

На правах рукописи



ЁДАЛИЕВА Зулфия Нуралиевна

**ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СИСТЕМ
CdSb - NiSb₂, ВЛИЯНИЕ ИХ НА ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ
ДИМЕТИЛГИДРАЗИНА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ
И ДАВЛЕНИЯ**

01.04.14 –Теплофизика и теоретическая теплотехника

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук**

Казань-2016

Работа выполнена в Таджикском техническом университете имени академика М.С. Осими на кафедре «Теплотехника и теплотехническое оборудование»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
Сафаров Махмадали Махмадиевич
к.х.н., доцент **Сайдуллаева Муътабар**

Официальные оппоненты:

Эмиров Субханверди Нурмагомедович, доктор технических наук, профессор. Институт проблем геотермии, кафедры бурения нефтяных и газовых скважин; Дагестанский научный центр РАН, главный научный сотрудник.

Сагдеев Дамир Исмагилович - кандидат технических наук, доцент ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет, доцент кафедры вакуумной техники электрофизических установок»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Защита диссертации состоится «19» октября 2016 г. в 12³⁰ часов на заседании диссертационного совета по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Д 212.079.02., на базе ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ» по адресу: 420111. г. Казань ул. К. Маркса, д.10.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева-КАИ», а также автореферат и диссертация размещены на сайте ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ»: <http://www.kai.ru/science/disser/index.phtml>

Автореферат разослан «___» _____ 2016г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Каримова Ала Григорьева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность диссертационной работы заключается в том, что развитие современной науки и техники предъявляет все возрастающие требования к разнообразию, уровню и качеству свойств изделий из полупроводниковых материалов системы $CdSb-NiSb_2$. Исследование теплофизических и термодинамических свойств полупроводниковых материалов в зависимости от давления и температуры представляет одну из важных научных проблем, имеющих большую практическую значимость. Вопросы надежности полупроводниковых приборов, повышения процентов выхода годных изделий, стабильности параметров остаются весьма актуальными. Обычно они решаются—на этапах изготовления — усовершенствованием технологических процессов, конструкции—в итоге—отбраковкой ненадёжных изделий. Комплексное изучение термодинамических и теплофизических свойств этих материалов в широкой области параметров состояния интересно тем, что как модельные объекты они являются удобными. Анализ экспериментальных данных исследуемых веществ при высоких параметрах состояния дает возможность установить основные условия рассеяния и переноса теплоты как в чистых металлах, так и в отмеченных полупроводниковых материалах, а также позволяет проверить возможность применимости теорий. В последние годы в России в солнечных батареях, используемых в космических аппаратах, применяют водные растворы гидразина (в определенном соотношении). В эти растворы добавляют некоторое количество порошка $CdSb$, который вследствие химической реакции разлагается на наночастицы Cd и Sb . Наночастицы $CdSb$ выделяют некоторое количество энергии, а частицы Cd высвечиваются, выделяя тем самым дополнительное количество теплоты. Поэтому мы перед собой поставили задачу изучить теплофизические свойства несимметричного диметилгидразина (водный раствор гидразина) с добавкой порошка $CdSb-NiSb_2$ от 0,5 до 2,5% при высоких параметрах состояния. Полученные результаты позволяют оценить влияние концентрации данного порошка на свойства и поведение несимметричного диметилгидразина, а также могут быть использованы для численных расчетов калорических и термодинамических свойств изучаемых систем (несимметричный диметилгидразин и $CdSb-NiSb_2$) при различных температурах и давлениях.

Диссертационная работа посвященная исследованию теплоёмкости, температуропроводности, теплопроводности и плотности в малоисследованной области температур и давлений, имеет цель восполнить пробел в экспериментальном изучении указанных свойств полупроводниковых материалов системы $CdSb-NiSb_2$ (порошок, монокристалл) и несимметричного диметилгидразина с добавкой порошка $CdSb-NiSb_2$ от 0,5 до 2,5% в интервалах температур (100-673)К и давлений(0,101-19,62)МПа.

Объект исследования полупроводниковые материалы системы $CdSb-NiSb_2$ (порошок, монокристалл) и несимметричный диметилгидразин с добавкой порошка $CdSb-NiSb_2$ от 0,5 до 2,5%.

Целью диссертационной работы является получение данных на базе экспериментальных исследований по теплофизическим (теплопроводность, температуропроводность, теплоёмкость, плотность) свойствам и расчёт термодинамических (энтропия, энтальпия, энергия Гиббса, энергия Гельмгольца и внутренняя энергия) свойств системы $CdSb-NiSb_2$ (монокристалл, порошок) в интервале температур (100-

673)К и несимметричного диметилгидразина с добавкой порошка CdSb-NiSb_2 размерами 10 мкм, от 0,5 до 2,5% в интервалах температур (293-673)К и давлений (0,101-19,62) МПа.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Обоснована возможность применения метода монотонного регулярного теплового режима первого рода, для исследования теплофизических свойств полупроводниковых материалов при различных температурах и давлениях и реологических свойств.

2. Выполнено комплексное исследование теплопроводности, теплоёмкости, температуропроводности и плотности полупроводниковых материалов системы CdSb-NiSb_2 (монокристалл, порошок) в зависимости от температуры в диапазоне (100–673)К для создания подробных таблиц по теплофизическим свойствам исследуемых систем.

3. Измерены теплопроводность, теплоёмкость, температуропроводность, плотность несимметричного диметилгидразина с добавкой порошка системы CdSb-NiSb_2 , размером 10 мкм в диапазоне температур (100–673)К и давлений (0,101-19,62) МПа, а также проведено обобщение полученных экспериментальных данных.

4. Изучены механизмы теплофизических процессов, их влияние на качество и теплофизические характеристики полупроводниковых материалов системы CdSb-NiSb_2 как в виде монокристалла, так и их порошков.

Научная новизна и теоретическая значимость полученных результатов диссертационной работы состоит в следующем:

1. Усовершенствование экспериментальной установки для исследования температуропроводности (метод α -калориметра), теплопроводности и теплоёмкости (метод цилиндрического бикалориметра), плотности (метод гидростатического взвешивания). При сборке установок учтены специфические особенности исследуемых веществ.

2. Впервые выполнено комплексное исследование теплопроводности, температуропроводности, удельной теплоёмкости и плотности полупроводниковых материалов системы CdSb-NiSb_2 в зависимости от температуры (100-673)К в виде монокристалла и порошка, размером 10 мкм а также несимметричного диметилгидразина с добавкой порошков данных полупроводниковых материалов в интервале температур (100-673)К и давления (0,101-19,62) МПа.

3. Впервые получены эмпирические уравнения для расчёта теплопроводности, теплоёмкости, температуропроводности полупроводниковых материалов системы CdSb-NiSb_2 и несимметричного диметилгидразина с добавкой порошков данных полупроводниковых материалов.

4. На основе экспериментальных данных по плотности при различных температурах и давлениях впервые нами получены уравнения состояния (УС) исследуемых растворов, позволяющие определить их калорические и термодинамические свойства.

5. С использованием уравнения состояния впервые нами рассчитаны такие термодинамические функции, как энтальпия, энтропия, энергия Гиббса, энергия Гельмгольца, внутренняя энергия, разность теплоемкостей и др. системы несимметричный диметилгидразин + порошок полупроводниковых материалов системы CdSb-NiSb_2 при различных температурах и давлениях.

6. Впервые нами апробированы новые способы обобщения и обработки экспериментальных данных теплофизических свойств полупроводниковых материалов

систем CdSb-NiSb₂ и несимметричного диметилгидразина в зависимости от температуры и давления.

7. Составлены таблицы экспериментальных данных по теплофизическим свойствам (теплопроводности, теплоёмкости, температуропроводности) порошка полупроводниковых систем CdSb-NiSb₂, термодинамическим характеристикам (плотность, энтальпия, энтропия, энергия Гиббса, энергия Гельмгольца, внутренняя энергия, разность теплоемкостей)

На защиту выносятся:

-результаты экспериментального исследования теплофизических характеристик полупроводниковых материалов системы CdSb-NiSb₂ (монокристалл, порошок), от температуры в интервале (100-673)К;

-закономерности изменения теплофизических свойств (плотности, теплопроводности, удельной теплоёмкости и температуропроводности) исследуемых объектов в зависимости от концентрации NiSb₂ в интервале температуры от 100 до 673К и давлений (0,101-19,62)МПа.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Получены экспериментальные и расчетные данные по теплофизическим и термодинамическим свойствам полупроводниковых материалов системы CdSb-NiSb₂, которые рекомендуются в качестве справочных данных и могут быть использованы при расчётах теплофизических характеристик композиционных материалов и тепловых режимов работы полупроводниковых изделий в зависимости от температуры и давления.

2. Получены аппроксимационные зависимости устанавливающие взаимосвязь теплофизических свойств полупроводниковых материалов CdSb-NiSb₂ (монокристалл, порошок) и несимметричного диметилгидразина с добавкой 0,5 до 2,5% порошка полупроводниковых материалов CdSb-NiSb₂ от температуры и давления, а также концентрации второго компонента (монокристалл и порошок) и концентрации порошка в диметилгидразине, которые позволяют рассчитать температуропроводность, теплоёмкость, теплопроводность и плотность данных систем в интервале температур (100-673)К и давлений (0,101-19,62)МПа с погрешностью до ±5%.

3. Усовершенствованная аппаратура для измерения теплофизических свойств используется в научных и учебных лабораториях кафедры «Теплотехника и теплотехническое оборудование» Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими, аспирантами и преподавателями для выполнения научных работ.

Результаты исследования внедрены: Основные результаты и выводы диссертационной работы используются в качестве справочного материала в институте химии им. В.И. Никитина Академии наук Республики Таджикистан и на кафедре «Теплотехника и теплотехническое оборудование» ТТУ имени академика М.С. Осими.

Личный вклад автора состоит в выборе методов и разработке алгоритмов, решении поставленных задач при выполнении работы; установлении основных закономерностей протекающих физико-химических процессов; проведении экспериментальных исследований по теплофизическим параметрам (теплопроводность, теплоёмкость, плотность, температуропроводность) расчёте термодинамических параметров (энтальпии, энтропии, удельной энергии Гиббса, удельной энергии Гельмгольца); обработке полученных результатов; формулировке основных выводов диссертационной работы.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: X Российской конференции «Теплофизические свойства веществ». Казань, (2002); Конференции молодых учёных Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими, Душанбе, (2002); Республиканской научно-практической конференции «Инновация-эффективный фактор связи науки производством» Душанбе, (2008); Научно-практической конференции «Актуальные проблемы технологического образования средних специальных и средних учебных заведений» Душанбе, (2009); Республиканской научно-практической конференции, посвящённой 35-летию кафедры «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты» Душанбе, (2009); Научно-теоретической республиканской конференции Курган-Тюбе, (2011); 8-Международной теплофизической школе, посвящённой 60-летию профессора М.М. Сафарова. Душанбе–Тамбов, (2012); 9-й Международной теплофизической школе Душанбе–Тамбов, (2014); 8- Международной научно-технической конференция «Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики (АНТЭ-2015)» КНИТУ-КАИ, (2015).

Публикация. По теме диссертационной работы опубликовано 25 научных статей и тезисов докладов (из них 5 рекомендуемых ВАК РФ).

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, основных результатов и выводов работы, списка использованной литературы и приложения. Содержание работы изложено на 148 страницах компьютерного текста, включая 44 таблиц, 35 рисунков, 150 наименований использованной литературы и 16 страниц приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ:

Во введении – приведена актуальность темы диссертации, сформирована цель работы, приведены практическая ценность и научная новизна работы.

В первой главе приведен обзор результатов физико-химических исследований полупроводниковых материалов как зарубежными, так и отечественными учеными.

Изучению физико-химических и электрических свойств полупроводниковых соединений посвящено значительное количество работ. Так, например, Абулхаев В. Дж на основании результатов исследования процесса начала взаимодействия редкоземельных элементов (РЗЭ) с сурьмой, висмутом и диаграмм состояния систем РЗЭ-сурьма и РЗЭ-висмут, разработал ряд методов синтеза сплавов и соединений, в частности твёрдых растворов $d_x\text{H}_{0,5-x}$ ($x=0,5-1,5$). В результате физико-химического анализа автором были построены диаграммы состояния систем Ln-Sb (In-La, Ce, Pr, Nd, Sm, Vb) и систем Ln-Bi (Ln-Pr, Nd, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Lu), на основании чего были найдены и выделены гомогенные состояния соединений Nd_2Sb , Sm_5Sb_3 , Ln_5Bi_3 . (Ln-Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Lu) обнаружен полиморфизм соединений Vb_5Sb_3 , Ln Sb_2 , (Ln-La, Ge, Pr, Nd) и показана возможность образования соединений типа LnBi_2 , (Ln=Gd, Tb, Ho, Er, Tm, Ln) в обычных условиях. Назаровым Х.Х. были построены полные диаграммы состояния систем Gd_4Sb_3 - Ln_4Sb_3 (Ln = Pr, Nd, Tb, Dy, Yb) и Tb_4Sb_3 - Dy_4Sb_3 и выявлена общая закономерность в их строении, которая проявляется в следующем: а) указанные диаграммы однотипны; б) характерно образование в системах изоструктурного ряда твердых растворов замещения; в) установлен характер проводимости, определены значения парамагнитных температур Кюри и тип магнитного упорядочения твердых растворов систем Gd_4Sb_3 - Ln_4Sb_3

(Ln = Pr, Nd, Tb, Dy, Yb) и Tb₄Sb₃ - Dy₄Sb₃. На основании проведенных исследований Назаров Х.Х разработал новые магнитные материалы с повышенными магнитными свойствами. Балаевым М.А. была разработана установка, с помощью которой четырех контактным способом проведено исследование температурной зависимости удельного электросопротивления (ρ) и термо-э.д.с. (α) сплавов и соединений. При этом относительная погрешность измерения удельного электросопротивления составляла $\pm 2,5\%$, а термо-э.д.с. $\pm 2\%$. По результатам исследований автор также показал, что как удельное электросопротивление, так и термо-э.д.с. соединений системы Gd-Sb во всем исследованном диапазоне температур изменяются линейно, что характерно для веществ с металлической проводимостью. В последнее время Ащеуловым А.А. получены результаты, которые говорят о том, что свойства некоторых полупроводниковых материалов и приборов на их основе могут быть изменены, в результате воздействия на них сочетания электрического и магнитного полей соответствующей геометрии (ЭМПСГ). Предметом изучения являлись серийные кремниевые низковольтные фотодиоды УФДО1, УФДО2 и ФД288А, критерием воздействия служил обратный (тепловой) ток (I_t).

Во второй главе рассматриваются экспериментальные методы измерения теплофизических свойств веществ в зависимости от температуры и давления. Обоснован выбор методов исследования теплопроводности, удельной теплоёмкости, плотности, температуропроводности веществ.

Описание экспериментальной установки для измерения температуропроводности зернистых материалов и порошков в широком диапазоне температур

Для измерения температуропроводности зернистых материалов была использована экспериментальная установка по методу цилиндрического a -калориметра регулярного теплового режима. Схема установки приведена на рисунке 1.

Установка в основном состоит из 1) a -калориметра, 2) термостатирующей системы, 3) вакуумной системы, 4) системы заполнения, 5) электроизмерительных датчиков. a -калориметр состоит из медного цилиндра (1) диаметром 100мм и высотой 190 мм, в котором расточена цилиндрическая полость диаметром 30мм и глубиной 95,8 мм. В верхней части a -калориметра имеется пробка (2), которая имеет два отверстия. Одно из отверстий расположено по центру пробки, в которое вставлена металлическая трубка (4) диаметром 6мм. Длина трубки выбирается с таким расчётом, чтобы она проходила по осевой линии a -калориметра до основания, нижняя часть трубки вварена. В другое отверстие (5) заварена металлическая трубка (6) диаметром 14/10, длиной 400 мм. Пробка с заваренными трубками вварена в корпус a -калориметра. Через трубку (6) при-

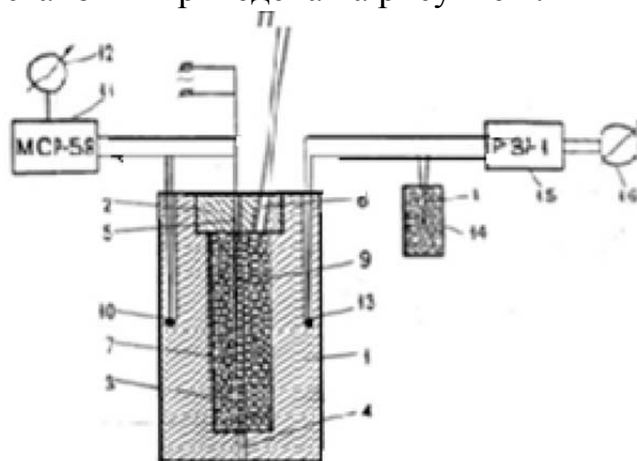


Рисунок 1. Схема экспериментальной установки для измерения температуропроводности зернистых материалов и порошков

бор заполняется исследуемым объектом. Трубка (6) также служит для подачи газа внутрь α -калориметра и создания вакуума. Внутрь трубки (4) вставляется горячий спай хромель-алюмелевой термопары (9) и маломощный нагреватель. Для создания хорошего теплового контакта горячий спай измерительной термопары (9) вплотную подведен к внутренней поверхности трубки(4), холодный спай измерительной термопары (10) вставляется в отверстие, в корпус α -калориметра. Концы термопары через шунтирующий магазин сопротивления (11) подсоединены к зеркальному гальванометру М17/4(12). Шкала гальванометра соответствует температурному перепаду примерно 3К. Медный цилиндр выполняет роль среды, обеспечивающей благоприятные условия эксперимента. Для измерения температуры используется другая дифференциальная хромель-алюмелевая термопара, горячий спай (13) которой вмонтирован в тело α -калориметра, а холодный (14) помещен в термос со льдом. Концы термопары подсоединены к потенциометру постоянного тока Р-37/1 (15). Класс точности 0,01.

Выход потенциометра подсоединяется к зеркальному гальванометру М 25/2 (16), позволяющему регистрировать температуру тела α -калориметра с точностью до сотой доли градуса. Медный цилиндр, тело которого в нашей установке используется как охлаждающая среда, вследствие большой теплопроводности, обеспечивает также малые градиенты температур. Для создания вакуума в α -калориметре используется вакуумный пост типа ВОУ-1А. После вакуумирования производится замер температуропроводности исследуемого образца при заданной температуре. Давление в камере измерялось вакуумметром ВИТ-2. Эта установка позволяет проводить исследование температуропроводности зернистых материалов и порошков в интервале температур 293÷673 К.

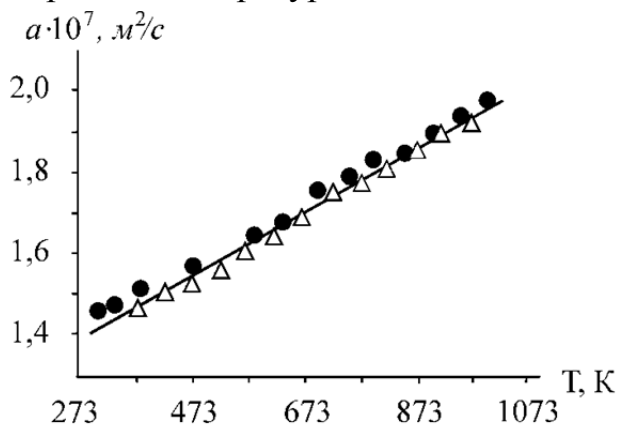


Рисунок 2. Зависимость температуропроводности порошка окиси алюминия от температуры:

Δ – литературные данные; \bullet – данные автора

Для проверки правильности постановки и обработки эксперимента контрольные измерения были проведены на порошке окиси алюминия. Температуропроводность порошка окиси алюминия измерялась при атмосферном давлении в интервале температур 298÷1008,6К (до температуры плавления равной, 2050К). Полученные экспериментальные данные порошка окиси алюминия с погрешностью 2-2,5% совпадают с данными во всем интервале температур (рисунок 2). Анализ возможных ошибок при измерении температуропроводности показывает, что общая относительная доверительная граница при $\alpha = 0,95$ погрешности измерения не превышает 1,91%. α -калориметр заполняется исследуемым образцом. Производится проверка отсутствия электрических контактов между телом α -калориметра, измерительными термопарами и нагревателем, затем α -калориметр помещается в шахтную печь типа СШОЛ-11,6/12. Печь может работать в автоматическом режиме и в режиме ручной регулировки. Печь обеспечивает равномерный прогрев образца до температуры 1473К.

При переводе печи в ручную регулировку и правильном подборе режимного тока при заданной температуре система позволяет поддерживать постоянную температуру в теле α -калориметра с точностью до сотых долей градуса в течение времени, необходимого для проведения замеров. Для разогрева образца до заданной температуры печь переключается на автоматический режим. В этом режиме производится прогрев образца, после чего для получения точной, постоянной температуры печь переводится на ручную регулировку. Контрольные приборы позволяют определить момент, когда температура α -калориметра перестанет изменяться. После вакуумирования до нужного давления и заполнения α -калориметра газом устанавливается положение нулевой точки зеркального гальванометра типа М17/49(12). Затем включается цепь внутреннего маломощного нагревателя, который поднимает температуру образца на 3-4К выше температуры корпуса α -калориметра, регистрируется по отклонению зайчика гальванометра (12).

После нагрева производится отключение нагревательной системы и наблюдается самопроизвольное охлаждение образца. Время охлаждения образца фиксируется секундомером типа С11-16. По шкале зеркального гальванометра (12) отмечается время прохождения светового зайчика между двумя определенными значениями шкалы гальванометра. Данный участок располагается в середине шкалы, который всегда соответствует регулярному тепловому режиму процесса охлаждения, что было проверено построением полулогарифмических графиков для определения темпа охлаждения.

Температуропроводность исследуемых образцов вычислялась по формуле:

$$a = Km_{\infty}, \quad (1)$$

где K – коэффициент, характеризующий форму образца; m_{∞} – темп охлаждения при $\alpha \rightarrow \infty$ и $t_c = \text{const}$. Коэффициент формы образца K для цилиндра определяется по формуле:

$$K = \frac{1}{\left(\frac{x_0}{R}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{\ell}\right)^2}, \text{ м}^2 \quad (2)$$

где x_0 – наименьший корень Бесселевой функции первого рода нулевого порядка; $x_0 = 2,4040$; R и ℓ – соответственно радиус и высота цилиндрической полости α -калориметра. Для нашей установки $R = 8,5 \cdot 10^{-2}$ м; $\ell = 3 \cdot 10^{-5}$ м; $K = 0,34 \cdot 10^{-4}$ м². Темп охлаждения определяется по формуле:

$$m = \frac{\ln N_1 - \ln N_2}{\tau_2 - \tau_1} = \frac{\ln \theta_1 - \ln \theta_2}{\tau_2 - \tau_1}. \quad (3)$$

Убедившись, что экспериментальная установка хорошо воспроизводит температуропроводность порошка окиси алюминия, можно приступать к измерению температуропроводности исследуемых образцов. На данной установке нами измерена температуропроводность порошков CdSb как в чистом виде, так и с содержанием от 4 до 100% массовой концентрации NiSb₂ в интервале температур 290,8-673К при атмосферном давлении ($P = 0,101$ МПа).

Экспериментальная установка для комплексного определения теплофизических свойств веществ при различных температурах и давления

Для измерения теплофизических свойств (теплопроводность, теплоёмкость и температуропроводность) исследуемых образцов при высоких температурах и давлениях применяли экспериментальную установку по методу цилиндрического бикалориметра регулярного теплового режима первого рода. Схема установка показана на рисунке 3.

Установка в основном состоит из цилиндрического бикалориметра, пере-

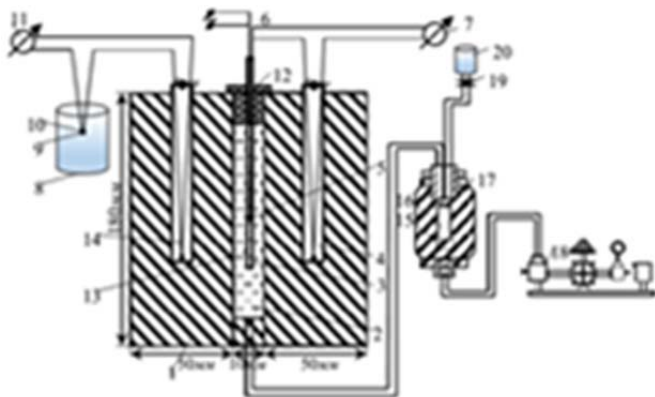


Рисунок 3. Схема установки для комплексного определения теплофизических свойств растворов

жимного сосуда высокого давления (17), грузопоршневого манометра МП-2500 (18) и электроизмерительных приборов (7,11). При измерении температуры опыта нами использована дифференциальная хромель-алюмелевая термопара диаметром 0,15мм с потенциометром Р37-1(7,11) класса точности 0,001. Холодный спай дифференциальной термопары помещается в сосуд Дьюара со льдом (9) и (8). С помощью термопары и гальванометра типа М17/4 регистрировалось изменение температуры опыта

во время эксперимента, которое не превышало 0,02К. Для измерения перепада температуры на границах исследуемого слоя использовалась также хромель-алюмелевая термопара, горячий спай которой находился в отверстии в измерительном цилиндре (2), а холодный спай в отверстии (7) внешнего цилиндра, концы которого соединяются с гальванометром типа М17/2. Внутренний нагреватель и горячий спай измерительной термопары находились в бикалориметре при атмосферном давлении и полностью были изолированы от исследуемой среды. Для создания перепада температуры на границе исследуемого слоя использовался внутренний нагреватель из нихромовой проволоки диаметром 0,15мм, вмонтированной в измерительный цилиндр, который питался от сети через понижающий трансформатор. Отверстия, высверленные в измерительном цилиндре для размещения нагревателя спая измерительной термопары, имели минимальные диаметры, чтобы наличие их не могло существенно влиять на равномерность температурного поля ядра. Для исключения электрического контакта термопары и внутреннего нагревателя они были изолированы от корпуса бикалориметра с помощью стеклоткани, пропитанной клеем БФ-2. Перепад температуры на границе исследуемого слоя составлял 1,31-0,65К. Для расчёта методической погрешности измерения температуры опыта использована универсальная методика. Расчёты показали, что доверительная граница погрешности теплопроводности при измерении по методу цилиндрического бикалориметра (комплексного) регулярного теплового режима в относительной форме, при $\alpha=0,95$ составляет 1,9%, методическая погрешность 0,2%, инструментальная погрешность 1,1%. Общая относительная погрешность измерений теплопроводности составляет 3,2%. Аминов Ш.А на экспериментальных установках измерял теплопроводность, удельную изобарную теплоёмкость и температуропроводность водных растворов пентэласт R-1161(1%-6%,2%,3%,4%,5%,6%), в интервале температур (293-413)К, при атмосферном давлении, а также в интервале давлений (0,101-29,25) МПа. Используя закон соответственных состояний и экспериментальные

данные по теплофизическим характеристикам, мы получили ряд эмпирических уравнений, которые позволяют рассчитать выше перечисленные параметры исследованных растворов. Контрольные измерения для проверки правильности постановки экспериментов были проведены с атмосферным воздухом и толуолом. При атмосферном давлении теплопроводность воздуха измерялась в интервале температур от 293К до 673К. Также с помощью установки проверялась на воспроизводимость теплопроводность воздуха, которая измерялась в разное время и при различных толщинах исследуемого слоя. Экспериментальные значения теплопроводности воздуха для одной серии измерений графически приведены на рисунке 4.

Для измерения теплоемкости исследуемых образцов в зависимости от температуры нами была использована экспериментальная установка, работающая методом монотонного разогрева, с помощью которой можно определить теплоемкость веществ с погрешностью 2,7%. С помощью экспериментальной установки, работающей методом гидростатического взвешивания с погрешностью до 0,1% нами была измерена плотность исследуемых образцов при высоких параметрах состояния. Подробное описание опытных установок приведено в диссертации.

В третьей главе приводятся результаты экспериментального исследования теплопроводности, теплоёмкости, температуропроводности и плотности полупроводниковых материалов (порошок, монокристалл) в зависимости от температуры, а также выше перечисленные теплофизические свойства растворов системы несимметричного диметилгидразина с добавкой порошков полупроводниковых материалов системы $CdSb-NiSb_2$ от 0,5 до 2,5% при различных температурах и давлениях.

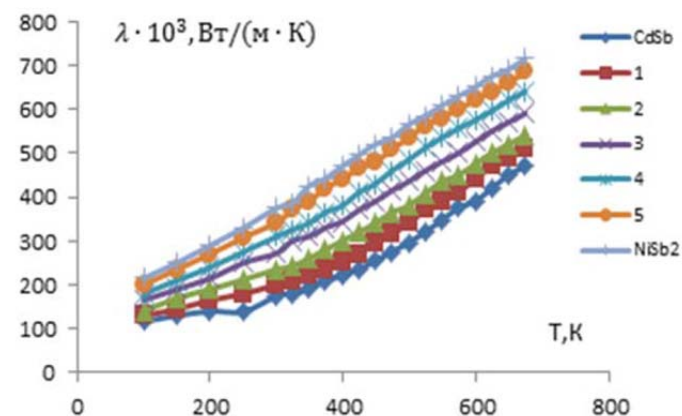


Рисунок 5. Зависимость теплопроводности исследуемых порошков системы ($CdSb-NiSb_2$) с различными концентрациями второго компонента при различных температурах: 1-96% $CdSb$ -4% $NiSb_2$; 2-95% $CdSb$ -5% $NiSb_2$; 3-93% $CdSb$ -7% $NiSb_2$; 4-85% $CdSb$ -5% $NiSb_2$; 5-10% $CdSb$ -90% $NiSb_2$

Как видно из рисунка 5, теплопроводность исследуемых образцов (порошок) с ростом температуры увеличивается. Установлено, при $T=100K$, с ростом концентрации второго компонента до 15% теплопроводность порошка увеличивается на 83,8%, при $T=523K$ и $T=673K$ растёт до 52,1%. Для образца N2 (95% $CdSb$ + 5% $NiSb_2$) в интервале температур (100-673)K, теплопроводность увеличивается в 3,86 раз. Как видно, из рисунка 6 теплопроводность монокристаллов полупроводниковых систем от концентрации второго компонента (n_{NiSb_2}) увеличивается. Соответственно были ис-

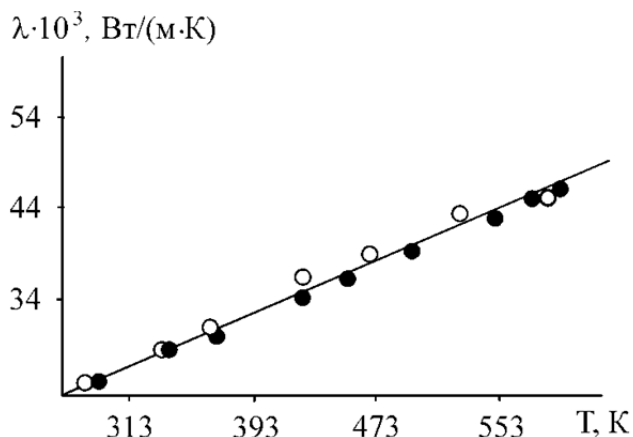


Рисунок 4. Сравнение экспериментальных значений теплопроводности воздуха:

○ - литературные данные; ● - данные автора

следованы следующие системы: 96%CdSb-4%NiSb₂ (1-образец); 95%CdSb-5%NiSb₂ (2-образец); 93%CdSb-7%NiSb₂ (3-образец); 85%CdSb 5%NiSb₂ (4-образец); 10%CdSb-90%NiSb₂ (5-образец); Эвтектическим является сплав состава 96 %CdSb - 4 %NiSb₂ 1-образец.

Как показали результаты, экспериментальных исследований теплопроводность монолитов полупроводниковых систем CdSb-NiSb₂ с ростом температуры уменьшается, а с увеличением концентрации NiSb₂, увеличивается. Результаты экспериментального исследования теплопроводности чистых CdSb и NiSb₂, при различных температурах приведены на рисунке 7. Как видно, из рисунка 7 теплопроводность полупроводниковых систем (монолит) с ростом температуры уменьшается по экспоненциальному закону во всем интервале температуры. Теплопроводность полупроводниковых систем NiSb₂ больше чем системы CdSb во всем диапазоне температур. Например, при температуре 100К теплопроводность системы NiSb₂ больше, чем теплопроводность системы CdSb на 32,4%, а при T=673К это отличие составляет 17,5%.

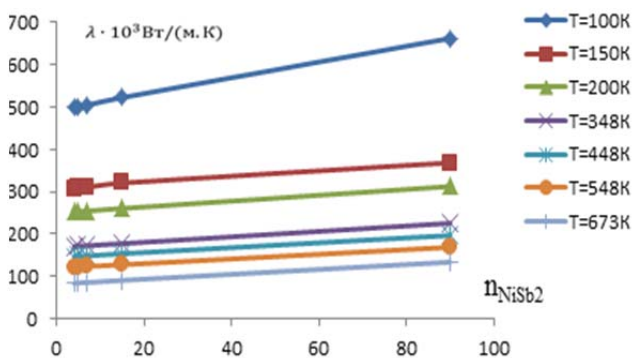


Рисунок 6. Зависимость теплопроводности монолитов полупроводниковых систем CdSb-NiSb₂ от концентрации второго компонента NiSb₂ и температуры

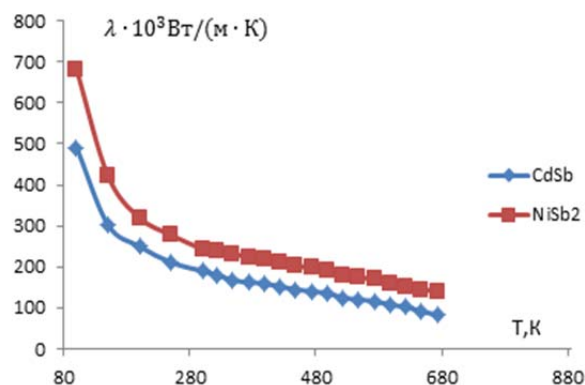


Рисунок 7. Зависимость теплопроводности чистых CdSb и NiSb₂ (монолит) от температуры

Для исследования теплопроводности системы диметилгидразин + порошок и полупроводниковых материалов системы CdSb-NiSb₂ нами использован метод комплексного определения теплофизических свойств жидкостей и растворов. Предложенное устройство позволяет за один опыт измерить сразу три параметра теплофизических характеристик жидкостных растворов при различных температурах и давлениях.

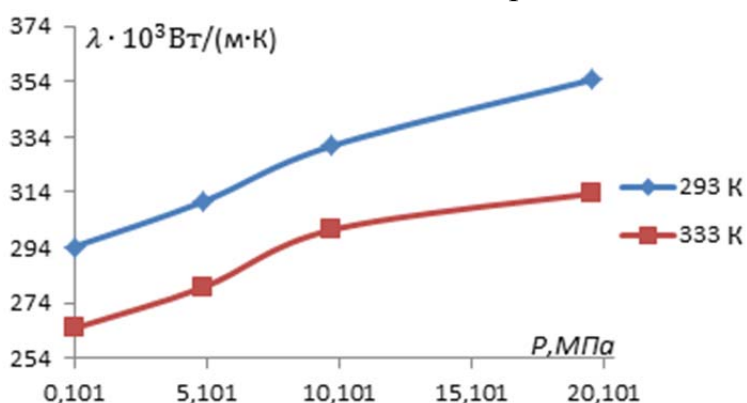


Рисунок 8. Зависимость теплопроводности системы несимметричный диметилгидразин+1,5% порошков полупроводниковых материалов системы (CdSb-NiSb₂) размером 10мкм, при различных температурах и давлениях

теплопроводность исследуемых образцов с ростом температуры уменьшается, а с увеличением давления растёт. Установлено, что при увеличении температуры

от 293К до 333К коэффициент теплопроводности образца при атмосферном давлении уменьшается на 10,1%, а при $P = 19,62$ МПа на 11,6%.

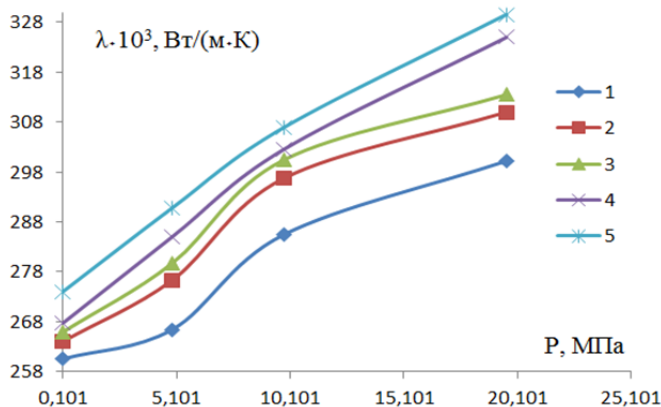


Рисунок 9. Зависимость теплопроводности исследуемых образцов от давления при температуре $T_1 = 333K$:

1 - чистый несимметричный диметилгидразин; 2 – несимметричный диметилгидразин +1%(CdSb+NiSb₂); 3 – несимметричный диметилгидразин +1,5% (CdSb+NiSb₂); 4 – несимметричный диметилгидразин +2,0%(CdSb+NiSb₂); 5-несимметричный диметилгидразин +2,5 % (CdSb+NiSb₂)

Согласно рисунку 9, можно заключить, что характер изменения теплопроводности от давления зависит и от концентрации порошков полупроводниковых материалов системы CdSb-NiSb₂. При давлении 0,101МПа, если в несимметричный диметилгидразин добавить 1,5% порошка полупроводниковых материалов системы CdSb-NiSb₂, теплопроводность возрастает на 2,1%, при давлении 9,81МПа на 5,3%, а при давлении 19,62МПа на 4,4%.

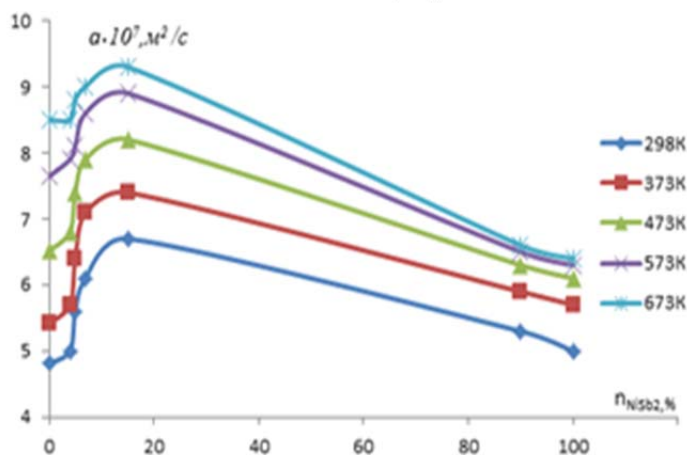
Для исследования температуропроводности порошков и композиционных полупроводниковых материалов системы CdSb-NiSb₂ в зависимости от температуры, и концентрации второго компонента, нами использован метод a -калориметра регулярного теплового режима 1-го рода, и следующее выражение

$$a = \frac{\lambda}{C_p \rho}, \frac{M^2}{c} \quad (4)$$

где, λ , Вт/(м К) теплопроводность исследуемых образцов при различных температурах и концентрации компонентов (CdSb и NiSb₂).

Характер изменение температуропроводности полупроводниковых системы CdSb от концентрации NiSb₂ при температуре 298,373,473, 573и 673К, приведены на рисунке 10. Из рисунка 10 видно, что температуропроводность исследуемых порошков с ростом температуры увеличивается. Согласно рисунку 10 можно заключить, что температуропроводность образца N4-(85%CdSb+15% NiSb₂) имеет самое высокое значение, что по нашему предположению зависит от природы композита.

Рисунок 10. Зависимость температуропроводности порошков полупроводниковых систем CdSb-NiSb₂ размерами 10мкм при различных температурах и концентрациях второго компонента n_{NiSb_2}



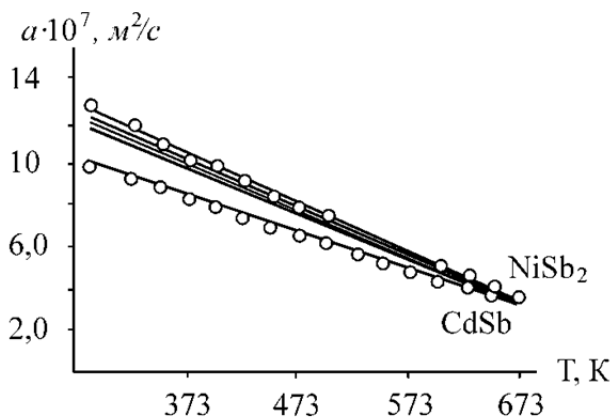


Рисунок 11. Зависимость температуропроводности монолитов полупроводниковых материалов системы $CdSb - NiSb_2$ от температуры и концентрации второго компонента. №1-96% $CdSb$ +4% $NiSb_2$;

№2-95% $CdSb$ +5% $NiSb_2$; №3-93% $CdSb$ + 7% $NiSb_2$;
 №4-85% $CdSb$ +15% $NiSb_2$; №5-10% $CdSb$ +90% $NiSb_2$.

Результаты расчета температуропроводности системы несимметричного диметилгидразина как в чистом виде, так и содержащих до 2,5% полупроводниковых порошков систем $CdSb-NiSb_2$ при атмосферном давлении и температуре $T = 293 K$, $T = 333 K$ приведены в таблице 1.

Таблица 1. Температуропроводность ($\alpha \cdot 10^7, m^2/c$) несимметричного диметилгидразина в зависимости от концентрации порошков полупроводниковых материалов системы $CdSb-NiSb_2$ размерами 10 мкм при атмосферном давлении и температурах $T = 293K$, $T = 333K$.

x, %	0	1,0	1,5	2,0	2,5
T, K	293				
$\alpha \cdot 10^7, m^2/c$	0,99	1,02	1,021	1,031	1,054
T, K	333				
$\alpha \cdot 10^7, m^2/c$	0,83	0,84	0,85	0,86	0,87

экспериментальную установку, работающую методом монотонного разогрева, измерена удельная изобарная теплоёмкость порошков и монолитов композитов полупроводниковых материалов систем: образец №1 - 96% $CdSb$ +4% $NiSb_2$; образец №2 -95% $CdSb$ +5% $NiSb_2$; образец №3-93% $CdSb$ +7% $NiSb_2$; образец №4-85% $CdSb$ + 15% $NiSb_2$; образец №5 - 10% $CdSb$ +90% $NiSb_2$, в широком интервале температуры (таблица 2, рисунки 12 и 13). Видно, что теплоёмкость исследуемых образцов с ростом температуры увеличивается.

Рисунок 12. Зависимость теплоёмкости порошков полупроводниковых материалов системы $CdSb-NiSb_2$ размерами 10 мкм от температуры: 1-образец N1; 2-образец N2; 3-образец N3; 4-образец N4; 5-образец N5; 6-образец N6

Характер изменения температуропроводности монолитов исследованных композиционных материалов, подчиняется законам классической физики, т.е. как видно из рисунка 11 температуропроводность образцов с ростом температуры уменьшается. Для расчёта температуропроводности чистого несимметричного диметилгидразина и с добавкой порошков полупроводниковых материалов систем $CdSb-NiSb_2$ нами использовано выражение (4). Где λ – теплопроводность испытуемого образца в зависимости от температуры и давления, C_p –теплоёмкость испытуемого образца в зависимости от температуры и давления, ρ –плотность испытуемого образца в зависимости от температуры.

Как видно из таблицы 1 и рисунка 12, температуропроводность несимметричного диметилгидразина с ростом концентрации наполнителя увеличивается. Используя экспери-

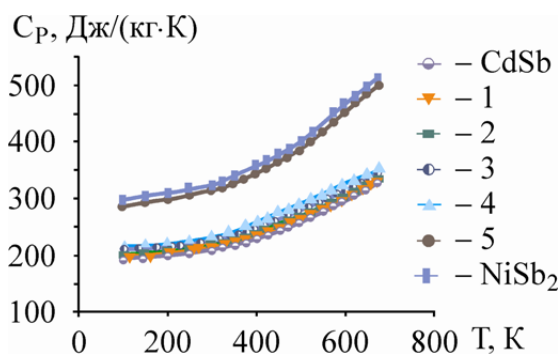


Таблица 2. Теплоёмкость C_p , Дж/(кг К) монолитов полупроводниковых систем CdSb-NiSb₂ в зависимости от температуры.

Т, К	C_p , Дж/(кг К)						
	Объект						
	CdSb	№1	№2	№3	№4	№5	NiSb ₂
100	198	204	210	216	222	296	307
150	202	207	214	218	224	302	313
200	207	212	217	222	226	308	320
250	212	218	222	226	232	316	327
300	218	224	222	234	238	324	335
323	222	228	232	238	242	330	342
348	227	233	238	242	248	335	348
373	234	239	242	246	258	344	360
398	238	245	248	254	265	354	368
423	244	252	258	262	274	364	378
448	254	258	263	268	283	374	388
473	258	266	272	278	292	384	400
498	267	274	280	286	301	396	414
523	276	282	288	296	308	413	431
548	285	291	298	304	317	432	448
573	296	302	308	312	326	447	465
598	308	312	316	322	337	467	481
623	316	322	326	332	343	484	496
648	326	334	338	344	352	500	512
673	340	346	350	356	362	517	530

Как видно из рисунка 13 теплоёмкость несимметричного диметилгидразина с ростом концентрации порошков CdSb-NiSb₂ и давления уменьшается. При низких температурах изменение теплоёмкости (при P=0,101;4,91МПа) имеет линейный характер, а при P = 4,91 МПа теплоёмкость изменяется по экспоненциальному закону (рисунок 13). Добавка порошков полупроводниковых материалов системы CdSb-NiSb₂ в несимметричный диметилгидразин приводит к тому, что его теплоёмкость уменьшается следующим образом: при давлении 0,101МПа на 3,4%; при давлении 4,91МПа на 3,8%; при давлении 9,81 МПа на 4,1%; при давлении 19,62МПа на 4,4%. Как видно, из выше изложенного, при давлении 19,62МПа концентрация порошка существенно влияет на изменение теплоёмкости диметилгидразина.

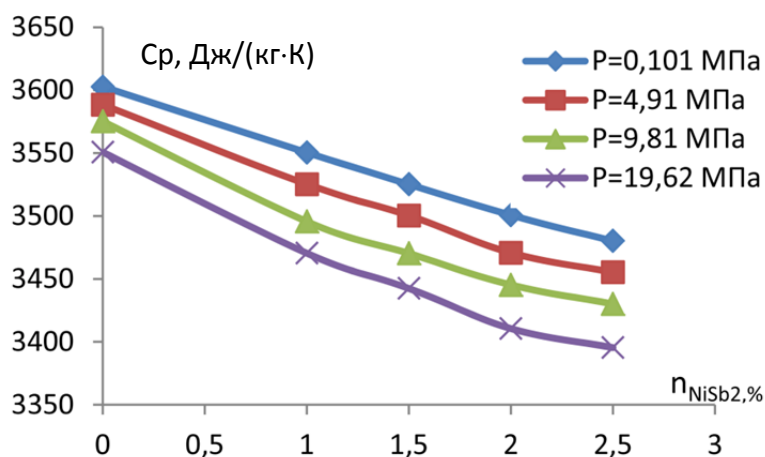


Рисунок 13. Зависимость теплоёмкости исследуемых систем несимметричного диметилгидразина от концентрации порошка полупроводниковых материалов системы CdSb-NiSb₂ размерами 10мкм при температуре 293К и давлениях: 1-P=0,101; 2-P=4,91; 3-P=9,81; 4-P=19,62 МПа

Как видно из рисунка 14 плотность монолитов системы CdSb-NiSb₂ с ростом температуры уменьшается, а с ростом концентрации второго компонента увеличивается.

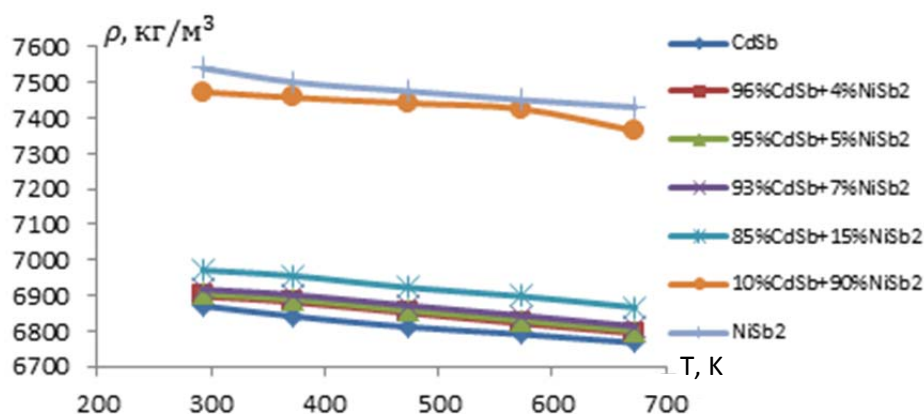


Рисунок 14. Плотность ρ (кг/м³) монолитов полупроводниковых систем CdSb-NiSb₂ в зависимости от температуры и концентрации второго компонента

Таблица 3. Термодинамические характеристики чистого несимметричного диметилгидразина в зависимости от температуры при атмосферном давлении.

T, K	293	313	333
ρ , (кг/м ³)	803	765	730
C_p , Дж/(кг K)	3602,6	3700,2	3789,4

Как видно, из таблицы 3 плотность чистого несимметричного диметилгидразина с увеличением температуры от 293К до 333К плотность уменьшается на 9,1% а теплоёмкость увеличивается на 5,2%. Из литературных данных известно, что несимметричный диметилгидразин является хорошим растворителем, а его водные растворы можно использовать как ракетное топливо.

Таблица 4. Плотность (ρ , кг/м³) системы чистого несимметричного диметилгидразина (96%CdSb+4%NiSb₂) в зависимости от концентрации порошка при комнатной температуре.

x, %	0	1,0	1,5	2,0	2,5
ρ , (кг/м ³)	803	809,5	817,4	830,0	839,4

Как видно, из таблицы 4, при добавлении до 2,5% порошка системы CdSb-NiSb₂ в жидкий диметилгидразин его плотность увеличивается на 4,5%.

Для определения плотности исследуемых систем при комнатной температуре и атмосферном давлении использован пикнометрический метод. Общая относительная погрешность измерения плотности при доверительной вероятности $\alpha=0,95$, составляет 0,005%.

В четвертой главе приводится обработка и обобщение экспериментальных данных по теплофизическим свойствам исследуемых полупроводниковых материалов и их растворов.

Для обработки и обобщения экспериментальных данных по температуропроводности порошков и монолитов исследуемых полупроводниковых композиционных материалов, нами использована следующая функциональная зависимость:

$$\frac{a}{a_1} = f\left(\frac{T}{T_1}\right), \quad (5)$$

где a и a_1 - температуропроводность исследуемых образцов при T и T_1 : соответственно для порошков $T_1=300\text{K}$ и для монолитов $T_1=473\text{K}$.

Выполнимость функциональной зависимости (5), показана на рисунке 15. Как видно, из рисунка 15, все экспериментальные данные ложатся вдоль общей прямой. Графоаналитической обработкой данных нами получено эмпирическое уравнение в следующем виде (6):

$$\alpha = \left[\left[-1,51 \left(\frac{T}{T_1} \right) + 2,51 \right] \left((7,7 \cdot 10^{-12} n_{\text{NiSb}_2}^2 - 1,89 \cdot 10^{-12} n_{\text{NiSb}_2}^2 + 7,71 \cdot 10^{-7}) \right) \right], \text{ м}^2/\text{с} \quad (6)$$

Уравнение (6) позволяет рассчитать температуропроводность исследованных полупроводниковых систем CdSb-NiSb_2 , при различных температурах с погрешностью 4,2%, для этого необходимо знать значения концентрации второго компонента (NiSb_2) и температуры.

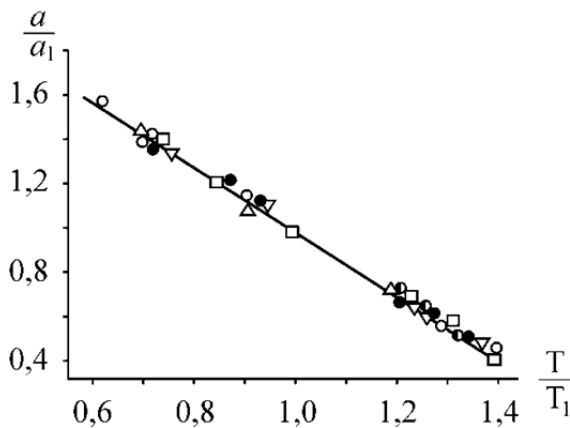


Рисунок 15. Зависимость температуропроводности a/a_1 от относительной температуры T/T_1 исследуемых образцов: 1- $\text{CdSb}+4\%\text{NiSb}_2$; 2- $96\%\text{CdSb}+4\%\text{NiSb}_2$; 3- $95\%\text{CdSb}+5\%\text{NiSb}_2$; 4- $93\%\text{CdSb}+7\%\text{NiSb}_2$; 5- $85\%\text{CdSb}+15\%\text{NiSb}_2$; 6- $10\%\text{CdSb}+90\%\text{NiSb}_2$; 7- NiSb_2

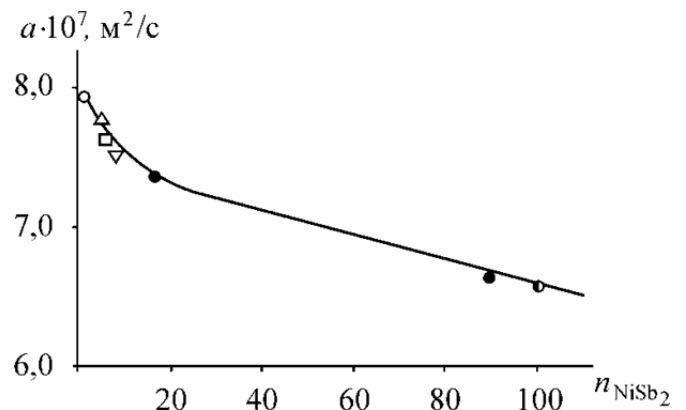


Рисунок 16. Зависимость температуропроводности a_1 монолитов полупроводниковых материалов системы CdSb-NiSb_2 от концентрации второго компонента при температуре $T_1=473\text{K}$

Обработка и обобщение экспериментальных данных по температуропроводности порошков полупроводникового материала системы CdSb-NiSb_2 , также по теплопроводности, теплоемкости и плотности порошка данной системы проведено аналогичным образом.

$$\alpha = \left[-0,3492 \left(\frac{T}{T_1} \right)^2 + 1,15 \left(\frac{T}{T_1} \right) + 0,1856 \right] \left[-2 \cdot 10^{-7} (n_{\text{CdSb}})^4 + 0,0001 (n_{\text{CdSb}})^3 - 0,0083 (n_{\text{CdSb}})^2 + 0,02255 n_{\text{CdSb}} + 6,4161 \right], \text{ м}^2/\text{с} \quad (7)$$

$$C_p = \left[0,24 \left(\frac{T}{T_1} \right)^2 - 0,84 \left(\frac{T}{T_1} \right) + 0,8 \right] \times$$

$$\times \left(-6,1 \cdot 10^{-3} n_{CdSb}^3 + 1,94 n_{CdSb} + 239,3 \right), \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) \quad (8)$$

$$\lambda = \left[1,25 \left(\frac{T}{T_1} \right)^2 - 3,35 \left(\frac{T}{T_1} \right) + 3,20 \right] \left(5,57 \cdot 10^{-3} n_{CdSb}^3 + 1,61 \right), \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}) \quad (9)$$

$$\rho = \left[0,0059 \left(\frac{T}{T_1} \right)^3 - 0,00209 \left(\frac{T}{T_1} \right)^2 + 0,0043 \frac{T}{T_1} + 1,0111 \right] \times$$

$$\times \left[0,0156 (n_{NiSb})^2 + 8,2753 n + 1691,2 \right], \text{ кг}/\text{м}^3 \quad (10)$$

С помощью уравнений (7), (8), (9) и (10) можно рассчитать температуропроводность, теплоёмкость, теплопроводность и плотность экспериментально неисследованных порошков полупроводниковых материалов системы CdSb-NiSb₂ размерами 10 мкм с погрешностью 4,7%, 3,5%, 4% и 3,6% соответственно, если известны значения компонента n_{CdSb} при температуре $T_1=298\text{K}$. Закон соответственных состояний даёт возможность обобщить результаты экспериментального исследования термодинамических, теплофизических, физико-химических характеристик веществ в широком диапазоне параметров состояния.

Для обобщения и обработки опытных данных нами было использовано также следующее выражение

$$\frac{C_p}{C_p^*} = f\left(\frac{T}{T_1}\right), \quad (11)$$

В выражении (11) C_p, C_p^* теплоёмкость образцов при T и T_1 : $T_1 = 373 \text{ K}$. Выполнимость функциональной зависимости (11) в относительных координатах представлена на рисунке 17.

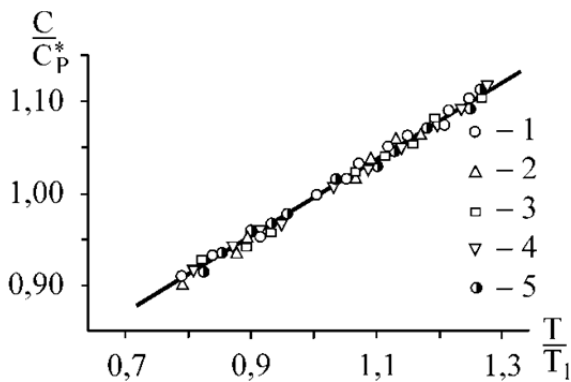


Рисунок 17. Зависимость относительной теплоёмкости C_p/C_p^* от относительной температуры T/T_1 : 1-чистый несимметричный диметилгидразин; 2-несимметричный диметилгидразин + 1% порошков полупроводниковых материалов системы (CdSb+NiSb₂); 3-несимметричный диметилгидразин + 1,5% порошков полупроводниковых материалов системы CdSb-NiSb₂; 4-несимметричный диметилгидразин + 2,0% порошков полупроводниковых материалов системы CdSb-NiSb₂; 5-несимметричный диметилгидразин + 2,5% порошков полупроводниковых материалов системы CdSb-NiSb₂

Как видно из рисунка 17, все экспериментальные данные ложатся вдоль общей прямой, уравнение которой имеет вид:

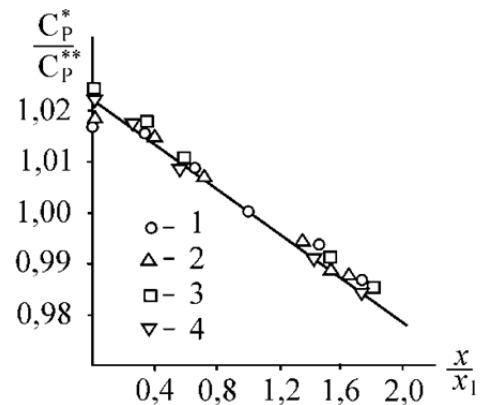
$$\frac{C_p}{C_p^*} = 0,48 \left(\frac{T}{T_1} \right) + 0,52. \quad (12)$$

Анализ значения C_p^* показал, что оно является функцией концентрации полупроводниковых порошков системы CdSb-NiSb₂:

$$\frac{C_p^*}{C_p^{**}} = f \left(\frac{\chi}{\chi_1} \right), \quad (13)$$

где $\chi_1 = 1,5\%$. Функциональная зависимость (13) в относительных координатах показана на рисунке 18.

Рисунок 18. Зависимость относительной теплоёмкости (C_p^*/C_p^{**}) от относительной концентрации порошка (χ/χ_1) исследуемых образцов. 1-несимметричный диметилгидразин+1%порошков полупроводниковых материалов системы (CdSb+ NiSb₂); 2-несимметричный диметилгидразин +1,5% порошков полупроводниковых материалов системы CdSb-NiSb₂; 3-несимметричный диметилгидразин+2,0% порошков полупроводниковых материалов системы CdSb-NiSb₂; 4-несимметричный диметилгидразин+2,5% порошков полупроводниковых материалов системы CdSb-NiSb₂



Прямая линия, показанная на рисунке 18 представлена в виде следующей зависимости:

$$\frac{C_p^*}{C_p^{**}} = 1,002 - 0,022 \left(\frac{\chi}{\chi_1} \right), \quad (14)$$

Судя по значениям теплоёмкости C_p^{**} можно заключить, что они являются функциями давления (рисунок 19).

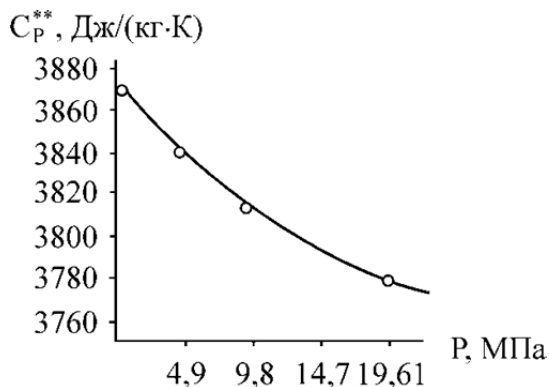


Рисунок 19. Зависимость системы несимметричный диметилгидразин+ от 1 до 2,5% порошка полупроводниковых материалов системы CdSb-NiSb₂ в зависимости от давления P, МПа

Кривую линию на рисунке 19 можно описать следующим уравнением

$$C_p^{**} = 1,34 \cdot 10^{-13} P^2 - 7,74 \cdot 10^{-6} P + 3875,5, \quad \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \quad (15)$$

Из уравнения (12), с учетом (13-15) получим следующее эмпирическое уравнение:

$$C_p = \left\{ 0,48 \left(\frac{T}{T_1} \right) + 0,52 \right\} \left[1,022 - 0,022 \left(\frac{x}{x_1} \right) \right] \cdot (1,34 \cdot 10^{-13} P^2 - 7,74 \cdot 10^{-6} P + 3875,5), \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \quad (16)$$

Выражение(16) позволяет рассчитать теплоемкость экспериментально исследованного несимметричного диметилгидразина с добавкой порошков полупроводникового материала системы CdSb-NiSb₂ в зависимости от температуры, давления и концентрации порошка с погрешностью 0,9%. Аналогичным образом была проведена обработка и обобщение экспериментальных данных по теплопроводности, температуропроводности и плотности системы несимметричный диметилгидразин + порошок полупроводникового материала системы CdSb-NiSb₂.

$$\lambda = \left[0,462 \left(\frac{T}{T_1} \right)^2 - 1,92 \left(\frac{T}{T_1} \right) + 2,468 \right] \left[-2,6 \cdot 10^{-2} \left(\frac{P}{P_1} \right)^2 + 0,157 \left(\frac{P}{P_1} \right) + 0,867 \right] \times (10,8 \cdot 10^{-3} x + 250,6 \cdot 10^{-3}), \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}} \quad (17)$$

$$\alpha = \left[0,069 \left(\frac{x}{x_1} \right)^2 + 0,0202 \left(\frac{x}{x_1} \right) + 0,9688 \right] (-0,002T + 1,6473), \text{ м}^2/\text{с} \quad (18)$$

$$\rho_{p,T} = \left[1,875 - 0,907 \left(\frac{T}{T_1} \right) \right] \left[a \left(\frac{x}{x_1} \right)^2 + b \left(\frac{x}{x_1} \right) + c \right] [k(P)^3 + f(P) + d], \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \quad (19)$$

где, $T_1 = 343\text{К}$ и $x_1 = 1,5\%$.

Эмпирические уравнения (17-19) дают возможность рассчитать теплопроводность, температуропроводность и плотность экспериментально неисследованных образцов системы несимметричного диметилгидразина и порошков полупроводников системы CdSb-NiSb₂ размерами 10мкм при различных температурах, давлениях и концентрации второго компонента полупроводниковых порошков, с погрешностью 1-2%, 0,64%, 3,7%, соответственно.

Уравнение состояния исследуемых образцов

Для получения уравнения состояния порошков полупроводниковых материалов системы CdSb-NiSb₂ размерами 10мкм + несимметричный диметилгидразин, используя экспериментальные данные по плотности при различных температурах и давлениях, были построены в плоскости $(P/\rho^2, \rho^6)$ прямые $P = \text{const}$.

$$P/\rho^2 = f(\rho^6) \quad (20)$$

Таблица 5. Расчетные данные по уравнению состояния системы несимметричный диметилгидразин+порошок полупроводниковых материалов CdSb-NiSb₂ размерами 10мкм при различных температурах и давлениях.

T, К	293	313,6	323,2	333,8	352,7	373,8	373,8
$\frac{P}{\rho^2}, \frac{\text{Па} \cdot \text{м}^6}{\text{кг}^2}$	96,6	52,2	100	108	101,5	84	65
$\rho^6 \cdot 10^{-17}, \frac{\text{кг}^6}{\text{м}^{18}}$	25,6	16,7	32	38	42	40	40

Выполнимость зависимости (20) для исследуемых образцов представлена на рисунке 20. $P=\text{const}$ являются прямыми и описываются уравнением:

$$P = A(T)\rho^2 + B(T)\rho^8, \quad (21)$$

где P – внешнее давление, Па; ρ – плотность, кг/м³; $A(T)$ и $B(T)$ – коэффициенты уравнения. Коэффициенты $A(T)$ и $B(T)$ приведены в таблице 6.

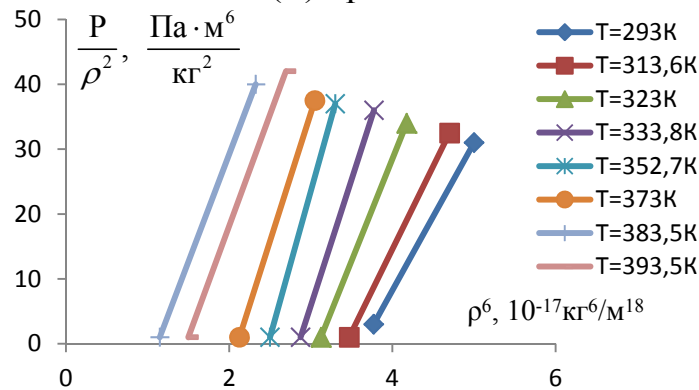


Рисунок 20. Зависимость (P/ρ^2) от ρ^6 для системы диметилгидразин + 2,5% порошка полупроводниковых материалов системы CdSb-NiSb₂ размерами 10мкм, при различных температурах.

Таблица 6. Значения коэффициентов уравнения(21) при различных температурах

T, К	Значения коэффициентов	
	$A(T), \frac{\text{Па} \cdot \text{м}^6}{\text{кг}^2}$	$B(T) \cdot 10^{17}, \frac{\text{Па} \cdot \text{м}^6}{\text{кг}^2}$
293,0	96,6	25,6
313,6	52,2	16,7
323,0	100	32,0
333,8	108	38,0
352,7	101,5	42
373,8	84	40
383,5	65	40
393,5	66,3	45,3

Коэффициенты $A(T)$ и $B(T)$ вычислены, для каждой изобары методом наименьших квадратов, а затем на основе графоаналитического анализа аппроксимированы с погрешностью 0,01- 0,14% полиномами второй степени:

$$A(T)=\sum_0^3 a_i T^i \text{ и } B(T)=\sum_0^3 b_i T^i \quad (22)$$

Из уравнений (21) и (22) получим следующее уравнение состояния, для системы несимметричный диметилгидразин+порошок полупроводниковых материалов системы CdSb-NiSb₂:

$$P = \sum_0^3 a_i T^i \cdot \rho^2 + \sum_0^3 b_i T^i \cdot \rho^8 \quad (23)$$

Проверка уравнения состояния (23), для полупроводниковых систем + несимметричный диметилгидразин показала, что с погрешностью до 0,13% описывает экспериментальные данные. Используя уравнение состояния (23), можно рассчитать коэффициент изотермической сжимаемости β_T , коэффициент объемного расширения α_p , внутреннее давление P_i , разность теплоемкостей $C_p - C_v$.

В приложении приводятся подробные расчёты погрешности измерений плотности исследуемых образцов.

ВЫВОДЫ

1. Модернизирована экспериментальная установка для комплексного определения теплофизических свойств методом регулярного теплового режима первого рода (цилиндрический a -калориметр) для азотосодержащих растворов.

2. Впервые исследована температурная зависимость теплопроводности, теплоёмкости, температуропроводности и плотности образцов сплавов системы CdSb-NiSb₂, (в виде порошков и монолитов).

3. Исследована зависимость теплофизических характеристик системы диметилгидразин+ CdSb-NiSb₂ в виде порошка от температуры и давления.

4. Установлено, что при повышении температуры от 298 до 396К коэффициент теплопроводности образца (чистого несимметричного диметилгидразина) при атмосферном давлении уменьшается на 40,9%, а для образца (несимметричный диметилгидразин+2,5%(CdSb+NiSb₂)) уменьшается на 30,5% данная закономерность наблюдается при давлении $P=19,62$ МПа для первого образца 26,3%, а для второго образца 24,7%.

5. На основе экспериментальных данных по теплоёмкости системы (несимметричный диметилгидразин+(CdSb+NiSb₂)) рассчитаны термодинамические функции (энтальпия, энтропия, внутренняя энергия, энергия Гиббса и Гельмгольца) и калорические свойства (коэффициент линейного расширения и адиабатической сжимаемости и др).

6. При обработке экспериментальных данных, на основе закона термодинамического подобия по теплофизическим свойствам исследуемых объектов, получены новые эмпирические уравнения и уравнение состояния.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННЫЕ РАБОТЫ ИЗЛОЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ:

в изданиях, рекомендованных ВАК России:

1. **Ёдалиева З.Н.** Взаимосвязь между теплопроводностью и электропроводностью полупроводниковых систем CdSb-NiSb₂. //З.Н Ёдалиева, М.С. Сайдуллаева, М.М. Сафаров //Вестник Таджикского технический университет имена академика М.С. Осими.2008.С.3-8. 33%

2. **Ёдалиева З.Н.** Теплоёмкость и теплопроводность порошков полупроводниковых систем CdSb-NiSb₂./ З.Н. Ёдалиева, Р.А. Кариева, М.С. Сайдуллаева, М.М. Сафаров //Вестник Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими, Душанбе 2010,2(10) С.7-10. 25%

3. **Ёдалиева З.Н.** Теплофизические и термодинамические свойства полупроводниковых сплавов систем CdSb-NiSb₂./З.Н. Ёдалиева, Р.А. Кариева, М.С. Сайдуллаева, М. М. Сафаров. //Известия Академия наук Республики Таджикистан, 2009, №3(136) С. 32-37. 25%

4. **Ёдалиева З.Н.** Влияние воды на изменение плотности симметричного диметилгидразина (CH₃NH-NHCH₃)./З.Н. Ёдалиева, М.А. Зарипова, М. Сайдуллаева, М. Т.Тургунбаев, М.М. Сафаров. //Вестник Таджикского технического университета им.акад.М.С.Осими. №2(230). Душанбе,2015.-С.11-14. 25%

5. **Ёдалиева З.Н.** Плотность несимметричного диметилгидразина в зависимости от температуры и давления. /З.Н. Ёдалиева, М.А. Зарипова, М.Т. Тургунбаев, Х.А. Зоиров, М.М. Сафаров. // Вестник Таджикского педагогического университета им. С. Айни. Душанбе, 2011. №5 (41), С.18-22. 25%

Статьи и тезисы в сборниках и материалах научных конференций:

1. **Ёдалиева З.Н.** Термодинамические свойства полупроводников систем CdSb-NiSb₂. /М.М. Сафаров, З.Н. Ёдалиева, М.С.Сайдуллаева, //Материалы 2-ой Республиканской научно-практической конференции. Чкаловск, Республика Таджикистан. 2008г. С.38-40. 33%

2. **Ёдалиева З.Н.** Теплоёмкость системы гидразин-вода-этиленгликоль./ М.С. Сайдуллаева, М.А. Зарипова, **З.Н.Ёдалиева**, //Тезисы докладов X-я Российская конференция «Теплофизических свойств веществ» 30 сентября-4 октября 2002 г. Казань – Россия С.6-7. 33%

3. **Ёдалиева З.Н.** Экспериментальное исследование плотности, температуропроводности и теплоемкости двухкомпонентных водных растворов в зависимости от температуры и давления. /М.М. Сафаров, М.С. Сайдуллаева, З.Н. Ёдалиева.// Тезисы докладов X-ая Российская конференция «Теплофизических свойств веществ». 30 сентября-4 октября 2002 г. Казань – Россия С. 7-8. 33%

4. **Ёдалиева З.Н.** Электрические и термоэлектрические свойства эвтектических композиций CdSb-NiSb₂./З.Н. Ёдалиева, М.С.Сайдуллаева //В сборнике материалов: «Труды молодых ученых Таджикского технического университета» Душанбе. 2002 г. С. 27-29. 50%

5. **Ёдалиева З.Н.** Характер межмолекулярного взаимодействия в системе CdSb-NiSb₂. / З.Н. Ёдалиева, М.С. Сайдуллаева. В сборнике материалов: «Труды молодых учёных Таджикского технического университета» Душанбе. 2002 г. С. 30-31. 50%

6. **Ёдалиева З.Н.** Экспериментальное исследование плотности, тепло-и температуропроводности и теплоёмкости двухкомпонентных водных растворов в зависимости от температуры и давления. / М.С. Сайдуллаева, З.Н. Ёдалиева.// Тезисы докладов XI-ая Российская конференция «Теплофизических свойств веществ» 30 июня-4 июля 2003 г. Саратов – Россия С. 59. 50%

7. **Ёдалиева З.Н.** Исследование Cd-Sb-Cr по разрезу CdSb-CrSb₂./Р.А. Кариева, М.С. Сайдуллаева, З.Н.Ёдалиева. //Вестник ТГУ, 2007 г С. 70-74. 33%
8. **Ёдалиева З.Н.** Исследование взаимодействия в тройной системе Cd-Sb-Cr./Р.А. Кариева, М.С. Сайдуллаева, З.Н. Ёдалиева. //Тезисы докладов научно-теоретическая конференция. «Проблемы физики конденсированных сред» Посвящается 80-летию академика А.А. Адхамова. ТГУ. ноябрь 2008.г. Душанбе: С 18-19. 33%
9. **Ёдалиева З.Н.** Теплопроводность, электропроводность и теплоёмкость полупроводниковых систем CdSb – NiSb₂ / З.Н.Ёдалиева, М.М Сафаров, М.С. Сайдуллаева, //Материалы республиканской научно-практической конференция «Инновация - эффективный фактор связи науки с производством» Душанбе-2008 С.118-124 33%
10. **Ёдалиева З.Н.** Теплофизические свойства полупроводниковых порошков. /З.Н. Ёдалиева, М.С. Сайдуллаева, М.М. Сафаров, М.Д. Пирмадов. //Материалы Республиканской научно-практической конференции посвящённой 35-летию кафедры «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты» Душанбе: 2009. С. 121-122. 25%
11. **Ёдалиева З.Н.** Теплопроводность полупроводниковых систем CdSb-NiSb₂ в зависимости от температуры. /З.Н. Ёдалиева, М.С. Сайдуллаева, М.М. Сафаров, Х.Мухиддинов. //Материалы научно-практической конференции. //Актуальные проблемы технологического образования средних специальных и средних учебных заведениях. Душанбе: 2009 С.35-37. 25%
12. **Ёдалиева З.Н.** Плотность метилгидразина и его водных растворов. Уравнение состояния. /З.Н.Ёдалиева, М.А. Зарипова, М.Т.Тургунбаев, Н.А Минина, М.М. Сафаров.//Материалы 8-Международной теплофизической школы, посвящённой 60-летию профессора Сафарова М.М.2012, Душанбе–Тамбов. С.68 -69. 25%
13. **Ёдалиева З.Н.** Исследование теплофизических свойство тройной системы Cd-Sb-Ni. /З.Н.Ёдалиева, Р.А.Кариева, М.С.Сайдуллаева, М.М. Сафаров. //Материалы 8-Международной теплофизической школы, посвящённой 60-летию профессора Сафарова М.М.2012, Душанбе-Тамбов.С. 231-235. 25%
14. **Ёдалиева З.Н.** Энтальпия и теплоёмкость нанопорошков двух–и трехкомпонентных непереходных металлов системы медь, никель, алюминий и кадмий. / З.Н.Ёдалиева, Э.Ш. Тауров, М.С. Сайдуллаева, Х.С.Содыков, Иман Бахром Маниш, М.М.Сафаров.//МТФШ-9,Душанбе-Тамбов,6-11 октября 2014.С.299-303. 16%
15. **Ёдалиева З.Н.** Калориметрия и температуропроводность твёрдых полупроводниковых систем CdSb //З.Н. Ёдалиева, Э.Ш. Тауров, Х.С. Содыков, М.М. Сафаров, // МТФШ-9, Душанбе-Тамбов, 2014.С.187-190. 25%
16. **Ёдалиева З.Н.** Полупроводниковая система CdSb–NiSb₂ в концепции регулярных растворов. /Р.А. Кариева. М.С. Сайдуллаева //Материалы 7-международной научно–практической конференция. «Перспективы развития науки и обра-

зования» 23-24 октября 2014. Посвящается 20-летию Конституции РТ и 90-летию г. Душанбе. С 163-164. 33%

17. **Ёдалиева З.Н.** Физико-химические и электрические свойства полупроводниковых соединений группы $A^{II}B^V$. / Р.А. Кариева, М.С. Сайдулаева, З.Н. Ёдалиева //Материалы 7-международной научно – практическая конференция. «Перспективы развития науки и образования» 23-24 октября 2014. Посвящается 20-летию Конституции РТ и 90-летию г. Душанбе С.164-166. 33%

18. **Ёдалиева З.Н.** Исследование теплофизических свойств разреза $CdSb-NiSb_2$ в тройной системе $Cd-Sb-Ni$. /Р.А. Кариева, М.Сайдуллаева, З.Н. Ёдалиева. // Республиканская научно-практическая конференция, Куляб, апрель 2015.С 12-13. 33%

19. **Ёдалиева З.Н.** Физико-химические и электрические свойства полупроводниковых соединений группы $A^{II}B^V$. / З.Н Ёдалиева, Р.А. Кариева, М. Сайдуллаева. Депонирована НПИЦентр под. №10 (1873) от «13» июня 2012 г.- 11с. 33%

20. **Ёдалиева З.Н.** Интенсификация азотосодержащих ракетных топлив с учетом добавки наночастиц и расчёт термодинамических характеристики./ М.М. Сафаров, Н.Б. Давлатов,З.Н. Ёдалиева, М.А. Зарипова, М.М.Гуломов. //8-й Международная научно-техническая конференция «Проблемы и перспективы развития авиации наземного транспорта и энергетики», (АНТЭ-2015), 19-21 октября 2015, КАИ – С. 517-522. 25%.

Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Печать цифровая.
Усл.печ.л. 1,4. Тираж 100. Заказ А 32

Издательство КНИТУ-КАИ.
420111, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 10