

**Исследование свойств и структуры термоэлектрических тонких пленок висмута и сурьмы**Макарова Е. С.<sup>1</sup>, Каблукова Н.С.<sup>2</sup>, Кадыров А. Ш.<sup>1</sup><sup>1</sup>Университет ИТМО, Санкт-Петербург,<sup>2</sup>РГПУ им. А.И. Герцена, Санкт-Петербург

Научный руководитель Новотельнова А.В. Университет ИТМО, Санкт-Петербург

Термоэлектрические материалы в последнее время привлекают все больше внимания. Эффективность термоэлектрических генераторов определяется безразмерным коэффициентом термоэлектрической добротности  $ZT$ , который выражается формулой:

$$ZT = \frac{\sigma \alpha^2}{k} T$$

где  $\alpha$ -коэффициент Зеебека,  $\sigma$  – электропроводность,  $k$  - теплопроводность материала. Для обеспечения эффективной работы термоэлектрических преобразователей энергии термоэлектрики должны обладать высокими значениями коэффициентов Зеебека и электропроводности, а также низкими значениями коэффициента теплопроводности.

Тонкие термоэлектрические пленки относятся к низкоразмерным структурам. Наличие в них большого количества границ раздела кристаллитов и границ зерен, служащих центрами эффективного рассеивания фононов, может позволить улучшить термоэлектрические характеристики материала.

Пленки висмута и его твердые растворы с сурьмой являются одними из перспективных термоэлектрических материалов в области низких температур. Эти материалы имеют небольшое перекрытие энергетических зон, что объясняет высокую чувствительность физических свойств к механическим воздействиям [1]. Также наблюдается изменение свойств пленок от полуметаллических до полупроводниковых в зависимости от соотношения компонентов в растворах висмута и сурьмы [2].

Для изучения термоэлектрических свойств тонких пленок висмута и твердых растворов висмут-сурьмы необходимо исследовать зависимость гальваномагнитных свойств и теплопроводности от режимов напыления, структуры и типа подложки.

Улучшение термоэлектрических свойств пленочного термоэлектрика возможно при использовании периодической слоистой структуры, для этого необходимо рассчитать толщину слоев и их периодичность.

Было произведено исследование влияния подслоя сурьмы на гальваномагнитные характеристики тонких пленок висмута [3]. Получена зависимость размеров кристаллитов от рода подложки, на которую напыляется пленка, температуры подложки и длительности отжига. Исследована связь гальваномагнитных свойств от размеров кристаллитов и их ориентации относительно подложки. Проведено исследование получения монокристаллических пленок висмута методом зонной перекристаллизации под покрытием на ультратонком слое сурьмы или с использованием дополнительного управляемого градиента температур. Благодаря использованию подслоя сурьмы удалось уменьшить толщину монокристаллической пленки висмута до 200 нм [4].

Основная проблема заключается в измерении теплопроводности тонких пленок. Известные методы, используемые для измерения теплопроводности массивных образцов, могут оказаться неприменимыми для изучения тонких пленок висмута. Из-за анизотропии свойств тонких пленок висмута и твердых растворов висмута и сурьмы, необходимо исследовать теплофизические свойства тонких пленок в перпендикулярном и параллельном направлениях плоскости подложки.

В настоящее время существует несколько методов по исследованию теплопроводности тонких пленок. Данные методы применялись ранее для изучения однослойных металлических образцов толщиной более 5-10 мкм. В нашем случае пленка

висмута находится на диэлектрической подложке. Толщина пленки не превышает 1 мкм, что по сравнению с толщиной подложки является очень малой величиной.

Сейчас стали разрабатываться новые методы измерения теплопроводности для тонких пленок [5].

Предполагается использовать модифицированные методы лазерной вспышки [6, 7], ранее использованные для исследования тонких металлических слоев. Условия проведения эксперимента подобраны с помощью моделирования в программной среде Comsol Multiphysics для процесса измерения тонких пленок висмута на различных подложках. Исследуется возможность исследования теплопроводности тонких пленок на основе метода лазерной вспышки с использованием систем щелей. Данный метод измерения ограничивается соотношением толщины пленки к подложке.

Также возможно использование 3- $\omega$  метода измерения теплопроводности тонких пленок висмута. Однако, предварительные эксперименты, проведенные в Университете Монпелье (Франция), показывают ограниченность данного метода, заключающуюся в невозможности исследования тонких слоев висмута на диэлектрической подложке. Исследования могут быть проведены, если использовать в качестве подложки кремний.

Проведенные исследования показали, что подложка играет существенную роль в гальваномагнитных свойствах.

#### **Список литературы:**

1. R. Tolutis Transverse magnetoresistance of uniaxially deformed thin polycrystalline n-Bi films // Lithuanian Journal of Physics. - 2009 г - Vol. 49. No. 2. – Pp. 189–195.
2. В. М. Грабов, В. А. Комаров, Е. В. Демидов. Гальваномагнитные и термоэлектрические явления в тонких пленках висмута и сплавов висмут-сурьма: монография — СПб.: Изд-во РГПУ им. А. И. Герцена, 2011. — 124 с.
3. Н.С. Каблукова, В.А. Комаров, Д.О. Сканченко, Е.С. Макарова, Е.В. Демидов Гальваномагнитные свойства пленок висмута, имеющих тонкое покрытие или подслоя из сурьмы // ФТП – 2017. – Т. 51.– Вып.7.– С. 917-920, DOI: 10.21883/ФТП.2017.07.44642.28
4. Е.С. Макарова, В.М. Грабов, В.А. Комаров, Н.С. Каблукова Использование подслоя сурьмы при зонной перекристаллизации пленок висмута // Физика полупроводников и наноструктур. Полупроводниковая опто- и наноэлектроника. Тезисы докладов 19-й Всерос. молод. конф. 27 ноября – 1 декабря 2017 года. - СПб, Изд-во Политехн. ун-та, 2017. – С. 33.
5. Linseis, V., Völklein, F., Reith, H. et al. // Journal of Electronic Materials. – 2018.– Vol. 47, Iss. 6. - Pp 3203–3209.
6. Hiromichi Ohta, Hiroyuki Shibata, Yoshio Waseda New attempt for measuring thermal diffusivity of thin films by means of a laser flash method // Review of Scientific Instruments. - 1989.- Vol. 60.- С. 317-321, DOI: 10.1063/1.1140430.
7. К. Н. Нищев, М. И. Новопольцев, В. И. Беглов, М. А. Окин, Е. Н. Лютова Измерение температуропроводности тонких металлических слоев методом лазерной вспышки// Физико-математические науки. Физика. – 2015. - № 4 (36).