабушкин А.Н.* Электропроводность и термоэдс фазы высокого давления селенида кадмия в области вероятного перехода полупроводник-металл // ФТТ, 1993, Т. 35, № 8, с. 2231-2234.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

Статьи в ведущих рецензируемых научных журналах, определенных ВАК:

1. *Гуничева Ю.А., Бабушкин А.Н., Волкова Я.Ю., Игнатченко О.А.* Релаксация диэлектрических свойств серы при сверхвысоких давлениях // Неорганические материалы, 2000, Т. 36, № 2, с. 191-193.
2. *Гуничева Ю.А., Бабушкин А.Н., Шкерин С.Н.* Исследование электрофизических свойств серы при сверхвысоких давлениях методом импедансной спектроскопии // Неорганические материалы, 2001, Т. 37, № 7, с. 796-799.

Статьи в научных журналах:

3. *Кандрина Ю.А., Бабушкин А.Н.* Исследование электрофизических свойств CdS при высоких давлениях методом импедансной спектроскопии // Неорганические материалы, 2008, Т. 44, № 5, с. 532-534.
4. *Babushkin A.N., Kandrina Y.A., Kobeleva O.L., Schkerin S.N., Volkova Y.Y.* Impedance spectroscopy at superhigh pressures. Phase transitions and metastable states // *Frontiers of High Pressure Research II: Application of High Pressure to Low-Dimensional Novel Electronic Materials.* Eds. H.D. Hochheimer, B. Kuchta, P.K. Dorhout, J.L. Yarger, Kluwer Acad. Publ., Dordrecht-New York-London, 2001, p. 131-141.

Тезисы российских и международных конференций:

5. **Гуничева Ю.А., Бабушкин А.Н., Волкова Я.Ю.** Релаксационные процессы в сере при сверхвысоких давлениях // V Межгосударственный семинар “Структурные основы модификации материалов методами нетрадиционных технологий (МНТ–V)”, Обнинск, 14-17 июня, 1999, Тез. конф. с. 50.
6. **Gunicheva Y.A., Babushkin A.N., Volkova Y.Y.** Relaxation processes in sulphur under high pressure // 3th High Pressure School On Chemistry, Biology, Materials Science and Techniques, 1999, Warsaw, abstract <http://www.unipress.waw.pl/ihps/>.
7. **Гуничева Ю.А., Бабушкин А.Н.** Применение метода электрической импедансной спектроскопии при исследовании электрофизических свойств серы под сверхвысоким давлением // Российская конференция "Фазовые превращения при высоких давлениях". Черноголовка, 13-15 июня, 2000, Тез. конф., с. 164.
8. **Кандрина Ю.А., Бабушкин А.Н., Шкерин С.Н.** Применение импедансной спектроскопии при сверхвысоких давлениях: электрофизические свойства серы // VI Межгосударственный семинар “Структурные основы модификации материалов методами нетрадиционных технологий (МНТ – VI)”, Обнинск, 12-15 июня, 2001, Тез. конф., с. 68-69.
9. **Kandrina Y.A., Babushkin A.N., Shkerin S.N.** Application of the ac impedance spectroscopy at high pressures: electrophysical properties of sulfur // 4th High Pressure School On Chemistry, Biology, Materials Science and Techniques, 22-25 June, 2001, Warsaw, abstract <http://www.unipress.waw.pl/ihps/>.
10. **Кандрина Ю.А., Бабушкин А.Н.** Применение метода импедансной спектроскопии при высоких давлениях. Электрофизические свойства сульфида кадмия // 8-й международный симпозиум ОМА – 2005, Фазовые превращения в твердых растворах и сплавах, Сочи, 12-16 сентября, 2005, Тез. конф. с. 228-229.
11. **Кандрина Ю.А., Бабушкин А.Н.** Исследование электрофизических свойств сульфида кадмия при высоких давлениях методом импедансной спектроскопии // XVI Уральская международная зимняя школа по физике полупроводников, Екатеринбург, с 27 февраля по 4 марта, 2006, Тез. конф., с. 174.

12. **Кандрина Ю.А., Бабушкин А.Н.** Электрические свойства CdS при высоких давлениях: метод импедансной спектроскопии // 9-я Международная конференция. Высокие давления – 2006, Судак, Крым, Украина, 17-23 сентября, 2006, Тез. конф., с. 17.
13. **Kandrina Yu. A., Babushkin A.N.** Electrical Properties of CdSe at High Pressures: An Impedance Spectroscopy Study // Joint 21st AIRAPT and 45th EHPRG International Conference on High Pressure Science and Technology, Catania, Italy, September 17-21, 2007, book of abstracts, p. 282-283.
14. **Кандрина Ю.А., Бабушкин А.Н.** Электрические свойства селенида кадмия при высоких давлениях. Метод импедансной спектроскопии // IX Международный семинар “Структурные основы модификации материалов методами нетрадиционных технологий (МНТ–IX)”, Обнинск, 12-16 июня, 2007, Тез. конф. с. 76-77.
15. **Кандрина Ю.А., Бабушкин А.Н.** Исследование электрофизических свойств селенида кадмия при высоких давлениях методом импедансной спектроскопии // Международная конференция “Фазовые переходы, критические и нелинейные явления в конденсированных средах”, Махачкала, 12-15 сентября, 2007, Тез. конф. с. 447-448.
16. **Кандрина Ю.А., Бабушкин А.Н.** Применение метода импедансной спектроскопии при высоких давлениях. Электрофизические свойства ZnS // Тезисы 10-й Международной конференции Высокие давления – 2008, Национальная академия наук Украины, Донецкий физико-технический институт, Судак, Крым, 16-20 сентября, 2008, Тез. конф. с. 166.
17. **Кандрина Ю.А., Бабушкин А.Н.** Применение метода импедансной спектроскопии при высоких давлениях. Электрофизические свойства ZnS // X Международный семинар “Структурные основы модификации материалов методами нетрадиционных технологий (МНТ–X)”, Обнинск, 16-19 июня, 2009, Тез. конф. с. 94-96.

18. *Kandrina Yu. A., Babushkin A.N.* Electrical properties of ZnS at high pressures: an impedance spectroscopy study // XLVIIth EHPRG Conference, Paris, 2009, book of abstracts, p. 249.
19. *Кандрина Ю.А., Бабушкин А.Н.* Электрофизические свойства ZnSe. Применение метода импедансной диэлектрической спектроскопии при высоких давлениях // XVIII Уральская международная зимняя школа по физике полупроводников, Екатеринбург, 15-20 февраля, 2010, Тез. конф., стр. 262.
20. *Kandrina Yu. A., Babushkin A.N.* Electrical properties of ZnSe at high pressures: an impedance spectroscopy study // 48th EHPRG International Conference, Uppsala (Sweden), 25-29 July, 2010, book of abstracts, p. 164.
21. *Кандрина Ю.А., Бабушкин А.Н.* Электрофизические свойства ZnSe. Применение метода импедансной спектроскопии при высоких давлениях // Тезисы 11-ой Международной конференции Высокие давления – 2010, Национальная академия наук Украины, Донецкий физико-технический институт, Судак, Крым, 26-30 сентября, 2010, Тез. конф. стр. 43.