

**Абдуллаев Н.А.**<sup>1</sup> докт. физ.-мат. наук,  
**Алекперов О.З.**<sup>1</sup> канд. физ.-мат. наук,  
**Алигулиева Х.В.**<sup>1</sup> канд. физ.-мат. наук,  
**Зверев В.Н.**<sup>2</sup> докт. физ.-мат. наук,  
**Керимова А.М.**<sup>1</sup> канд. физ.-мат. наук,  
**Мамедов Н.Т.**<sup>1</sup> акад. НАН Азербайджана

<sup>1</sup> Институт физики Национальной Академии Наук Азербайджана,  
Баку, AZ1143, Азербайджан

<sup>2</sup> Институт физики твёрдого тела Российской Академии Наук,  
Черноголовка, Московская область, 142432, Россия  
e-mail: abnadir@physics.ab.az

## ЛОКАЛИЗАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ В ТОНКИХ ПЛЁНКАХ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОЕДИНЕНИЯ $Bi_2Te_{2.7}Se_{0.3}$

*Термическим испарением в вакууме методом «горячей стенки» получены тонкие плёнки термоэлектрического соединения  $Bi_2Te_{2.7}Se_{0.3}$ . Высокое качество полученных тонких плёнок подтверждается данными рентгеновской дифракции и рамановского рассеяния. Исследован транспорт электронов в широкой области температур 1.4–300 К и магнитных полей вплоть до 8 Тл. В температурной зависимости электропроводности при температурах ниже 10 К наблюдается локализация электронов, обусловленная электрон-электронным взаимодействием в двумерном пределе. Предполагается, что наблюдаемая слабая антилокализация в полевой зависимости магнитосопротивления обусловлена доминирующим вкладом поверхностных состояний топологического изолятора. Оценена длина сбоя фазы. Библ. 17, рис. 2.*

**Ключевые слова:** тонкие плёнки, проводимость, магнитосопротивление, локализация, слабая локализация, слабая антилокализация, топологический изолятор.

### Введение

Тонкие плёнки термоэлектрических материалов на основе соединений группы  $A_2^V B_3^{VI}$  представляют интерес с одной стороны тем, что согласно современным теоретическим представлениям [1], значительного увеличения термоэлектрической добротности можно получить в низкоразмерных системах на основе термоэлектрических материалов, а с другой стороны тем, что в последнее время соединения группы  $A_2^V B_3^{VI}$  позиционируются как топологические изоляторы [2].

Кроме того, согласно [3], термоэлектрические устройства на основе тонких пленок  $Bi_2Te_3$  и  $Bi_2Se_3$  позволяют достичь существенного охлаждения до 32 К и прокачивания теплового потока до  $700 \text{ Вт/см}^2$ . Локальное охлаждение или нагрев происходит приблизительно в  $2 \cdot 10^4$  раз быстрее, чем в устройствах, созданных на основе объемных материалов.

Использование тонких плёнок является также более предпочтительным из соображений миниатюризации приборов на основе этих соединений.

Целью настоящей работы было выяснение механизма низкотемпературного транспорта электронов в тонких плёнках твердого раствора  $Bi_2Te_{2.7}Se_{0.3}$ . Выбор именно такого состава для исследований обусловлен тем, что имеющиеся в литературе данные [4] указывают на то, что в системе твердых растворов  $Bi_2(Te_{1-x}Se_x)_3$  наибольшей термоэлектрической эффективностью обладает состав  $Bi_2Te_{2.7}Se_{0.3}$ .

## Эксперимент и обсуждение результатов

Тонкие пленки были получены методом «горячей стенки» термическим испарением синтезированного вещества в вакууме  $10^{-5}$  мм рт. ст. на подложки из оксидного силикатного стекла. Температура подложки поддерживалась около  $300\text{ }^\circ\text{C}$ . Термический отжиг полученных плёнок проводился в вакууме при температуре  $200\text{ }^\circ\text{C}$  в течении 1 часа. Толщина полученных пленок варьировалась в пределах  $500 - 600$  нм.

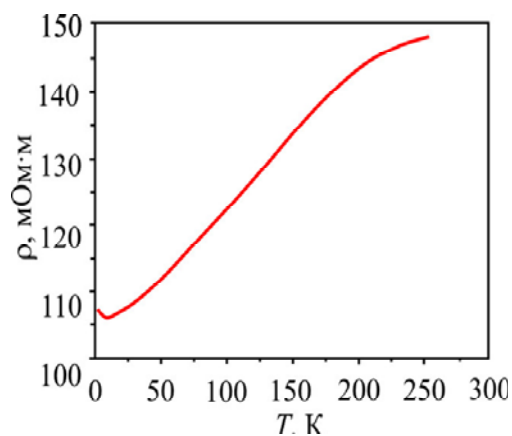
Для характеристики полученных тонких плёнок было проведено изучение дифракции рентгеновских лучей на рентгеновском дифрактометре Bruker D8 Advance и комбинационного рассеяния света на трехмерном конфокальном рамановском микроспектрометре Nanofinder 30 (Tokyo Instr.), а также исследования морфологии поверхности плёнок на атомно-силовом микроскопе AIST-NT (Tokyo Instr.). Данные этих исследований свидетельствуют о значительной кристаллизации пленок в результате отжига в вакууме при температуре  $200\text{ }^\circ\text{C}$  в течении 1 часа и увеличении размеров кристаллитов.

Ещё одним свидетельством кристаллизации тонких плёнок после термического отжига в вакууме являются данные исследования температурной зависимости удельного сопротивления, приведенные на рис. 1. Температурные зависимости сопротивления исследовались в широкой области температур  $1.4 - 300$  К и в магнитных полях вплоть до 8 Тл. Измерения проводились по стандартной четырехзондовой схеме на переменном токе частоты 20.5 Гц методом фазового детектирования. Точечные контакты наносились при помощи серебряной пасты.

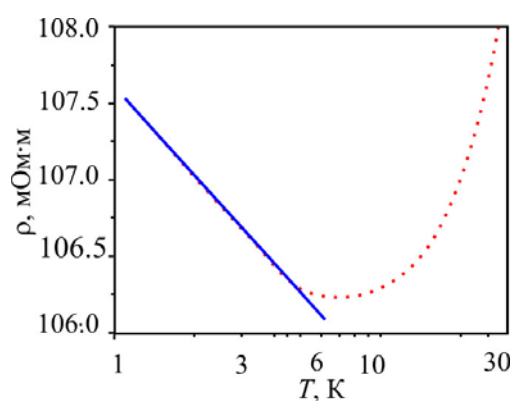
В неотожжённой плёнке наблюдается «диэлектрический» ход температурной зависимости удельного сопротивления, обусловленная неупорядоченностью структуры. В этом случае наблюдается термоактивационная прыжковая проводимость по локализованным состояниям, доложенная нами ранее в [5]. В отожжённой при  $200\text{ }^\circ\text{C}$  тонкой плёнке  $Bi_2(Te_{0.9}Se_{0.1})_3$  температурная зависимость удельного сопротивления имеет «металлический» ход, как и в объёмных монокристаллах [6].

Интересным является то обстоятельство, что при низких температурах (ниже 8 К) с понижением температуры величина удельного сопротивления в отожжённой плёнке несколько возрастает (рис. 1б). Подобное температурное поведение удельного сопротивления характерно при доминировании в области низких температур квантовых интерференционных поправок к проводимости, обусловленных слабой локализацией или электрон-электронным взаимодействием [7]. Поскольку в случае слабой локализации при приложении поперечного магнитного поля должно было бы наблюдаться отрицательное (а у нас, как будет показано ниже, наблюдается положительное) магнитосопротивление, мы считаем, что наблюдаемая локализация носителей заряда обусловлена электрон-электронным взаимодействием. Анализ температурной зависимости удельного сопротивления при температурах  $T < 8$  К (рис. 1б),

показал что имеет место логарифмическая зависимость сопротивления от температуры  $\rho(T) \sim \ln T$ , характерная для двумерного случая [7].



а)



б)

Рис. 1. Температурная зависимость удельного сопротивления в отожжённых тонких плёнках  $Bi_2(Te_{0.9}Se_{0.1})_3$  при температурах  $T < 300$  K (а) и при низких температурах  $T < 30$  K (б).

На рисунке 2 приведены данные исследований полевой зависимости магнетосопротивления.

При малых магнитных полях (до 1 Тл) наблюдается резкий рост сопротивления с ростом магнитного поля (рис. 1а), а при полях больших 1 Тл наблюдается стандартная, лоренцевская, квадратичная зависимость, свойственная полевой зависимости магнетосопротивления в объёмных монокристаллах. Такой резкий рост сопротивления с ростом магнитного поля в слабых магнитных полях характерен для эффекта слабой антилокализации [7].

Наблюдение эффекта слабой антилокализации (САЛ) не является неожиданным, поскольку для соединений группы  $A_2^V B_3^{VI}$  характерно наличие сильного спин-орбитального взаимодействия. Однако необходимо отметить, что САЛ в объёмных монокристаллах не наблюдается и она характерна только для тонких плёнок соединений группы  $A_2^V B_3^{VI}$ . Поэтому естественно предположить, что наблюдаемая в тонких плёнках САЛ является проявлением интерференционных эффектов в электронных приповерхностных состояниях топологического изолятора (ТИ).

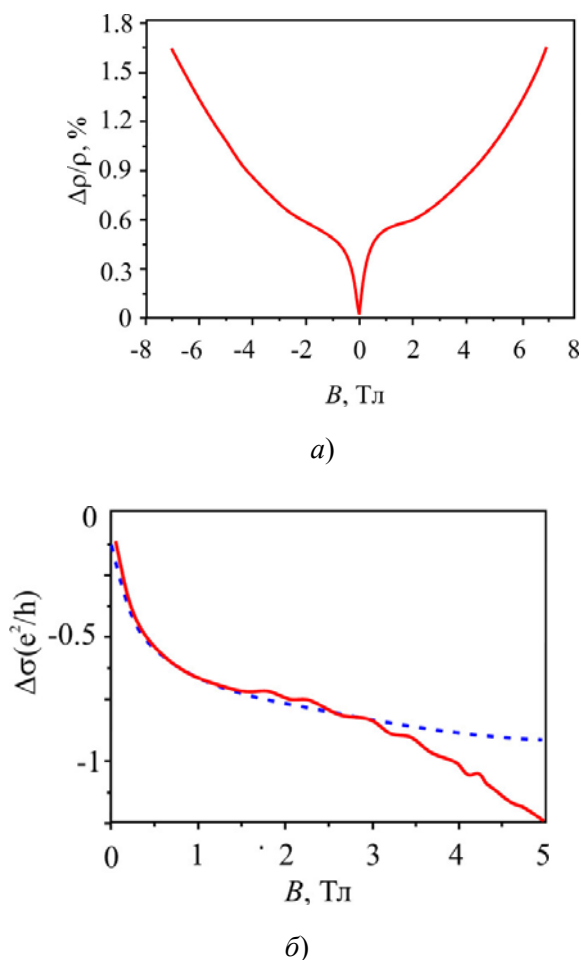


Рис. 2. Полевая зависимость магнитосопротивления (а) и проводимости (б, пунктирная линия теоретический расчёт) в отожджённных тонких плёнках  $Bi_2(Te_{0.9}Se_{0.1})_3$  при температуре  $T = 5 \text{ K}$ .

Теоретически магнитополевая зависимость магнитопроводимости в случае сильного спин-орбитального взаимодействия ( $\tau_\phi \gg \tau_{so}, \tau_e$ ) в двумерном приближении для слабых полей описывается формулой Хиками-Ларкин-Нагаока [8]:

$$\Delta\sigma(B) = \frac{1}{2} \frac{e^2}{2\pi^2\hbar} \left[ \psi\left(\frac{1}{2} + \frac{B_\phi}{B}\right) - \ln\left(\frac{B_\phi}{B}\right) \right], \quad (1)$$

здесь  $\tau_{so}, \tau_e, \tau_\phi$  – соответственно, времена спин-орбитального взаимодействия, упругого рассеяния и сбоя фазы;  $e$  – заряд электрона;  $\hbar$  – приведённая постоянная Планка; характеристическое поле  $B_\phi = \hbar/4el_\phi$ ;  $l_\phi$  – длина сбоя фазы.

Нами была проведена подгонка экспериментальных данных формулой (1) с использованием двух подгоночных параметров: коэффициента  $A$  перед всей формулой и поля  $B_\phi$ . Результаты подгонки приведены на рис. 2б. Как видно из рисунка, рассчитанная из (1) теоретическая кривая (пунктирная линия) хорошо согласуется с экспериментальными данными при значениях параметров  $A = 1.1$  и характеристического поля  $B_\phi = 0.004 \text{ Tл}$ . Оцененная длина сбоя фазы равна  $l_\phi = 200 \text{ нм}$ . Несмотря на то, что эта величина сравнима с толщиной плёнки  $L \sim 500 \text{ нм}$ ,

необходимо учитывать, что глубина локализации поверхностных состояний ТИ  $a < 10$  нм. Таким образом условие  $l_\phi \gg a$  выполняется достаточно строго.

## Выводы

В настоящей работе показано, что термический отжиг в вакууме при температуре 200 °С приводит к значительной кристаллизации тонких плёнок  $Bi_2(Te_{0.9}Se_{0.1})_3$ , что подтверждается данными рентгеновской дифракции и комбинационного рассеяния света. В отожженных тонких плёнках  $Bi_2(Te_{0.9}Se_{0.1})_3$  наблюдается такой же «металлический» ход температурной зависимости удельного сопротивления, как и в объёмных монокристаллах, с существенными отличиями в низкотемпературной области.

При низких температурах (ниже 8 К), логарифмический рост сопротивления с ее понижением обусловлен доминирующим вкладом электрон-электронного рассеяния в процессы низкотемпературного транспорта электронов.

Наблюдающийся резкий рост магнитосопротивления с возрастанием величины магнитного поля в слабых полях (до 1 Т) при низких температурах ( $T = 5$  К) обусловлен эффектом слабой антилокализации, характерным для систем с сильным спин-орбитальным взаимодействием. Наблюдение слабой антилокализации указывает на доминирование топологических поверхностных состояний в электронном транспорте в магнитных полях при низких температурах.

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда развития науки при Президенте Азерб. республики – грант № EIF/GAM-3-2014-6(21)-24/01/1.

## Литература

1. L.D. Hicks, M.S. Dresselhaus, *Phys. Rev. B* 47, 12727 (1993).
2. L.D. Hicks, T.C. Harman, M.S. Dresselhaus, *Appl. Phys. Lett.* 63, 3230 (1993).
3. L.D. Hicks, M.S. Dresselhaus, *Phys. Rev. B* 47, 16631 (1993).
4. В.А. Кутасов, Л.Н. Лукьянова, П.П. Константинов. // ФТТ – 2000. - № 42. – С.1985.
5. Л.В. Прокофьева, Д.А. Пшенай-Северин, П.П. Константинов, А.А. Шабалдин. // ФТП – 2009. – №43. – С. 1009.
6. Н.А. Абдуллаев, Н.М. Абдуллаев, Х.В. Алигулиева, А.М. Керимова, К.М. Мустафаева, И.Т. Мамедова, Н.Т. Мамедов, С.А. Немов, П.О. Буланчук. // ФТП – 2013. - № 47. – С. 586.
7. Н.А. Абдуллаев, С.Ш. Кахраманов, Т.Г. Керимова, К.М. Мустафаева, С.А. Немов. // ФТП – 2009. - № 43. – С. 156.
8. А.А. Абрикосов. Основы теории металлов – М.: Наука, 1987.
9. S. Hikami, A. I. Larkin, and Y. Nagaoka, *Progress of Theoretical Physics* 63, 707 (1980).

Поступила в редакцию 26.06.2017

**N.A. Abdullaev**<sup>1</sup> *Dr. of ph.-mat. science,*  
**O.Z. Alekperov**<sup>1</sup> *Cand. of Phys.- Math. Sciences,*  
**Kh.V. Aligulieva**<sup>1</sup> *Cand. of Phys.- Math. Sciences,*

V.N. Zverev<sup>2</sup> Dr. of technical science,  
A.M. Kerimova<sup>1</sup> Cand. of Phys.- Math. Sciences,  
N.T. Mamedov<sup>1</sup> Academicians of the National Academy of Sciences of Azerbaijan

<sup>1</sup>Institute of Physics Azerbaijan National Academy of Sciences,  
Baku, AZ1143, Azerbaijan;

<sup>2</sup>Institute of Solid State Physics Russian Academy of Sciences,  
Chernogolovka, Moscow region, 142432, Russia  
e-mail: abnadir@physics.ab.az

## LOCALIZATION EFFECTS IN THIN FILMS OF $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.7}\text{Se}_{0.3}$ THERMOELECTRIC COMPOUND

*Thin films of  $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.7}\text{Se}_{0.3}$  thermoelectric compound were prepared using “hot wall” method by thermal evaporation in vacuum. High quality of the resulting thin films is proved by the data of X-ray diffraction and Raman scattering. Electron transport was investigated in a wide range of temperatures 1.4 – 300 K and magnetic fields up to 8 T. In the temperature dependence of electric conductivity at temperatures below 10 K there is localization of electrons caused by electron-electron interaction in a two-dimensional limit. It is supposed that the observed weak anti-localization in the field dependence of magnetoresistance is caused by the dominant contribution of surface states of a topological insulator. The length of phase failure was estimated. Ref. 17, Fig. 2.*

**Key words:** thin films, conductivity, magnetoresistance, localization, weak localization, weak anti-localization, topological insulator.

### References

1. L.D. Hicks, M.S. Dresselhaus. (1993). Phys. Rev. B, 47, 12727.
2. L.D. Hicks, T.C. Harman, M.S. Dresselhaus. (1993). Appl. Phys. Lett., 63, 3230.
3. L.D. Hicks, M.S. Dresselhaus. (1993). Phys. Rev. B, 47, 16631.
4. Kutasov V.A., Lukyanova, L.N., Konstantinov P.P. (2000). Fizika tverdogo tela – Physics of the Solid State, 42, 1985 [in Russian].
5. Prokofieva L.V., Pshenai-Severin D.A., Konstantinov P.P., Shabaldin A.A.(2009). Fizika i tekhnika poluprovodnikov – Semiconductors, 43, 1009 in Russian].
6. Abdullaev N.A., Abdullayev N.M., Aligulieva Kh.V., Kerimova A.M., Mustafaeva K.M., Mamedova I.T., et al. (2013). Fizika i tekhnika poluprovodnikov – Semiconductors, 47, 586 [in Russian].
7. Abdullaev N.A., Kakhramanov S. Sh., Kerimova T.G., Mustafaeva K.M., Nemov S.A. (2009). Fizika i tekhnika poluprovodnikov – Semiconductors, 43, 156 [in Russian].
8. Abrikosov A.A. (1987). Osnovy teorii metallov [Fundamentals of theory of metals]. Moscow: Nauka [in Russian].
9. Hikami S., Larkin A.I., Nagaoka Y. (1980). Progress of Theoretical Physics, 63, 707.

Submitted 26.06.2017