

*На правах рукописи*

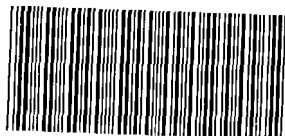
**НОР Полина Евгеньевна**

**ПОЛУЧЕНИЕ, АДсорбЦИОННЫЕ  
И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА  
ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ СИСТЕМЫ CdS – CdTe**

Специальность 02.00.04 – Физическая химия

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени  
кандидата химических наук**



**005059289**

16 МАЯ 2013

Омск-2013

*На правах рукописи*



**НОР Полина Евгеньевна**

**ПОЛУЧЕНИЕ, АДсорбЦИОННЫЕ  
И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА  
ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ СИСТЕМЫ CdS – CdTe**

Специальность 02.00.04 – Физическая химия

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени  
кандидата химических наук**

Омск-2013

Работа выполнена на кафедре «Физическая химия»  
федерального государственного бюджетного образовательного учреждения  
высшего профессионального образования  
«Омский государственный технический университет»

- Научный руководитель: заслуженный деятель науки и техники РФ,  
доктор химических наук, профессор  
**КИРОВСКАЯ Ираида Алексеевна**
- Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
**МАТЯШ Юрий Иванович,**  
ФГБОУ ВПО «Омский государственный  
университет путей сообщения»
- кандидат химических наук, доцент  
**МУРАШКО Юрий Александрович,**  
ФГБОУ ВПО «Омский государственный  
университет им. Ф. М. Достоевского»
- Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
профессионального образования  
«Кемеровский государственный университет»

Защита состоится «22» мая 2013 г. в 16<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.178.11 при ФГБОУ ВПО «Омский государственный технический университет» по адресу: 644050, г. Омск, пр. Мира, 11, корпус 6, ауд. 340, тел./факс: (3812) 65-64-92, e-mail: dissov\_omgtu@omgtu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Омского государственного технического университета.

Автореферат разослан «19» апреля 2013 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.178.11  
кандидат химических наук, доцент



А. В. Юрьева

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Быстрые темпы развития науки и значительные достижения современной полупроводниковой, нано-, сенсорной техники неотъемлемо связаны с получением и исследованием новых материалов. В их числе особое место занимают многокомпонентные системы на основе алмазоподобных полупроводников, представителями которых являются твердые растворы систем типа  $A^{IV}B^{VI}-A^{IV}B^{VI}$  и, в частности, система  $CdS - CdTe$ . Такого рода объекты с широко регулируемым составом, возможным непрерывным и экстремальным изменением свойств давно зарекомендовали себя как перспективные материалы [1, 2].

Получением и изучением свойств многокомпонентных полупроводниковых материалов на основе бинарных соединений  $A^{III}B^V$  и  $A^{IV}B^{VI}$  многие годы занимается творческий коллектив кафедры Физической химии ОмГТУ под руководством профессора И. А. Кировской. Основное внимание уделяется проблеме создания единого подхода к исследованию реальной поверхности алмазоподобных полупроводников и теории ее управления, так как параметры полупроводниковых приборов во многом определяются поверхностными процессами. Обнаруженные зависимости изменения физико-химических свойств твердых растворов от состава характеризуются не только участками с плавным изменением свойств, но и наличием экстремальных эффектов, предсказывать которые заранее не всегда возможно, но весьма актуально [1, 2].

Реальная поверхность твердых растворов  $(CdS)_x(CdTe)_{1-x}$  практически не изучена, что не позволяет рассматривать некоторые вопросы химической технологии полупроводниковой, нано-, сенсорной техники. Практическая ценность этих объектов и почти полное отсутствие информации об их поверхности, необходимой для создания перспективных полупроводниковых материалов, обуславливают необходимость выполненных в работе исследований.

Являясь неотъемлемой частью проводимых научным коллективом кафедры многолетних исследований алмазоподобных полупроводников, она посвящена получению и изучению объемных и поверхностных физико-химических свойств твердых растворов системы  $CdS-CdTe$ , в сравнении с ее исходными бинарными соединениями.

**Цель работы:** Впервые по разработанной методике получить и аттестовать твердые растворы системы  $CdS-CdTe$ , изучить их объемные и поверхностные физико-химические свойства, установить закономерности изменения свойств с составом, взаимосвязь между ними и оценить возможности практического применения полученных результатов.

В соответствии с поставленной целью диссертационной работы были сформулированы следующие задачи:

1. Разработать методику и получить твердые растворы системы  $CdS - CdTe$ .
2. Восполнить сведения об объемных физико-химических свойствах (структурных, оптических, электрофизических), на основе которых аттестовать твердые растворы; получить дополнительную информацию об их энергетическом спектре; определить области люминесцентного свечения.

3. Изучить поверхностные физико–химические свойства полученных твердых растворов (химический состав поверхности, кислотно-основные, адсорбционные):

- определить природу, силу, концентрацию активных центров;
- выяснить механизмы кислотно-основного и адсорбционного взаимодействий;
- охарактеризовать поведение оксида углерода и аммиака – газов-адсорбатов, зондов на кислотные центры, составляющих газовых выбросов и выдыхаемых Человеком газов;
- оценить роль наноразмерного эффекта.

4. Установить взаимосвязанные закономерности изменения изученных объемных и поверхностных физико–химических свойств в зависимости от состава. Построить диаграммы состояния «свойство – состав».

5. На основе установленных взаимосвязанных закономерностей и соответствующих диаграмм состояния определить возможности применения твердых растворов экстремального состава.

6. Разработать практические рекомендации по использовании предложенных материалов в качестве первичных преобразователей сенсоров–датчиков экологического и медицинского назначения и люминофоров с определенными спектрами свечения.

### **Научная новизна**

1. Впервые по разработанной методике получены (в форме порошков и наноразмерных пленок) твердые растворы системы CdS–CdTe ранее неизученных составов.

2. Впервые исследованы объемные физико–химические свойства (рентгенографические, ИК-, УФ-, КР- спектроскопические) полученных твердых растворов, использованные для уточнения их кристаллической, электронной структуры, определения электрофизических, оптических характеристик и аттестации. Установлены:

– на основе рентгенографических исследований – образование твердых растворов замещения со структурой вюрцита;

– на основе ИК–спектроскопических исследований – химический состав исходной поверхности, представленный преимущественно адсорбированными молекулами воды, группами OH<sup>-</sup>, углеродсодержащими соединениями и продуктами окисления поверхностных атомов;

– на основе УФ–спектроскопических исследований – возникновение экситонного эффекта. Определены значения ширины запрещенной зоны;

– на основе КР–спектроскопических исследований – области максимальной люминесценции, которой обладают CdS и твердые растворы с избытком CdTe. Определены значения частот примесной (характеризующих гексагональную модификацию) и межзонной люминесценций, определены значения ширины запрещенной зоны;

3. Впервые изучены кислотно–основные и адсорбционные (по отношению к  $\text{CO}$ ,  $\text{NH}_3$ ) свойства твердых растворов  $(\text{CdS})_x(\text{CdTe})_{1-x}$  и бинарных компонентов  $\text{CdS}$ ,  $\text{CdTe}$ .

– Определены природа, сила, концентрация кислотных центров. За кислотные центры ответственны преимущественно координационно–ненасыщенные атомы. Исходная поверхность всех компонентов системы  $\text{CdS}$ – $\text{CdTe}$  имеет слабокислый характер ( $\text{pH}_{\text{изо}} = 5,9\text{--}6,5$ ). С увеличением содержания  $\text{CdS}$  значение  $\text{pH}_{\text{изо}}$  плавно нарастает, а общая концентрация кислотных центров изменяется экстремально – через максимумы при  $X_{\text{CdS}} = 0,16$  и  $X_{\text{CdS}} = 0,24$ , свидетельствуя и о наибольшей адсорбционной активности твердых растворов указанных составов.

– На основе анализа опытных зависимостей  $\alpha_p = f(T)$ ,  $\alpha_T = f(p)$ ,  $\alpha_T = f(t)$ ; результатов расчетов теплот и энергий активации адсорбции, ИК–спектров, кислотно–основных характеристик поверхности адсорбентов, а также с учетом электронной природы молекул адсорбатов установлен преимущественно химический, активированный характер адсорбции при температурах выше 303–323 К, подтверждены природа активных центров и донорно–акцепторный механизм взаимодействия  $\text{CO}$  и  $\text{NH}_3$  с поверхностью компонентов системы  $\text{CdS}$ – $\text{CdTe}$ . Наиболее активным из изученных адсорбатов оказался аммиак ( $\alpha_{\text{NH}_3} > \alpha_{\text{CO}} \sim$  в 2 раза).

При ответственности за адсорбцию на порошках и нанопленках одних и тех же активных центров активность нанопленок значительно выше.

4. Найдены закономерности в изменении объемных (рентгеновской плотности, ширины запрещенной зоны, доли ионной связи) и поверхностных (кислотно–основных, адсорбционных) свойств с составом. Построены диаграммы состояния «свойство–состав». Установлена взаимосвязь между ними. Найденный параллелизм закономерностей обоснован с учетом природы активных центров и природы химической связи в исследованных объектах.

5. На основе установленных закономерностей, взаимосвязи между ними и соответствующих диаграмм состояния «свойство–состав»

– показаны возможности прогнозирования поверхностных свойств полупроводников изученной и подобных систем;

– реализованы возможности прогнозирования адсорбционной активности полупроводников по отношению к газам определенной электронной природы по кислотно–основным характеристикам поверхности;

– найдены наиболее активные по отношению к  $\text{CO}$  и  $\text{NH}_3$  компоненты системы  $\text{CdS}$ – $\text{CdTe}$  – твердые растворы составов  $(\text{CdS})_{0,16}(\text{CdTe})_{0,84}$ ,  $(\text{CdS})_{0,24}(\text{CdTe})_{0,76}$ ;

– твердые растворы данных составов предложены в качестве люминофоров с определенными спектрами свечения и первичных преобразователей сенсоров–датчиков на микропримеси указанных газов, эффективность которых значительно повышена за счет использования предложенных материалов в форме наноразмерных пленок;

– даны практические рекомендации по использованию первичных преобразователей в диагностике окружающей среды и медицинской диагностике выдыхаемого газа.

### Защищаемые положения

1. Разработанная методика и результаты получения, аттестации твердых растворов системы CdS – CdTe.

2. Результаты исследований объемных физико–химических свойств (рентгенографических ИК-, УФ-, КР– спектроскопических), подтвердившие образование твердых растворов замещения и позволившие уточнить их кристаллическую, электронную структуру, определить электрофизические, оптические характеристики.

3. Выводы о химическом составе поверхности, природе активных центров, механизмах и закономерностях кислотно–основных и адсорбционных взаимодействий, о влиянии размерного эффекта на адсорбционные свойства.

4. Установленные закономерности в изменении объемных и поверхностных физико–химических свойств компонентов системы CdS–CdTe с составом, взаимосвязь между ними.

5. Обоснование причины найденных закономерностей и их взаимосвязи, заложенной в природе активных центров и природе химической связи.

6. Прогнозирование поверхностных свойств полупроводников изученной и подобных систем на основе взаимосвязанных закономерностей «свойство–состав».

7. Обоснование и установленные возможности создания на основе твердых растворов составов  $(\text{CdS})_{0,16}(\text{CdTe})_{0,84}$ ,  $(\text{CdS})_{0,24}(\text{CdTe})_{0,76}$  первичных преобразователей сенсоров–датчиков экологического и медицинского назначения (на микропримеси CO, NH<sub>3</sub>) и использования предложенных материалов в форме наноразмерных пленок.

### Практическая значимость работы

1. Разработана методика получения в форме порошков и наноразмерных пленок новых материалов – твердых растворов системы CdS–CdTe.

2. Подтверждена возможность прогнозирования адсорбционной активности твердых растворов и бинарных компонентов системы CdS–CdTe на основе анализа диаграмм состояния «физическое, физико–химическое свойство – состав».

3. С применением данного способа

– найдены оптимальные составы твердых растворов с повышенной активностью по отношению к CO ( $(\text{CdS})_{0,16}(\text{CdTe})_{0,84}$ ) и NH<sub>3</sub> ( $(\text{CdS})_{0,24}(\text{CdTe})_{0,76}$ );

– разработаны практические рекомендации по использованию их в качестве первичных преобразователей сенсоров–датчиков на микропримеси CO, NH<sub>3</sub> и соответственно в диагностике окружающей среды и медицинской диагностике выдыхаемого газа;

– твердые растворы указанных составов рекомендованы также как люминофоры с определенными спектрами свечения.

Подана заявка на изобретение.

### **Апробация работы**

Основные материалы диссертационной работы доложены и обсуждены на VIII Международной научной конференции «Современные наукоемкие технологии» (Хургада, Египет, 2008г.); VIII научной конференции «Аналитика Сибири и Дальнего Востока» (Томск, 2008); IV, V, VI, VIII Международных научно-технических конференциях «Динамика систем, механизмов и машин» (Омск, 2002, 2004, 2007, 2012); I и II научно-технических конференциях аспирантов, магистрантов «Техника и технология современного и нефтегазового производства» (Омск, 2011, 2012); II-ой Региональной молодежной научно-технической конференции «Омский регион – месторождение возможностей» (Омск, 2011); I, II, III и IV Всероссийских научно-технических конференциях «Россия молодая: передовые технологии – в промышленность» (Омск, 2008, 2009, 2010, 2011). Результаты диссертации опубликованы в 16 работах.

### **Структура работы**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 166 страниц, включая 13 таблиц и 63 рисунка.

### **Краткое содержание работы**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы ее цель и задачи, научная новизна и практическая значимость работы, приведены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** обобщены и проанализированы литературные данные по получению и исследованию основных объемных и поверхностных свойств бинарных соединений типа  $A^{II}B^{VI}$ , в частности, CdS, CdTe и твердых растворов  $(CdS)_x(CdTe)_{1-x}$ . Рассмотрены перспективы их применения в полупроводниковом газовом анализе.

**Во второй главе** описаны используемые методы получения и аттестации твердых растворов системы CdS–CdTe, а также методы исследования объемных (рентгенографических, оптических) и поверхностных (химического состава поверхности, кислотно-основных и адсорбционных) физико-химических свойств.

В качестве объектов исследования использовали порошки и нанопленки бинарных соединений CdS, CdTe и твердых растворов  $(CdS)_x(CdTe)_{1-x}$  ( $x=0,16; 0,24; 0,5; 0,61$ ). Последние получали двумя методами: изотермической диффузии бинарных компонентов в вакуумированных запаянных кварцевых ампулах при температуре 1173 К (высокотемпературная лабораторная печь Snol 6.7/1300) и дискретным термическим напылением в вакууме ( $T_{конд} = 298$  К,  $P = 1,33 \cdot 10^{-4}$  Па) на электродные площадки пьезокварцевых резонаторов (АТ-среза,



собственная частота колебаний 8 МГц) (вакуумный универсальный пост ВУП-5).

Аттестацию твердых растворов осуществляли по результатам рентгенографического анализа (дифрактомер ДРОН-3,  $\text{CuK}\alpha, \beta$  – излучение с длинами волн 0,154178 и 0,139217 нм). Косвенно об образовании твердых растворов судили по результатам исследования химического состава и кислотно-основных свойств поверхности.

УФ–спектры регистрировали на спектрофотометре UV-2501PC фирмы «Shimadzu» с приставкой диффузного отражения ISR-240A в диапазоне 190–900 нм с разрешением 1 нм; спектры комбинационного рассеяния (КРС) – на Рамановском Фурье–спектрометре BRUKER RFS-100/s (длина волны возбуждающего лазера  $\lambda = 785$  нм, мощность – до 100 мВт, спектральное разрешение –  $3 \text{ см}^{-1}$ ).

Химический состав поверхности компонентов системы CdS–CdTe определяли методом ИК–спектроскопии на Фурье–спектрометре инфра-красном ИнфраЛЮМ ФТ-02 с приставкой МНПВО (материал кристалла–германий, The PIKET Technologies NATR) в спектральном диапазоне  $800\text{--}4000 \text{ см}^{-1}$ .

Кислотно-основные свойства поверхности изучали методами гидролитической адсорбции (определение pH изоэлектрического состояния -  $\text{pH}_{\text{изо}}$ ), механики, неводного кондуктометрического титрования, ИК – спектроскопии.

Адсорбцию изучали методами пьезокварцевого микровзвешивания (предельная чувствительность  $1,23 \cdot 10^{-11} \text{ г/см}^2 \text{ Гц}$ ), ИК-спектроскопии многократного нарушенного полного внутреннего отражения (ИКС МНПВО) в интервалах температур 250–453 К и давлений 4–13 Па. Адсорбатами служили  $\text{CO}$ ,  $\text{NH}_3$ .

По результатам этих исследований определяли величины адсорбции, дифференциальных теплот и средних энергий активации адсорбции [2].

Воспроизводимость и точность экспериментальных данных проверяли дублированием опытов. Расчеты и статистическую обработку результатов проводили с помощью ЭВМ.

**В третьей главе** представлены и обсуждены результаты получения и аттестации твердых растворов  $(\text{CdS})_x(\text{CdTe})_{1-x}$ , исследований физико–химических свойств поверхности: химического состава, оптических, кислотно-основных и адсорбционных свойств поверхности компонентов системы CdS–CdTe.

**В четвертой главе** проведен анализ полученных результатов и установлены закономерности изученных объемных и поверхностных свойств от состава, связь между ними. Показаны возможности прогнозирования поверхностных (кислотно–основных, адсорбционных) свойств, а также перспективы применения полученных материалов в полупроводниковом газовом анализе.

## **Получение и аттестация твердых растворов системы CdS–CdTe**

Синтез твердых растворов  $(\text{CdS})_x(\text{CdTe})_{1-x}$  широкого диапазона составов ( $X_{\text{CdS}} = 0,1\text{--}0,60$ ), проводили методом изотермической диффузии бинарных соединений в эвакуированных запаянных кварцевых ампулах при температурах, близких к температуре плавления более легкоплавкого компонента (CdTe).

Результаты рентгенографического анализа указали на образование в системе CdS–CdTe твердых растворов замещения в исследованных областях концентраций.

Положение основных линий на рентгенограммах и распределение их интенсивностей свидетельствуют о том, что CdS и твердые растворы имеют структуру вюрцита, а CdTe – структуру сфалерита.

Зависимости значений параметров решетки ( $a$ ,  $c$ ) и межплоскостного расстояния и от состава твердых растворов имеют характер близкий к линейному (рис.1).

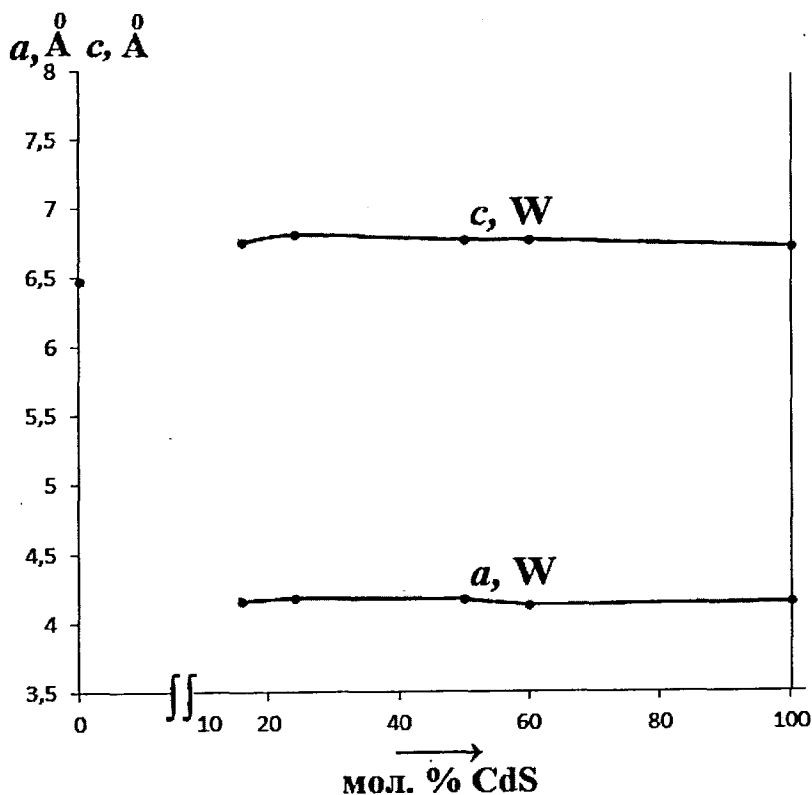


Рис.1. Зависимость изменения параметров кристаллической решетки от состава компонентов системы CdS–CdTe ( $a$ ,  $c$  – параметры кристаллической решетки; W – вюрцит)

## Оптические свойства компонентов системы CdS–CdTe

По данным УФ-спектров найдена зависимость ширины запрещенной зоны системы CdS–CdTe от состава. Она нелинейна и имеет максимум при содержании CdS 16 мол. % и минимум при содержании CdS 50 мол.%. Рассчитанные значения ширины запрещенной зоны  $\Delta E$  бинарных компонентов практически совпадают с литературными данными. Для сульфида кадмия  $\Delta E = 2,44$  эВ (2,53 эВ – табличное значение), а для теллурида кадмия  $\Delta E = 1,51$  эВ (1,49–1,5 эВ – табличное значение).

УФ-спектры твердых растворов с избытком теллурида кадмия имеют одинаковую форму со спектром бинарного компонента CdS, а также ярко выраженное плечо в интервале  $\lambda = 550\text{--}725$  нм, обусловленное возникновением экситонного эффекта.

При анализе спектров комбинационного рассеяния компонентов системы CdS–CdTe (рис. 2) выявлено изменение относительной интенсивности, уширение пиков излучения и их смещение с увеличением содержания CdS, что является следствием изменения координационного окружения атомов исходных бинарных компонентов, ширины запрещенной зоны и, в согласии с вышесказанным, свидетельствует об образовании твердых растворов замещения.

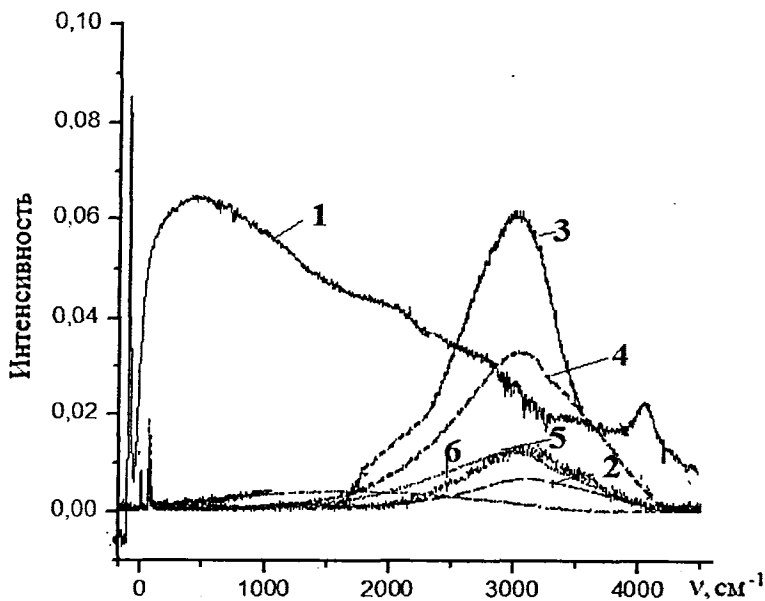


Рис. 2. Спектры комбинационного рассеяния поверхности компонентов системы CdS(1); CdTe (2);  $(\text{CdS})_{0,16}(\text{CdTe})_{0,84}$  (3);  $(\text{CdS})_{0,24}(\text{CdTe})_{0,76}$  (4);  $(\text{CdS})_{0,5}(\text{CdTe})_{0,5}$  (5);  $(\text{CdS})_{0,6}(\text{CdTe})_{0,4}$  (6)



В сложных полупроводниковых системах ловушки рекомбинации состоят из трех уровней (основного «ЛРО» и двух возбужденных «ЛРВ1», «ЛРВ2»). Ловушка рекомбинации с возбужденным уровнем «ЛРВ1» захватывает электрон (при условии что ловушка рекомбинации с основным уровнем «ЛРО» свободна), затем ловушка – «ЛРО» захватывает электрон и только тогда ловушка рекомбинации с возбужденным уровнем «ЛРВ2» захватывает дырку. Поверхность ловушек рекомбинации служит для нейтрализации носителей заряда.

Ловушками рекомбинации (активаторы, локальные уровни, центры люминесценции) являются дефекты и примеси (создают локальные энергетические уровни в запрещенной зоне) [3-9].

Согласно данному механизму и возникает длительное свечение, которое продолжается до тех пор, пока все электроны не прорекомбинируют с ионизационными центрами.

Рассчитанные на основе КР-спектров средние энергии, соответствующие межзонным переходам, характеризующим ширину запрещенной зоны для CdS, CdTe,  $(\text{CdS})_{0,16}(\text{CdTe})_{0,84}$ ;  $(\text{CdS})_{0,24}(\text{CdTe})_{0,76}$  составляют 2,49; 1,5; 2,18; 2,01 эВ и находятся в хорошем согласии с результатами определения ширины запрещенной зоны на основе УФ - спектроскопических исследований [8, 9].

В ИК-спектрах компонентов системы CdS – CdTe различного состава обращает на себя внимание относительное положение основных полос (рис. 4). Оно косвенно подтверждает образование в ней твердых растворов замещения и влияние состава на кислотно-основные свойства поверхности.

## **Химический состав поверхности.**

### **Кислотно-основные свойства**

Использование совокупности методов (определения  $\text{pH}_{\text{изо}}$ , механохимии, неводного кондуктометрического титрования, ИК - спектроскопии) позволило оценить природу, силу, концентрацию кислотных центров поверхности компонентов системы CdS – CdTe, экспонированных на воздухе, в аммиаке, оксиде углерода (II).

Согласно ИК-спектрам (рис. 4), поверхность бинарных соединений и твердых растворов  $(\text{CdS})_x(\text{CdTe})_{1-x}$ , экспонированных на воздухе, содержит преимущественно адсорбированные молекулы воды и гидроксильные группы (полосы 1650, 3650-3680, 730-750  $\text{см}^{-1}$ ), углеродсодержащие соединения (полосы 1100  $\text{см}^{-1}$  (C-O), 2340-2350 ( $\text{CO}_2$ ), 2950 и 980  $\text{см}^{-1}$  (C-H)), собственные оксиды (полоса 610  $\text{см}^{-1}$  (B-O)) [1-7].

После термической вакуумной обработки до минимального газовыделения поверхность практически полностью освобождается от адсорбированных примесей и в значительной степени от оксидов [1-3].

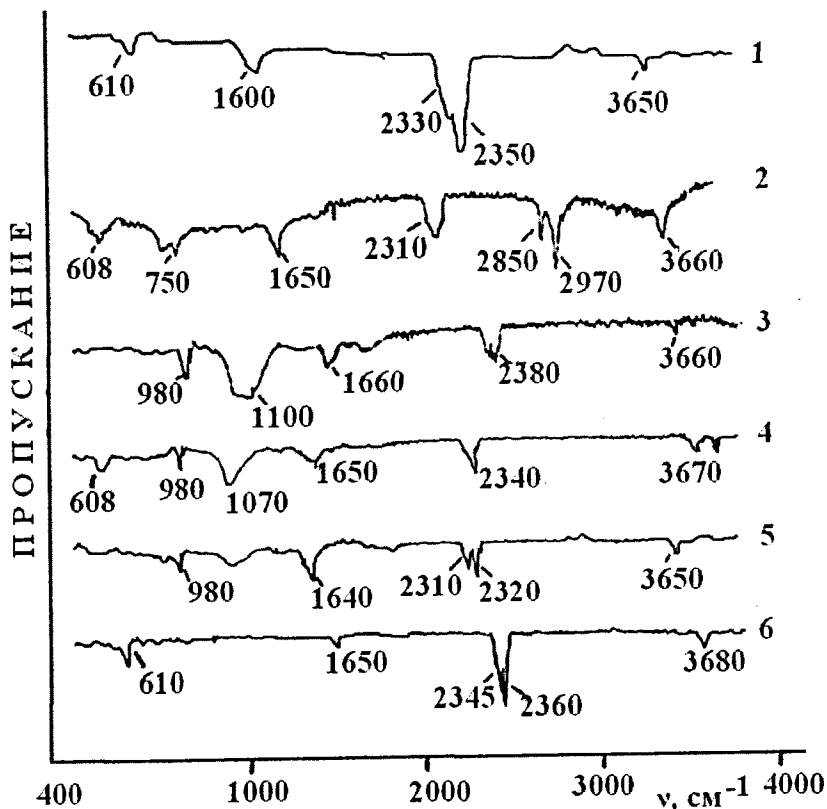


Рис. 4. ИК – спектры поверхности CdS(1);  $(\text{CdS})_{0,5}(\text{CdTe})_{0,5}$ (2);  $(\text{CdS})_{0,6}(\text{CdTe})_{0,4}$ (3);  $(\text{CdS})_{0,24}(\text{CdTe})_{0,76}$ (4);  $(\text{CdS})_{0,16}(\text{CdTe})_{0,84}$ (5); CdTe (6), экспонированных на воздухе

Значения  $pH_{\text{изо}}$  исходной поверхности (экспонирование на воздухе) отвечают слабокислой области, нарастая с составом в последовательности CdTe  $\rightarrow (\text{CdS})_{0,16}(\text{CdTe})_{0,84} \rightarrow (\text{CdS})_{0,24}(\text{CdTe})_{0,76} \rightarrow (\text{CdS})_{0,5}(\text{CdTe})_{0,5} \rightarrow (\text{CdS})_{0,61}(\text{CdTe})_{0,39} \rightarrow \text{CdS}$  от 5,9 (для CdTe) до 6,5 (для CdS). Превалирующий слабокислый характер исходной поверхности компонентов системы CdS – CdTe обусловлен преимущественно присутствием на ней льюисовских кислотных центров (координационно-ненасыщенных атомов).

Плавное изменение  $pH_{\text{изо}}$  с составом дополнительно подтверждает образование в системе CdS – CdTe твердых растворов замещения. Такая закономер-

ность свидетельствует также о влиянии физико-химических свойств бинарных и элементных составляющих не только на объемные, но и на поверхностные свойства твердых растворов.

При воздействиях аммиака характер зависимости  $pH_{\text{изо}}$  от состава сохраняется, но при этом происходит подщелачивание поверхности. Такое поведение водородного показателя можно объяснить, опираясь на известные положения о механизмах взаимодействия различных газов с поверхностью алмазоподобных полупроводников.

*Воздействия оксида углерода (II)* на водородный показатель оказались неоднозначными: значения  $pH_{\text{изо}}$  смещаются как в слабощелочную (при избытке в твердых растворах теллурида кадмия), так и в слабокислую (при  $x_{\text{CdS}} \geq 0,5$ ) области. Отмеченное поведение  $pH_{\text{изо}}$  логично связать с электронной структурой и двойственной функцией молекул CO.

Высказанные соображения о природе кислотных центров, о механизме кислотно-основных взаимодействий подтверждают *результаты механохимических исследований*. Они характеризуют изменение  $pH$  среды в зависимости от времени диспергирования в воде крупнодисперсных порошков CdS, CdTe и твердых растворов  $(\text{CdS})_x(\text{CdTe})_{1-x}$ , экспонированных на воздухе. Для разных составов диспергируемых полупроводников отмечается и подкисление (при  $x_{\text{CdS}} \geq 0,5$ ), и подщелачивание (при  $x_{\text{CdS}} \leq 0,5$ ) среды.

Существенным дополнением к описанным результатам явились *результаты неводного кондуктометрического титрования*. Они позволили подтвердить природу, определить концентрацию кислотных центров на поверхности компонентов системы CdS – CdTe и оценить ее изменение под воздействием оксида углерода (II). Наличие на дифференциальных кривых кондуктометрического титрования всех изученных компонентов, экспонированных на воздухе, трех пиков, свидетельствует о существовании на поверхности различных типов кислотных центров и подтверждает образование в твердых растворах катион-анионных комплексов, распределенных неравномерно.

Логично предположить, что за первый пик ответственны льюисовские кислотные центры, а за второй и третий – бренстедовские. Подтверждением являются результаты измерения  $pH$  изоэлектрического состояния поверхности – смещение точки  $pH_{\text{изо}}$  в щелочную область с ростом  $X_{\text{CdS}}$ .

Зависимость общей концентрации кислотных центров (рассчитанной по первому, второму и третьему пикам) от состава системы CdS – CdTe имеет экстремальный характер, с максимумами при  $X_{\text{CdS}} = 0,16$  и  $X_{\text{CdS}} = 0,24$  (рис. 5), то есть твердые растворы указанных составов обладают наибольшими концентрациями кислотных центров.

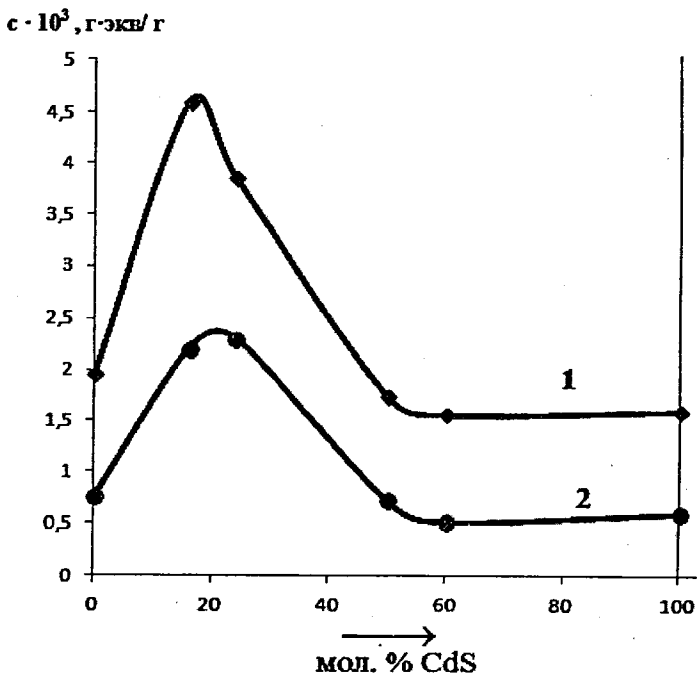


Рис. 5. Зависимости общей концентрации кислотных центров компонентов системы CdS-CdTe, экспонированных на воздухе (1) и в атмосфере CO (2), от состава

### Адсорбционные свойства компонентов системы CdS-CdTe

Величины адсорбции газов (CO и NH<sub>3</sub>) на всех компонентах системы CdS-CdTe составляют  $10^{-5} - 10^{-4}$  моль/м<sup>2</sup>. Изобары, равновесные и кинетические изотермы адсорбции ( $\alpha_p = f(T)$ ,  $\alpha_T = f(p)$ ,  $\alpha_T = f(t)$ ) каждого данного газа (CO и NH<sub>3</sub>) имеют сходный характер на бинарных соединениях (CdS, CdTe) и твердых растворах.

Уже внешний вид изобар адсорбции (рис. 6) позволяет сделать вывод о протекании химической активированной адсорбции при температурах выше 303 К (NH<sub>3</sub>), 323 К (CO) и при более высоких температурах. Подтверждением служат результаты анализа равновесных и кинетических изотерм адсорбции, расчеты энергии активации и теплот адсорбции.

В области предполагаемой химической адсорбции равновесные изотермы описываются в основном уравнением Лэнгмюра (спрямляемость в координатах P/a - P), свидетельствуя о мономолекулярности адсорбционного слоя, кинетиче-



ские изотермы  $\alpha_T=f(t)$  – уравнением Рогинского-Зельдовича-Еловича (спрямляемость в координатах  $\alpha - RT \ln t$ ), справедливым применительно к поверхности с равномерно – неоднородным характером распределения. Это позволило, использовать созданный С.З. Рогинским метод «контролирующей полосы» рассчитать средние значения энергии активации адсорбции при различных заполнениях поверхности (величинах  $\alpha$ ). Они составляют 27,3 - 81 кДж/моль.

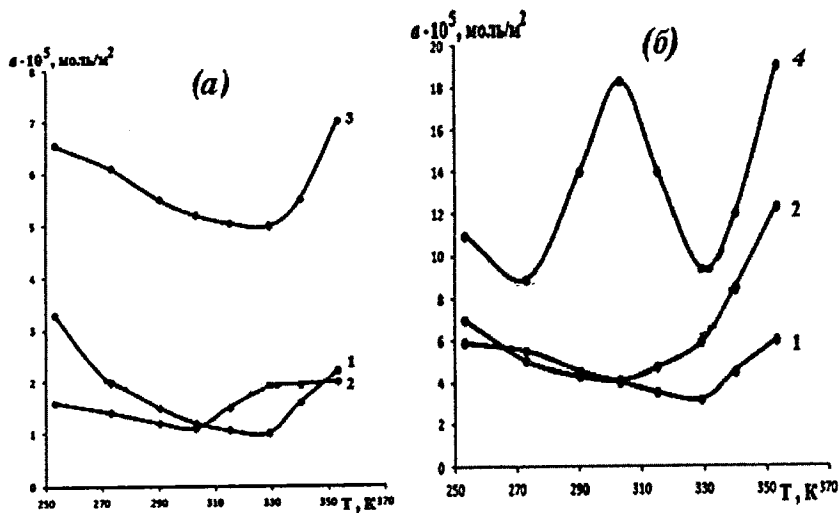


Рис. 6. Изобары адсорбции CO (а) и NH<sub>3</sub> (б) на CdS(1); CdTe (2) и твердых растворах (CdS)<sub>0,16</sub>(CdTe)<sub>0,84</sub> (3); (CdS)<sub>0,24</sub>(CdTe)<sub>0,76</sub>(4) при P<sub>н</sub> = 13Па

Теплоты адсорбции, рассчитанные по уравнению Клапейрона – Клаузиуса для нисходящих участков изобар  $\alpha_p - f(T)$  и полуэмпирическому уравнению, предложенному одним из авторов [5], для всего исследованного интервала температур, при различных  $T$  и  $\alpha$ , составляют 2 - 12 кДж/моль.

Небольшие, характерные для алмазоподобных полупроводников теплоты химической адсорбции можно связать с локализацией носителей заряда на адсорбированных молекулах.

Из анализа полученных результатов адсорбционных исследований поверхности адсорбентов, электронного строения молекул адсорбатов, их «поведения» на других алмазоподобных полупроводниках [2, 8] следует: адсорбция CO и NH<sub>3</sub> протекает по донорно-акцепторному механизму с участием в качестве акцепторов преимущественно поверхностных атомов А (со свободными d- и p-орбиталями и с более выраженными металлическими свойствами) и в качестве доноров – молекул адсорбатов.

Согласно диаграммам, приведенным на рис. 7 отмечается удовлетворительная согласованность адсорбционных характеристик между собой и с зависимостью от состава концентрации кислотных центров (рис. 5), что важно для подтверждения выводов о природе активных центров адсорбции и для прогнозирования адсорбционных свойств по кислотно-основным свойствам.

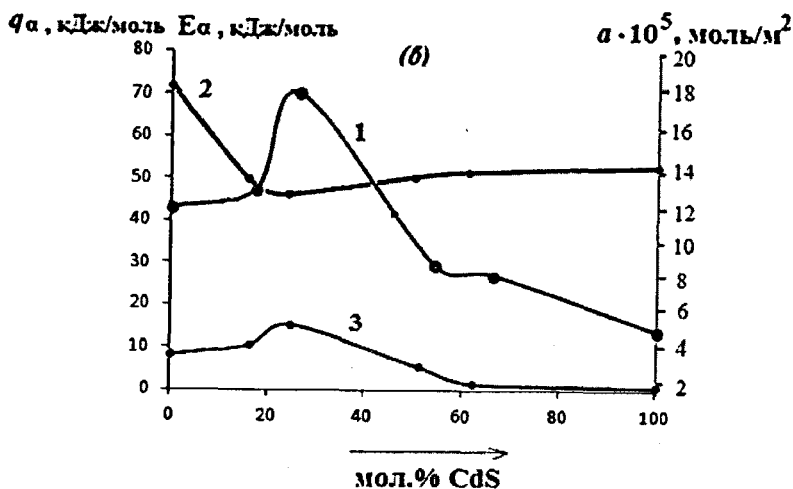
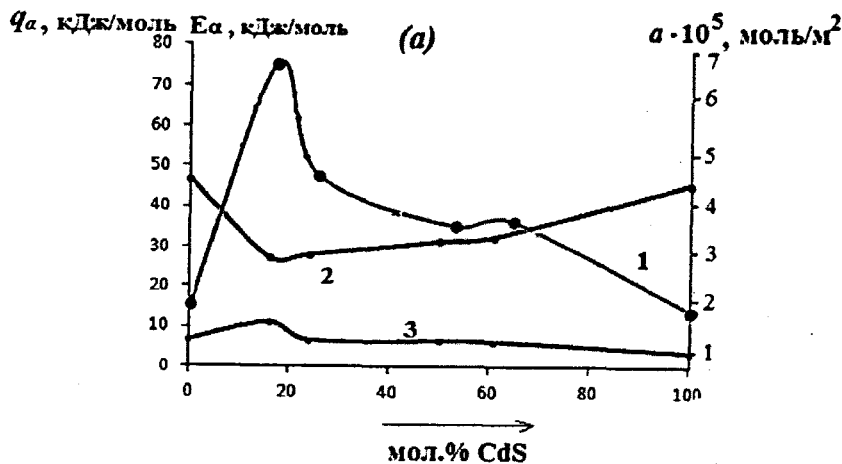


Рис. 7. Зависимости величины адсорбции (1), энергии активации (2), теплоты (3) адсорбции CO (а) и NH<sub>3</sub> (б) от состава системы CdS-CdTe

## Основные закономерности изменения изученных свойств от состава системы CdS–CdTe

Исследования, проведенные в настоящей работе, позволили сопоставить свойства бинарных компонентов и твердых растворов на их основе, выделить сходства и различия в их поведении и провести систематический анализ данных, полученных на каждом этапе исследования.

Так, при аттестации полученных твердых растворов наблюдаются плавные изменения параметров решетки «а», «с» (рис. 1) и рентгеновской плотности от состава твердых растворов  $(\text{CdS})_x(\text{CdTe})_{1-x}$ .

– параметры решетки «а» и «с» CdS и твердых растворов, имеющих структуру вюрцита, изменяются линейно;

– рентгеновская плотность полупроводников системы CdS–CdTe плавно увеличивается с ростом мольной доли CdTe.

Согласно результатам УФ–спектроскопических исследований:

– зависимость интенсивности излучений УФ–света компонентами системы CdS–CdTe от состава имеет экстремальный характер с максимумом при  $X_{\text{CdS}} = 0,16$ ;

– вид УФ–спектров сульфида кадмия и твердых растворов с избытком теллурида кадмия подтверждает возникновение экситонного эффекта в интервале длин волн  $\lambda = 550\text{--}725$  нм.

– зависимость ширины запрещенной зоны компонентов системы CdS–CdTe от состава имеет нелинейный характер, с максимумом при  $X_{\text{CdS}} = 0,16$  и минимумом  $X_{\text{CdS}} = 0,5$ , что характерно для твердых растворов образованных сложными полупроводниками.

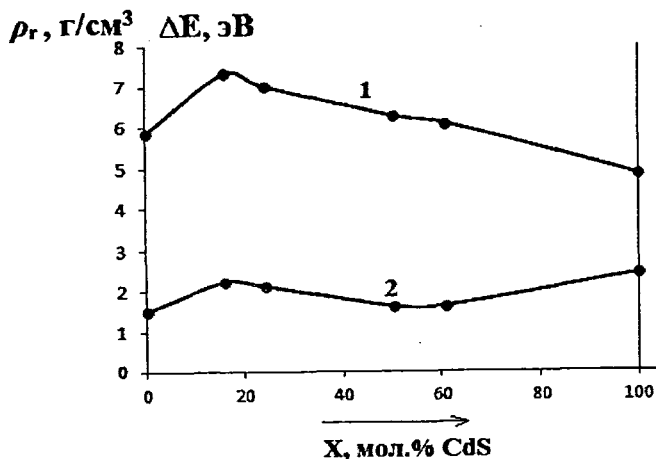


Рис. 8. Зависимости рентгеновской плотности (1) и ширины запрещенной зоны (2) от состава компонентов системы CdS–CdTe

По результатам КР-спектроскопических исследований выявлена зависимость изменения относительной интенсивности люминесценции от состава системы CdS-CdTe. Отмечено, что CdS ведет себя как типичный люминофор, о чем свидетельствует широкий пик с большей интенсивностью.

Интенсивность люминесценции твердых растворов на основе теллурида кадмия выше, чем твердых растворов на основе сульфида кадмия, максимум спектрального распределения находится в длинноволновой области, а интенсивность изменяется через максимум, приходящийся на твердый раствор  $(\text{CdS})_{0,16}(\text{CdTe})_{0,84}$  в видимой области спектра (618 нм).

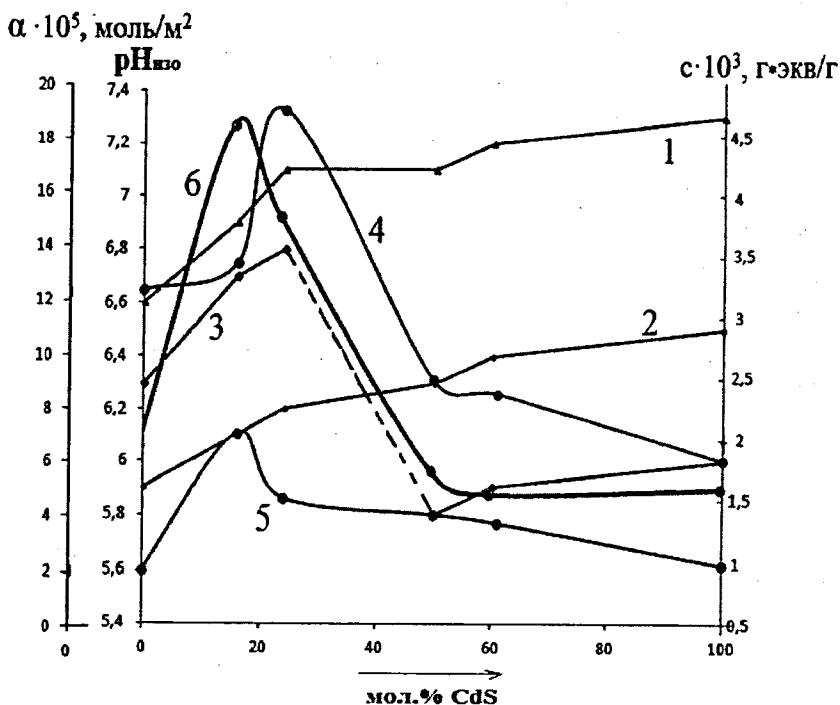


Рис. 9. Концентрационные зависимости кислотных характеристик (1 -  $\text{pH}_{\text{изо}}$  в  $\text{NH}_3$ ; 2 -  $\text{pH}_{\text{изо}}$  на воздухе; 3 -  $\text{pH}_{\text{изо}}$  в CO; 6 -  $\text{с} \cdot 10^3, \text{ г} \cdot \text{экв/г}$ ), и величин адсорбции (4 - аммиака; 5 - оксида углерода (II)) от состава системы CdS - CdTe

При сопоставлении результатов изученных объемных свойств обращает на себя внимание аналогия в закономерностях изменения зависимостей «ширина запрещенной зоны - состав» и «рентгеновская плотность - состав» (рис. 8). В основе взаимосвязи между ними лежит изменение степени ионности связи, а

также электроотрицательности атомов. По мере уменьшения доли ионной связи происходит увеличение значения ширины запрещенной зоны и рентгеновской плотности, а также увеличение кислотности поверхности по сравнению с сульфидом кадмия. То есть, с увеличением содержания CdS происходит изменение кристаллической структуры, вследствие чего изменяется координационное окружение атомов, растет дефектность структуры и происходит неравномерное распределение катион-анионных комплексов, что, в свою очередь, обуславливает наличие экстремумов на диаграммах «свойство–состав».

Исследование кислотно-основных свойств показало, что исходная поверхность обладает преимущественно слабокислыми свойствами, значения pH увеличиваются с ростом мольной доли CdS, а общая концентрация кислотных центров изменяется экстремально, через максимумы для твердых растворов составов  $(\text{CdS})_{0,16}(\text{CdTe})_{0,84}$   $(\text{CdS})_{0,24}(\text{CdTe})_{0,76}$ . При экспонировании в атмосфере аммиака исчезают льюисовские и частично бренстедовские кислотные центры. Соответственно  $\text{pH}_{\text{изо}}$  смещается в слабощелочную область. При экспонировании же в атмосфере оксида углерода (II) значения  $\text{pH}_{\text{изо}}$  смещаются как в слабощелочную (при избытке в системе CdS – CdTe теллурида кадмия), так и в слабокислую (при  $x_{\text{CdS}} \geq 0,5$ ) области. При этом максимальным изменением  $\text{pH}_{\text{изо}}$  под действием оксида углерода, аммиака и, следовательно, максимальной чувствительностью к этим газам обладают твердые растворы составов  $(\text{CdS})_{0,16}(\text{CdTe})_{0,84}$  и  $(\text{CdS})_{0,24}(\text{CdTe})_{0,76}$ .

Таким образом, кислотно-основные характеристики целесообразно использовать для прогнозирования адсорбционной чувствительности, вместо проведения прямых измерений адсорбции, что значительно сокращает время и трудоемкость проведения эксперимента.

Поверхность твердых растворов с содержанием  $X_{\text{CdS}} < 0,5$  характеризуется наибольшей кислотностью, наибольшей концентрацией кислотных центров и соответственно наибольшей активностью по отношению к CO и  $\text{NH}_3$  (донорам электронных пар и акцепторам протонов). При увеличении содержания CdS в твердых растворах наблюдается смещение водородного показателя изоэлектрического состояния ( $\text{pH}_{\text{изо}}$ ) в слабощелочную область и снижение активности по отношению к CO и  $\text{NH}_3$ , что подтверждают результаты адсорбционных исследований (табл. 1).

Сопоставление бинарных компонентов и твердых растворов системы CdS–CdTe как адсорбентов по отношению к выбранным газам позволило обнаружить, наряду со сходством в их поведении, специфические особенности твердых растворов. На сходство указывают аналогичный вид изобар адсорбции, порядок величин адсорбции, термодинамических и кинетических характеристик, одинаковые природа активных центров, механизм и закономерности адсорбционного взаимодействия. На различие и, тем самым, специфичность твердых растворов указывают энергетически более выгодное протекание на них адсорбции (уменьшение энергии активации), наличие экстремумов на диаграммах «кислотно-основная характеристика – состав», «адсорбционная характеристика – состав» (рис. 9, табл. 1).

Обращает на себя внимание аналогия в закономерностях протекания адсорбционных процессов (рис. 7).

Так, при увеличении мольной доли сульфида кадмия в системе CdS-CdTe зависимости величины адсорбции CO и NH<sub>3</sub>, теплоты адсорбции от состава, имеют экстремальный характер с максимумами при X<sub>CdS</sub> = 0,16 и X<sub>CdS</sub> = 0,24. И в обратной последовательности (через минимумы для твердых растворов данных составов) изменяется зависимость величины энергии активации (рис. 10).

Анализируя зависимости «концентрационная характеристика – состав» и «адсорбционная характеристика – состав» (рис. 9) отмечаем их экстремальное изменение с максимумами при X<sub>CdS</sub> = 0,16 и X<sub>CdS</sub> = 0,24.

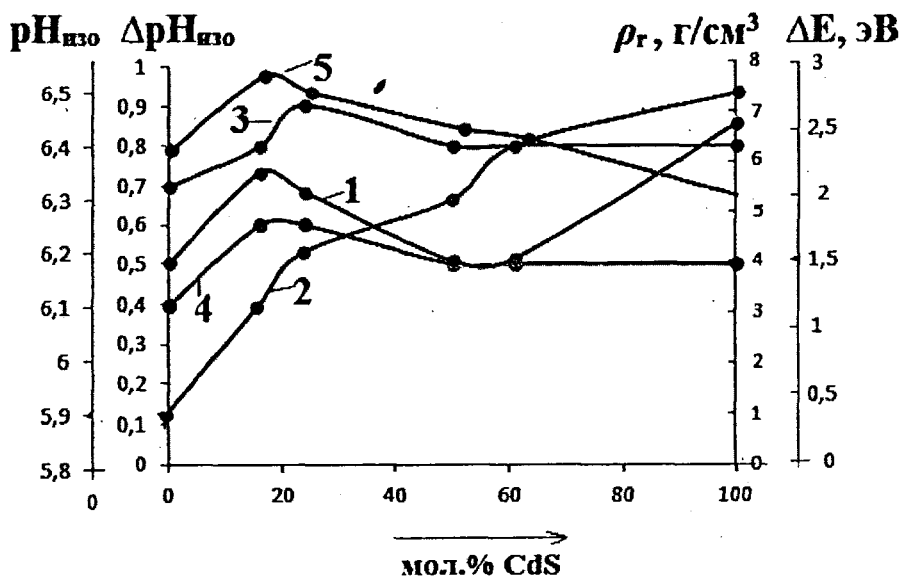


Рис. 10. Зависимости ширины запрещенной зоны (1), показателей кислотности поверхности: pH<sub>изз</sub>(2), ΔpH<sub>изз</sub> (3– NH<sub>3</sub>, 4 – CO), рентгеновской плотности (5) от состава компонентов системы CdS-CdTe

В результате исследований на основе зависимостей «кислотно-основная характеристика – состав» удалось предсказать, а на основе зависимостей «адсорбционная характеристика – состав» найти наиболее активные компоненты (адсорбенты) системы CdS-CdTe: по отношению к CO – твердый раствор (CdS)<sub>0,16</sub>(CdTe)<sub>0,84</sub>, по отношению к NH<sub>3</sub> – твердый раствор (CdS)<sub>0,24</sub>(CdTe)<sub>0,76</sub>. Они предложены в качестве материалов для создания сенсоров-датчиков, со-

ответственно, на микропримеси CO и NH<sub>3</sub>, прошедших лабораторные испытания.

Основные закономерности описанных явлений, взаимосвязь между ними обусловлены природой активных кислотных центров и природой химической связи.

Анализ зависимостей «свойство-состав» позволил установить взаимосвязь между объемными ( $\rho_r$ ,  $\Delta E$ ) и поверхностными ( $pH_{изо}$ ,  $\Delta pH_{изо}$ ) свойствами (рис. 10). В основе которой лежит изменение доли ионной связи, электроотрицательности атомов и соответственно изменение силы и природы кислотных центров, их активности.

Твердые растворы в зависимости от состава проявляют различные свойства (табл.1).

Таблица 1

Значения показателей кислотности поверхности, величин адсорбции от состава системы CdS-CdTe

Мол. доля CdS $X_{CdS}$	$pH_{изо}$	$\Delta pH_{изо}$ CO(NH <sub>3</sub> )	$c \cdot 10^3$ , г-экв/г	$\alpha_{CO} \cdot 10^5$ , моль/м <sup>2</sup>	$\alpha_{NH_3} \cdot 10^5$ , моль/м <sup>2</sup>
0	5,9	0,4(0,7)	1,96	2,1	12,3
0,16	6,1	0,6(0,8)	4,6	7,2	13,3
0,24	6,2	0,6(0,9)	4,05	4,6	19
0,50	6,3	0,5(0,9)	1,75	4,0	9,05
0,61	6,4	0,5(0,8)	1,56	3,7	8,5
1	6,5	0,5(0,8)	1,6	2,2	6,1

Обращают на себя внимание следующие закономерности изменения объемных (рентгеновская плотность, ширина запрещенной зоны) и поверхностных свойств, взаимосвязь между ними:

- по мере нарастания доли ионной связи и увеличении прочности отмечается уменьшение рентгеновской плотности и уменьшение ширины запрещенной зоны (с увеличением мольной доли сульфида кадмия в системе CdS–CdTe);
- параллельно отмечаются закономерности в изменении общей концентрации кислотных центров и адсорбционной активности (в роли активных центров выступают координационно–ненасыщенные атомы А (Cd));
- прослеживается аналогичная закономерность в изменении оптических свойств (зависимости «оптическое свойство – состав») имеют экстремальный характер с максимумами при  $X_{CdS} = 0,16$  и  $X_{CdS} = 0,24$ );
- наличие экстремумов (максимумов) на диаграммах «поверхностное свойство–состав», «объемное свойство–состав» может быть связано с наибольшей дефектностью структуры и координационной ненасыщенностью поверхностных атомов.

### Выводы

1. Впервые по разработанной методике получены в форме порошков и наноразмерных пленок твердые растворы системы CdS–CdTe, ранее неизученных составов.

2. Впервые исследованы объемные физико–химические свойства (рентгенографические, ИК-, УФ-, КР- спектроскопические) полученных твердых растворов, использованные для их аттестации, уточнения кристаллической, электронной структуры, определения электрофизических и оптических характеристик. В результате установлены:

- на основе рентгенографических исследований – образование твердых растворов замещения со структурой вюрцита;
- на основе ИК–спектроскопических исследований – химический состав исходной поверхности, представленный преимущественно адсорбированными молекулами воды, группами ОН-, углеродсодержащими соединениями и продуктами окисления поверхностных атомов;
- на основе УФ–спектроскопических исследований – возникновение экситонного эффекта. Определены значения ширины запрещенной зоны;
- на основе КР–спектроскопических исследований – области максимальной люминесценции, которой обладают CdS и твердые растворы с избытком CdTe. Определены значения частот примесной (характеризующих гексагональную модификацию) и межзонной люминесценций, определены значения ширины запрещенной зоны;

3. Впервые изучены кислотно–основные и адсорбционные (по отношению к CO, NH<sub>3</sub>) свойства твердых растворов (CdS)<sub>x</sub>(CdTe)<sub>1-x</sub> и бинарных компонентов CdS, CdTe.

– Определены природа, сила, концентрация кислотных центров. За кислотные центры ответственны преимущественно координационно–ненасыщенные атомы. Исходная поверхность всех компонентов системы CdS–CdTe имеет слабокислый характер (рН<sub>изо</sub> = 5,9–6,5). С увеличением содержания CdS значение рН<sub>изо</sub> плавно нарастает, а общая концентрация кислотных центров



изменяется экстремально – через максимумы при  $X_{\text{CdS}} = 0,16$  и  $X_{\text{CdS}} = 0,24$ , свидетельствуя и о наибольшей адсорбционной активности твердых растворов указанных составов.

– На основе анализа опытных зависимостей, результатов расчетов теплот и энергий активации адсорбции, ИК–спектров, кислотно–основных характеристик поверхности адсорбентов, а также с учетом электронной природы молекул адсорбатов установлен преимущественно химический, активированный характер адсорбции при температурах выше 303–323 К, подтверждены природа активных центров и донорно–акцепторный механизм взаимодействия CO и NH<sub>3</sub> с поверхностью компонентов системы CdS–CdTe. Наиболее активным из изученных адсорбатов оказался аммиак ( $\alpha_{\text{NH}_3} > \alpha_{\text{CO}} \sim$  в 2 раза).

При ответственности за адсорбцию на порошках и нанопленках одних и тех же активных центров активность нанопленок значительно выше.

4. Найдены закономерности в изменении объемных (рентгеновской плотности, ширины запрещенной зоны, доли ионной связи) и поверхностных (кислотно–основных, адсорбционных) свойств с составом. Построены диаграммы состояния «свойство–состав». Установлена взаимосвязь между ними. Найденный параллелизм закономерностей обоснован с учетом природы активных центров и природы химической связи в исследованных объектах.

5. На основе установленных закономерностей, взаимосвязи между ними и соответствующих диаграмм состояния «свойство–состав»

– показаны возможности прогнозирования поверхностных свойств полупроводников изученной и подобных систем;

– реализованы возможности прогнозирования адсорбционной активности полупроводников по отношению к газам определенной электронной природы по кислотно–основным характеристикам поверхности;

– найдены наиболее активные по отношению к CO и NH<sub>3</sub> компоненты системы CdS–CdTe – твердые растворы составов (CdS)<sub>0,16</sub>(CdTe)<sub>0,84</sub>, (CdS)<sub>0,24</sub>(CdTe)<sub>0,76</sub>;

– твердые растворы данных составов предложены в качестве люминофоров с определенными спектрами свечения и первичных преобразователей сенсоров-датчиков на микропримеси указанных газов, эффективность которых значительно повышена за счет использования предложенных материалов в форме наноразмерных пленок;

– даны практические рекомендации по использованию первичных преобразователей в диагностике окружающей среды и медицинской диагностике выдыхаемого газа.

Подана заявка на изобретение.

### Список цитируемой литературы

1. Кировская И. А. Твердые растворы бинарных и многокомпонентных полупроводниковых систем. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2010. - 400с.
2. Кировская И. А. Поверхностные явления. Омск : Изд-во ОмГТУ, 2001. – 176 с.

3. Кировская И. А. Поверхностные свойства бинарных алмазоподобных полупроводников. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2012.-416с.

4. Кировская И. А. Оценка чувствительности поверхности полупроводников - первичных преобразователей сенсоров-датчиков по кислотно-основным свойствам / И. А. Кировская, А. Е. Земцов, О. А. Тимошенко, Е. О. Карпова, П. Е. Нор, С.О. Подгорный, М. В. Шинкаренко, В.А. Холоденко //Фундаментальные исследования.-№12.-2008.- с. 82-85.

5. Кировская И. А. Адсорбционные процессы. Иркутск : Изд-во ИГУ, 1995. – 300с.

6.Кировская И. А. Методология исследований физико-химических свойств поверхности алмазоподобных полупроводников и основные направления практических разработок // Омский научный вестник. Выпуск 14, 2001. с 1356-1358.

7. Литтл Л. Инфракрасные спектры адсорбированных молекул. М.: Мир, 1969.– 514 с.

8. Кировская И. А. Поверхностные свойства алмазоподобных полупроводников. Адсорбция газов. Иркутск : Изд-во ИГУ, 1984. – 186 с.

9. Накамото К. ИК- спектры и спектры КР неорганических и координационных соединений. М.: Мир, 1991. – 536 с.

10. Кировская И. А. Катализ. Полупроводниковые катализаторы. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2004.-272с.

11. Кировская И. А. Новые катализаторы и адсорбенты на основе полупроводниковой системы InSb-CdTe // ЖФХ, 2007. Т. 81. № 4. С.627-636.

12. Сушинский М. М. Резонансное неупругое рассеяние света в кристаллах // УФН. – 1988. – Т. 154. – вып. 3. – с. 353 – 379.

### **Основные результаты диссертации опубликованы в работах:**

1. Кировская, И. А. Получение и исследование новых материалов и катализаторов на основе системы CdTe-ZnS / И. А. Кировская, И. Ю. Касатова, А. В. Юрьева, П. Е. Нор и др. // Омский научный вестник. – 2012. – № 2(110). – С. 52 – 57.

2. Кировская, И. А. Получение, структурные исследования и аттестация новых адсорбентов (CdS)<sub>x</sub>(CdTe)<sub>1-x</sub>/ И. А. Кировская, П. Е. Нор, Е. Н. Еремин, В. И. Суриков, Ю. К. Машков // Омский научный вестник. – 2012. – № 1(107). – С. 39 – 42.

3. Кировская, И. А. Получение по созданной технологии и физико-химические исследования новых адсорбентов/ И. А. Кировская, О. Т. Тимошенко, А. В. Юрьева, С. А. Корнеев, В. Ф. Суровикин, Ю. И. Матяш, Е. О. Карпова, П. Е. Нор // Омский научный вестник. – 2012. – № 2(110). – С. 61 – 64.

4. Кировская, И. А. Кислотно-основное состояние поверхности полупроводников новой системы CdS-CdTe / И. А. Кировская, П. Е. Нор // Журн. Физической химии. –2013.– Т.87 – №10 – с.1-6 (с игнальный экземпляр),

5. Кировская, И. А. Химический состав и кислотно-основные свойства поверхности компонентов системы CdS-CdTe / И. А. Кировская, П. Е. Нор // Омский научный вестник. – 2013. – № 2(120) – с.1–5 (сигнальный экземпляр).

6. Кировская, И. А. Оценка чувствительности поверхности полупроводников - первичных преобразователей сенсоров-датчиков по кислотно-основным свойствам/ И. А. Кировская, А. Е. Земцов, О. А. Тимошенко, Е. О. Карпова, П. Е.Нор, С. О. Подгорный, М. В. Шинкаренко, В. А. Холоденко // Фундаментальные исследования.-№12.-2008.- с. 82-85.

7. Кировская, И. А. Новый способ оценки чувствительности поверхности полупроводников первичных преобразователей сенсоров-датчиков / И. А. Кировская, А. Е. Земцов, О. А. Тимошенко, П. Е. Нор и др.// Материалы VIII научной конф. Аналитика Сибири и Дальнего Востока. - Томск: ТПУ, 2008. - С.131

8. Кировская, И. А. Химическое и кислотно-основное состояние поверхности InP, CdS, подвергнутой различным воздействиям / И. А. Кировская, О. Т. Тимошенко, П. Е. Нор// Материалы V Международной научно-технической конф. «Динамика систем, механизмов и машин». Кн. 3. - Омск: ОмГТУ, 2004. - С. 40-43

9. Кировская, И. А. Получение и физико-химические исследования новой полупроводниковой системы InSb-CdS / И. А. Кировская, Т. Н. Филатова, П. Е. Нор, А. В. Шаповалова // Материалы VI Международной конф. «Динамика систем, механизмов и машин». Кн. 3. -Омск: ОмГТУ, 2007. - С. 163-167

10. Кировская, И. А. Новый способ оценки чувствительности первичных преобразователей сенсоров-датчиков / И. А. Кировская, А. Е. Земцов, О. Т. Тимошенко, О. П. Азарова, Е. О. Карпова, С. О. Подгорный, П. Е. Нор, В. А. Холоденко // Материалы Всерос. науч.-техн. конф. «Россия молодая : передовые технологии - в промышленность» Кн. 2. –Омск, ОмГТУ, 2008. — С. 228 – 234.

11. Кировская, И. А. Кислотно-основное состояние и активность поверхности новых адсорбентов на основе систем  $A^2B^6 - A^2B^6/$  И. А. Кировская, Т. Л. Букашкина, М. В. Васина, П. Е. Нор, Е. О. Карпова, И. Ю. Касатова, И. А. Кубрина, В. А. Холоденко, Ю. В. Бунтина // Материалы Всероссийской научно-технической конф. «Россия молодая: передовые технологии – в промышленность». Кн. 2. - Омск: ОмГТУ, 2009. - С. 165-169

12. Кировская, И. А. Влияние состава компонентов системы CdTe-ZnS и аналогов  $CdV^6$ ,  $ZnV^6$  на кислотно-основные поверхности / И. А. Кировская, И. Ю. Касатова, П. Е. Нор, В. А. Холоденко // Материалы III Всероссийской молодежной научно-технической конф. «Россия молодая: передовые технологии – в промышленность». Кн. 1. - Омск: ОмГТУ, 2010. - С. 337-342

13. Кировская, И. А. Получение и аттестация твердых растворов системы CdS-CdTe / И. А. Кировская, П. Е. Нор // Материалы IV Всероссийской молодежной научно-технической конф. «Россия молодая: передовые технологии – в промышленность». Кн. 1. - Омск: ОмГТУ, 2011. – С. 375 - 378

14. Кировская, И. А. Кислотно-основные свойства и прогнозирование адсорбционной активности поверхности полупроводников системы CdTe-ZnS /

И. А. Кировская, И. Ю. Касатова, П. Е. Нор и др. // Материалы II Региональной молодежной научно-технической конф. «Омский регион – месторождение возможностей». Кн. 1. - Омск: ОмГТУ, 2011. - С. 229-232

15. Кировская, И. А. Кислотно-основные свойства бинарных и многокомпонентных полупроводников типа  $A^{IV}B^{VI}$ ,  $A^{IV}B^{VI} - A^{IV}B^{VI}$  / И. А. Кировская, И. Ю. Касатова, П. Е. Нор и др. // Материалы 1-й научно-технической конференции аспирантов, магистрантов, студентов «Техника и технология современного и нефтегазового производства». - Омск: ОмГТУ, 2011. – С.96-101

16. Кировская, И. А. Получение, аттестация, и кислотно-основные свойства твердых растворов системы  $CdS-CdTe$  / И. А. Кировская, И. Ю. Касатова, П. Е. Нор, Г. В. Ладуренко // Материалы 2-й научно-технической конф. аспирантов, магистрантов, студентов «Техника и технология современного и нефтегазового производства». Кн. 1. – Омск: ОмГТУ, 2012. - С. 134-142.

17. Кировская, И. А. Оценка чувствительности адсорбентов системы  $CdS-CdTe$  к токсичным газам/ И. А. Кировская, О. Т. Тимошенко, П. Е. Нор// Материалы VIII международной научно-технической конференции Динамика система, механизмов и машин. Кн. 3. – Омск: ОмГТУ, 2012. - С. 185-189.

18. Кировская, И. А. Кислотно-основные и оптические свойства бинарных и тройных компонентов системы  $CdS-CdTe$  / И. А. Кировская, П. Е. Нор // Материалы VIII международной конференции Динамика систем, механизмов и машин. Кн.3. - Омск: ОмГТУ, 2012. – С.180-185.

Печатается в авторской редакции

Компьютерная верстка О. Г. Белименко

Подписано в печать 18.04.13. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная.  
Отпечатано на дупликаторе. Усл. печ. л. 1,75. Уч.-изд. л. 1,75.  
Тираж 100 экз. Заказ 247.

---

Издательство ОмГТУ. 644050, г. Омск, пр. Мира, 11; т. 23-02-12  
Типография ОмГТУ