

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ ЭКСПЕРТНОЙ КОМИССИИ

по защите диссертации Панченко Виктории Петровны на тему  
**«Получение термостабильного среднетемпературного термоэлектрического материала в системе Zn-Sb»,**

представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.3 – «Технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники» и состоявшейся в НИТУ «МИСиС» 20.09.2022 г.

Диссертация принята к защите Диссертационным советом НИТУ «МИСиС» 27.06.2022 г., протокол № 3.

Диссертация выполнена на кафедре материаловедения полупроводников и диэлектриков Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Министерство науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель – кандидат физико-математических наук Табачкова Наталия Юрьевна, доцент кафедры материаловедения полупроводников и диэлектриков НИТУ «МИСиС», старший научный сотрудник отдела нанотехнологий научного центра лазерных материалов и технологий ИОФ РАН.

Экспертная комиссия утверждена Диссертационным советом НИТУ «МИСиС» (протокол № 3 от 27.06.2022 г.) в составе:

1. Костишин Владимир Григорьевич – д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой технологии материалов электроники НИТУ «МИСиС» – председатель комиссии;
2. Панина Лариса Владимировна – д.ф.-м.н., профессор кафедры технологии материалов электроники НИТУ «МИСиС»;
3. Ховайло Владимир Васильевич – д.ф.-м.н., профессор кафедры функциональных наносистем и высокотемпературных материалов НИТУ «МИСиС»;
4. Штерн Юрий Исаакович – д.т.н., профессор института перспективных материалов и технологий НИУ МИЭТ;
5. Дорохин Михаил Владимирович – вед. н.с., д.ф.-м.н., профессор кафедры физического материаловедения Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского (ННГУ), заведующий лабораторией спиновой и оптической электроники НИФТИ ННГУ, заведующий отделом твердотельной электроники и оптоэлектроники НИФТИ ННГУ.

В качестве ведущей организации утверждено Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО», г. Санкт-Петербург.

Экспертная комиссия отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- разработан высокоэффективный среднетемпературный термоэлектрический материал  $\beta$ -Zn<sub>4</sub>Sb<sub>3</sub> с добротностью  $zT = 1,55$  при температурах 673–723 К;
- доказана необходимость проведения синтеза с избытком Zn относительно стехиометрического состава для воспроизводимого получения  $\beta$ -Zn<sub>4</sub>Sb<sub>3</sub>. Установлено,

что предельное содержание Zn в соединении  $\beta\text{-Zn}_4\text{Sb}_3$  составило 58,57 ат.%, такой твердый раствор соответствует составу  $\text{Zn}_{4,1}\text{Sb}_3$ ;

- показано, что однофазный материал  $\beta\text{-Zn}_4\text{Sb}_3$  можно получить только с помощью синтеза с последующим искровым плазменным спеканием. При этом получение материала методом прямого сплавления компонентов является предпочтительнее метода механохимического синтеза;

- показано, что для получения термостабильного материала  $\beta\text{-Zn}_4\text{Sb}_3$  необходимо легирование In. Установлено, что предельное содержание In в фазе  $\text{Zn}_{4,1-x}\text{In}_x\text{Sb}_3$  может достигать  $x = 0,3$ . Показано, что до концентрации  $x = 0,2$  индий растворяется по механизму замещения, а при  $x > 0,2$  преимущественно по механизму внедрения;

- определен оптимальный состав  $\text{Zn}_{3,85}\text{In}_{0,25}\text{Sb}_3$ , обладающий термоэлектрической эффективностью  $zT = 1,55$  и стабильный при температурах эксплуатации.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

- был оценен предел растворимости цинка в  $\beta\text{-Zn}_4\text{Sb}_3$ , а также определен механизм растворения. Показано, что Zn растворяется в фазе  $\beta\text{-Zn}_4\text{Sb}_3$  по механизму внедрения;

- установлено, что наличие межузельного Zn в соединении  $\beta\text{-Zn}_4\text{Sb}_3$  не является условием сохранения стабильности данной фазы;

- было исследовано влияние легирования индием на термоэлектрические свойства и термостабильность фазы  $\beta\text{-Zn}_4\text{Sb}_3$ . Показано, что такое легирование приводит к увеличению фактора мощности за счет оптимизации концентрации основных носителей заряда и снижению теплопроводности из-за рассеяния на дополнительных точечных дефектах и искажениях решетки;

- был определен механизм растворения In в фазе  $\text{Zn}_{4,1-x}\text{In}_x\text{Sb}_3$ . Показано, что до концентрации  $x = 0,2$  индий растворяется по механизму замещения, а при  $x > 0,2$  преимущественно по механизму внедрения.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

- найдены технологические условия получения среднетемпературного материала на основе  $\beta\text{-Zn}_4\text{Sb}_3$  с высокой величиной термоэлектрической эффективности;

- установлено, что однофазный материал на основе  $\beta\text{-Zn}_4\text{Sb}_3$  воспроизводимо получается методом искрового плазменного спекания из синтезированного материала, взятого в стехиометрическом мольном соотношении с добавлением избыточного цинка;

- определены диапазоны концентраций избыточного цинка и легирующей примеси индия для получения однофазного и термостабильного материала на основе  $\beta\text{-Zn}_4\text{Sb}_3$ ;

- результаты работы использованы в технологическом процессе при получении термоэлектрического материала на основе  $\beta\text{-Zn}_4\text{Sb}_3$  в АО «Ферротек Норд».

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

- достоверность научных результатов подтверждается использованием современного аттестованного и сертифицированного оборудования, а также использованием аттестованных методик измерения функциональных свойств материалов, таких как четырёхзондовый метод, метод лазерной вспышки и метод дифференциальной сканирующей калориметрии.

Личный вклад автора в настоящую работу состоит в постановке целей и задач, непосредственном участии в экспериментах, в том числе в разработке технологической схемы получения термоэлектрического материала на основе твердых растворов антимонида цинка, проведении экспериментальных измерений, обработке, анализе и оценке полученных результатов измерений.

Материалы диссертации Панченко Виктории Петровны опубликованы в 17 печатных работах, из которых 12 работ в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ (11 – в базах Web of Science/SCOPUS).

Пункт 2.6 Положения о порядке присуждения ученых степеней в НИТУ «МИСиС» соискателем ученой степени кандидата наук не нарушен.

Диссертация Панченко Виктории Петровны соответствует критериям п. 2 Положения о порядке присуждения ученых степеней в НИТУ «МИСиС», так как в ней на основании выполненных автором исследований содержится решение задачи по нахождению оптимальных технологических условий получения термостабильного материала на основе  $\beta\text{-Zn}_4\text{Sb}_3$  с высокой термоэлектрической эффективностью, установлено влияние отклонения от стехиометрического состава на возможность получения однофазного материала  $\beta\text{-Zn}_4\text{Sb}_3$ , определено влияние избыточного цинка и легирования индием на термоэлектрические свойства материала и установлена зависимость термостабильности  $\beta\text{-Zn}_4\text{Sb}_3$  от соотношения концентрации цинка и индия. Полученные в работе результаты имеют важное научное значение и являются перспективными в решении практических задач.

Экспертная комиссия приняла решение о возможности присуждения Панченко Виктории Петровне ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.3 – «Технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники».

При проведении тайного голосования экспертная комиссия в количестве 5 (пяти) человек, участвовавших в заседании, из 5 человек, входящих в состав комиссии, проголосовала: за - 5, против - 0, недействительных бюллетеней – 0.

Председатель Экспертной комиссии



В.Г. Костишин

20.09.2022