

ОТЗЫВ

научного руководителя Овсянникова Сергея Владимировича о работе Коробейникова Игоря Витальевича по теме диссертации **«Термоэлектрические явления в твердых растворах Si-Ge и (Bi,Sb)₂(Te,Se)₃ при высоком давлении»**, представленной к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников

Коробейников Игорь Витальевич, 1986 года рождения, в 2010-м году закончил Уральский государственный университет имени А.М. Горького по специальности «Механика. Прикладная математика». В 2010 году он начал работать в Группе высоких давлений Отдела работ на атомном реакторе Института физики металлов УрО РАН в должности электроника. С 2014 года Коробейников И. В. начал работать в Лаборатории полупроводников и полуметаллов того же института, сначала в должности младшего научного сотрудника, а в 2017 году был переведен на должность научного сотрудника, на которой и работает в настоящее время.

За время работы в Институте физики металлов Коробейников И. В. детально освоил методику исследования свойств материалов в условиях приложенного высокого давления в применении к различным актуальным полупроводниковым материалам. При его активном участии было подготовлено более 25 публикаций по данной тематике в рецензируемых научных журналах как российских, так и международных. Он также неоднократно представлял результаты этих исследований в качестве устных и стендовых докладов на ведущих международных конференциях по данной тематике, например, на 52-ой, 53-ей, 54-ой и 58-ой Европейских международных конференций по физике и техники высоких давлений (Лион, Франция, 2014; Мадрид, Испания, 2015; Байройт, Германия 2016; Тенерифе, Испания, 2020); Международной конференции по термоэлектричеству (Дания, Ольбург 2012) и 12-ом международном симпозиуме по физике материалов (ISPMA 12) (Чехия, Прага, 2011) Коробейников И. В. являлся активным участником ряда научных проектов финансируемых РФФИ (№ 14-02-00622, 14-08-31023, 18-32-00618, 10-08-00945, 10-08-01296), и в данный момент является руководителем проекта РФФИ № 20-02-00695.

Тема диссертационной работы Коробейникова И. В. посвящена крайне актуальной тематике, связанной с исследованием свойств микроскопических полупроводниковых образцов в условиях приложенного варьируемого механического стресса (давления). Возможность изменения и управления электронными свойствами полупроводников может открыть

дополнительные перспективы в микро- и нанoeлектронике для создания новых типов интегральных схем, включающих полупроводниковые элементы с легко переключающимися свойствами (например, обратимое переключение типа электропроводности между *p*- и *n*-типами и скомпенсированной проводимостью, получающейся при равенстве парциальных электронных и дырочных вкладов). Кроме того, эти эффекты могут использоваться при создании компактных электронных модулей, например, для преобразования тепловой энергии в электрическую, то есть, выработки термоэлектричества, в которых, небольшие стрессы, приложенные к отдельным элементам, позволяют повышать их рабочие характеристики. Поэтому, фундаментальные исследования в этой области важны как для понимания поведения физических свойств и фазовых переходов в полупроводниках в экстремальных условиях приложенных высоких давлений, так и с практической точки зрения. В диссертационной работе Коробейникова И. В. приводятся результаты системных исследований электронных, структурных и оптических свойств для актуальных полупроводниковых систем, включающих кремний, германий и их твердые растворы, а также материалы на основе Bi_2Te_3 , которые используются в термоэлектрических генераторах, работающих при комнатных температурах.

В рамках диссертационной работы соискателю предстояло решить несколько научных задач. В частности, с помощью измерений эффекта термоЭДС (эффекта Зеебека) как функции приложенного высокого давления при комнатной температуре предстояло определить тип электропроводности и его возможные изменения под давлением в кристаллах кремния, германия и их твердых растворах с преобладанием либо кремния, либо германия. Требовалось определить тип проводимости и величину термоЭДС в полупроводниковых фазах с кубической структурой типа алмаза, в металлических фазах высокого давления, и метастабильных фазах, которые образуются после декомпрессии металлических фаз в нормальные условия. Для твердых растворов на основе Bi_2Te_3 предстояло исследовать изменения термоЭДС и электросопротивления под давлением, чтобы определить эффект приложенного давления на фактор мощности, который характеризует эффективность термоэлектрического элемента для преобразования тепловой энергии в электрическую. Для систем на основе Bi_2Te_3 также предстояло установить влияние давления на их слоистые кристаллические структуры. Кроме того, требовалось разработать модель термоэлектрического модуля, в котором эффекты высокого давления могут использоваться для улучшения рабочих параметров элементов.

Коробейников И. В. принимал личное и активное участие на всех этапах диссертационной работы, включающих как обсуждение её общего плана, методологии, целей и задач, так и выполнения её отдельных частей. Все результаты, приведенные в диссертации, получены либо лично соискателем, либо при его активном участии. Так, Коробейников И. В. лично участвовал в

планировании, подготовке и проведении экспериментов по измерению величин термоЭДС и электросопротивления полупроводников при высоком давлении, которые составляли основную часть диссертационной работы. Соискатель также принимал непосредственное участие в обработке и анализе полученных данных термоЭДС и электросопротивления. Он принимал активное участие в анализе данных, полученных в рентгеноструктурных исследованиях и исследованиях комбинационного рассеяния света под давлением, которые проводились в Баварском геологическом институте в Германии. Коробейников И. В. принимал активное участие в обсуждении результатов с научным руководителем и коллегами, а также в их публикации в журналах и представлению на научных конференциях.

В диссертационной работе Коробейникова И. В. были получены следующие оригинальные результаты:

- Получены зависимости от давления эффекта термоЭДС (эффекта Зеебека) в основных фазах кремния, германия и их твердых растворах. Эти фазы включали как полупроводниковые фазы с кубической структурой типа алмаза, так и металлические фазы, образующиеся при высоком давлении, и метастабильные фазы, образующиеся после декомпрессии.

- Обнаружено, что в полупроводниковых фазах твердых растворах $Si_{1-x}Ge_x$ с малым содержанием германия (около 1.4-2.6 %), знак термоЭДС может меняться под действием небольших приложенных давлений выше 1 ГПа.

- Обнаружено, что фактор термоэлектрической мощности, который характеризует эффективность термоэлемента, может быть значительно повышен для многих твердых растворах $p-Bi_xSb_{2-x}Te_3$ и $n-Bi_2Te_{3-x-y}Se_xS_y$ под действием внешнего давления около 2-3 ГПа.

- Разработана модель термоэлектрического модуля, в котором, рабочие параметры элементов могут изменяться, в том числе, улучшаться при помощи изменения величины приложенного давления.

- Установлены структурные фазовые переходы в тройном составе $Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te_3$ при давлениях 9.5 и 18 ГПа в моноклинные структуры $C2/m$ и $C2/c$, соответственно.

Результаты, представленные в диссертационной работе, были опубликованы в 15 статьях, в том числе в 12 статьях в рецензируемых журналах, входящих в Перечень ВАК, и были представлены на 16 международных и российских конференциях.

Считаю, что кандидатская диссертация Коробейникова И. В. «Термоэлектрические явления в твердых растворах Si-Ge и $(Bi,Sb)_2(Te,Se)_3$ при высоком давлении» удовлетворяет всем требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней в УрФУ, а ее автор, Коробейников Игорь Витальевич, является сложившимся научным сотрудником, способным к

самостоятельным научным исследованиям, и, следовательно, он заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников.

Старший научный сотрудник
Лаборатории структурного и фазового анализа
Института химии твердого тела УрО РАН,
кандидат физ.-мат. наук



С. В. Овсянников

« 22 » марта 2021 г.

Почтовый адрес: 620108, г. Екатеринбург, ул. Первомайская, 91

Тел.: (343) 374-5219

E-mail: sergey2503@gmail.com

Подпись Овсянникова С.В. заверяю

Ученый секретарь ИХТТ УрО РАН

23 марта 2021

Богданова Е.А.

