

УДК 538.935

Грабов В.М., докт. фіз.-мат. наук, професор
Демидов С.В., канд. фіз.-мат. наук
Комаров В.А., канд. фіз.-мат. наук
Суслов А.В., Герега В.А., Єфімов Д.Д.

Російський державний педагогічний університет ім. А. І. Герцена,
наб. р. Мойки, Санкт-Петербург, 191186, Росія,

ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТОНКИХ ПЛІВОК ВІСМУТУ І ТВЕРДОГО РОЗЧИНУ ВІСМУТ-СУРМА

Методом, що виключає виникнення зовнішніх деформаційних впливів на систему плівка-підкладка, були досліджені температурні залежності питомого опору і термоЕРС, розрахований фактор термоелектричної потужності в інтервалі температур 77-300 К для плівок твердого розчину вісмут-сурма на підкладках з різним коефіцієнтом температурного розширення. Встановлено, що для отримання максимальної термоЕРС критично важливим є співвідношення розміру кристалітів і товщини плівки, що обумовлено різним обмеженням рухливостей електронів і дірок поверхнею і межами кристалітів. Максимальне значення термоЕРС і фактора потужності відповідає товстим блоковим плівкам $Bi_{0.88}Sb_{0.12}$ на слюді. Робота виконана в рамках державного завдання за фінансової підтримки Міносвіти Росії (проект № FSZN-2020-0026). Бібл., рис., табл.

Ключові слова: вісмут, вісмут-сурма, термо, розмірний ефект, фактор потужності

Вступ

Твердий розчин вісмут-сурма відомий як найбільш ефективний низькотемпературний (температури нижче 200 К) термоелектричний матеріал. При цьому праці останніх років показують можливість використання квантових і класичних розмірних ефектів в електронних явищах, а також внутрішніх деформацій для збільшення термоелектричної ефективності матеріалів [1 – 5].

Термоелектрична ефективність (Z) в низькорозмірних структурах і наноструктурах в порівнянні з однорідними масивними матеріалами може збільшуватися як за рахунок збільшення фактора потужності (P) внаслідок особливостей щільності станів в околі дна нижньої підзони розмірного квантування [**Ошибка! Источник ссылки не найден., Ошибка! Источник ссылки не найден.**], так і за рахунок зменшення теплопровідності внаслідок розсіювання фононів на межах поділу [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**]. Ще одним механізмом зміни термоелектричної потужності може служити зміна співвідношення внеску електронів і дірок в термоЕРС внаслідок різного обмеження їх рухливостей поверхнею і межами кристалітів в тонкій плівці [8, 9].

Додаткові можливості вирішення проблеми збільшення термоелектричної ефективності відкриває стрейнроніка [10]. Стрейнронікою (від англ. Strain - натяг) називають новий науковий напрям фізики конденсованого стану, що використовує фізичні ефекти в твердих тілах, обумовлені деформаціями, що виникають в мікро- і нанощарах і гетероструктурах під дією зовнішніх керуючих полів, що призводять до змін зонної структури, електричних, магнітних, оптичних та інших властивостей матеріалів [11]. Можливості стрейнроніки стають очевидними, якщо звернути увагу,

що деякі теоретичні розрахунки і окремі експериментальні результати показують, що використання високого тиску може істотно збільшити ZT деяких матеріалів [12]. Однак даний підхід не набув поширення в зв'язку з технологічною складністю створення великих тисків в готових пристроях. Аналогом високого тиску може виступати як раз деформація, яка в разі тонкоплівкових матеріалів може бути легко створена кількома способами, зокрема, використанням підкладок з різними параметрами ґратки та температурними коефіцієнтами розширення, напилення плівок на вигнуті підкладки або їх контрольований вигин безпосередньо в процесі експлуатації і т.п. У низькорозмірних структурах, які знаходяться на підкладках, можливе створення рекордних пружних деформацій. Наприклад, оскловані нитки вісмуту субмікронних розмірів витримують відносні видовження в 2-3 % [13]. Це еквівалентно таким значенням пружних деформацій в масивних кристалах, які відповідають механічним напругам до 1 ГПа, що приблизно відповідає значенням, що застосовуються при дослідженні масивних кристалів такого типу. В даний час активні дослідження в області стрейнтроники лише розпочинаються.

В рамках даної роботи експериментально досліджуються можливості збільшення термоелектричної ефективності тонких плівок вісмуту і твердого розчину вісмут-сурма з допомогою вищевказаних підходів.

Методика експерименту

Досліджено плівки вісмуту товщиною від 10 нм до 1 мкм і плівки вісмут-сурма з концентрацією сурми від 3 до 15 ат. % *Sb*. В якості підкладок використовувалися пластини монокристалічної слюди (мусковіт) та поліамідна плівка. Коефіцієнт теплового лінійного розширення (КТР) цих матеріалів дорівнює $8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ та $45 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ відповідно. КТР вісмуту в тригональній площині дорівнює $10.5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Таким чином, підкладки зі слюди викликають деформацію площинного розтягування, а підкладки з поліаміду - деформацію площинного стиснення плівки за температур нижче температури формування плівки.

Для отримання плівок з різним досконалістю структури використовувалися різні методи. В якості основного методу отримання тонкоплівкових зразків використовувався метод термічного осадження в глибокому вакуумі (10^{-5} Торр). При цьому для плівок твердого розчину вісмут-сурма використовувався метод дискретного випаровування, що дозволяє отримувати гомогенний розподіл компонентів твердого розчину по всьому об'єму. Таким методом за оптимальних умов отримання [14] вдається отримувати плівки з розмірами кристалітів, які більш ніж на порядок перевищують товщину плівки (для вісмуту) і в кілька разів перевищують товщину плівки (для твердого розчину вісмут-сурма). З метою отримання плівок з монокристалічною структурою використовувався метод зонної перекристалізації плівки під захисним покриттям [8]. З метою отримання плівок з розмірами блоків порядку товщини плівки використовувалася методика, заснована на вирощуванні плівки у високому вакуумі на попередньо сформованих нанокластерах [15]. Структура плівок контролювалася методами атомно-силової мікроскопії та рентгеноструктурним аналізом. Всі плівки мали орієнтацію площини (111) паралельну площині підкладки.

На отриманих плівках були досліджені температурні залежності термоЕРС і питомого опору в інтервалі температур 77-300 К за ступінчастої зміни температури зі стабілізацією температури в точці вимірювання. Для вимірювання термоЕРС використовувалась методика, що виключає спотворення елементами установки природної деформації в системі плівка-підкладка. Цю методику описано у праці [16].

Експериментальні результати та їх обговорення

Як було зазначено у вступі, в плівках вісмуту межі кристалітів і поверхня плівки по-різному обмежують рухливість електронів і дірок, що призводить до суттєвих змін значення коефіцієнта Хола в залежності від співвідношення товщини плівки та розмірів кристалітів. Поверхнею за низьких температур більшою мірою обмежується рухливість електронів, а межами кристалітів – рухливість дірок. З метою вивчення впливу вищевказаного явища на термоЕРС, яка є, як і ефект Хола, різницеvim ефектом, досліджені плівки вісмуту на слюді мали істотні відмінності в розмірах кристалітів. Досліджувалися плівки з розмірами кристалітів, порядку товщини плівки (№ 1, 4 на рис. 1 і 2), отримані з використанням нано кластерів вісмуту відповідно до методики, розробленої в роботі [15].

На рис 1 і 2 наведені температурні залежності термоЕРС і питомого опору плівок вісмуту товщиною 300 нм (№1, 2, 3) і 1000 нм (№4, 5, 6).

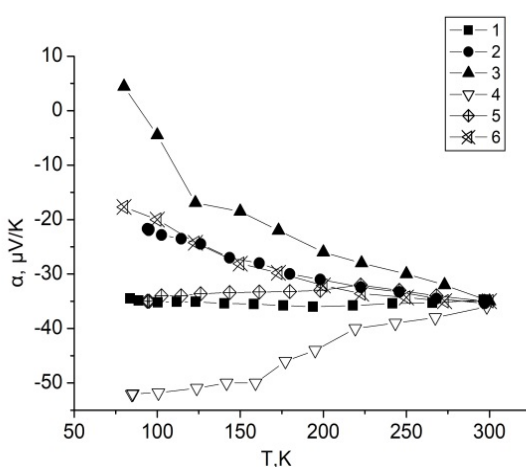


Рис. 1. Залежність термоЕРС від температури для плівок вісмуту на підкладці зі слюди

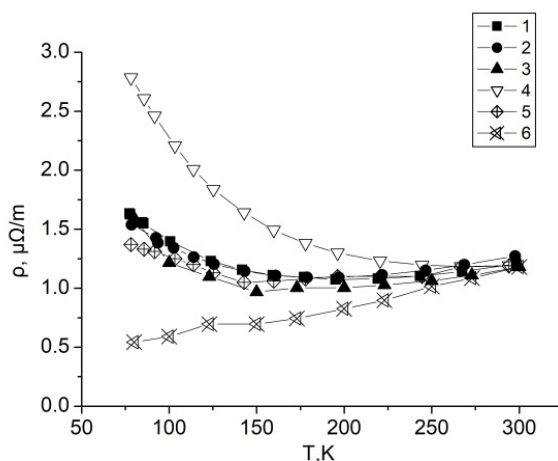


Рис. 2. Залежність питомого опору від температури для плівок вісмуту на підкладці зі слюди

З представлених залежностей видно, що для плівок однакової товщини при зменшенні розмірів кристалітів відбувається зростання абсолютного значення термоЕРС при низьких температурах, що, як і для ефекту Хола, обумовлено істотно більшим обмеженням межами кристалітів рухливості дірок в порівнянні з рухливістю електронів. Для плівки №4 абсолютне значення термоЕРС за 77 К перевищує аналогічне значення для масивного вісмуту ($\alpha_{11} = -45$ мкВ/К). При цьому, вплив кристалітів на рухливість для плівок, отриманих з використанням нанокластерів вісмуту, може істотно варіюватися від зразка до зразка.

У роботах [1, 2] вперше було теоретично показано, що квантування енергії носіїв заряду в тонких плівках і нитках може призводити до зростання термоЕРС і істотного збільшення ZT . Істотне зростання термоЕРС в тонких плівках внаслідок квантового розмірного ефекту повинно відбуватися за товщин h , порівняних з довжиною хвилі де Бройля носіїв заряду. В монокристалах вісмуту носії заряду мають досить велике значення $\lambda = 2\pi\hbar/\sqrt{2E_F m^*}$, яке в напрямку осі $C3$ складає 67 нм для електронів і 11 нм для дірок за температури 77 К. У даній роботі зроблено спробу експериментального виявлення впливу квантового розмірного ефекту на термоелектричні властивості тонких плівок вісмуту на слюді.

На рис. 3 наведено температурні залежності термоЕРС плівок вісмуту товщиною від 10 нм до 1 мкм, отриманих методом термічного напилення при оптимальних умовах [14] с відпалом. З представлених залежностей видно, що за низьких температур для плівок товщиною від 1 мкм до 27 нм відбувається зменшення абсолютного значення негативної за знаком термоЕРС зі зменшенням товщини плівки, і для найтоншої плівки термоЕРС за низької температури переходить в позитивну область. При цьому внаслідок особливостей формування тонкоплівкових структур при зменшенні товщини плівок відбувається зростання відношення розмірів кристалітів до товщини плівки (D/h). Як було зазначено вище в цьому випадку при зменшенні товщини плівки більш істотно обмежується рухливість електронів, по відношенню до рухливості дірок, що і призводить до зменшення внеску електронів в термоЕРС і зменшення її абсолютного значення для більш тонких плівок. Однак, для плівок товщиною менше 27 нм при низьких температурах починається зростання абсолютного значення термоЕРС (вставка рис. 3), при цьому залежність від товщини D/h залишається такою ж, як і для плівок більшої товщини, тому зміна характеру товщинною залежності термоЕРС для плівок товщиною менше 27 нм не може бути обумовлено різним обмеженням рухливості електронів і дірок поверхнею і кордонами кристалітів. Ймовірно, збільшення абсолютного значення термоЕРС зі зменшенням товщини плівок вісмуту пов'язано зі зміною електронного енергетичного спектра внаслідок квантового розмірного ефекту. Для плівок товщиною менше 27 нм за низьких температурах починається зростання абсолютного значення термоЕРС (вставка рис. 3), при цьому залежність від відношення D/h залишається такою ж, як і для плівок більшої товщини, тому зміна характеру товщинною залежності термоЕРС для плівок товщиною менше 27 нм не може бути обумовлена різним обмеженням рухливості електронів і дірок поверхнею і межами кристалітів.

Для плівок вісмут-сурма даний ефект нами не виявлено, мабуть, внаслідок меншої ефективності відпалу з точки зору збільшення розмірів кристалітів (табл. 1), для тонких плівок твердого розчину вісмут-сурма і внаслідок цього менших значень довжини когерентності носіїв заряду в порівнянні з плівками чистого вісмуту, великі значення якої є критично важливими для спостереження когерентних явищ [17].

З використанням вимірних температурних залежностей питомого опору і термоЕРС для досліджуваних плівок розраховано фактор термоелектричної потужності P (рис. 4). Найбільш високе значення термоелектричної потужності для всіх температур спостерігається для плівок товщиною 500-1000 нм. Однак її залежність від товщини носить немонотонний характер за низьких температурах. Для плівок товщиною менше 27 нм починається зростання фактору потужності зі

зменшенням товщини плівки, що, як і зростання абсолютного значення термоЕРС, обумовлено зміною зонної структури плівок внаслідок прояву квантової когерентності носіїв заряду.

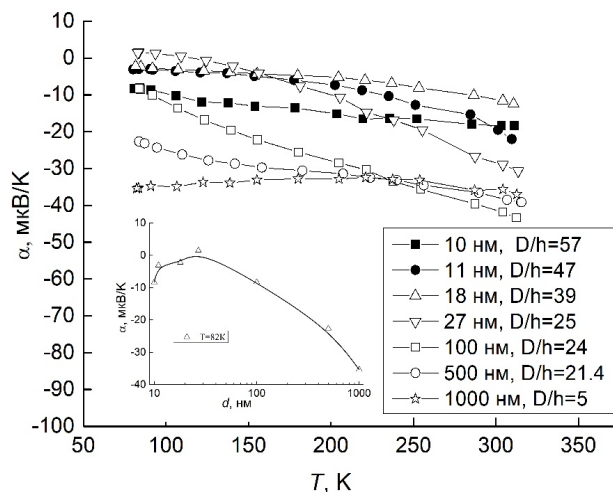


Рис. 3. Температурні залежності термоЕРС плівок вісмуту товщиною від 10 нм до 1 мкм. D/h – відношення розмірів кристалітів до товщини плівки

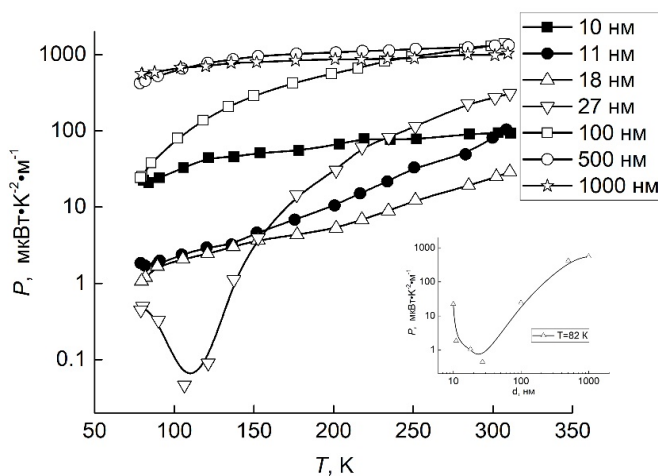


Рис. 4. Температурні залежності фактора термоелектричної потужності плівок вісмуту товщиною від 10 нм до 1 мкм. D/h – відношення розмірів кристалітів до товщини плівки

С метою експериментального дослідження можливості використання внутрішніх механічних напружень для поліпшення термоелектричних властивостей тонких плівок системи вісмут-сурма в даній роботі досліджено термоелектричні властивості тонких плівок твердого розчину вісмут-сурма на підкладках, які мають різний коефіцієнт температурного розширення: поліїмід та слюда (мусковіт). Під дією різниці температурного розширення матеріалів плівки і підкладки, плівки вісмуту на поліїміді переходять у стан площинного стиснення, а плівки вісмуту на слюді – у стан площинного розтягування за температури, нижчої від температури формування плівки. При аналізі

результатів використовувалися значення середнього розміру кристалітів плівок системи вісмут-сурма отримані методами, розвиненими у працях [18,19]. Ці значення наведено у табл. 1.

Збільшення концентрації сурми в плівці супроводжується збільшенням абсолютної величини термоЕРС за низької температури, що відображає зміну термоЕРС у монокристалах зі зміною їх складу (рис. 5 і рис.6). Зменшення товщини плівки в плівках твердого розчину вісмут-сурма призводить до зменшення термоЕРС за абсолютним значенням в низькотемпературній області, в той час як зменшення розмірів кристалітів призводить до збільшення її абсолютного значення в повній аналогії з плівками чистого вісмуту.

Вплив деформації плівки, внаслідок відмінності температурного розширення матеріалів плівки і підкладки, призводить до різного характеру температурних залежностей термоЕРС в плівках вісмут-сурма на підкладках із слюди та поліімиду. Використання плівок на підкладках з великим температурним розширенням призводить до зменшення абсолютного значення термоЕРС, особливо в низькотемпературній області. Максимальне значення термоЕРС і фактора потужності відповідає плівкам $Bi_{0.88}Sb_{0.12}$ на слюді та полііміді (рис. 6, 7).

Таблиця 1

Розміри кристалітів плівок вісмуту і твердого розчину вісмут-сурма, мкм.

Матеріал підкладки	Товщина, мкм	1	0.5	0.25
	склад, ат.% Sb			
Слюда	0	5.4	10.7	3.6
	3	6.8	5.6	4.3
	5	8.2	1.8	3.2
	8	2.2	3.5	-
	12	3.8	3.2	2
	15	2.7	-	1.6
Полиимид	0	2.0	1.4	1.3
	3	1.0	0.8	0.6
	5	-	-	0.9
	8	1.2	0.7	-
	12	1.1	0.7	-
	15	1.0	-	-

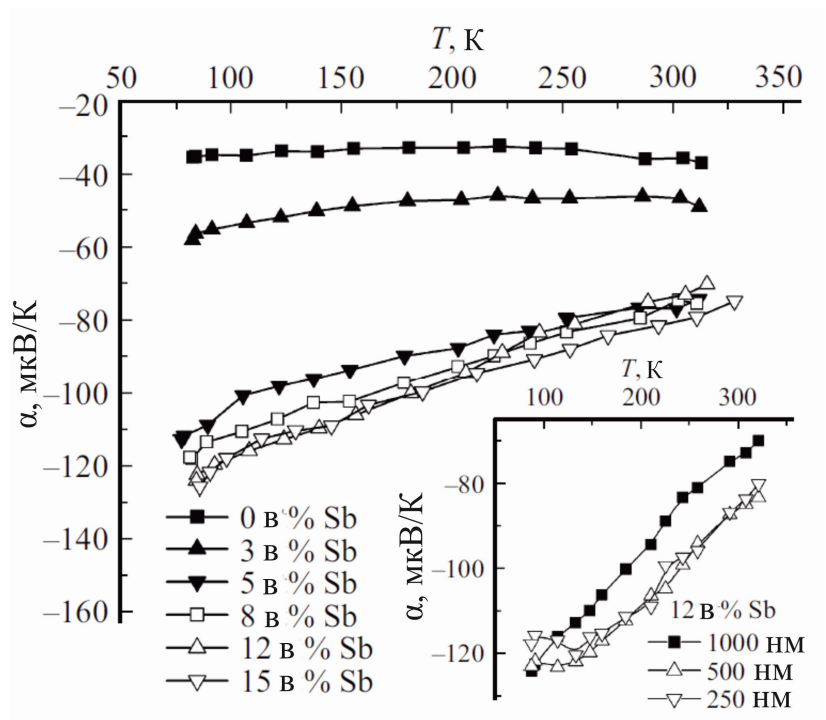


Рис. 5 ТермоЕРС плівок товщиною 1000 нм різного складу на слюді. На вставці — термоЕРС плівок $Bi_{0.88}Sb_{0.12}$ різних товщин.

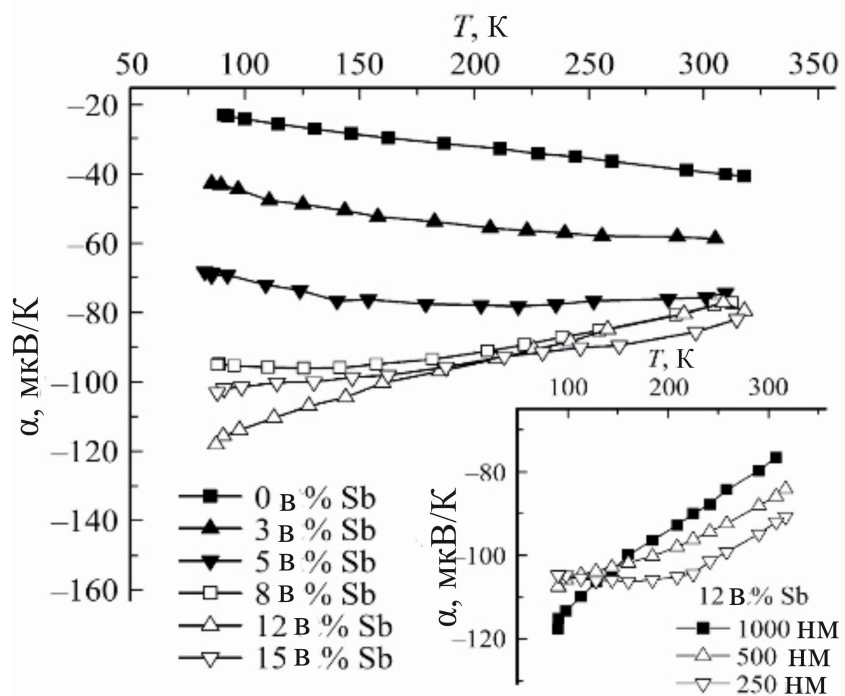


Рис. 6. ТермоЕРС плівок товщиною 1000 нм різного складу на поліміді. На вставці — термоЕРС плівок $Bi_{0.88}Sb_{0.12}$ різних товщин.

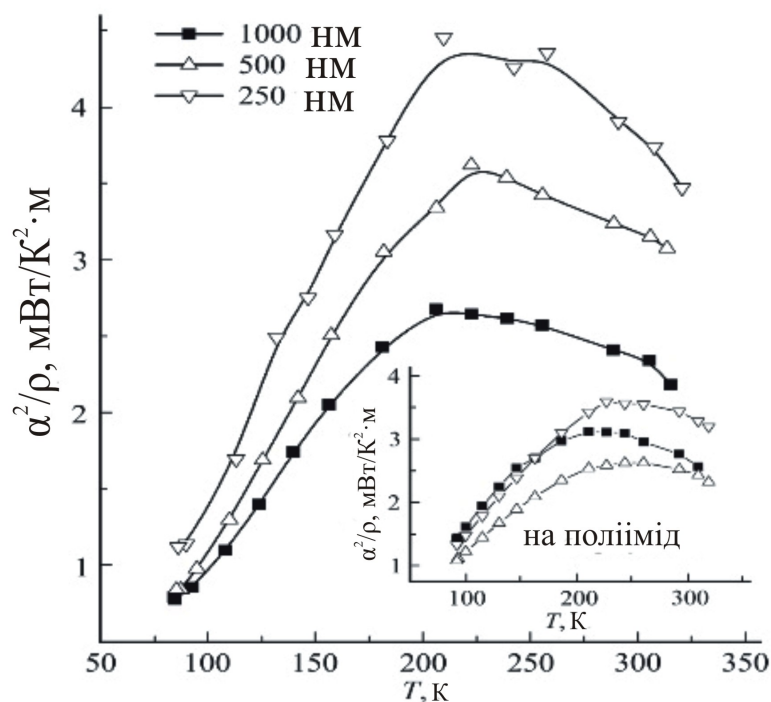


Рис. 7. Фактор потужності плівок $Bi_{0.88}Sb_{0.12}$ різної товщини на слоїді.
На вставці - фактор потужності плівок $Bi_{0.88}Sb_{0.12}$ різної товщини на Поліїміді.

Висновок

Встановлено, що використання плівок на підкладках з великим температурним розширенням призводить до зменшення термоЕРС, особливо в низькотемпературній області. Максимальне значення термоЕРС і фактора потужності відповідає товстим блоковим плівкам $Bi_{0.88}Sb_{0.12}$ на слоїді. В даних плівках отримано максимальне значення фактора потужності 4 мВт / К² · м за температур 200-250 К. Перспективним для досягнення високих значень термоелектричної потужності видається дослідження ультратонких монокристалічних плівок вісмут-сурма з досяжною мінімальною дефектністю і великою досконалістю поверхні, що забезпечує велику довжину когерентності носіїв заряду при переважанні дзеркального відбиття від поверхонь плівки. Однак у даний момент технологія створення таких плівок не відпрацьована.

Література

1. Hicks LD, Dresselhaus MS Effect of quantum-well structures on the thermoelectric figure of merit // Phys. Rev. B. - № 47. - 1993. - P. 12727.
2. Dresselhaus M.S, Dresselhaus G., Sun X., Zhang Z., Cronin S.B, Koga T. Low-dimensional thermoelectric materials // Phys. Solid State. - № 41. - 1999. - P. 679.
3. Ніколаєва АА, Конопко Л.А., Гіцу Д.В., Хубер ТЕ, Пара Г.І., Цуркан А. Вплив магнітного поля, пружного розтягу і розмірів на термоелектричні властивості нанониток вісмуту // Термоелектрика. - № 2. - 2008. - С. 21-37.
4. Дмитрієв А. В., Звягін І. П., Сучасні тенденції розвитку фізики термоелектричних матеріалів // УФН. - Т. 180. - № 8. - 2010. - С. 821-838.
5. Ovsyannikov S.V, Shchennikov V.V., Vorontsov G.V., Manakov A.Y., Likhacheva A.Y., Kulbachinskii

- V.A. Giant improvement of thermoelectric power factor of Bi₂Te₃ under pressure // Journal of Applied Physics. - № 104. - 2008. - P. 053 713.
6. Demidov E.V., Grabov V.M., Komarov V.A., Suslov A.V., Suslov M.V. The method of measuring the thermoelectric power in the thin films of the semimetals and narrow-gap semiconductors formed on the thin substrates // Journal of Physics: Conference Series. - № 857. - 2017. - P. 012 006.
 7. Грабів В.М., Демидов Е.В., Іванова Є. К., Комаров В.А., Каблукова Н.С., Крушельницький А.Н., Старіцин М.В. Вплив відпалу при температурі вище температури солідусу на структуру і гальваноманітних властивостей тонких плівок твердого розчину Ві₉₂Сb₈ // Журнал технічної фізики. - Т. 87. - № 7. - 2017. - С. 1071-1077.
 8. Grabov V.M., Komarov V.A., Demidov E.V., Khristich E.E. The occurrence of the classic size effect in single crystal bismuth films // Moldavian Journal of the Physical Sciences. - Vol. 10. - № 1. - 2011. - P. 87-95.
 9. Грабов В.М., Демидов Є.В., Комаров В.А. Обмеження рухливості носіїв заряду в плівках вісмуту, обумовлене їх блоковою структурою // Поверхня. Рентгенівські, синхротронного і нейтронні дослідження. - № 2. - 2011. - С.81-85.
 10. Kusagaya K., Hagino H., Tanaka S. Miyazaki, K., Takashiri M. Structural and Thermoelectric Properties of Nanocrystalline Bismuth Telluride Thin Films Under Compressive and Tensile Strain // Journal of Electronic Materials. - Vol. 44. - № 6. - 2015. - P. 1632.
 11. Бухараева А. А., Звездин А. К., Пятаков А. П., Фетисов Ю. К. Стрейтроніка - новий напрямок мікро- і наноелектроніки і науки про матеріали // УФН. - Т. 188. - 2018. - С. 1288-1330.
 12. Ovsyannikov SV, Shchennikov VV, Vorontsov GV, Manakov AY, Likhacheva AY, Kulbachinskii VA Giant improvement of thermoelectric power factor of Bi₂Te₃ under pressure // Journal of Applied Physics. - № 104. - 2008. - P. 053 713.
 13. Nikolaeva A., Huber T., Konopko L., Tsurkan A. Features of Lifshits electron topological transitions induced by anisotropic deformation in thin wires of doped bismuth. // J. Low Temp. Phys. - № 159. - 2010. - P. 258.
 14. Грабов В.М., Демидов Є.В., Комаров В.А. Оптимізація режимів термічного осадження у вакуумі плівок вісмуту при контролі їх дефектності методом атомно-силової мікроскопії // Фізика твердого тіла. - Т 52. - № 6. - 2010. - С. 1219 - одна тисячу двісті двадцять дві.
 15. Грабов В.М., Демидов Є.В., Комаров В.А., Кисельова Н.І. Термоелектричні властивості плівок вісмуту, що мають наноблочну структуру // Термоелектрика. - № 4. - 2011. - С. 73-79.
 16. Demidov E.V., Grabov V.M., Komarov V.A., Suslov A.V., Suslov M.V. The method of measuring the thermoelectric power in the thin films of the semimetals and narrow-gap semiconductors formed on the thin substrates // Journal of Physics: Conference Series. - № 857. - 2017. - P. 012 006.
 17. Демидов Є.В., Грабов В.М., Комаров В.А., Крушельницький А.Н., Суслов А.В., Суслов М.В. Особливості прояву квантового розмірного ефекту в явищах переносу в тонких плівках вісмуту на підкладках із слюди // Фізика і техніка напівпровідників. - Т. 53. - № 6. - 2019. - С.736-740.
 18. Грабов В.М., Демидов Е.В., Комаров В.А. Клімант М.М. Атомно-силова мікроскопія декорованих оксидуванням дефектів плівок вісмуту // Фізика твердого тіла. - Т. 51. - № 4. - 2009. - С. 800-802.
 19. Грабов В.М., Демидов Е.В., Комаров В.А. Атомно-силова мікроскопія плівок вісмуту // Фізика твердого тіла. - Т. 50. - №7. - 2008. - С. 1312-1316.

Надійшла до редакції 18.05.2020

Грабов В. М., докт. физ.-мат. наук, профессор

Демидов Е. В., канд. физ.-мат. наук

Комаров В. А., канд. физ.-мат. наук,

Суслов А. В., Герега В. А., Ефимов Д. Д.

Российский государственный педагогический университет
им. А. И. Герцена, наб. р. Мойки, 48, Санкт-Петербург, 191186, Россия

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТОНКИХ ПЛЕНОК ВИСМУТА И ТВЕРДОГО РАСТВОРА ВИСМУТ-СУРЬМА

Методом, исключающим возникновение внешних деформационных воздействий на систему пленка–подложка, были исследованы температурные зависимости удельного сопротивления и термоЭДС, рассчитан фактор термоэлектрической мощности в интервале температур 77-300К для пленок твердого раствора висмут-сурьма на подложках с различным коэффициентом температурного расширения. Установлено, что для получения максимальной термоЭДС критически важным является соотношения размера кристаллитов и толщины пленки, что обусловлено различным ограничением подвижностей электронов и дырок поверхностью и границами кристаллитов. Максимальное значение термоЭДС и фактора мощности соответствует толстым блочным пленкам $Bi_{0.88}Sb_{0.12}$ на слюде. Работа выполнена в рамках государственного задания при финансовой поддержке Минпросвещения России (проект № FSZN-2020-0026). Библ. 19, рис. 7, табл. 1.

Ключевые слова: висмут, висмут-сурьма, термоЭДС, размерный эффект, фактор мощности

V.M.Grabov, doct. phys.– math. sciences, professor,

E.V. Demidov, cand. phys.– math. sciences,

V.A.Komarov, cand. phys.– math. sciences, docent,

A.V. Suslov, V.A.Gerega, D.D.Yefimov

The Herzen State Pedagogical University,
48 Moyka Embankment, St-Petersburg, 191186, Russia

THERMOELECTRIC PROPERTIES OF THIN FILMS OF BISMUTH AND BISMUTH-ANTIMONY SOLID SOLUTION

The temperature dependences of the resistivity and thermoEMF were investigated by the method that excludes the occurrence of external strain in the film-substrate system, and the thermoelectric power factor was calculated in the temperature range of 77 to 300K for bismuth-antimony solid solution films on substrates with different thermal expansion coefficients. It has been found that to get the maximum thermoEMF, the ratio of the crystallite size and film thickness is critically important, which is due to the different confinement of electrons and holes mobility by the surface and crystallite boundaries. The

maximum thermoEMF and power factor correspond to thick block films of $Bi_{0.88}Sb_{0.12}$ on mica. The research was supported by the Ministry of Education of the Russian Federation as part of a state assignment (project No. FSZN-2020-0026). Bibl. 19, Fig. 7, Tabl. 1.

Key words: bismuth, bismuth-antimony, thermoEMF, size effect, power factor.

References

1. Hicks L.D., Dresselhaus M.S. (1993). Effect of quantum-well structures on the thermoelectric figure of merit. *Phys. Rev. B*, 47, 12727.
2. Dresselhaus M.S., Dresselhaus G., Sun X., Zhang Z., Cronin S. B., Koga T. (1999). Low-dimensional thermoelectric materials. *Phys. Solid State*, 41, 679.
3. Nikolaeva A.A., Konopko L.A., Gitsu D.V., Huber T.E., Para G.I., Tsurkan A. (2008). Influence of magnetic field, elastic tension and dimensions on the thermoelectric properties of bismuth nanowires. *J. Thermoelectricity*, 2, 21-37.
4. Dmitriev A.V., Zviagin I.P. (2010). Sovremennyye tendentsii razvitiia fiziki termoelektricheskikh materialov [Modern development trends of thermoelectric materials]. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk- Advances in Physical Sciences*, 180(8), 821–838 [in Russian].
5. Ovsyannikov S.V., Shchennikov V.V., Vorontsov G.V., Manakov A.Y., Likhacheva A.Y., Kulbachinskii V.A. (2008). Giant improvement of thermoelectric power factor of Bi_2Te_3 under pressure. *J. Applied Physics*, 104, 053713.
6. Demidov E.V., Grabov V.M., Komarov V.A., Suslov A.V., Suslov M.V. (2017). The method of measuring the thermoelectric power in the thin films of the semimetals and narrow-gap semiconductors formed on the thin substrates. *Journal of Physics: Conference Series*, 857, 012006.
7. Grabov V.M., Demidov E.V., Ivanova E.K., Komarov V.A., Kablukova N.S., Krushelnitskiy A.N., Staritsyn M.V. (2017). Influence of annealing at a higher than solidus temperature on the structure and galvanomagnetic properties of thin films of $Bi_{92}Sb_8$ solid solution. *Technical Physics*, 87(7), 1071-1077.
8. Grabov V.M., Komarov V.A., Demidov E.V., Khristich E.E. (2011). The occurrence of the classic size effect in single crystal bismuth films. *Moldavian Journal of the Physical Sciences*, 10(1), 87-95.
9. Grabov V.M., Demidov E.V., Komarov V.A. (2011). Ogranicheniie podvizhnosti nositelei zariada v plionkakh vismuta, obuslovennoie ikh blochnoi strukturoi [Restriction of charge carrier mobility in bismuth films due to their block structure]. *Poverkhnost', sinkhrotronnyie i neitronnyie issledovaniia – J.Surf.Invest.:X-Ray, Synchrotron Neutron Techn.*, 2, 81-85 [in Russian].
10. Kusagaya K., Hagino H., Tanaka S. Miyazaki, K., Takashiri M. (2015). Structural and thermoelectric properties of nanocrystalline bismuth telluride thin films under compressive and tensile strain. *J. Electronic Materials*, 44(6), 1632.
11. Bukharaieva A.A., Zvezdin A.K., Piatakov A.P., Fetisov Yu.K. (2018). Streintronika – novoie napravleniie mikro- i nanoelektroniki i nauki o materialakh [Straintronics – a new direction of micro- and nanoelectronics and materials science]. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk- Advances in Physical Sciences*, 188, 1288-1330 [in Russian].
12. Ovsyannikov S.V., Shchennikov V.V., Vorontsov G.V., Manakov A.Y., Likhacheva A.Y., Kulbachinskii V.A. (2008). Giant improvement of thermoelectric power factor of Bi_2Te_3 under pressure. *J. Applied Physics*, 104, 053713.
13. Nikolaeva A., Huber T., Konopko L., Tsurkan A. Features of Lifshits electron topological transitions induced by anisotropic deformation in thin wires of doped bismuth. // *J. Low Temp. Phys.* - № 159. - 2010. - P. 258.

14. Grabov V.M., Demidov E.V., Komarov V.A. (2010). Optimizatsiia rezhimov termicheskogo osazhdeniia v vakuume plionok vismuta pri kontrole ikh defektnosti metodom atomno-silovoi mikroskopii [Optimization of thermal deposition in vacuum of bismuth films while monitoring their defectiveness by atomic force microscopy]. *Fizika Tverdogo Tela- Solid State Physics*, 52(6), 1219 – 1222 [in Russian].
15. Grabov V.M., Demidov E.V., Komarov V.A., Kiseleva N.I. (2011). Thermoelectric properties of bismuth films having nanoblock structure. *J. Thermoelectricity*, 4, 73-79.
16. Demidov E.V., Grabov V.M., Komarov V.A., Suslov A.V., Suslov M.V. (2017). The method of measuring the thermoelectric power in the thin films of the semimetals and narrow-gap semiconductors formed on the thin substrates. *Journal of Physics: Conference Series*, 857, 012006.
17. Demidov E.V., Grabov V.M., Komarov V.A., Krushelnitskiy A.N., Suslov A.V., Suslov M.V. (2019). Osobennosti proiavleniia kvantovo-razmernogo effekta v yavleniiakh perenosa v tonkikh plionkah vismuta na podlozhkakh iz sliudy [Peculiarities of quantum size effect manifestation in transport phenomena in bismuth thin films on mica substrates]. *Fizika i Tekhnika Poluprovodnikov – Semiconductors*, 53(6), 736-740 [in Russian].
18. Grabov V.M., Demidov E.V., Komarov V.A., Klimantov M.M. (2009). Atomno-silovaia mikroskopiiia dekorirovannykh oksidirovaniem defektov plionok vismuta [Atomic-force microscopy of bismuth films decorated with oxidation of defects]. *Fizika Tverdogo Tela - Physics of the Solid State*, 51(4), 800-802 [in Russian].
19. Grabov V.M., Demidov E.V., Komarov V.A. (2008). Atomno-silovaia mikroskopiiia plionok vismuta [Atomic-force microscopy of bismuth films]. *Fizika Tverdogo Tela – Physics of the Solid State*, 50(7), 1312-1316 [in Russian].

Submitted 18.05.2020