

“УТВЕРЖДАЮ”
Первый проректор
Федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего
образования «Воронежский государственный
технический университет»
д.т.н., профессор Дроздов Игорь Геннадьевич



ОТЗЫВ

ведущей организации – ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» о диссертационной работе Калмыкова Рустама Мухамедовича «Влияние примеси CdSe на термоэлектрические свойства сплавов PbTe», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Диссертационная работа Р.М. Калмыкова посвящена исследованию влияния структурных и фазовых изменений на температурные зависимости термоэлектрических свойств сплавов PbTe с примесями CdSe различных мольных концентраций. Представлены особенности формирования полупроводниковых соединений на основе теллурида свинца при ультразвуковом воздействии на жидкий расплав. В работе особое внимание уделено фазообразованиям и их влиянию на характер температурных зависимостей удельной электропроводности, коэффициента термоЭДС и коэффициента термоэлектрической мощности сплавов. Также представлены особенности влияния изотермического отжига на политермы термоэлектрических параметров.

Актуальность темы диссертационной работы обусловлена тем, что для создания эффективных преобразователей тепловой энергии в электрическую в области средних температур и высокочувствительных приемников ИК-излучения, наибольшее распространение получили композиционные материалы на основе PbTe.

Влияние примеси на термоэлектрические свойства кристаллов существенно зависит от способа приготовления исследуемых образцов. В частности, сложность приготовления PbTe стехиометрического состава затрудняет получение однозначных данных по его электрофизическим и теплофизическим свойствам. Исследование области устойчивости PbTe показывает, что относительно стехиометрического состава она сдвинута в сторону теллура и при кристаллизации в первую очередь выпадает твердая фаза с избытком теллура. Эти особенности существенно влияют на свойства синтезируемых кристаллов.

В связи с этим, получение новых сплавов полупроводниковых соединений на основе PbTe с высокоэффективными термоэлектрическими свойствами является актуальной задачей.

К основным результатам, полученным автором, и имеющим **научную значимость**, следует отнести:

1. Разработана новая методика получения термоэлектрических материалов на основе теллурида свинца путем воздействия на жидкий расплав ультразвуковыми волнами при оптимальных условиях, защищенная патентом Российской Федерации. Показано, что при использовании высокотемпературного флюса и воздействии на жидкий расплав ультразвуковых волн при частоте 24 кГц и мощности 600 Вт формируется однородный сплав полупроводниковых соединений на основе теллурида свинца без образования кавитационных пузырьков.

2. Установлены структурные изменения и образование новых фаз в твердых сплавах PbTe при концентрациях примеси CdSe 0,5; 1; 2; 3; 5; 7 и 10 мол %. Показано, что при изотермическом отжиге сплавов теллурида свинца с различным содержанием примеси изменяется кристаллическая структура и образуются новые фазы кубической и гексагональной сингонии.

3. Установлена зависимость параметра решетки a от концентрации примеси CdSe в матрице PbTe, а также образование новых фаз кубической и гексагональной сингонии. В сплавах PbTe-CdSe и в образующейся в них новой фазе CdTe, параметр решетки a изменяется нелинейно и при концентрациях примеси CdSe больше 5 мол % значительно уменьшается.

4. Установлено влияние изотермического отжига на фазообразование и политермы удельной электропроводности, коэффициента термоЭДС, а также термоэлектрической мощности в твердых сплавах PbTe при концентрациях примеси CdSe 0,5; 1; 2; 3; 5; 7 и 10 мол %. По результатам исследования политерм удельной электропроводности определена энергия активации проводимости полученных сплавов в диапазоне температур 460-720 К.

Обнаружено, что в сплавах с примесями от 5 мол % до 10 мол % Еа не меняется и составляет 0,11 эВ.

5. Установлено влияние изотермического отжига на характер температурной зависимости и абсолютные значения коэффициента термоЭДС. Построена зависимость коэффициента термоэлектрической мощности сплавов на основе PbTe, содержащего примеси CdSe, от температуры. Наибольшее значение термоэлектрической мощности $P = 43,6$ мкВт/(см·К²) при температуре $T = 460$ К характерно для образца с содержанием 10 мол% CdSe в основной матрице PbTe.

Практическая значимость работы заключается в том, что полученные Р.М. Калмыковым экспериментальные результаты фазообразования, температурных зависимостей термоэлектрических параметров теллурида свинца и системы PbTe-CdSe можно применить для дальнейшего развития физики термоэлектрических материалов, а также использовать при создании приборов и устройств микро- и нанoeлектроники, новых композиционных материалов, термоэлектрических преобразователей и т.д.

Достоверность и обоснованность результатов диссертационной работы подтверждается использованием общепризнанных экспериментальных методов исследования структурных изменений, фазообразования, удельной электропроводности, коэффициента термоЭДС, воспроизведением результатов при повторении экспериментов в одних и тех же условиях, а также согласованностью с известными теоретическими и экспериментальными данными. Интерпретация полученных результатов базируется на современных представлениях о структуре и термоэлектрических свойствах исследованных материалов.

Рекомендации по использованию результатов и выводов

Установленные в работе закономерности могут быть востребованы такими научными и производственными коллективами, как в НИЦ «Курчатовский институт» (г. Москва), Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова» (г. Москва), ФТИ РАН им. Иоффе, (г. С.-Петербург), Воронежский государственный технический университет, Воронежский государственный университет (г. Воронеж) и др. Отдельные результаты работы могут быть использованы в учебном процессе, например, в курсе «Технология материалов электронной техники», читаемом студентам направления «Техническая физика».

Изложенные в диссертации результаты хорошо обоснованы и прошли апробацию на международных конференциях. По теме диссертации автором опубликовано 20 печатных изданий, в том числе: 6 в рецензируемых научных

журналах, рекомендованных ВАК РФ для публикации результатов кандидатских и докторских диссертаций, из которых 3 работы индексируются международными системами цитирования Scopus и Web of Science, 13 – в сборниках конференций и 1 патент на изобретения.

По диссертации можно сделать следующие **замечания и пожелания**:

1. В работе автором не поясняется, почему для проведения изотермического отжига выбрана температура 750 K?

2. Для оценки эффективности работы термоэлектрических преобразователей чаще всего пользуются так называемой термоэлектрической добротностью, которая определяется формулой (1.3), представленной в работе. Однако автор ограничился лишь определением термоэлектрической мощности, что не позволяет эффективно оценить практическую применимость разработанных и исследованных в работе материалов.

3. В дальнейшем следовало бы измерить также и электрофизические свойства образующихся новых фаз, что возможно дало бы объяснение особенностей кривых температурных зависимостей.

4. В тексте диссертации имеются также замечания по оформлению работы:

- некоторые подписи к рисункам оторваны от самих рисунков (например, рис. 55, 56), что затрудняет чтение текста;
- оформление отдельных литературных источников выполнено с нарушением стандартов (например, 25, 26, в которых отсутствует название работы).

Отмеченные замечания не снижают научной и практической значимости полученных результатов и общую положительную оценку работы, а в значительной степени носят характер пожеланий. Диссертация представляет собой самостоятельно выполненную, цельную и завершенную научно-исследовательскую работу на достаточно актуальную тему. Автореферат диссертации дает полное представление о проведенных автором исследованиях и о полученных результатах.

Заключение

Диссертационная работа Р.М. Калмыкова «Влияние примеси CdSe на термоэлектрические свойства сплавов PbTe» представляет собой завершенную научно-квалификационную работу и удовлетворяет требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям (п.п. 9, 10 «Положения о присуждении ученых степеней» от 24 сентября 2013 г., № 842). Тема и содержание диссертации соответствует п.п. 1,2 Паспорта специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

По объему выполненных работ и новизне полученных результатов диссертационная работа Р.М. Калмыкова на тему «Влияние примеси CdSe на термоэлектрические свойства сплавов PbTe» может быть рекомендована для защиты на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Отзыв подготовлен профессором кафедры физики твёрдого тела", заслуженным работником высшей школы, д.ф.-м.н., профессором Калинин Юрием Егоровичем, был заслушан и обсуждён на заседании ученого совета факультета радиотехники и электроники ФГБОУ ВО "Воронежский государственный технический университет" 13 ноября 2020 года (протокол № 3). Присутствовали на заседании: 16 человек. Результаты голосования: "за" – 16 человек, "против" – нет, "воздержались" – нет.

Декан факультета радиотехники и электроники
Федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
"Воронежский государственный технический
университет", доктор технических наук, доцент



Небольсин Валерий Александрович

Служебный адрес и телефон: 394066, г. Воронеж, 394066, г. Воронеж,
Московский пр-т, 179, учебный корпус №3, ауд 419; E-mail: f-r-t-e@yandex.ru
телефон: +7 (473) 243-77-30.