

МИКРООХЛАЖДАЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО НА ОСНОВЕ СЛОЕВ И ФОЛЬГ ТОПОЛОГИЧЕСКИХ ИЗОЛЯТОРОВ

Денис ШИВЕРСКИЙ

DMIB, гр. MN-201, Факультет Вычислительной техники, информатики и микроэлектроники, Технический
Университет Молдовы, Кишинев, Молдова

Автор-корреспондент: Денис Шиверский, email denis.siverscki@mib.utm.md

Научный руководитель: Леонид КОНОПКО, email leonid.konopko@ien.utm.md

Абстракт. Приведены результаты исследования термоэлектрических свойств монокристаллических слоев на основе топологических изоляторов Bi_2Te_3 p-типа и фольг $Bi_{0,84}Sb_{0,16}$ n-типа ($d=10-20 \mu m$). Обнаружено, что теплопроводность фольг в интервале температур 300–100 K остается постоянной. Независимость теплопроводности от температуры является важнейшим фактором для термоэлектрических применений, в частности, для миниатюрных термоэлектрических охладителей. На основе разработанной авторами технологии формирования монокристаллических слоев Bi_2Te_3 p-типа и фольг $Bi_{0,84}Sb_{0,16}$ n-типа создано устройство, обеспечивающее градиент температуры $\Delta T = 9 K$ на площади $0,01 cm^2$. Структуры на основе Bi_2Te_3 могут быть использованы для создания миниатюрных датчиков термоэлектрических устройств, таких как термоэлектрические охладители, в частности, для охлаждения процессора компьютера.

Ключевые слова: топологический изолятор, теллурид висмута, микрослои, фольга, термоэлектричество, микроохладитель.

Введение

Теллурид висмута (Bi_2Te_3) представляет собой узкозонный полупроводник, который хорошо известен как один из лучших термоэлектрических материалов [1,2]. При комнатной температуре массивный Bi_2Te_3 и его твердые растворы ($Bi_{2-x}Sb_xTe_3$, $Bi_2Te_{3-y}Se_y$) имеют самые высокие показатели термоэлектрической эффективности $ZT = \alpha^2 \sigma T / \kappa \sim 1$, где α - коэффициент Зеебека, σ - электропроводность, κ - теплопроводность, T - температура. В течение многих десятилетий ведутся поиски способов повысить термоэлектрическую эффективность термоэлектрических материалов. В настоящее время параметры Bi_2Te_3 оптимизируются за счет таких технологических факторов, как легирование и ионное замещение $[(Bi,Sb)_2(Te,Se,S)_3]$, изменение мезоструктуры (сверхрешетки, квантовые точки и проволоки [3]) и изменение условий синтеза. Недавно Bi_2Te_3 и $Bi_{1-x}Sb_x$ были представлены как новый тип квантовой материи - 3D топологический изолятор (ТИ) [4]. Благодаря своим многочисленным замечательным свойствам топологические изоляторы в настоящее время стали одним из наиболее активно исследуемыми предметами в физике конденсированного состояния. В объеме ТИ имеется изолирующая щель, тогда как на поверхности существуют нетривиальные металлические поверхностные состояния (ПС). Топологические ПС защищены симметрией обращения времени и поэтому не могут быть разрушены возмущениями немагнитных примесей и дефектами решетки. Более того, такие ПС порождают двумерные фермионы Дирака, что обещает множество новых достижений в физике и спинтронике. Теоретически было показано, что ZT можно радикально улучшить в тонких пленках и нанопроволоках Bi_2Te_3 толщиной всего в несколько атомных слоев за счет увеличения плотности электронных состояний вблизи уровня Ферми, вызванного конфайнментом [5, 6]. Многообещающие, но трудновоспроизводимые результаты ($ZT \sim 2,4$) были получены только в лабораторных условиях при температурах выше 350 K.

Методика эксперимента

Известно, что теллурид висмута (Bi_2Te_3) представляет собой узкозонный слоистый полупроводник с тригональной элементарной ячейкой; он легко расщепляется вдоль тригональной оси из-за слабых ван-дер-ваальсовых связей между соседними атомами теллура [7]. Монокристаллические слои на основе сплавов Bi_2Te_3 n - и p -типов формировались путем механического отслаивания слоев из монокристаллического слитка соответствующего состава как с использованием скотча [8], так и без клейкой ленты по специальной, разработанной нами технологии. Рентгеноструктурные исследования подтвердили, что полученные слои представляют собой монокристаллы с осью C_3 , ориентированной перпендикулярно плоскости слоя.

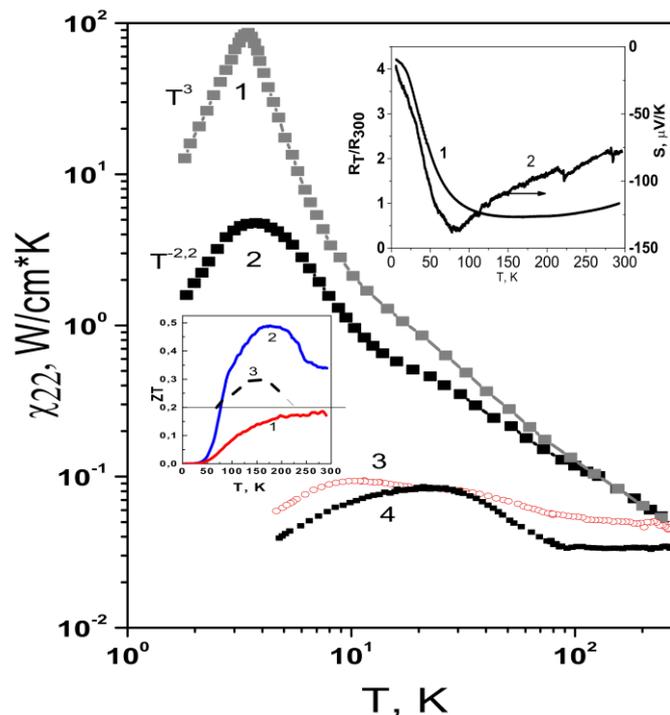


Рисунок 1. Температурные зависимости теплопроводности $\chi(T)$ фольг $\text{Bi}_{0,84}\text{Sb}_{0,16}$, $d=17\mu\text{m}$ и массивных образцов Bi и $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$, Bi (1), $\text{Bi}_{0,865}\text{Sb}_{0,135}$ (2) и фольг: (3) $\text{Bi}_{0,97}\text{Sb}_{0,03}$, $d=20\mu\text{m}$ и (4) $\text{Bi}_{0,84}\text{Sb}_{0,16}$, $d=17\mu\text{m}$. Вставка сверху - температурные зависимости сопротивления $R_T/R_{300}(T)$ - (1) и термоЭДС $S(T)$ - (2) фольги $\text{Bi}_{0,84}\text{Sb}_{0,16}$, $d=17\mu\text{m}$, вставка в центре - температурные зависимости $ZT(T)$ фольги $\text{Bi}_{0,84}\text{Sb}_{0,16}$ (кривая 2).

Фольги полупроводниковых сплавов $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ готовились методом высокоскоростной кристаллизации тонкого слоя путем впрыскивания капли расплава массой 0,2–0,3 g во внутреннюю полированную поверхность вращающегося полого медного цилиндра [9]. Электронно-зондовый микроанализ распределения висмута и сурьмы показал, что в быстро затвердевших фольгах сплавов $\text{Bi}_{0,84}\text{Sb}_{0,16}$ сурьма распределяется равномерно, образуя $(10\bar{1}2)$ текстуру; то есть зерна расположены так, что указанные плоскости лежат параллельно поверхности фольги, а ось симметрии C_3 совпадает с нормалью к поверхности фольги.

Разработана и изготовлена автоматизированная установка для исследования термоэлектрических микроохладителей. Установка позволяет исследовать эффект Пельтье в микротермопарах, изготовленных из слоев, фольг или проволок термоэлектрических материалов, при комнатной температуре, т.е. автоматически регистрировать зависимость возникающей разности температур между холодным и горячим спаями микротермопары от силы и направления проходящего через нее тока.

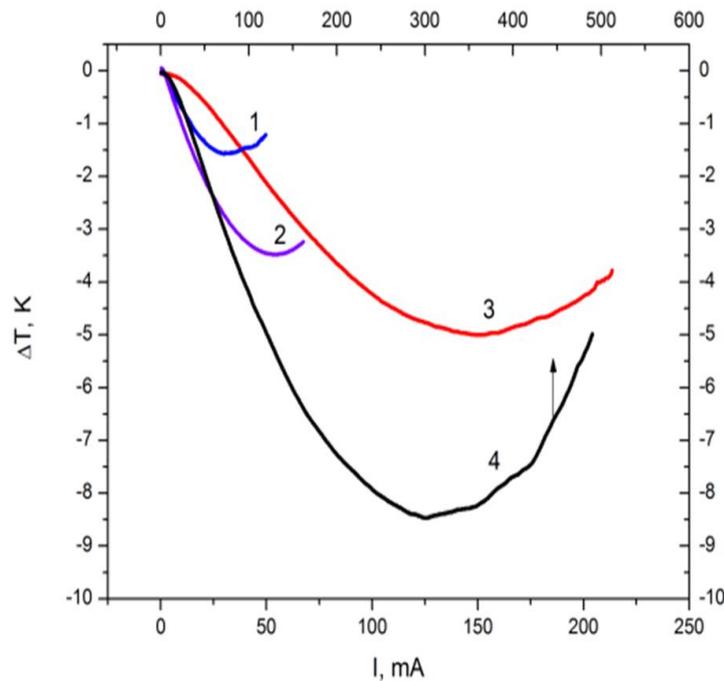


Рисунок 2. Зависимость градиента температуры ΔT от протекающего тока: (кривая 1) одна термопара (слой $n\text{-Bi}_2\text{Te}_3$ и $p\text{-Bi}_2\text{Se}_3$); (кривая 2) две сегментные термопары из слоев Bi_2Te_3 и Bi_2Se_3 ; (кривая 3) одна термопара из фольги $\text{Bi}_{0,84}\text{Sb}_{0,16}$ n -типа и p -слой Bi_2Te_3 ; (кривая 4) термопара из двух параллельно соединенных p -слоев Bi_2Te_3 и фольги $\text{Bi}_{0,84}\text{Sb}_{0,16}$ n -типа

Результаты и обсуждение

Были изучены температурные зависимости сопротивления и термоЭДС образцов в интервале температур 4,2–300 К. При температуре $T=300$ К удельное сопротивление фольг полупроводникового сплава $\text{Bi}_{0,84}\text{Sb}_{0,16}$ $\rho=200 \cdot 10^{-6}$ W cm, что в пределах погрешности совпадает со значениями ρ массивных монокристаллических образцов соответствующего состава и при этом ниже удельного сопротивления пленок, выращенных различными методами. Впервые экспериментально исследована теплопроводность фольг сплавов $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ в интервале температур 4,2–300 К. Типичные температурные зависимости теплопроводности $s(T)$ для фольг сплавов $\text{Bi}_{0,84}\text{Sb}_{0,16}$ представлены на рис. 1. Для сравнения показаны температурные зависимости массивных образцов Bi и $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$. При 300 К значения теплопроводности s фольг $\text{Bi}-16\text{at}\%\text{Sb}$ ($t=17\mu\text{m}$) практически идентичны значениям, определенным для массивных образцов. В интервале температур 300–200 К теплопроводность фольг не зависит от температуры, тогда как в объемных образцах $s(T)$ линейно возрастает в 3 раза. Независимость s от температуры в диапазоне 300–200 К является важнейшим фактором для термоэлектрических применений, в частности, для миниатюрных термоэлектрических охладителей. Именно этим фактом обусловлено использование фольги в качестве n -ветви в микроохлаждающем устройстве. На основе одного монокристаллического слоя Bi_2Te_3 n -типа и Bi_2Se_3 p -типа (рис.2, кривая 1) создано миниатюрное охлаждающее устройство (в виде термопары), обеспечивающее охлаждение на $\Delta T = 2$ К на площади $0,01 \text{ cm}^2$. Зависимость градиента температуры от тока, проходящего через две сегментные термопары на основе слоев n - и p -типа Bi_2Te_3 и Bi_2Se_3 , представлена на рис. 2, кривая 2. Охлаждение на $\Delta T = 5$ К наблюдалось на термопаре, изготовленной из одного слоя $\text{Bi}-17\text{at}\%\text{Sb}$ n -типа и одного слоя Bi_2Te_3 p -типа (рис.2, кривая 3). Использование фольги $\text{Bi}-16\text{at}\%\text{Sb}$ n -типа в качестве n -ветви позволило получить градиент температуры $\Delta T = 9$ К на термопаре, изготовленной из двух монокристаллических слоев Bi_2Te_3 p -типа, соединенных параллельно, и n -типа фольги $\text{Bi}-16\text{at}\%\text{Sb}$ (рис. 2, кривая 4).

Заклучение

Обнаружено, что в фольгах $\text{Bi}_{0,84}\text{Sb}_{0,16}$ n -типа теплопроводность $\chi = 3 \times 10^{-2}$ W/(cm K) при 300 K и остается постоянной при уменьшении температуры до 100 K. Независимость χ от температуры в диапазоне 300–200 K является важнейшим фактором для термоэлектрических применений, в частности, для миниатюрных термоэлектрических охладителей. На основе слоя Bi_2Te_3 p -типа и фольги $\text{Bi}_{0,84}\text{Sb}_{0,16}$ n -типа создано миниатюрное охлаждающее устройство (на площади $0,01 \text{ cm}^2$) с $\Delta T = 9$ K при 300 K. Использование разработанных миниатюрных охлаждающих устройств позволит повысить функциональность и расширить диапазоны миниатюризации современных электронных компонентов.

Acknowledgments Данная работа выполнена в рамках Subprogram de cercetare 020201 „Nanostructuri și materiale avansate pentru aplicații în spintronică, termoelectricitate și optoelectronică”.

Список литературы

- [1] D.V. ROWE, *Thermoelectric handbook: macro to nano*. Boca Raton: Taylor Francis, 2006.
- [2] O. YAMASHITA, S. TOMIYOSHI, K. MAKITA, “Bismuth telluride compounds with high thermoelectric figures of merit,” *Journal of Applied Physics*, vol. 93, pp. 368-374, 2003, doi: 10.1063/1.1525400
- [3] L. KONOPKO, A. NIKOLAEVA, T. HUBER, and D. MEGLEI, “Thermoelectric properties of Bi_2Te_3 microwires,” *Physica Status Solidi C*, vol. 11, pp. 1377–1381, 2014, doi: 10.1002/pssc.201300202
- [4] M. HASAN and C. KANE, “Colloquium: Topological insulators,” *Reviews of modern physics*, vol. 82, pp. 3045-3067, 2010, doi: 10.1103/RevModPhys.82.3045
- [5] J.P. HEREMANS “Low dimensional thermoelectricity,” *Acta Physica Polonica*, vol. 108, pp. 609-634, 2005.
- [6] O. RABIN, Y.M. LIN, M.S. DRESSELHAUS, “Anomalously high thermoelectric figure of merit in $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ nanowires by carrier pocket alignment,” *Applied Physical Letters*, vol. 79, pp. 81-83, 2001, doi: 10.1063/1.1379365
- [7] P. LARSON, S.D. MAHANTI, M.G. KANATZIDIS, “Electronic structure and transport of Bi_2Te_3 and BaBiTe_3 ,” *Physical Review B*, vol. 61, pp. 8162-8171, 2000, doi: 10.1103/PhysRevB.61.8162
- [8] V. GOYAL, D. TEWELDEBRHAN and A. BALANDIN, “Mechanically-exfoliated stacks of the films of Bi_2Te_3 topological insulator,” *Applied Physics Letters*, vol. 97, p. 133117, 2010, doi: 10.1063/1.3494529
- [9] A.V. DEMIDCHIK and V.G. SHEPELEVICH, “Structure and electronic spectrum of fullerene-like nanoclusters based on Mo, Nb, Zr, and Sn disulfides,” *Inorganic Materials*, vol. 40, pp. 391-395, 2004