

6. Zimkina T. M., Fomichev V. A. *Ul'tramyagkaya rentgenovskaya spektroskopiya* [Ultrasoft X-ray spectroscopy]. Leningrad: Leningrad State University, 1971. 132 p. (In Russ.)

7. Rumsh M. A., Lukirskii A. P., Shchemelev V. N. On the question of the application of vtorichnoelektronnykh multipliers for the study of soft X-ray spectra. *Math. USSR Academy of Sciences. Ser. Nat.* 1961, vol. 25, no. 8, pp. 1060–1065. (In Russ.)

8. Filatov E. O. *Spektroskopiya zerkal'nogo otrazheniya i rasseyaniya myagkogo rentgenovskogo izlucheniya poverkhnostyami tverdykh tel* [Spectroscopy specular reflection and scattering of soft X-ray solid surfaces]: Diss. ... Doctor of Physics and Mathematics. S.-Pb., 2000. 374 p. (In Russ.)

9. Chelikowsky J., Chadi D. J., Cohen M. L. Calculated valence-band densities of states and photoemission spectra of diamond and zinc-blende semiconductors. *Phys. Rev. B.* 1973, vol. 8, no. 6, pp. 2786–2794.

10. Chelikowsky J. R., Cohen M. L. Electronic structure of silicon. *Phys. Rev. B.* 1974, vol. 10, no. 12, pp. 5095–5107.

11. Euaruksakul C., Chen F., Tanto B., Ritz C. S., Paskiewicz D. M., Himpel F. J., Savage D. E., Liu Zheng, Yao Yugui, Liu

Feng, Lagally M. G. Relationships between strain and band structure in Si(001) and Si(110) nanomembranes. *Phys. Rev. B.* 2009, vol. 80, pp. 115323.

12. Andreeva M. A., Domashevskaya E. P., Odintsova E. E., Terekhov V. A., Turishchev S. Yu. Interference phenomena of synchrotron radiation in TEY spectra for silicon-on-insulator structure. *J. Synchrotron Radiation.* 2012, vol. 19, iss. 4, pp. 609–618. DOI: 10.1107/S0909049512022844

13. Zheludeva S. I., Kovalchuk M. V., Novikova N. N., Sosphenov A. N. The role of film thickness in the realization of X-ray waveguide effects at total reflection. *Adv. X-ray Chem. Anal. Jpn.* 1995, vol. 26s, pp. 181–186.

Acknowledgements. This work was supported by the Federal Target Program «Scientific and pedagogical personnel of innovative Russia in 2009–2013», and supported in part by NSF Grant To. DMR-0537588 (The Synchrotron Radiation Center, University Of Wisconsin–Madison).

Received October 18, 2012

УДК 537.323:621.315.592

ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРНЫХ И РАЗМЕРНЫХ СВОЙСТВ СПИННИНГОВАННЫХ ПОРОШКОВ p - $\text{Bi}_{0,5}\text{Sb}_{1,5}\text{Te}_3$, СКОМПАКТИРОВАННЫХ ГОРЯЧИМ ВАКУУМНЫМ ПРЕССОВАНИЕМ И ИСКРОВЫМ ПЛАЗМЕННЫМ СПЕКАНИЕМ

© 2014 г. А. А. Мельников^{1,2}, В. Г. Костишин¹, С. А. Кичик², В. В. Аленков²

¹Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Ленинский просп., д. 4, Москва, 119049, Россия,

²ООО НПО «Кристалл», ул. Станционная, д. 45-Б, Королев, Московская обл., 141060, Россия

Получены порошки термоэлектрического материала $\text{Bi}_{0,5}\text{Sb}_{1,5}\text{Te}_3$ p -типа проводимости методом спиннингования расплава (сверхбыстрой закалки из жидкого состояния). Определены их структурные и размерные характеристики. Установленная кристаллографическая группа и параметры решетки порошкового материала соответствуют материалу p - $\text{Bi}_{0,5}\text{Sb}_{1,5}\text{Te}_3$, закristализованному в равновесных условиях, что свидетельствует об идентичности их кристаллической структуры. Из порошков методами горячего вакуумного прессования и искрового плазменного спекания скомпактированы образцы. Установлено, что при компактировании спиннингованных порошков p - $\text{Bi}_{0,5}\text{Sb}_{1,5}\text{Te}_3$ возможно возникновение частичной аксиальной текстуры [001], направленной вдоль оси приложения давления. Электрофизические и термоэлектрические свойства образцов измерены в направлении, перпендикулярном к оси приложения давления, в диапазоне температур 100–700 К. Показано, что образцы, приготовленные указанными методами, обладают низкой теплопро-

водностью, сохраняя при этом значения электропроводности и коэффициента Зеебека, сравнимые с аналогичными величинами для традиционных закristализованных материалов. За счет этого термоэлектрическая эффективность ZT достигает значений 1,05–1,15 при 330–

350 К, что говорит о высокой перспективности применения указанных технологий.

Ключевые слова: термоэлектричество, спиннингование, спиннингованные порошки, теллуриды висмута и сурьмы, искровое плазменное спекание.

Введение

Термоэлектричество в последнее время вызывает все больший интерес как альтернативный способ преобразования тепловой энергии в электрическую и наоборот. Расширение области применения термоэлектрических материалов связано с увеличением безразмерной величины термоэлектрической эффективности ZT , равной

$$ZT = \frac{\alpha^2 \sigma}{\kappa} T, \quad (1)$$

где α — коэффициент Зеебека, В/К; σ — удельная электропроводность, $\text{Om}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$; κ — удельная теплопроводность, $\text{Вт} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; T — температура материала, К.

Научные исследования, направленные на увеличение термоэлектрической эффективности, ведут в направлениях как опти-

Мельников Андрей Андреевич^{1,2} — аспирант(1), ведущий специалист(2); **Костишин Владимир Григорьевич**¹ — доктор физ.-мат. наук, доцент, заведующий кафедрой; **Кичик Сергей Александрович**² — ведущий специалист; **Аленков Владимир Владимирович**² — генеральный директор.

мизации используемых составов материалов и технологий (нормально направленная кристаллизация, горячее вакуумное прессование, экструзия), так и поиска новых материалов (клатраты, скуттерудиты, наноматериалы) и технологий (спиннингование, искровое плазменное спекание).

Спиннингование (англ. *melt spinning*) — перспективная технология приготовления материала, основанная на сверхбыстром охлаждении расплава, применяемая в основном для получения припоев и аморфных сплавов в металлургии [1, 2]. Метод заключается в подаче на круглый охлаждаемый барабан расплавленного материала и получения его в виде тонких закристаллизовавшихся лент или порошка. Скорости охлаждения материала могут достигать 10^4 — 10^7 (К/с) [1], за счет чего структурные свойства и размеры кристаллитов приготавливаемого материала отличаются от материала, закристаллизованного в равновесных условиях.

Получение термоэлектрического материала методом спиннингования впервые было описано в работах [3, 4]. В работах [5—8] были получены материалы с эффективностью ZT до 1,5. В последнее время значения ZT спиннигованных материалов до 1,3 подтверждены в работе [9]. Однако в работах [3—9] недостаточно внимания уделено объяснению подобных результатов.

Цель работы — предварительный структурный анализ спиннигованных порошков, пробная прессовка методами горячего вакуумного прессования (ГВП) и искрового плазменного спекания (ИПС) и оценка свойства полученных материалов.

Образцы и методы исследования

Процесс спиннингования проводили при температуре расплавленного материала 923 К. Частота вращения барабана составляла 1200 об/мин, что приводило к скоростям кристаллизации порядка 10^5 — 10^6 К/с.

Оценку морфологии, размеров и формы спиннигованных порошков выполняли на растровом электронном микроскопе (РЭМ) FEI Phenom. Порошки подвергали горячему вакуумному прессованию при температуре 743 К в течение 20 мин и искровому плазменному спеканию при температуре 743 К в течение 5 мин при одинаковом приложенном давлении. Стабилизирующий отжиг спрессованных образцов осуществляли при температуре 593 К в течение 12 ч.

Рентгенографические исследования спиннигованных порошков с разными размерами частиц, а также спрессованного материала проводили с помощью дифрактометра ДРОН-УМ ($\text{CuK}\alpha$ -излучение). Параметры решетки элементарной ячейки определяли методом Ритвельда по дифрактограмме с наименьшей фракцией порошка (< 40 мкм) ввиду наибольшего усреднения. Размеры области когерент-

ного рассеяния (ОКР) были определены по формуле Шерера:

$$d = \frac{k\lambda}{\beta \cos\theta}, \quad (2)$$

где d — средний размер кристаллитов, нм; λ — длина волны использованного рентгеновского излучения, $\lambda(\text{CuK}\alpha) = 0,154051$ нм; β — ширина пика на половине высоты, рад; θ — угол дифракции, рад; k — константа Шерера = 0,9.

Измерения предела прочности на сжатие спрессованных образцов выполняли на электродинамической системе ElectroPuls E1000 при комнатной температуре.

Коэффициент Зеебека, удельные электро- и теплопроводность образцов размером $5 \times 5 \times 10$ мм³ измеряли при комнатной температуре до и после отжига и в интервале температур 100—700 К после отжига. Решеточную составляющую теплопроводности определяли как

$$\kappa_p = \kappa - \kappa_{эл}, \quad (3)$$

$$\kappa_{эл} = A\sigma T, \quad (4)$$

где κ_p — решеточная составляющая теплопроводности; A — число Лоренца; T — температура.

Параметр термоэлектрической эффективности материалов ZT рассчитывали по формуле (1).

Результаты и их обсуждение

РЭМ-изображения частиц спиннигованного материала $\text{Bi}_{0,5}\text{Sb}_{1,5}\text{Te}_3$ представлены на рис. 1. Большинство частиц имеет форму плоских пластин с размерами от десятков до сотен микрометров и толщиной от единиц до десятков микрометров, более мелкие частицы имеют объемную форму (см. рис. 1, а). Плоские стороны частиц-пластин параллельны охлаждаемой плоскости барабана, их поверхности могут быть полностью заполнены материалом (см. рис. 1, г) или иметь промежутки между кристаллитами (см. рис. 1, б и в). Такое различие в виде поверхностей одних и тех же частиц объясняется особенностью кристаллизации материалов в процессе спиннингования. При попадании на охлаждаемый барабан расплав кристаллизуется в каждой точке поверхности соприкосновения, образуя сплошную, полностью заполненную материалом поверхность. Далее за счет высоких скоростей кристаллизации и свойственной халькогенидам висмута и сурьмы анизотропии роста материал кристаллизуется по преимущественным кристаллографическим направлениям, в результате чего на поверхности наблюдаются субмикрометровые кристаллиты в виде пластин или многоугольников (см. рис. 1, б и в).

РЭМ-изображения, снятые в перпендикулярном направлении к частицам (см. рис. 1, д и е) позволяют

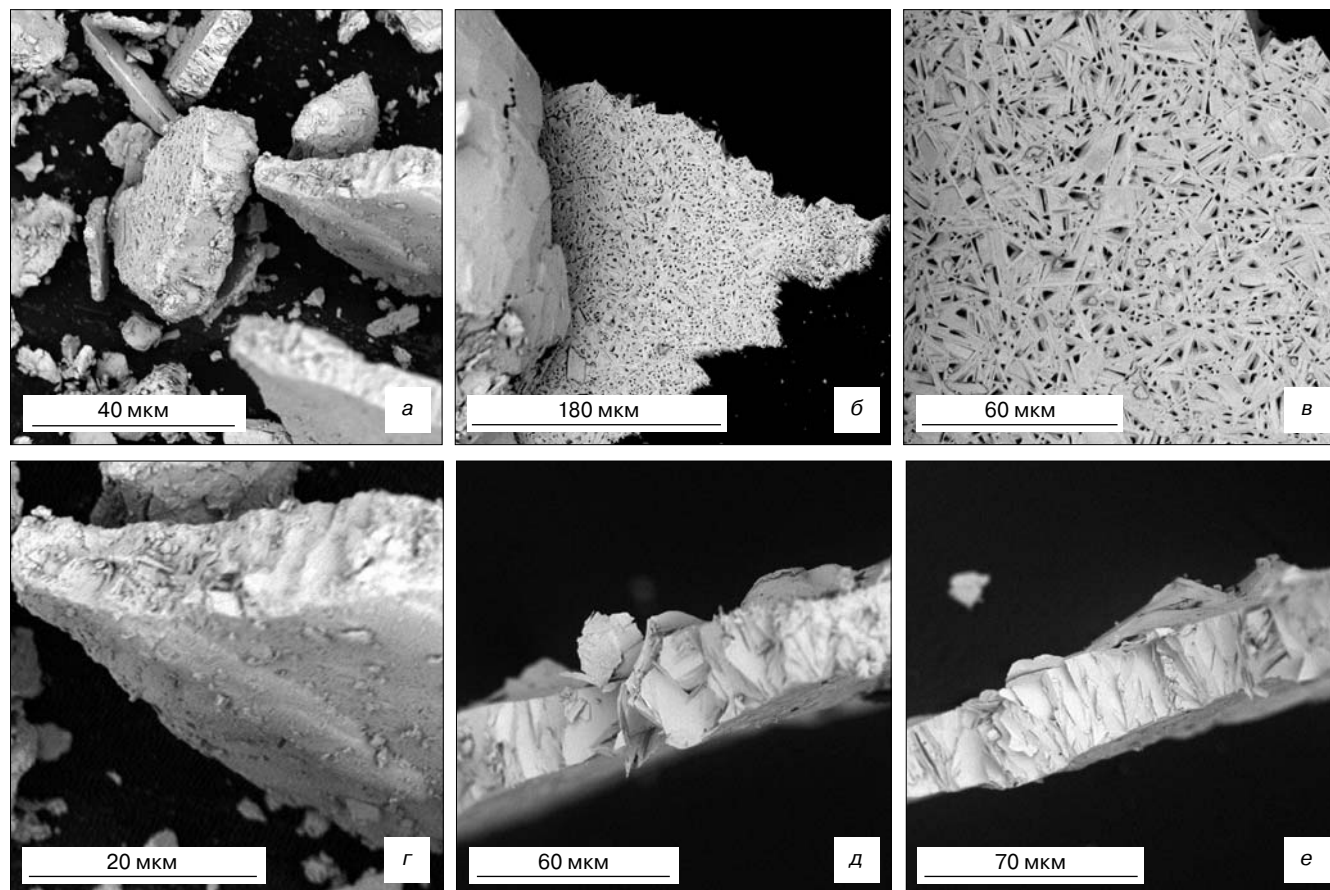


Рис. 1. РЭМ-изображения спиннингованных частиц $p\text{-Bi}_{0,5}\text{Sb}_{1,5}\text{Te}_3$

сделать вывод о слоистой структуре спиннингованных частиц. Частицы порошка состоят из множества не строго ориентированных кристаллитов в форме чешуек, толщина которых составляет от десятков нанометров до единиц микрометров.

Рентгеновские дифрактограммы спиннингованных порошков разных размеров представлены на рис. 2. В качестве размера указан больший линейный размер частичек. Набор основных пиков отражений по углу 2θ полностью соответствует отражениям от образца материала $\text{Bi}_{0,5}\text{Sb}_{1,5}\text{Te}_3$, закристаллизованного в равновесных условиях. Кристаллографическая группа — $R\bar{3}m$. Небольшое несоответствие интенсивностей пиков исследованных и эталонного $\text{Bi}_{0,5}\text{Sb}_{1,5}\text{Te}_3$, особенно в порошках с более крупными фракциями, связано с частичной текстуризацией порошков при проведении измерений. Идентичность кристаллической структуры спиннингованных порошков и эталонного $\text{Bi}_{0,5}\text{Sb}_{1,5}\text{Te}_3$ дает основание полагать, что пластины-кристаллиты, из которых состоит спиннингованная частица, представляют собой набор чередующихся монослоев атомов — $\text{Te}^{(1)} - \text{Bi}, \text{Sb} - \text{Te}^{(2)} - \text{Bi}, \text{Sb} - \text{Te}^{(1)}$ —, как и в материале $\text{Bi}_{0,5}\text{Sb}_{1,5}\text{Te}_3$, закристаллизованном в равновесных условиях [10]. Расслоения по плоскостям спайности, вероятно, также преимущественно происходят между соседними слоями атомов $\text{Te}^{(1)}$ ввиду наименьшей энергии связи. Таким образом, можно

сделать вывод, что структура спиннингованных частиц отличается от структуры равновесно закристаллизованных материалов ориентацией кристаллографических плоскостей, морфологией поверхностей, а также размером и формой кристаллитов.

Параметры ячейки спиннингованных частиц $\text{Bi}_{0,5}\text{Sb}_{1,5}\text{Te}_3$ были определены методом Ритвельда и составили следующие значения: $a = 0,439592$ нм, $c = 3,051287$ нм.

Размеры ОКР спиннингованных порошков $p\text{-Bi}_{0,5}\text{Sb}_{1,5}\text{Te}_3$ разных фракций представлены ниже.

Размер зерна, мкм	ОКР, нм
< 40	37,4
40—94	44,7
94—315	40,2
315—500	51,6

Так как установлено, что размеры ОКР составляют порядка десятков нанометров, есть основания сделать предположение о нанофрагментированности кристаллитов, наличии дефектов, двойниковании.

Спиннингованные порошки с размерами кристаллитов 40—94 мкм были скомпактированы методами ГВП и ИПС. Дифрактограммы горячепрессованных образцов, снятые с их граней, перпендикулярных и параллельных оси приложения давления,

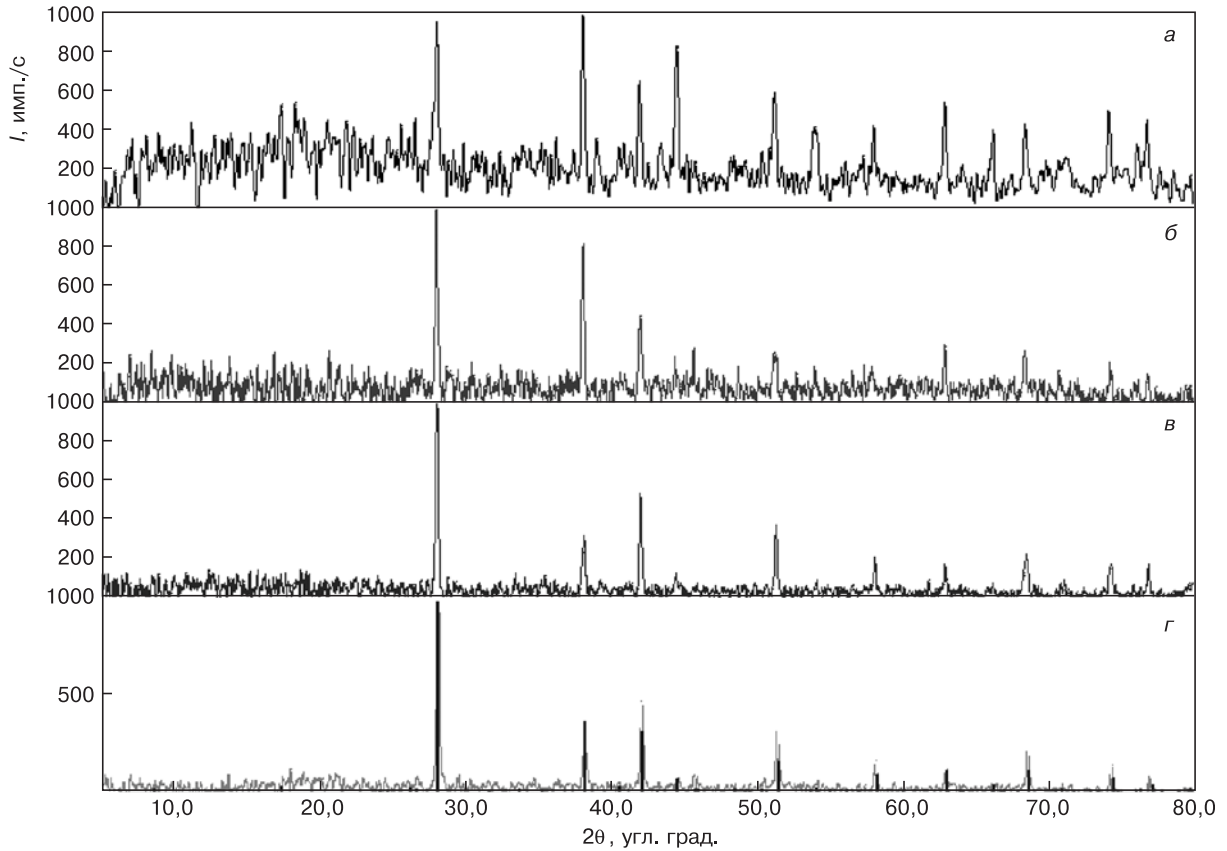


Рис. 2. Рентгеновские дифрактограммы спиннингованных порошков $p\text{-Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ разных размеров: а — 315–500 нм; б — 94–315 нм; в — 40–94 нм; г — <40 нм

представлены на рис. 3. На дифрактограмме, снятой с боковой грани, параллельной оси прессования, наблюдается повышение интенсивности отражения от плоскостей [110], на дифрактограмме, снятой с

торцевой грани, перпендикулярной к оси прессования, — повышение интенсивности отражений [003]. Таким образом, при компактировании спиннингованных порошков возможно образование частичной

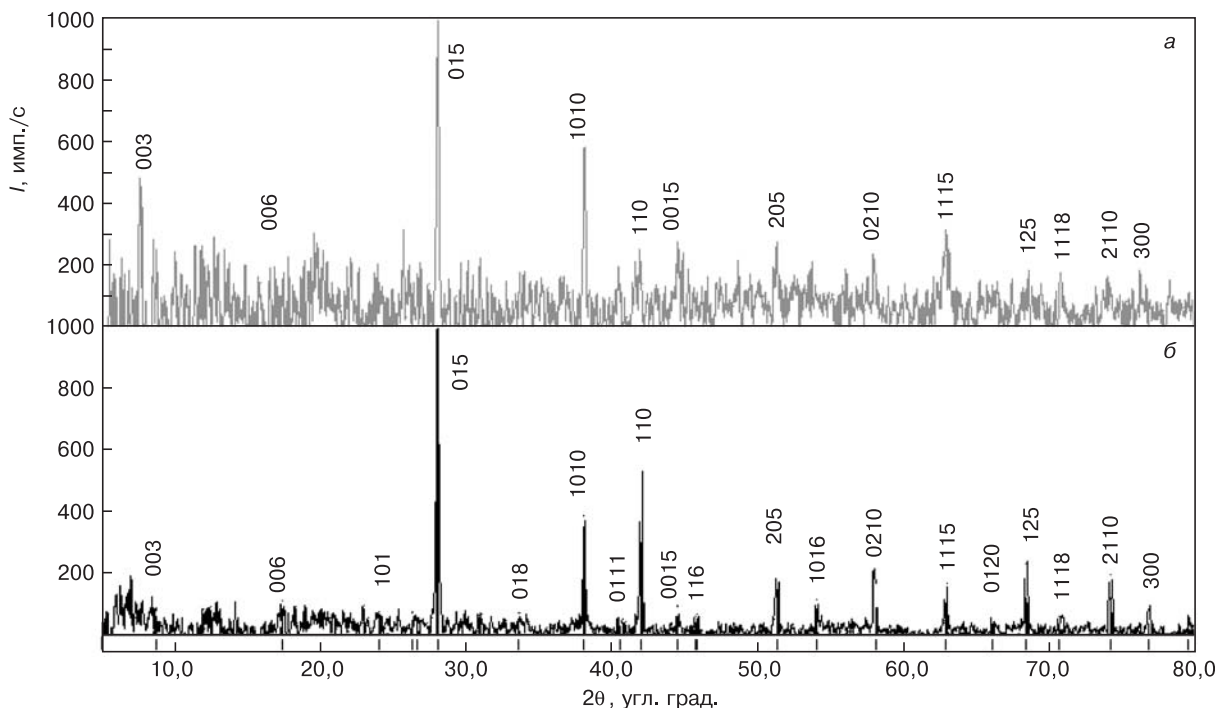


Рис. 3. Рентгеновские дифрактограммы прессованного спиннингованного образца $p\text{-Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ в плоскости, перпендикулярной (а) и параллельной (б) оси приложения давления

Термоэлектрические характеристики при 300 К скомпактированных спиннингованных порошков до и после отжига

Образец	α , мкВ/К	σ , Ом ⁻¹ ·см ⁻¹	$\kappa \cdot 10^3$, Вт/(см·К)	$Z \cdot 10^3$, К ⁻¹	α , мкВ/К	σ , Ом ⁻¹ ·см ⁻¹	$\kappa \cdot 10^3$, Вт/(см·К)	$Z \cdot 10^3$, К ⁻¹
	До отжига				После отжига			
ГВП	201	965	12,3	3,17	209	763	10,0	3,33
ИПС	180	1220	11,2	3,53	198	1101	12,8	3,37

аксиальной текстуры [001], направленной вдоль оси приложения давления, что может быть связано как с образованием текстур укладки, так и с деформационными процессами. Более подробное изучение образования текстуры во время компактирования спиннингованных порошков — цель дальнейших исследований.

Механическая прочность на сжатие материала, спрессованного из спиннингованных порошков, составила 65—75 МПа, что оказалось немногим выше средней прочности горячепрессованных механически измельченных порошков — 55—60 МПа [11]. Указанные свойства свидетельствуют о применимости материала для изготовления термоэлементов и микротермоэлементов для модулей Пельтье.

Термоэлектрические характеристики при 300 К скомпактированных спиннингованных порошков до и после 12-часового отжига представлены в таблице. После отжига термоэлектрическая эффективность Z увеличилась для горячепрессованного образца, однако уменьшилась для ИПС-образца, что может быть объяснено различными структурно-размерными изменениями в процессе отжига.

Графики зависимостей термоэлектрических характеристик отожженных образцов в направлении, перпендикулярном к оси приложения давления, показаны на рис. 4. Наблюдаемые значения теплопроводностей на 10—30 % ниже средних значений для закристаллизованных материалов, что объясняется рассеянием тепловых фононов на границах

зерен вследствие структурных особенностей спиннингованных порошков. Значения коэффициентов Зеебека и электропроводностей исследованных образцов и закристаллизованных материалов примерно соответствуют друг другу. За счет этого параметр ZT скомпактированных спиннингованных материалов достигает значений 1,05—1,15 в области 330—350 К.

Заключение

Исследованы структурные и размерные характеристики порошков $p\text{-Bi}_{0,5}\text{Sb}_{1,5}\text{Te}_3$, полученных методом спиннингования расплава. Установлено, что закристаллографическая группа и параметры решетки идентичны закристаллизованному в равновесных условиях материалу. Ключевыми особенностями спиннингованных порошков, способствующими повышению термоэлектрических свойств, по-видимому, являются размер и форма кристаллитов, их ориентация в пространстве, морфология поверхностей.

Определены размеры ОКР частиц порошков; их значения составили десятки нанометров. Это дает основания полагать, что кристаллиты спиннингованного $\text{Bi}_{0,5}\text{Sb}_{1,5}\text{Te}_3$ нанофрагментированы.

Установлено, что при компактировании спиннингованных порошков возможно возникновение частичной аксиальной текстуры [001], направленной вдоль оси приложения давления.

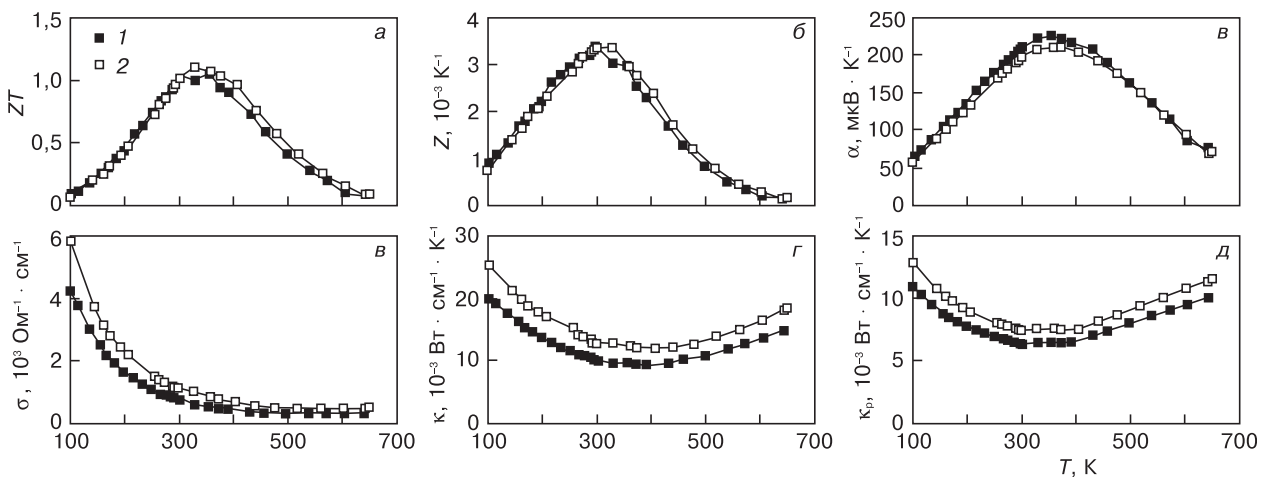


Рис. 4. Температурные зависимости термоэлектрических характеристик спиннингованных образцов $p\text{-Bi}_{0,5}\text{Sb}_{1,5}\text{Te}_3$, скомпактированных методами ГВП (1) и ИПС (2):

а — $ZT(T)$; б — $Z(T)$; в — $\alpha(T)$; г — $\sigma(T)$; д — $\kappa(T)$; е — $\kappa_p(T)$

Измерены температурные зависимости термоэлектрических характеристик спиннингованного материала, скомпактированного методами ГВП и ИПС. Показано, что образцы обладают более низкой теплопроводностью по сравнению с кристаллизованными материалами, за счет чего параметр ZT достигает значений 1,05—1,15 при 330—350 К.

Библиографический список

1. Cahn, R. W. *Physical Metallurgy* / Ed. R. W. Cahn, P. Haasen. – New York : Elsevier Sci. Publ., 1983. – 1042 p.
2. Белов, А. Ф. Получение однородных твердых растворов методом сверхбыстрого охлаждения / А. Ф. Белов, В. М. Глазов, Ю. З. Ятманов, А. Я. Потемкин // ДАН СССР. – 1984. – Т. 277, № 5. – С. 1155—1160.
3. Глазов, В. М. Структурные особенности сплавов системы Bi–Te, полученных при сверхбыстрой закалке жидкой фазы / В. М. Глазов, Ю. В. Ятманов, А. Б. Иванова // Изв. АН СССР. Неорган. материалы. – 1986. – Т. 22, № 4. – С. 596—599.
4. Гогишвили, О. Ш. Получение сплавов на основе халькогенидов висмута и сурьмы методом сверхбыстрого охлаждения расплавов / О. Ш. Гогишвили, С. П. Лалыкин, С. П. Криворучко // VII Всесоюз. конф. «Химия, физика и техническое применение халькогенидов». – Ужгород, 1988. – С. 368.
5. Xie, W. J. Nanostructure and thermoelectric properties of p -type $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ compound prepared by melt spinning technique /

W. J. Xie, X. F. Tang, G. Chen, Q. Jin, Q. J. Zhang // The 26th Internat. Conf. on Thermoelectrics. – Jeju Island (Korea), 2007. pp. 23—26.

6. Xie, W. Unique nanostructures and enhanced thermoelectric performance of melt-spun BiSbTe alloys / W. Xie, X. Tang, Y. Yan, Q. Zhang, T. Tritt // *J. Appl. Phys.* – 2009. – V. 94 – P. 102111/1–3.

7. Xie, W. High thermoelectric performance BiSbTe alloy with unique low-dimensional structure / W. Xie, X. Tang, Y. Yan, Q. Zhang, T. Tritt // *J. Appl. Phys.* – 2009. – V. 105. – P. 113713/1–8.

8. Xie, W. Identifying the specific nanostructures responsible for the high thermoelectric performance of (Bi, Sb)₂Te₃ nanocomposites / W. Xie, J. He, H. Kang, X. Tang, S. Zhu, M. Laver, S. Wang, J. Copley, C. Brown, Q. Zhang, T. Tritt // *Nano Lett.* – 2010. – V. 10. – P. 3283—3289.

9. Иванова, Л. Д. Спиннингование расплава — перспективный метод получения материалов твердого раствора теллуридов висмута и сурьмы / Л. Д. Иванова, Л. И. Петрова, Ю. В. Гранаткина, В. Г. Леонтьев, А. С. Иванов, С. А. Варламов, Ю. П. Прилепо, А. М. Сычев, А. Г. Чуйко, И. В. Башков // Термоэлектричество. – 2013. – № 1. – С. 34—45.

10. Гольцман, Б. М. Полупроводниковые термоэлектрические материалы на основе Bi₂Te₃ / Б. М. Гольцман, В. А. Кудин, И. А. Смирнов – М.: Наука, 1972

11. Кичик, С. А. Исследование механических и термоэлектрических свойств материалов Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te₃, полученных методом вакуумного прессования / С. А. Кичик, А. А. Мельников, И. С. Маракушев, А. Н. Корякин // XIII Межгосударственный семинар «Термоэлектрики и их применения». – С.-Пб, 2012.

Статья поступила в редакцию 23 июня 2014 г.

ISSN 1609–3577 *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki* = *Materials of Electronics Engineering*. 2014, vol. 17, no. 2, pp. 86–91.

Study of Structural and Dimensional Characteristics of the Melt Spun p -Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te₃ Powders Compacted by Vacuum Hot Pressing and Spark Plasma Sintering

Andrei Andreyevich Melnikov^{1,2} — Postgraduate Student (1), Leading Specialist (2); Vladimir Grigorievich Kostishin¹ — Dr. Sci. (Phys.–Math.), Associate Professor, Head of Chair «Technology of Materials of Electronics»; Sergey Aleksandrovich Kichik² — Leading Specialist; Vladimir Vladimirovich Alenkov² — General Director.

¹National University of Science and Technology «MISiS»,
4 Leninskiy prospekt, Moscow, 119049 Russia

²Crystal Ltd.,
45B Stantsionnaya Str., Korolev, Moscow Region, 141060 Russia

Abstract. P -type thermoelectric Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te₃ powders were obtained by the melt spinning technique (extremely rapid quenching from the liquid state) and their structural and dimensional characteristics were characterized. The crystallographic group and the lattice parameters of the powders correspond to those for Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te₃ crystallized in equilibrium conditions which suggests the identity of the crystal structure. The powders were compacted by vacuum hot pressing and spark plasma sintering. We found that the partial axial texture [001] directed along the axis of pressure application could be formed during the compacting of the powders. Temperature dependences of the thermoelectric characteristics of the compacted material were measured in a direction perpendicular to the pressure application axis in the 100—700 K range. It is demonstrated that the compacted samples possess low thermal conductivity while retaining the Seebeck coefficient and the electrical conductivity values comparable to crystallized material; therefore ZT reaches 1,05—1,15 in the 330—350 K range which indicates high prospects of applying these technologies.

Keywords: thermoelectricity, melt spinning, melt-spun powders, bismuth antimony telluride, spark plasma sintering.

References

1. Physical Metallurgy. Ed. Cahn R. W., Haasen P. *New York: Elsevier Sci. Publ.* B. V., 1983. 1042 p.
2. Belov A. F., Glazov V. M., Yatmanov Yu. Z., Potemkin A. Ya. Obtaining of homogeneous solid solutions by rapid quenching. *Dokladi Akademii Nauk SSSR*. 1984, vol. 277, no. 5, pp. 1155—1160. (In Russ.)
3. Glazov V. M., Yatmanov Yu. Z., Ivanova A. B. Structural peculiarities of alloys of Bi—Te system, obtained by rapid quenching

of liquid phase. *Izvestiya Akademii Nauk SSSR. Neorganicheskii materialy*. 1986, vol. 22, no. 4, pp. 596—599. (In Russ.)

4. Gogishvili O. Sh., Lalykin S. P., Krivoruchko S. P. Production of Alloys Based on Bismuth and Antimony Chalcogenides by Superfast Cooling of Melts. *VII vsesoyuznaya konferentsiya «Kimiya, fizika i tekhnicheskoe primeneniye khal'kogenidov»*. Uzhgorod, 1988. p. 368

5. Xie W. J., Tang X. F., Chen G., Jin Q., and Zhang Q. J. Nanostructure and thermoelectric properties of p -type Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te₃ compound prepared by melt spinning technique, *The 26th International Conference on Thermoelectrics*. Jeju Island, Korea, 2007. pp. 23—26. DOI: 10.1109/ICT.2007.4569414

6. Xie W., Tang X., Yan Y., Zhang Q., Tritt T. Unique Nanostructures and Enhanced Thermoelectric Performance of Melt-Spun BiSbTe Alloys. *J. Appl. Phys.* 2009. vol. 94, pp. 102111/1–3. DOI: 10.1063/1.3097026

7. Xie W., Tang X., Yan Y., Zhang Q., Tritt T. High Thermoelectric Performance BiSbTe Alloy with Unique Low-Dimensional Structure. *J. Appl. Phys.* 2009, vol. 105, pp. 113713/1–8. DOI: 10.1063/1.3143104

8. Xie W., He J., Kang H., Tang X., Zhu S., Laver M., Wang S., Copley J., Brown C., Zhang Q., Tritt T. Identifying the Specific Nanostructures Responsible for the High Thermoelectric Performance of (Bi, Sb)₂Te₃ Nanocomposites. *Nano Lett.* 2010, vol. 10, pp. 3283—3289. DOI: 10.1021/nl100804a

9. Ivanova L. D., Petrova L. I., Granatkina Yu. V., Leontyev V. G., Ivanov A. S., Varlamov S. A., Prilepo Yu. P., Sychev A. M., Chuiko A. G., Bashkov I. V. Melt spinning as a promising method for preparation of bismuth and antimony telluride solid solution materials. *Journal of Thermoelectricity*, 2013, vol. 1, pp. 31–40

10. Goltzman B. M., Kudinov V. A., Smirnov I. A. *Poluprovodnikoviyе termoelektricheskiye materialy na osnove Bi₂Te₃* [Semiconductor thermoelectric materials based on Bi₂Te₃]. Moscow: Nauka, 1972. (In Russ.)

11. Kichik S. A., Melnikov A. A., Marakushev I. S., Koryakin A. N. Investigation of mechanical and thermoelectric properties of Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te₃ materials prepared by vacuum pressing. *XIII Mezhgosudarstvennyi Seminar «Termoelektriki i ikh primeneniya» = XIII Interstate Workshop «Thermoelectrics and their applications»*. St. Petersburg, 2012. (In Russ.)

Received June 23, 2014