

Абдуллаєв Н.А.¹, Алекперов О.З.¹, Алігулієва Х.В.¹,
Зверєв В.Н.², Керімова А.М.¹, Мамедов Н.Т.¹

¹Інститут фізики Національної Академії Наук Азербайджану,
Баку, AZ1143, Азербайджан;

²Інститут фізики твердого тіла Російської Академії Наук, Чернооголовка,
Московська область, 142432, Росія

ЛОКАЛІЗАЦІЙНІ ЕФЕКТИ В ТОНКИХ ПЛІВКАХ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОЇ СПОЛУКИ $Bi_2Te_{2.7}Se_{0.3}$

Термічним випаровуванням у вакуумі методом «гарячої стінки» отримані тонкі плівки термоелектричної сполуки $Bi_2Te_{2.7}Se_{0.3}$. Висока якість отриманих тонких плівок підтверджується даними рентгенівської дифракції й рамановського розсіювання. Досліджений транспорт електронів у широкій області температур 1.4 – 300 К і магнітних полів аж до 8 Тл. У температурній залежності електропровідності при температурах нижче 10 К спостерігається локалізація електронів, обумовлена електрон-електронною взаємодією у двовимірній границі. Передбачається, що спостережувана слабка антилокалізація в польовій залежності магнітоопору обумовлена домінуючим внеском поверхневих станів топологічного ізолятора. Оцінена довжина збою фази.

Ключові слова: тонкі плівки, провідність, магнітоопір, локалізація, слабка локалізація, слабка антилокалізація, топологічний ізолятор.

Thin films of $Bi_2Te_{2.7}Se_{0.3}$ 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 – 300K 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.

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

Вступ

Тонкі плівки термоелектричних матеріалів на основі сполук групи $A_2^V B_3^{VI}$ становлять інтерес з однієї сторони тим, що відповідно до сучасних теоретичних уявлень [1], значне збільшення термоелектричної добротності можна одержати в низькорозмірних системах на основі термоелектричних матеріалів, а з іншого сторони тим, що останнім часом сполуки групи $A_2^V B_3^{VI}$ позиціонуються як топологічні ізолятори [2].

Крім того, згідно [3], термоелектричні пристрої на основі тонких плівок Bi_2Te_3 і Bi_2Se_3 дозволяють досягти істотного охолодження до 32 К і прокачування теплового потоку до

700 Вт/см². Локальне охолодження або нагрівання відбувається приблизно в $2 \cdot 10^4$ раз швидше, ніж в пристроях, створених на основі об'ємних матеріалів. Використання тонких плівок являється також більш прийнятним з міркувань мініатюризації приладів на основі цих сполук.

Метою даної роботи було з'ясування механізму низькотемпературного транспорту електронів у тонких плівках твердого розчину $Bi_2Te_{2.7}Se_{0.3}$. Вибір саме такої сполуки для досліджень обумовлений тим, що наявні в літературі дані [4] указують на те, що в системі твердих розчинів $Bi_2(Te_{1-x}Se_x)_3$ найбільшою термоелектричною ефективністю володіє сполука $Bi_2Te_{2.7}Se_{0.3}$.

Експеримент і обговорення результатів

Тонкі плівки були отримані методом «гарячої стінки» термічним випаровуванням синтезованої речовини у вакуумі 10^{-5} мм рт. ст. на підкладки з оксидного силікатного скла. Температура підкладки підтримувалася близько 300 °С. Термічний відпал отриманих плівок проводився у вакуумі при температурі 200 °С на протязі 1 години. Товщина отриманих плівок варіювалася в межах 500 – 600 нм.

Для характеристики отриманих тонких плівок було проведено вивчення дифракції рентгенівських променів на рентгенівському дифрактометрі Bruker D8 Advance і комбінаційного розсіювання світла на тривимірному конфокальному рамановському мікроспектрометрі Nanofinder 30 (Токуо Instr.), а також дослідження морфології поверхні плівок на атомно-силовому мікроскопі AIST-NT (Токуо Instr.). Дані цих досліджень свідчать про значну кристалізацію плівок у результаті відпалу у вакуумі при температурі 200 °С на протязі 1 години й збільшення розмірів кристалітів.

Ще одним свідченням кристалізації тонких плівок після термічного відпалу у вакуумі є дані дослідження температурної залежності питомого опору, наведені на рис. 1.

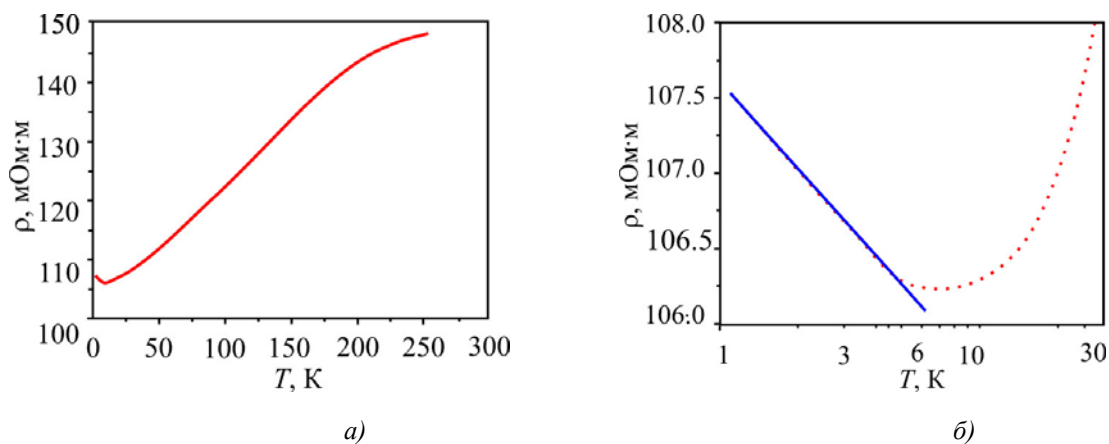


Рис. 1. Температурна залежність питомого опору у відпалених тонких плівках $Bi_2(Te_{0.9}Se_{0.1})_3$ (а) при температурах $T < 300$ К і при низьких температурах $T < 30$ К (б).

Температурні залежності опору досліджувалися в широкій області температур 1.4 – 300 К і в магнітних полях аж до 8 Тл. Виміри проводилися по стандартній чотирьохзондовій схемі на змінному струмі частоти 20.5 Гц методом фазового детектування. Точкові контакти наносилися за допомогою срібної пасту. У невідпаленій плівці спостерігається «діелектричний» хід температурної залежності питомого опору, обумовлений неупорядкованістю структури. У цьому випадку спостерігається термоактиваційна стрибкова провідність по локалізованих

станах, повідомлена нами раніше в [5]. У відпаленій при $200\text{ }^\circ\text{C}$ тонкій плівці $Bi_2(Te_{0.9}Se_{0.1})_3$ температурна залежність питомого опору має «металевий» хід, як і в об'ємних монокристалах [6].

Цікавою є та обставина, що при низьких температурах (нижче 8 K) зі зниженням температури величина питомого опору у відпаленій плівці трохи зростає (рис. 1б). Подібна температурна поведінка питомого опору характерна при домінуванні в області низьких температур квантових інтерференційних поправок до провідності, обумовлених слабкою локалізацією або електрон-електронною взаємодією [7]. Оскільки у випадку слабкої локалізації при накладанні поперечного магнітного поля повинен був би спостерігатися негативний магнітоопір (а в нас, як буде показано нижче, спостерігається позитивний магнітоопір), ми вважаємо, що спостережувана локалізація носіїв заряду обумовлена електрон-електронною взаємодією. Аналіз температурної залежності питомого опору при температурах $T < 8\text{ K}$ показав (рис. 1б), що має місце логарифмічна залежність опору від температури $\rho(T) \sim \ln T$, характерна для двовимірного випадку [7].

На рис. 2 наведені дані досліджень польової залежності магнітоопору.

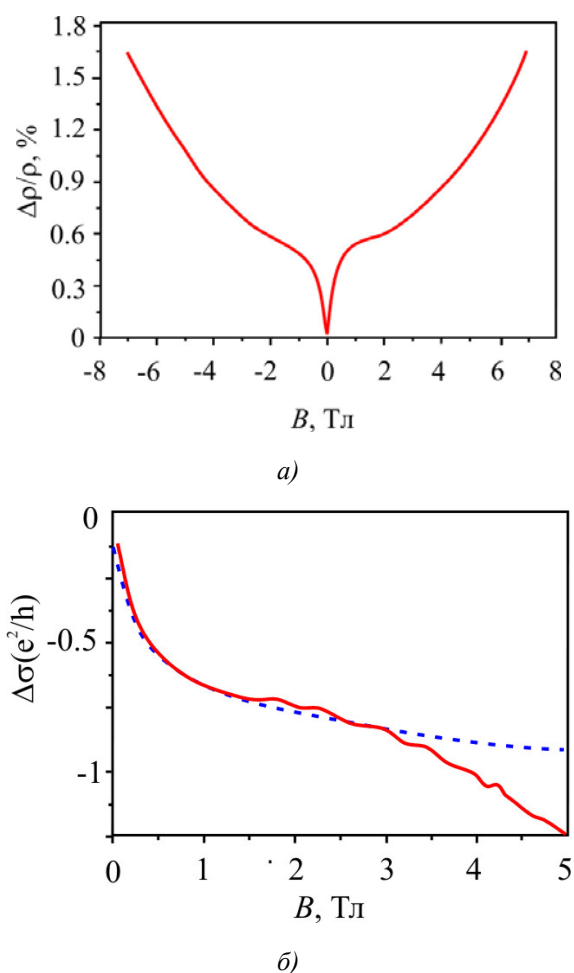


Рис. 2. Польова залежність магнітоопору (а) і провідності (б, пунктирна лінія теоретичний розрахунок) у відпалених тонких плівках $Bi_2(Te_{0.9}Se_{0.1})_3$ при температурі $T = 5\text{ K}$.

При малих магнітних полях (до 1 Tl) спостерігається різкий ріст опору з ростом магнітного поля (рис. 1а), а при магнітних полях більших 1 Tl спостерігається стандартна, лоренцівська, квадратична залежність, властива польовий залежності магнітоопору в об'ємних

монокристаллах. Такий різкий ріст опору з ростом магнітного поля в слабких магнітних полях характерний для ефекту слабкої антилокалізації [7]. Спостереження ефекту слабкої антилокалізації (САЛ) не є несподіваним, оскільки для сполук групи $A_2^V B_3^{VI}$ характерна наявність сильної спін-орбітальної взаємодії. Однак, необхідно відзначити, що САЛ в об'ємних монокристаллах не спостерігається й вона характерна тільки для тонких плівок сполук групи $A_2^V B_3^{VI}$. Тому природно припустити, що спостережувана в тонких плівках САЛ є проявом інтерференційних ефектів в електронних приповерхневих станах топологічного ізолятора (ТІ).

Теоретично магнітопольова залежність магнітопровідності у випадку сильної спін-орбітальної взаємодії ($\tau_\phi \gg \tau_{so}, \tau_e$) у двовимірнім наближенні для слабких полів описується формулою Хікамі-Ларкін-Нагаока [8]:

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

тут $\tau_{so}, \tau_e, \tau_\phi$ – відповідно, часи спін-орбітальної взаємодії, пружного розсіювання й збою фази, e – заряд електрона, \hbar – приведена постійна Планка, характеристичне поле $B_\phi = \hbar / 4el_\phi$, l_ϕ – довжина збою фази.

Нами було проведено підгонку експериментальних даних формулою (1) з використанням двох підгонних параметрів: коефіцієнта A перед усією формулою й поля B_ϕ . Результати підгонки наведено на рис. 2б. Як видно з рисунка, розрахована з (1) теоретична крива (пунктирна лінія) добре узгоджується з експериментальними даними при значеннях параметрів $A = 1.1$ і характеристичного поля $B_\phi = 0.004$ Тє. Оцінена довжина збою фази рівна $l_\phi = 200$ нм. Незважаючи на те, що ця величина порівнянна з товщиною плівки $L \sim 500$ нм, необхідно враховувати, що глибина локалізації поверхневих станів ТІ $a < 10$ нм. Тому умова $l_\phi \gg a$ виконується досить строго.

Висновки

Таким чином, у даній роботі показано, що термічний відпал у вакуумі при температурі 200 °С приводить до значної кристалізації тонких плівок $Bi_2(Te_{0.9}Se_{0.1})_3$, що підтверджується даними рентгенівської дифракції й комбінаційного розсіювання світла. У відпалених тонких плівках $Bi_2(Te_{0.9}Se_{0.1})_3$ спостерігається такий же «металевий» хід температурної залежності питомого опору, як і в об'ємних монокристаллах, з істотними відмінностями в низькотемпературній області.

Логарифмічний ріст опору зі зниженням температури при низьких температурах (нижче 8 К), обумовлений домінуючим внеском електрон-електронного розсіювання в процесі низькотемпературного транспорту електронів.

Різкий ріст магнітоопору, що спостерігається зі зростанням величини магнітного поля в слабких полях (до 1 Тл) при низьких температурах ($T = 5$ К), обумовлений ефектом слабкої антилокалізації, характерним для систем із сильною спін-орбітальною взаємодією. Спостереження слабкої антилокалізації вказує на домінування топологічних поверхневих станів в електронному транспорті в магнітних полях при низьких температурах.

Робота виконана при фінансовій підтримці Фонду розвитку науки при Президентіві Азерб. республіки – грант № EIF/GAM-3-2014-6(21)-24/01/1.

Література

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, 42, 1985 (2000); Л.В. Прокофьева, Д.А. Пшеная-Северин, П.П. Константинов, А.А. Шабалдин. ФТП, 43, 1009 (2009).
5. Н.А. Абдуллаєв, Н.М. Абдуллаєв, Х.В. Алигулієва, А.М. Керімова, К.М. Мустафаєва, И.Т. Мамедова, Н.Т. Мамедов, С.А. Немов, П.О. Буланчук. ФТП, 47, 586 (2013).
6. Н.А. Абдуллаєв, С.Ш. Кахраманов, Т.Г. Керімова, К.М. Мустафаєва, С.А. Немов. ФТП. – 2009 43, 156.
7. А.А. Абрикосов. Основы теории металлов, М: Наука, (1987).
8. S. Hikami, A. I. Larkin, and Y. Nagaoka, *Progress of Theoretical Physics* 63, 707 (1980).

Надійшла до редакції 14.02.2017