

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ЭКСПЕРТНОЙ КОМИССИИ

по защите диссертации Лаврентьева Михаила Геннадьевича на тему
**«Принципы формирования анизотропной структуры термоэлектрических
материалов на основе халькогенидов висмута и сурьмы для оптимизации их
функциональных характеристик»,**

представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 1.3.11 – «Физика полупроводников» и состоявшейся
в НИТУ МИСИС 20.02.2023 г.

Диссертация принята к защите Диссертационным советом НИТУ МИСИС
12.12.2022 г., протокол № 7.

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 № 7 от 12.12.2022 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 – 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:

- определены условия формирования однородной структуры по объему экструдированного стержня с помощью математического моделирования пластического течения;

- найдены условия экструзии, при которых генерация и отжиг дефектов, возникающих при пластической деформации и рекристаллизации, приводят к созданию структуры с оптимальными термоэлектрическими свойствами. Показано, что увеличение скорости экструзии приводит к реализации небазисных систем скольжения и возрастанию дефектности структуры.

- предложено использовать смеси порошков с разным гранулометрическим составом для улучшения функциональных характеристик экструдированных материалов. Показано, что увеличение мелкодисперсной фракции в смеси исходных порошков приводит практически к линейному увеличению механических свойств экструдированного материала. Найден гранулометрический состав исходных порошков, который приводит к увеличению термоэлектрической эффективности материалов р-типа проводимости.

- обнаружен эффект измельчения зерна в твердых растворах $\text{Bi}_{0,4}\text{Sb}_{1,6}\text{Te}_3$ и $\text{Bi}_2\text{Te}_{2,85}\text{Se}_{0,15}$ при высоких температурах искрового плазменного спекания. Показано, что образование новых зерен при искровом плазменном спекании обусловлено неоднородным нагревом по сечению зерна. Показано, что уменьшение теплопроводности в термоэлектрических материалах n-типа проводимости без использования анизотропии не позволяет получить материал с удовлетворительными термоэлектрическими свойствами.

- разработаны основы технологии метода искровой плазменной экструзии применительно к твердым растворам на основе халькогенидов висмута и сурьмы.

- показано формирование сильно анизотропной структуры твердых растворов $\text{Bi}_{0,4}\text{Sb}_{1,6}\text{Te}_3$ и $\text{Bi}_2\text{Te}_{2,85}\text{Se}_{0,15}$ методом искровой плазменной экструзии, обусловленное локальным перегревом по границам зерен.

- получены твердые растворы $\text{Bi}_{0,4}\text{Sb}_{1,6}\text{Te}_3$ и $\text{Bi}_2\text{Te}_{2,85}\text{Se}_{0,15}$ с термоэлектрической добротностью $Z=3,38 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ и $Z=2,98 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ соответственно и высокими механическими характеристиками.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

- с помощью математического моделирования определены условия формирования однородной структуры по объему экструдированного стержня;

- установлено формирование острой аксиальной текстуры в твердых растворах $\text{Bi}_{0,4}\text{Sb}_{1,6}\text{Te}_3$ и $\text{Bi}_2\text{Te}_{2,85}\text{Se}_{0,15}$ при пропускании импульсного тока в процессе искровой плазменной экструзии;

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

- подобраны оптимальные параметры процессов экструзии и искрового плазменного спекания для получения твердых растворов $\text{Bi}_{0,4}\text{Sb}_{1,6}\text{Te}_3$ и $\text{Bi}_2\text{Te}_{2,85}\text{Se}_{0,15}$ с высокими термоэлектрическими характеристиками.

- Разработаны основы технологии метода искровой плазменной экструзии применительно к твердым растворам на основе халькогенидов висмута и сурьмы.

- Получены твердые растворы $\text{Bi}_{0,4}\text{Sb}_{1,6}\text{Te}_3$ и $\text{Bi}_2\text{Te}_{2,85}\text{Se}_{0,15}$ с термоэлектрической добротностью $Z=3,38 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ и $Z=2,98 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ соответственно.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

- достоверность научных результатов подтверждается использованием современного аттестованного и сертифицированного оборудования, а также использованием аттестованных методик при измерении функциональных свойств материалов и исследовании структуры твёрдых растворов.

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 халькогенидов висмута и сурьмы, проведении экспериментальных измерений, обработке, анализе и оценке полученных результатов измерений.

Материалы диссертации Лаврентьева Михаила Геннадьевича опубликованы в 17 печатных работах, из которых 14 работ - в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ, 10 - в базы данных Web of Science/SCOPUS.

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

Диссертация Лаврентьева Михаила Геннадьевича соответствует критериям п. 2 Положения о порядке присуждения ученых степеней в НИТУ МИСИС, так как в ней на основании выполненных автором исследований содержится решение задач по определению

- условий пластического течения термоэлектрических материалов на основе халькогенидов висмута и сурьмы, приводящих к созданию однородной структуры в объеме экструдированного стержня, с помощью математического моделирования;

- влияния пластической деформации, возврата и рекристаллизации на формирование структуры экструдированных твердых растворов $\text{Bi}_{0,4}\text{Sb}_{1,6}\text{Te}_3$ и $\text{Bi}_2\text{Te}_{2,85}\text{Se}_{0,15}$;

- условий искрового плазменного спекания, приводящих к возникновению мелкозернистой структуры, уменьшающей теплопроводность твердых растворов $\text{Bi}_{0,4}\text{Sb}_{1,6}\text{Te}_3$ и $\text{Bi}_2\text{Te}_{2,85}\text{Se}_{0,15}$.

Разработан метод получения низкотемпературных термоэлектрических материалов на основе халькогенидов висмута и сурьмы, основанный на сочетании искрового плазменного спекания и горячей экструзии в едином технологическом процессе.

Полученные в работе результаты имеют важное научное значение и являются перспективными в решении практических задач.

Экспертная комиссия приняла решение о возможности присуждения Лаврентьеву Михаилу Геннадьевичу ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 – «Физика полупроводников».

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

Председатель Экспертной комиссии



В.Г. Костишин

20.02.2023