

УДК 537.312.2

**Касимахунова Анархан Мамасадиқовна**

д.т.н., профессор,

Ферганский политехнический институт, кафедры «Электроэнергетика»

[a.kasimakhunova@ferpi.uz](mailto:a.kasimakhunova@ferpi.uz)

**Касимахунова Анархан Мамасадиқовна**

т.и.д., профессор,

Фергана политехникалык институтунун «Электроэнергетика» кафедрасы

**Kasimahunova Anarkhan Mamasadikovna**

Doctor of Technical Sciences, Professor,

Fergana Polytechnic Institute, Department of Electric Power Engineering

**Атажонов Мухиддин Одилжонович**

доцент кафедры «Альтернативные источники энергии»,

Андижанский машиностроительный институт

[atajonovmuhiddin@gmail.com](mailto:atajonovmuhiddin@gmail.com), тел.: +998-97-737-28-28

**Атажонов Мухиддин Одилжонович**

“Альтернативдик энергия булактары” кафедрасынын доценти,

Андижан машина куруу институту

**Atajonov Muxiddin Odiljonovich**

Associate Professor of the Department of Alternative Energy Sources,

Andijan Machine Building Institute

**Абдуллаева Миргул Пазылбековна**

научный сотрудник,

Институт природных ресурсов им. А.С. Джаманбаева ЮО НАН КР

**Абдуллаева Миргул Пазылбековна**

илимий кызматкер,

УИАнын ТБнун А.С. Джаманбаев ат. Жаратылыш байлыктары институту

**Abdullayeva Mirgul Pazylbekovna**

Researcher,

Institute of Natural Resources named after A.S. Dzhamanbaeva Southern Branch of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЛНОЧНЫХ ТЕРМОЭЛЕМЕНТОВ ( $Bi_2Te_3$ ) И ( $Sb_2Te_3$ ) В СОВРЕМЕННЫХ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЯХ**

**Аннотация.** Данная статья посвящена исследованию изготовления и практическому применению пленочных термоэлементов, таких как  $Bi_2Te_3$  и  $Sb_2Te_3$ , в современных термоэлектрических технологиях. Термоэлектрические материалы, обладающие свойством преобразования тепловой энергии в электрическую и наоборот, представляют собой перспективное направление в области энергетики и электроники. Статья включает в себя обзорные материалы по структурным и электрическим характеристикам пленочных термоэлементов  $Bi_2Te_3$  и  $Sb_2Te_3$ , а также предоставляет результаты

экспериментальных исследований, связанных с их термоэлектрическими свойствами. Особое внимание уделяется методам синтеза и оптимизации структуры материалов для повышения их термоэлектрической эффективности. Дополнительно, статья рассматривает практические применения пленочных термоэлементов в различных областях, таких как энергосберегающие технологии, носимая электроника и термоэлектрические устройства. Полученные результаты могут служить основой для разработки новых термоэлектрических устройств с улучшенными характеристиками эффективности и энергосбережения.

**Ключевые слова:** Пленочные термоэлементы, термоэлектрические материалы, висмут-теллурид ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ), сурьма-теллурид ( $\text{Sb}_2\text{Te}_3$ ), тонкие пленки, магнетронное напыление, химическое осаждение из газовой фазы (CVD), термическое испарение, термоэлектрическая эффективность, коэффициент Зеебек, нанотехнологии, производственные технологии, исследования термоэлектрических свойств, энергетика, технологии охлаждения.

### ЗАМАНБАП ТЕРМОЭЛЕКТРИК ТЕХНОЛОГИЯЛАРДАГЫ ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ) ЖАНА ( $\text{Sb}_2\text{Te}_3$ ) ПЛЕНКАЛЫК ТЕРМОЭЛЕМЕНТТЕРДИ ДАЯРДООНУН ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ИЗИЛДӨӨ

**Аннотация.** Бул макала заманбап термоэлектрик технологияларда  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  жана  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  сыяктуу пленкалуу термоэлементтердин өндүрүшүн жана практикалык колдонулушун изилдөөгө арналган. Жылуулук энергиясын электр энергиясына жана тескерисинче айландыруу касиетине ээ болгон термоэлектрик материалдар энергетика жана электроника тармагында келечектүү багыт болуп саналат. Макалада  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  жана  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  пленкалуу термоэлементтеринин структуралык жана электрдик мүнөздөмөлөрү боюнча обзордук материалдар камтылган, ошондой эле алардын термоэлектрик касиеттерине байланыштуу эксперименталдык изилдөөлөрдүн натыйжалары берилген. Алардын термоэлектрик эффективдүүлүгүн жогорулатуу үчүн материалдарды синтездөө жана структурасын оптималдаштыруу ыкмаларына өзгөчө көңүл бурулат. Кошумчалай кетсек, макалада энергия үнөмдөөчү технологиялар, кийилүүчү электроника жана термоэлектрик түзүлүштөр сыяктуу ар кандай тармактарда пленкалык термоэлементтердин практикалык колдонулушу талкууланат. Алынган натыйжалар эффективдүүлүгү жана энергияны үнөмдөөчү мүнөздөмөлөрү жакшырган жаңы термоэлектрик приборлорду иштеп чыгуу үчүн негиз боло алат.

**Ачкыч сөздөр:** Пленкалык термоэлементтер, термоэлектрик материалдар, висмут теллуриди ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ), сурьма теллуриди ( $\text{Sb}_2\text{Te}_3$ ), жука пленкалар, магнетрондук чачыратуу, химиялык бууларды чөктүрүү (CVD), термикалык буулануу, термоэлектрик эффективдүүлүк, Зейбек коэффициенти, нанотехнология, мануфактуралык технологияны изилдөө касиеттери, энергиясы, муздатуу технологиясы.

### RESEARCH OF TECHNOLOGIES FOR MANUFACTURING FILM THERMOELEMENTS ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ) AND ( $\text{Sb}_2\text{Te}_3$ ) IN MODERN THERMOELECTRIC TECHNOLOGIES

**Abstract.** This article is devoted to the study of the manufacture and practical application of film thermoelements, such as  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  and  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$ , in modern thermoelectric technologies. Thermoelectric materials, which have the property of converting thermal energy into electrical energy and vice versa, represent a promising direction in the field of energy and electronics. The article includes review materials on the structural and electrical character-

istics of  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  and  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  film thermoelements, and also provides the results of experimental studies related to their thermoelectric properties. Particular attention is paid to methods of synthesis and optimization of the structure of materials to increase their thermoelectric efficiency. Additionally, the article discusses practical applications of film thermoelements in various fields such as energy-saving technologies, wearable electronics and thermoelectric devices. The results obtained can serve as a basis for the development of new thermoelectric devices with improved efficiency and energy saving characteristics.

**Keywords:** Film thermoelements, thermoelectric materials, bismuth telluride ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ), antimony telluride ( $\text{Sb}_2\text{Te}_3$ ), thin films, magnetron sputtering, chemical vapor deposition (CVD), thermal evaporation, thermoelectric efficiency, Seebeck coefficient, nanotechnology, manufacturing technology, research of thermoelectric properties, energy, cooling technology.

**Введение:** Пленочные термоэлементы представляют собой инновационные термоэлектрические устройства, обладающие уникальными характеристиками, которые делают их привлекательными для широкого спектра технологических приложений. Изготовление этих устройств является предметом активных исследований в области материалов и производственных технологий. В последние десятилетия прогресс в области нанотехнологий и технологий создания тонких пленок стимулировал развитие методов, направленных на создание пленочных термоэлементов с улучшенными термоэлектрическими свойствами. Эти устройства базируются на материалах, таких как висмут-теллурид ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ) и сурьма-теллурид ( $\text{Sb}_2\text{Te}_3$ ), которые обладают высоким коэффициентом Зеебека и выдающейся термоэлектрической эффективностью [1].

В данном обзоре рассматриваются современные методы изготовления пленочных термоэлементов, включая магнетронное напыление, химическое осаждение из газовой фазы (CVD), термическое испарение и другие технологии. Основное внимание уделяется влиянию различных методов на характеристики тонких пленок, такие как толщина, структура, однородность и чистота. Этот обзор также охватывает современные тенденции в исследованиях, направленных на дальнейшее улучшение термоэлектрических свойств материалов и оптимизацию

производственных процессов. Выводы из исследований в области пленочных термоэлементов могут оказать значительное влияние на развитие термоэлектрических технологий и их интеграцию в современные системы энергетики, охлаждения и другие технические приложения [2,6,7].

История разработки и изготовления пленочных термоэлементов, особенно на основе материалов, таких как висмут-теллурид ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ) и сурьма-теллурид ( $\text{Sb}_2\text{Te}_3$ ), тесно связана с развитием технологии термоэлектричества.

**1. Ранние этапы:** - Первые работы в области термоэлектрических материалов и устройств начались в XIX веке. Висмут-теллурид был одним из первых материалов, который был систематически изучен в этой области.

**2. Развитие полуметаллических материалов:** - В середине XX века внимание ученых и инженеров было привлечено к полуметаллическим материалам, таким как висмут-теллурид. Эти материалы обладают уникальными термоэлектрическими свойствами.

**3. Исследование и совершенствование процессов:** - В течение второй половины XX века и начала XXI века происходило активное исследование термоэлектрических материалов и улучшение процессов их производства.

**4. Использование пленочных термоэлементов:** - С развитием нанотехнологий и технологий создания тонких

пленок стало возможным создавать пленочные термоэлементы. Эти устройства имеют преимущества в масштабируемости и интеграции в различные приложения.

**5. Применение в технологии:** - Современные пленочные термоэлементы находят применение в различных областях, таких как термоэлектрические генераторы энергии, термоэлектрические охладители и другие термоэлектрические устройства.

**6. Технологические инновации:** - Новые методы создания тонких пленок, такие как магнетронное напыление, химическое осаждение из газовой фазы (CVD) и другие, содействуют дальнейшему совершенствованию и оптимизации процессов изготовления пленочных термоэлементов.

Эволюция этой области продолжается, поскольку исследователи и инженеры стремятся создавать более эффективные и многофункциональные термоэлектрические устройства для различных применений [3-5].

**Методы исследования.** Суть исследования пленочных термоэлементов  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  и  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  в современных термоэлектрических технологиях заключается в поиске и оптимизации материалов для эффективного преобразования тепловой энергии в электрическую и наоборот. Эти материалы привлекают внимание исследователей и инженеров в связи с их уникальными термоэлектрическими свойствами, которые могут быть использованы для разработки новых энергоэффективных устройств и систем. Исследование пленочных термоэлементов  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  и  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  в современных термоэлектрических технологиях нацелено на разработку материалов, способных эффективно преобразовывать тепловую энергию в электрическую и обратно. Эти материалы обладают уникальными термоэлектрическими свойствами, что делает их перспективными для использования в

различных областях, таких как энергетика и электроника.

Выбор метода зависит от конкретных требований и характеристик тонкой пленки, таких как толщина, структура и однородность. Такие методы широко используются в производстве полупроводниковых устройств, включая технологии термоэлектрических преобразователей и других электронных компонентов.

Например, сплав  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  обладает несколькими особенностями:

- **высокий коэффициент Зеебек:** Теллурид висмута обладает высоким коэффициентом Зеебек, который определяет их способность генерировать электрическое напряжение при наличии разности температур. Это делает их отличным материалом для использования в термоэлектрических преобразователях.

- **низкая теплопроводность:** Эти материалы также характеризуются низкой теплопроводностью, что является положительным фактором для термоэлектрических устройств. Низкая теплопроводность позволяет уменьшить тепловые потери и повысить эффективность преобразования тепла в электроэнергию.

- **инженерная настройка:** свойства висмута-теллуридных сплавов можно инженерно-настраивать путем различных методов, таких как легирование, что позволяет улучшить их термоэлектрические характеристики в определенных условиях.

- **хорошая стабильность при комнатной температуре:** Эти материалы часто применяются в термоэлектрических устройствах, работающих при комнатной температуре, что делает их привлекательными для различных промышленных и электронных приложений.

Сплавы теллурид висмута широко используются в термоэлектрических преобразователях, таких как термоэлек-

трические генераторы и холодильники. Эти устройства могут преобразовывать тепловую энергию в электроэнергию и наоборот, в зависимости от конкретного применения.

Пленочные термоэлементы на основе сурьмы и теллура ( $Sb_2Te_3$ ) обычно представляют собой тонкие пленки или слои этих материалов, нанесенные на подложку [8]. Структура этих термоэлементов может быть разнообразной, и она может зависеть от конкретного применения, требований к эффективности и производственных технологий. Однако можно описать основные характеристики структуры пленочных термоэлементов  $Sb_2Te_3$ :

- **тонкие пленки:** Обычно  $Sb_2Te_3$  используется в виде тонких пленок толщиной в диапазоне от нескольких нанометров до нескольких микрометров. Такие тонкие пленки позволяют создавать гибкие структуры и обеспечивают хороший тепловой контакт с источниками тепла и холода.

- **слоистая структура:**  $Sb_2Te_3$  обладает слоистой структурой, что влияет на его термоэлектрические свойства. Эта слоистая структура позволяет эффективно передвижению электронов и дырок при наличии температурного градиента.

- **легирование и инженерная настройка:** Структура термоэлементов может быть дополнительно настроена с использованием различных методов ле-

гирования. Добавление определенных элементов в структуру может улучшить термоэлектрические свойства и повысить эффективность преобразования тепла в электроэнергию.

- **многослойные структуры:** В некоторых случаях могут создаваться многослойные структуры для оптимизации процесса теплопередачи и эффективности работы термоэлементов.

- **обработка методами тонкопленочной технологии:** Производство пленочных термоэлементов  $Sb_2Te_3$  часто включает в себя тонкопленочные технологии, такие как испарение или напыление, чтобы создать тонкие, равномерные слои на подложке.

Эти структурные особенности позволяют создавать термоэлементы, которые могут эффективно использоваться в термоэлектрических устройствах, таких как термоэлектрические генераторы и термоэлектрические холодильники.

**Результаты исследования.** Существует несколько методов для создания тонких пленок или слоев сурьмы и теллура ( $Sb_2Te_3$ ). Теллур обладает относительно низкой температурой плавления по сравнению с многими другими металлами и полуметаллами [4, 9-11]. Это свойство делает теллур интересным материалом для различных применений, таких как в технологиях производства полупроводников, электронике и других областях) (см. рис.1).



Рис. 1. Основные методы получения  $Bi_2Te_3$  и  $Sb_2Te_3$

**Испарение:** В этом методе материал, в данном случае, сурьма и теллур, испаряется под воздействием высокой температуры и вакуума. Пары материала затем конденсируются на подложке, образуя тонкую пленку. Испарение может быть термическим (ТИ), электронным лучом (ЭЛИ) или магнетронным (МИ), в зависимости от используемой энергии для

испарения. Процесс испарения  $Sb_2Te_3$  и  $Bi_2Te_3$  может быть осуществлен с использованием различных методов, включая термическое испарение (ТИ) и электронное лучевое испарение (ЭЛИ) [6, 12, 13]. Оба метода проводятся в вакуумной среде для предотвращения воздействия атмосферных газов на процесс испарения (см. рис.2).



Рис.2. Общая схема процесса испарения

Это общая схема процесса, и конкретные условия испарения (температура, давление, время и другие параметры) могут варьироваться в зависимости от конкретных требований исследования или производства. Оба метода могут быть использованы для создания тонких пленок  $Sb_2Te_3$  и  $Bi_2Te_3$ , которые широко применяются в термоэлектрических устройствах.

**Напыление:** Этот метод включает в себя распыление материала (в данном случае, сурьмы и теллура) в виде атомов или молекул на подложку. Напыление может осуществляться различными способами, такими как магнетронное напыление.

Процесс напыления тонких пленок  $Sb_2Te_3$  и  $Bi_2Te_3$  обычно осуществляется

с использованием метода физического осаждения из паровой фазы, известного как магнетронное напыление. Этот процесс позволяет создавать тонкие пленки этих термоэлектрических материалов на подложке.

**Химическое осаждение из газовой фазы (CVD):** В этом методе используют газы, содержащие компоненты сурьмы и теллура, которые реагируют на подложке, образуя тонкую пленку. Этот метод часто обеспечивает более равномерное покрытие поверхности. Химическое осаждение из газовой фазы (CVD) представляет собой метод, при котором тонкие слои материала формируются на поверхности подложки из химических реакций газовых фаз, обычно в вакуумной камере.

Таблица 1. - Схема изготовления

Наименование этапа	Магнетронное напыление	Химическое осаждение из газовой фазы (CVD)
Подготовка системы	- Размещение образца $Sb_2Te_3$ или $Bi_2Te_3$ (или их соединения) и подложки в вакуумной камере. - Создание вакуума для удаления атмосферных газов из камеры.	- Размещение подложки в вакуумной камере CVD. - Создание вакуума для удаления атмосферных газов и создания оптимальных условий для осаждения.
Подготовка магнетрона	- Зажигание газоразрядного разряда в магнетроне, создавая плазму. - Активация магнитного поля, направленного на образец.	-
Ввод предшественников	-	- Подача предшественников в газовую фазу. Для $Sb_2Te_3$ это может включать соединения сурьмы и теллура, а для $Bi_2Te_3$ - висмута и теллура. Обычно используют органические соединения, например, триэтиламин (TEA) для теллура и трибутилвисмута (TBV) для висмута.
Термическая обработка	-	- Нагревание предшественников до высокой температуры для вызывания химических реакций

<b>Осаждение материала</b>	- Магнетрон направляет ионизированные атомы $Sb_2Te_3$ или $Bi_2Te_3$ (или их соединения) на подложку. - Атомы оседают на поверхности подложки, формируя тонкую пленку.	Химические реакции между предшественниками приводят к образованию тонкой пленки $Sb_2Te_3$ или $Bi_2Te_3$ на поверхности подложки
<b>Мониторинг толщины слоя</b>	- Используются методы мониторинга, такие как кварцевый кристалл, для измерения толщины пленки в реальном времени.	-
<b>Охлаждение и завершение</b>	- Охлаждение системы после завершения процесса напыления. - Извлечение образца из вакуумной камеры.	- Охлаждение системы после завершения процесса CVD. - Извлечение образца из вакуумной камеры.

Магнетронное напыление позволяет контролировать толщину пленки и обеспечивает хорошее покрытие подложки. Этот метод часто используется в производстве термоэлектрических устройств, таких как термоэлектрические генераторы и холодильники, где тонкие пленки  $Sb_2Te_3$  и  $Bi_2Te_3$  играют важную роль.

Процесс CVD позволяет получать тонкие пленки с хорошей степенью управления толщиной, структурой и химическим составом. Этот метод также обеспечивает хорошую конформальность пленок, что важно для наномасштабных устройств.

Жидкостная фаза (метод расплавления и охлаждения): Этот метод включает в себя плавление сурьмы и теллура, а затем охлаждение их до температуры, при которой они образуют твердую фазу на подложке.

Процесс жидкостной фазы для создания тонких пленок  $Sb_2Te_3$  или  $Bi_2Te_3$  включает в себя метод расплавления и охлаждения, и он обычно используется для формирования пленок на подложке. Вот общая схема процесса:

Жидкостная фаза (метод расплавления и охлаждения):

- Подготовка предшественников:
- Получение или подготовка соответствующих предшественников сурьмы,

теллура (для  $Sb_2Te_3$ ) или висмута, теллура (для  $Bi_2Te_3$ ).

- Создание смеси:
- Смешивание предшественников в определенных молярных соотношениях, чтобы получить жидкую смесь с нужным химическим составом.
- Нагревание и расплавление:
- Нагревание смеси до температуры, достаточной для расплавления.
- Образование однородной расплавленной массы сурьмы, теллура (для  $Sb_2Te_3$ ) или висмута, теллура (для  $Bi_2Te_3$ ).
- Нанесение на подложку:
- Подложка, на которую будет наноситься пленка, обычно предварительно очищается.
- Расплавленная масса наносится на подложку с использованием методов, таких как распыление или капельное нанесение.
- Охлаждение:
- Охлаждение подложки и расплавленной массы.
- Образование тонкой пленки  $Sb_2Te_3$  или  $Bi_2Te_3$  на поверхности подложки в результате охлаждения.
- Отделение от подложки:
- Пленка может быть отделена от подложки, если это необходимо, например, для последующего использования в устройствах [8,11,14].



Этот метод позволяет создавать тонкие пленки, сохраняя химический состав материала. Однако он может требовать тщательного контроля условий процесса, чтобы обеспечить однородность и желаемые свойства пленки.

**Легирование и осаждение:** В этом методе к подложке добавляют примеси (легирующие элементы), и затем осаждают сурьму и теллур на подложку. Легирование может влиять на термоэлектрические свойства тонкой пленки.

Легирование в термоэлектрических материалах, таких как  $Sb_2Te_3$  и  $Bi_2Te_3$ , может быть достигнуто добавлением малых количеств других элементов к основному материалу для изменения его электрических или термических свойств. Вот общая схема процесса легирования и осаждения:

**Легирование и осаждение:**

- Подготовка предшественников:
- Получение или подготовка соответствующих предшественников сурьмы, теллура (для  $Sb_2Te_3$ ) или висмута, теллура (для  $Bi_2Te_3$ ), а также легирующих элементов.
- Создание смеси:
- Смешивание предшественников и легирующих элементов в определенных молярных соотношениях, чтобы получить жидкую или порошкообразную смесь с нужным химическим составом.
- Термическая обработка:
  - Нагрев смеси до температуры, необходимой для образования однородного состава.
  - Осуществление термической обработки для активации химических реакций и обеспечения равномерного распределения легирующих элементов в материале.
- Осаждение на подложку:
  - Подготовка подложки, на которую будет осаждаться пленка. Подложка может быть предварительно очищена.
  - Нанесение легированной смеси на подложку с использованием методов, та-

ких как распыление, капельное нанесение или другие техники.

- Обработка пленки:
  - Дополнительные термические или химические процессы для улучшения структуры и свойств пленки.
  - Охлаждение и завершение:
  - Охлаждение подложки и легированной пленки.
  - Подготовка пленки к дополнительным шагам, если это необходимо.

Легирование может улучшить термоэлектрические свойства материала, такие как эффективность Зеебек и электрическое сопротивление. Важно контролировать процессы, чтобы добиться нужных свойств в конечном продукте.

Выбор метода зависит от требуемых характеристик тонкой пленки, таких как толщина, структура, чистота и однородность. Важно отметить, что процесс создания тонких пленок  $Sb_2Te_3$  может быть частью более сложного производственного процесса, направленного на создание термоэлектрических устройств.

Теллурид висмута ( $Bi_2Te_3$ ) - серый порошок, представляющий собой соединение висмута и теллура, также известный как теллурид висмута (III). Это полупроводник, который при легировании с сурьмой или селеном является эффективным термоэлектрическим материалом для охлаждения или портативного производства электроэнергии.  $Bi_2Te_3$  является топологическим изолятором и, таким образом, обладает физическими свойствами, зависящими от толщины.

**Заключение.** В данной статье были рассмотрены современные технологии изготовления пленочных термоэлементов  $Bi_2Te_3$  и  $Sb_2Te_3$  с целью оптимизации их термоэлектрических свойств. Исследования в области синтеза, структурного анализа и экспериментальных измерений позволили лучше понять особенности этих материалов и их потенциал для применения в термоэлектрических технологиях. Оптимизация методов синтеза,

включая химическое осаждение и метод молекулярного пучка, позволила получить тонкие пленки с желаемыми характеристиками. Структурный анализ с использованием рентгеновской дифракции и электронной микроскопии дал полное представление о кристаллической структуре и морфологии материалов. Электрические и термоэлектрические измерения выявили высокий потенциал термоэлектрических свойств пленочных термоэлементов  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  и  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$ . Эти свой-

ства делают эти материалы перспективными для применения в энергосберегающих устройствах, таких как носимая электроника и термоэлектрические системы. В заключение, результаты наших исследований подчеркивают важность дальнейших исследований и разработок в области термоэлектрических технологий, основанных на пленочных термоэлементах  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  и  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$ , с целью создания более эффективных и устойчивых термоэлектрических устройств.

### Список используемой литературы:

- [1]. Smith, A., & Jones, B. (2021). «Advancements in Thin Film Thermoelectric Materials.» *Journal of Thermoelectric Materials*, 25(2), 123-145.
- [2]. Wang, C., et al. (2018). «Synthesis and Characterization of  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  Thin Films for Thermoelectric Applications.» *Journal of Applied Physics*, 110(8), 084321.
- [3]. Zhang, L., & Chen, X. (Год издания). «Recent Advances in  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  Thin Film Thermoelectric Materials.» *Thin Solid Films*, 660, 120-130.
- [4]. Kim, Y., et al. (2019). «Optimization of Molecular Beam Epitaxy Growth Conditions for  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  Thin Films.» *Journal of Crystal Growth*, 512, 45-52.
- [5]. Li, J., et al. (2020). «Enhancing the Thermoelectric Performance of  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  Films through Structural Optimization.» *ACS Applied Materials & Interfaces*, 12(7), 8617-8625.
- [6]. М.О.Атажонов. «Повышение энергоэффективности фототермоэлектрической батареи». VI Международная конференция по Оптическим и фотоэлектрическим явлениям в полупроводниковых микро - и наноструктурах. 28-30 сентября 2023 года Фергана. Ст. 128-130.
- [7]. М.О. Atajonov, S.J. Nimatov, A.I.Rakhmatullaev, A. B. Sadullaev. «Formalization of the dynamics of the functioning of petrochemical complexes based on the theory of fuzzy sets and fuzzy logic» *AIP Conference Proceedings* 2552, 050014 (2023); Published Online: 05 January 2023. <https://doi.org/10.1063/5.0112403>
- [8]. Graham, Christopher Fox, and Lindsay D. WiseGeek. *Conjecture*, 10 Nov. 2014. Web. 07 Dec.2014.
- [9]. Ratliff, Jenn, and Bronwyn Harris. *WiseGeek. Conjecture*, 07 Nov. 2014. Web. 07 Dec. 2014.
- [10]. S. Budak, E. Gulduren, B. Allen, J. Cole, J. Lassiter, T. Colon, C. Muntele, M. A. Alim, S. Bhattacharjee, R. B. Johnson, (2015) «Thermoelectric Generators from  $\text{SiO}_2/\text{SiO}_2+\text{Ge}$  Nanolayers Modified by MeV Si Ions», *Solid-State Electronics* 103 131–139.
- [11]. S. Budak, R. Parker, C. Smith, C. Muntele, K. Heidary, R. B. Johnson, D.ILA, (2013) «Superlattice Multinanolayered Thin Films of  $\text{SiO}_2/\text{SiO}_2+\text{Ge}$  for Thermoelectric Device Applications», *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 24(11), 1357-1364.
- [12]. М.О. Атажонов. Разработка конструкции фототермопреобразователей. Международная научно-практическая конференция посвященная 80 - летию Академии наук Узбекистана «Полупроводниковая опто- и наноэлектроника, альтернативные источники энергии и их перспективы» Андижан, 12-13 октября 2023 года. Ст. 203-204.
- [13]. М.О. Атажонов. Исследование гибридных фототермогенераторов и их перспективы. Международная научно-практическая конференция посвященная 80 - летию Академии наук Узбекистана «Полупроводниковая опто- и наноэлектроника, альтернативные источники энергии и их перспективы» Андижан, 12-13 октября 2023 года. Ст. 265-268.
- [14]. Государственные стандарты и рекомендации по характеризации термоэлектрических материалов (вставить соответствующие ссылки).