

АКАДЕМИЯИ МИЛЛИИ ИЛМҲОИ
ТОҶИКИСТОН
ИНСТИТУТИ ФИЗИКАЮ ТЕХНИКАИ
БА НОМИ С.У. УМАРОВ



НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ТАДЖИКИСТАНА
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ИМ. С.У. УМАРОВА

NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF TAJIKISTAN
S.U. UMAROV PHYSICAL-TECHNICAL INSTITUTE

734063, Ҷумҳурии Тоҷикистон, ш. Душанбе, хиёбони Айнӣ, 299/1 | 734063, Республика Таджикистан,
г. Душанбе, проспект Айнӣ, 299/1 | 734063, Republic of Tajikistan, Dushanbe, Aini Avenue, 299/1
Tel. (+99237): 2258084, 2258090, 2258092 | E-mail: admin@phti.tj. Web: phti.tj

№370001/23-1-114 от 23.04.2024г.

« У Т В Е Р Ж Д А Ю »

Директор Физико-технического
Института им. С. У. Умарова НАНТ,

Зарифзода А.К.

23 апреля 2024 г.

О Т З Ы В

ведущей организации на диссертационную работу Баротова Намозкула Иноятовича на тему: «Исследование физико-химических параметров легированных полупроводниковых материалов на основе антимида индия», представленную на соискание ученой степени кандидата химических наук по специальности 02.00.04.-«Физическая химия»

Технический прогресс и достижения науки, свидетельствуют о бурном развитии не только общества, но и отрасли фундаментальных наук. Особенно быстро развиваются и внедряются результаты исследований в различные области наук, которые имеют широкие перспективы для развития электронной техники, на их основе быстро развиваются физика и химия полупроводников.

В области физики и химии изучение процессов, комплексное исследование металлов и полупроводниковых соединений в широком диапазоне температур при легировании в твердом и жидком состоянии, является актуальной проблемой. Эти проблемы создают трудности в различных аспектах, в частности, процессах плавления и кристаллизации, поиска новых материалов и изучении их комплекса физико-химических свойств в твердом и жидком состоянии. При проектировании и создании более современных полупроводниковых приборов необходимо знать важнейшие параметры полупроводников для дальнейшей их успешной эксплуатации, такие как концентрация, подвижность, определение знака носителей зарядов и др. Вместе с тем необходимость совершенствования технологии производства полупроводниковых материалов и улучшение их

качества требует дальнейшего всестороннего комплексного исследования физико-химических свойств полупроводниковых материалов в твёрдом и жидком состоянии. В частности, решение вопросов легирования неотделимо от изучения примесных уровней, механизмов электропроводности и термо-эдс, возникающих в полупроводниках. Комплексные исследования на основе новых материалов, имеющих оптимальные параметры получаемые путем легирования, играют важную роль в науке и технике. Работа большинства электронных полупроводниковых приборов и аппаратуры связана с использованием примесного механизма проводимости. Эти исследования также позволяют судить о взаимодействии между лигатурами и соединениями. Решение данной задачи необходимо для управления свойствами твёрдых полупроводников путём легирования различными примесями и позволяют судить о взаимодействии между лигатурами и соединениями. Поэтому возникает проблема легирования полупроводника, добавками в контролируемых количествах, исследование физико-химических, электрофизических, теплофизических и других свойств легированных полупроводников и поиск новых материалов, имеющих оптимальные параметры получаемые путем легирования в твёрдой и жидкой фазе играют важную роль в науке и технике.

Взаимодействие легирующих элементов друг с другом и несовершенство кристаллической решетки, диффузия в кристаллах полупроводников, распад твёрдых растворов, появление второй фазы в некоторых из них приводит к возникновению дефектов в твёрдой фазе, влиянию легирующих добавок на энергетический спектр, а также на их оптические, электрофизические, термоэлектрические свойства и т. д.

В настоящей работе рассматривается комплексный подход к исследованию электрофизических, технологических, термоэлектрических свойств полупроводниковых соединений типа $A^{III}B^V$ в частности антимонида индия (InSb) и его легирующее состояние серебром (InSb+Ag), комплексный подход к исследованию электрофизических и технологических, термоэлектрических свойств и методические приёмы получения соединений полупроводников различных структурных групп в широком диапазоне температур, включая и жидкую фазу; управление свойствами полупроводников путем легирования различных примесей, экспериментальное исследование электропроводности, термо-эдс и эффекта Холла расплавленных веществ, обладающих значительной химической активностью в связи с практическим применением в качестве активных элементов электронных приборов, а также целью их минимизации, во – вторых, это требование науки для построения общей теории в области предплавления, после плавления и жидкой фазы. Изложенный выше анализ проблем исследования, практического использования, вышеназванных соединений и их твёрдых растворов позволяет сформулировать основные положения диссертационной работы.

В связи с вышеизложенным, диссертационная работа Баротов Н.И., посвященная изучению физико-химических параметров легированных полупроводниковых материалов на основе антимонида индия в твердом и жидком состоянии, является актуальной задачей для современной науки в области физика и химии, которая является неотъемлемой частью материаловедения в электронной технике.

Целью работы является выявление закономерностей изменения коэффициентов электропроводности, термо-эдс и Холла в полупроводниках с различными типами межчастичного взаимодействия в твёрдом и жидком состоянии, вблизи точки плавления.

Задачи исследования:

1. На базе комплексного исследования физических свойств полупроводников группы A_3B_5 при переходе из твёрдого состояния в жидкое и в расплаве в зависимости от температуры с привлечением, как традиционных методов электропроводности и термо-эдс, так и метода эффекта Холла;
2. Поиск новых высокоэффективных материалов путем легирования для применения в области термоэлектричества как активных материалов термоэлементов, термогенераторов, диодов так и других полупроводниковых приборов;
3. Описание электрофизических свойств расплавов полупроводников различными моделями электронных расплавов;
4. Разработка надёжной методики и аппаратуры для высокотемпературных прецизионных исследований электропроводности, термо-эдс и эффекта Холла в расплавах полупроводников;
5. Экспериментальное исследование электропроводности, термо-эдс и эффекта Холла в твёрдом и жидком состоянии полупроводниковых соединений различных структурных групп, а также квазибинарных сплавов на их основе;
6. Анализ современных моделей неупорядоченных систем с позиции выяснения их возможностей при абсолютных значениях и температурной зависимости физико-химических свойств на основе комплексных исследований, гальваномангнитных, электрофизических и термоэлектрических характеристик;
7. Выяснение области практического применения новых бинарных антимонидов и квазибинарных разрезов антимонидов в электронной технике;
8. Исследование кинетических параметров и их связи со свойствами и составом $InSb$ и легированными образцами $InSb+Ag$ с целью получения материалов с высокой термоэлектрической эффективностью;
9. Синтез и получение образцов антимонида индия, легированных серебром, получение новых экспериментальных данных по электропроводности, термо-эдс и эффекту Холла в исходном и легированных образцах.

Объект исследования. Объектом исследования диссертантом были выбраны представители группы соединения A_3B_5 - антимонида индия и

образцы антимонида индия легированного серебром и изучения комплекса их свойств в твёрдом и жидком состоянии.

Предметом исследования является экспериментальное исследование коэффициентов электропроводности, термо-эдс и Холла в антимониде индия (InSb) и в образцах легированного серебра (InSb+Ag) с привлечением традиционных методов электропроводности, термо-эдс и эффекта Холла.

Научная новизна исследования заключается:

1. Впервые синтезированы образцы антимонида индия с содержанием серебра (InSb+Ag) и получена температурная зависимость важных электрофизических параметров, а именно: электропроводность, коэффициенты термо-эдс и Холла.
2. На основе экспериментальных данных рассчитаны подвижность и концентрация носителей заряда. Впервые проведено комплексное исследование электрофизических свойств - эффекта Холла, термо-эдс и электропроводности в расплавах InSb, а также образцах легированных серебром InSb+Ag.
3. Впервые сделан количественный анализ исследованных свойств веществ на основе различных моделей, предложенных М. Катлером и классической теорией свободных электронов.
4. Основываясь на экспериментальных и расчетных данных, можно классифицировать соединения A_3B_5 , в частности, антимонид индия (InSb) и его легирование серебром (InSb+Ag) в твердом состоянии как полуметалл, а при переходе из твердого в жидкое состояние как полуметалл-металл
5. Отмечается, что образцы InSb с содержанием 0,1 масс. % Ag имеют более высокое значение коэффициента термо-эдс, который может играть важную роль в изготовлении термодатчиков.

Теоретическая и практическая ценность исследования. Проведён количественный анализ применимости теоретических моделей М. Катлера, Н. Ф. Мотта, Андерсона, описывающих физические свойства исследованных расплавов полупроводников, а также веществ с подобной физико-химической природой. Полученные количественные данные по изученным физическим свойствам полупроводников представляют интерес для разработчиков аппаратуры электронной техники и технологов при создании и эксплуатации технологического оборудования для получения полупроводниковых материалов и приборов на базе исследованных твёрдых растворов.

Получен большой объём экспериментальных данных высокой точности, надежности по электропроводности, термо-эдс и эффекту Холла чистого антимонида индия (InSb) и легированного серебром (InSb+Ag), результаты которых внедрены в полученных образцах в народном хозяйстве.

Предложена методика одновременного измерения электропроводности, термо-эдс и коэффициента Холла в широком диапазоне температур, которая позволяет экономить материал ячейки, исследуемое вещество и время для

подготовки ячейки к измерениям. Вместо разовых измерительных ячеек предлагается использование многоразовых после полного изучения исследуемого вещества, проводить специальные приёмы и ячейка будет готова к новому измерению.

Положения, выносимые на защиту: На основании проведенных исследований и разработок на защиту выносятся следующее:

1. Методика комплексного исследования электропроводности, термо-эдс и эффекта Холла полупроводников в твёрдом и жидком состоянии.
2. Экспериментальные результаты исследования перечисленных характеристик соединения A_3B_5 , а также квазибинарные системы соединений A_3B_5 , в частности, антимонида индия (InSb) с содержанием 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5 масс.% Ag.
3. Анализ коэффициентов электропроводности, теплопроводности, термо-эдс и эффекта Холла исследованных веществ с целью выяснения высокоэффективных материалов для рекомендации их к применению в различных областях полупроводниковой техники.
4. Данные по анализу явления «после плавления» и роль ближнего порядка в жидком состоянии исследуемых веществ, а также явления кластерообразования после плавления.

Достоверность диссертационных результатов. Полученные экспериментальные данные подтверждаются использованием электрофизических и термоэлектрических методик исследования; современными электронными приборами; воспроизводимостью экспериментальных результатов в широком диапазоне температур; поиском и нахождением новых высокоэффективных активных элементов для создания электронных приборов.

Совпадение диссертации с паспортом специальности.

Рассматриваются узкозонные бинарные полупроводниковые соединения типа A^3B^5 , в частности антимонид индия (InSb) и антимонида индия, легированный серебром (InSb+Ag). Проведены комплексные исследования электрофизических, термоэлектрических свойств и методические приёмы полупроводников в широком диапазоне температур, включая и жидкую фазу (соответствует пунктам 1, 2 и 5 по специальности 02.00.04 – Физическая химия (пункт 1 – Экспериментальное определение и расчет параметров строения молекул и пространственной структуры веществ; пункт 2 – Экспериментальное определение термодинамических свойств веществ, расчет термодинамических функций простых и сложных систем, в том числе на основе методов статистической термодинамики, изучение термодинамики фазовых превращений и фазовых переходов; пункт 5 – Изучение физико-химических свойств систем при воздействии внешних полей, а также в экстремальных условиях высоких температур и давлений)).

Выявление закономерностей изменения коэффициентов электропроводности, термо-эдс и Холла в полупроводниках с различными типами межчастичного взаимодействия в твёрдом и жидком состоянии,

вблизи точки плавления, классификация соединения A_3B_5 , в частности, антимонида индия (InSb) и их легирования серебром (InSb+Ag), что в твердом состоянии как полуметалл, а при переходе из твердого в жидкое состояние как полуметалл-металл (соответствует пунктам 4, 9 и 11 по специальности 02.00.04 – Физическая химия (пункт 4 – Теория растворов, межмолекулярные и межчастичные взаимодействия; пункт 9 – Элементарные реакции с участием активных частиц; пункт 11 – Физико-химические основы процессов химической технологии)).

Личный вклад соискателя в работе, выполненную в соавторстве, состоял в систематизации литературных данных по теме диссертации, постановке задач исследования, получении экспериментальных данных, анализе и обобщении результатов, формулировке основных выводов диссертации, внедрении результатов исследования в народное хозяйство, получении авторского свидетельства.

Публикации и апробация результатов диссертационной работы. Полученные соискателем экспериментальные результаты прошли апробацию на международных, региональных и республиканских конференциях. По результатам исследований опубликовано 22 статьи, из которых 7 в журналах рекомендуемых ВАК Республики Таджикистан и Российской Федерации, а также 15 тезисов докладов конференций различного уровня и один патент с актом внедрения.

Структура, содержание и объём работы Диссертационная работа Баротова Н.И. состоит из введения, четырех глав и выводов, изложена на 141 страницах компьютерного набора, иллюстрирована 22 рисунками и содержит 15 таблиц. Список литературы включает 178 наименований.

Во введении изложена актуальность темы диссертации, необходимость проведения исследований, сформулированы цели и задачи работы и перечень основных положений, определена научная новизна, теоретическая и практическая значимость исследования, проведено описание моделей электронных расплавов и положение выносимых на защиту.

Первая глава представляет собой вводную часть, анализ и выводы об электрофизических и термоэлектрических свойствах полупроводниковых соединений типа $A^{III}B^V$, современные модели описания структуры твердых и жидких металлов и полупроводников.

Во второй главе приведено описание и даны принципиальные блок-схемы установки; экспериментальные методики для исследования электропроводности, коэффициентов термо-эдс и эффекта Холла в полупроводниковых материалах в широком диапазоне температур, включая и жидкую фазу. Приведено технологическая схема держателя для измерения коэффициента электропроводности, термо-эдс и Холла в твердом состоянии и схема измерительной ячейки для измерения электрофизических параметров.

Третья глава посвящена технологическим процессам синтеза и подготовки образцов к измерениям. В технологическом отношении такие

операции, как синтез и выращивание кристалла, а также легирование полупроводникового соединения проводится последовательно в ходе одного технологического цикла. Для получения соединения антимонида индия использовали прямой однотемпературный синтез.

В четвертой главе приведены анализ экспериментальных результатов по электропроводности, термо-эдс и эффекта Холла и рекомендации по практическому применению результатов исследования:

1. Полученные экспериментальные данные и анализ коэффициентов электропроводности, теплопроводности, термо-эдс и эффекта Холла в исследованном веществе ($\text{InSb}+\text{Ag}$) которой читаются высокоэффективным материалом и рекомендуется к применению в различных областях полупроводниковой и электронной техники для создания современных электронных приборов.

2. Легирующее соединение антимонида индия (InSb) с содержанием 0,1 масс.% серебром (Ag), имеет более высокое значение коэффициента термо – эдс, чем у этого чистого соединения и может играть важную роль для изготовления термодатчиков.

Диссертационная работа Баротова Намозкула Иноятовича представляет собой завершенное научное исследование. Однако при её чтении и автореферата возникли следующие замечания:

1. В диссертации и в автореферате в научной новизне и положениях, выносимых на защиту, недостаточно отражены результаты по применению данного соединения в электронной промышленности и в народном хозяйстве.

2. В диссертации, а также в автореферате не указано, почему для исследований выбран именно антимонид индия.

3. Текст диссертации и автореферата не лишены грамматических ошибок.

Отмеченные недостатки не умаляют научной и практической ценности диссертационного исследования, не снижают его актуальность, грамотно аргументированы и свидетельствуют о высокой теоретической и практической значимости работы соискателя.

Представленные соискателем сведения об опубликованных им работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации, достоверны. В диссертационной работе цитирование оформлено корректно; ссылки на авторов и соавторов оформлены в соответствии с критериями, установленными ВАК Республики Таджикистан.

Диссертационная работа Баротова Н.И. на тему: **«Исследование физико-химических параметров легированных полупроводниковых материалов на основе антимонида индия»** представленная на соискание ученой степени кандидата химических наук по специальности 02.00.04-физическая химия, является завершенной научно-квалификационной работой. В ней содержатся новые экспериментальные данные и анализ коэффициентов электропроводности, теплопроводности, термо-эдс и эффекта Холла в исследованных веществах ($\text{InSb}+\text{Ag}$), который читается высокоэффективным материалом и рекомендуется к применению в

различных областях полупроводниковой и электронной техники для создания современных электронных приборов. Также легирующее соединение антимонида индия (InSb) с содержанием 0,1 масс.% серебром (Ag), имеет более высокое значение коэффициента термо – эдс, чем у этого чистого соединения и может играть важную роль для изготовления термодатчиков.

Диссертационная работа соискателя по объему, теоретической и практической значимости, новизне отвечает всем требованиям «Положения о присуждении учёных степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата химических наук по специальности 02.00.04 - «Физическая химия» Отзыв обсуждён и утверждён на заседании научного семинара Физико-технического института имени С.У. Умарова Национальной академии наук Таджикистана, протокол № 5 от 23 апреля 2024 г.

Председатель научного семинара

заместитель директора по научно- учебной работе Физико-технического института им. С.У. Умарова НАНТ , к.ф.-м.н., доцент

 Холмуродов Ф.

Эксперты:

1. Заведующей лаборатории физики кристаллов, к.х.н.

 Холов А.

2. Ведущий научный сотрудник Центра исследования и использования возобновляемых источников энергии, к.ф.-м.н.

 Алидодов Т.М.

Ученый секретарь научного семинара, к.т.н.

 Каюмов М.

Тел.:(+992237): 2258084, E-mail: admin@phti.tj

Заверяю:

подписи Холмуродова Ф., Холова А., Алидодова Т.М. и Каюмова М.

Начальник отдела кадров
Физико-технического института
им. С.У. Умарова НАНТ



Ёрова М.