

43. Паращук, В.В. Мощный пакетно-импульсный полупроводниковый стримерный лазер / В.В. Паращук, К.И. Русаков // Лазерная и оптико-электронная техника: сб. науч. тр. / Под ред. И.А. Малевича, И.С. Манака. – Минск: Университетское, 1989. – С. 97–100.
44. Грибковский, В.П. Влияние лазерного излучения на свойства сверхпроводящей керамики $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ / В.П. Грибковский, В.Н. Болтунов, В.В. Паращук [и др.] // Лазерная технология: материалы респ. науч. конф. – Вильнюс, 23–26 октября 1989 г. – Вып. 8. – С. 121.
45. Яблонский, Г.П. Фоторазложение полупроводников ZnS, ZnSe и CdS под воздействием УФ-излучения He-Cd-лазера / Г.П. Яблонский, А.К. Беляева // Физика и химия обработки материалов. – 1989. – № 4. – С. 30–34.
46. Тагиев, Б.Г. Люминесцентные свойства соединений $A^{II}B_2^{III}C_4^{VI}$ / Б.Г. Тагиев, А.Б. Абдуллаев, О.Б. Тагиев [и др.] // ЖПС. – 1995. – Т. 62. – № 3. – С. 145–151.
47. Грибковский, В.П. Свечение электрических разрядов в монокристаллах $CaGa_2S_4:Eu$ / В.П. Грибковский, Б.Г. Тагиев, Р.Б. Джаббаров, В.В. Паращук // Физика импульсных разрядов в конденсированных средах: сб. материалов IX науч. школы / Ин-т импульсных процес. и технол. НАН Украины. – Николаев, 1999. – С. 28–29.
48. Tagiev, B.G. The streamer luminescence in $CaGa_2S_4: Eu^{2+}$ / B.G. Tagiev, R.B. Jabbarov, V.P. Gribkovskii, V.V. Parashchuk // Luminescence and Optical Spectroscopy of Condensed Matter.: abstracts. Intern. Conf., Osaka (Japan), August 23–27 1999 / Intern. Soc. for Opt. Eng. – Osaka, 1999. – P. 53.
49. Гладышук, А.А. Влияние толщины кристалла, температуры, одноосного сжатия, полярности электрического импульса и разрядного промежутка на стримерные разряды в сульфиде кадмия / А.А. Гладышук, А.Л. Гурский, В.В. Паращук, Г.П. Яблонский, В.П. Грибковский, С.А. Пендюр, О.Н. Таленский // ЖПС. – 1985. – Т. 42. – № 6. – С. 889–895.
50. Миронов, А.Л. Формирование длинных неветвящихся каналов пробоя в щелочно-галогидных кристаллах / А.Л. Миронов, А.И. Зубарев, В.Г. Шпак, В.В. Быков // ЖТФ. – 1990. – Т. 60. – № 11. – С. 203–206.
51. Грибковский, В.П. Стримерный лазер с селективным возбуждением / В.П. Грибковский, В.В. Паращук, А.Н. Прокопеня, К.И. Русаков // Известия РАН. Сер. Физическая. – 1995. – Т. 59. – № 6. – С. 30–33.
52. Грибковский, В.П. Стримерный лазер с селективным возбуждением / В.П. Грибковский, В.В. Паращук, К.И. Русаков // Лазерная и оптико-электронная техника: сб. науч. тр. / Под ред. И.А. Малевича, И.С. Манака, Е.Д. Карих. – Минск: Белгосуниверситет, 1992. – Вып. 2. – С. 9–11.
53. А. с. 1755336 А1 СССР, МКИ⁵ H01L21/66. Способ возбуждения заданного типа стримерного разряда в гексагональных полупроводниках / В.П. Грибковский, К.И. Русаков, В.В. Паращук (СССР). – № 4878458/25; Заявлено 30.10.90; Опубл. 15.08.92, Бюл. № 30 // Изобретения. Заявки и патенты. – 1992. – № 30. – С. 213.
54. Грибковский, В.П. Стримерное возбуждение генерации в высокочастотном режиме / В.П. Грибковский, В.В. Паращук, Г.П. Яблонский // Квантовая электроника. – 1989. – Т. 16. – № 6. – С. 1145–1149.
55. Грибковский, В.П. Характеристики пакетно-импульсного стримерного лазера / В.П. Грибковский, В.В. Паращук, К.И. Русаков // Белорусско-польский науч.-практ. семинар и выставка инновационных разработок и наукоемкой продукции: тез. докл., Гродно, 14–16 ноября 2000 г. / Белорусский ин-т сист. анализа и информ. обесп. науч.-тех. сферы. – Минск, 2000. – С. 14.
56. Паращук, В.В. Полупроводниковый стримерный лазер для медицинских целей / В.В. Паращук, В.П. Грибковский, К.И. Русаков // Оптика лазеров: тез. докл. VII Междунар. конф., С.-Петербург, 21–25 июня 1993 г. / ГОИ. – С.-Петербург, 1993. – Ч. II. – С. 641.
57. Parashchuk, V.V. Dynamics of an electron-photon system in strong electric fields // JOSA B. – 2006. – V. 23. – No.2. – P. 326–331.

Материал поступил в редакцию 08.11.11

PARASHCHUK V.V., RUSAKOV K.I. Modeling of streamer discharges in semiconductors and optimization of steamer lasers characteristics

The role of radiative processes, including nonlinear optical processes in the development of a streamer discharges are investigated. We have established patterns of the impact of discharge on the active medium as a complex phenomenon in terms of intense radiation and strong electrical field. We conducted a search for new methods of resource capacity and a significant increase of laser power in extreme conditions, including packet-switching regime.

УДК 669.45+548.735

Пинчук А.И., Шепелевич В.Г., Щербаченко Л.П.

МИКРОТВЕРДОСТЬ БЫСТРОЗАТВЕРДЕВШИХ ФОЛЬГ СПЛАВА ВИСМУТ-ОЛОВО

Введение. Ограничения на использование в ряде отраслей промышленности легкоплавких сплавов, содержащих вредные для человека и окружающей среды металлы (например, ртуть, свинец), вызвали замену в данных сплавах экологически вредных компонентов. В результате резко увеличилось число публикаций, посвященных разработке и исследованию новых припоев, а также получение их современными методами. К заменителям относятся олово, индий, висмут и др. [1–3], однако в связи с их высокой стоимостью по сравнению со стоимостью свинца целесообразно использовать легкоплавкие сплавы, полученные по энерго- и ресурсосберегающим технологиям, к которым относится, например, высокоскоростное затвердевание [4, 5].

Материалы, полученные методами сверхбыстрой закалки из расплава, характеризуются образованием микрокристаллической структуры, расширением области растворимости легирующих элементов, измельчением или отсутствием сегрегации, что приводит к появлению совершенно нового класса конструкционных материалов, которые

невозможно получить традиционными методами [6]. Последнее обуславливает актуальность исследований в данной области. В настоящей работе представлены результаты исследования структуры и микротвердости быстрозатвердевшей фольги сплава Bi-Sn.

Методика эксперимента. Сплавы системы Sn – Bi, содержащие 58 масс.% висмута и 42 масс.% олова, получены сплавлением компонентов, чистота которых не менее 99,99 %, в кварцевых ампулах. Затем из них изготовлены фольги путем спиннингования (схема установки приведена на рисунке 1). Электродвигатель (1) вызывает вращение медного цилиндра (2) диаметром 17,5 см, на внешней полированной поверхности которого осуществлялась кристаллизация капли расплава. Частота вращения изменялась и была равна 200, 500, 1000, 2000 и 3000 об/мин. Скорость охлаждения расплава, как показал расчет [7], находится в пределах $10^5 \dots 10^6$ К/с. В результате кристаллизации получались фольги длиной до 5 см, шириной до 1 см и толщиной 20...80 мкм.

Пинчук Александр Иванович, к.ф.-м.н., доцент кафедры физики Брестского государственного технического университета.

Щербаченко Лилия Павловна, ассистент кафедры физики Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

Шепелевич Василий Григорьевич, д.ф.-м.н., профессор кафедры физики твердого тела Белорусского государственного университета.

Беларусь, БГУ, 220050, г. Минск, пр. Независимости, 4.

Физика, математика, информатика

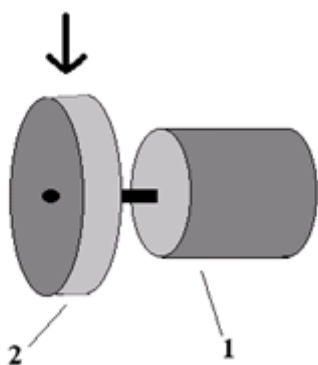
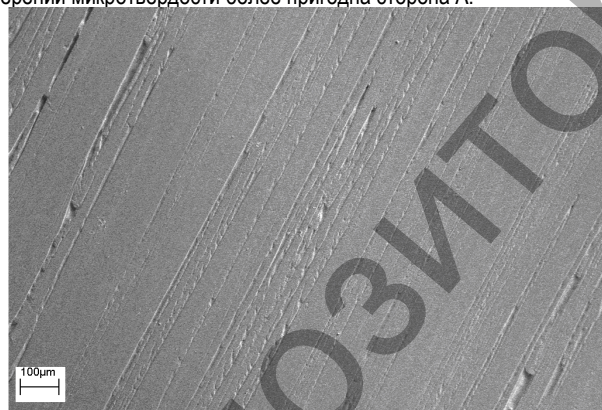


Рис. 1. Схема установки

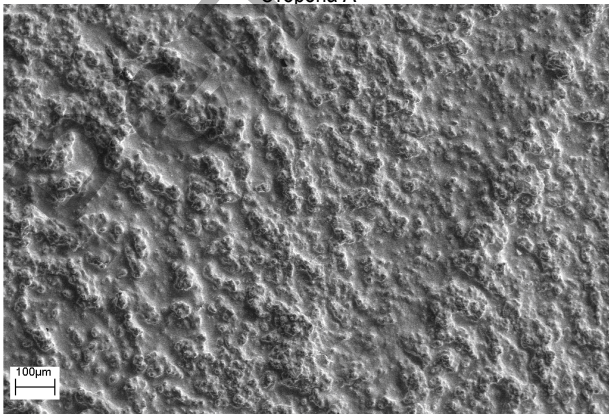
Рентгенографические исследования выполнены на дифрактометре ДРОН-3 в медном излучении, а также с помощью растрового электронного микроскопа LEO 1455VP.

Для определения среднего размера зерна, d , применялся метод секущих с использованием микрофотографий шлифов поперечных сечений образцов. Суть данного метода заключается в том, что на плоскости наблюдения (плоскости случайного сечения) проводятся произвольным образом секущие отрезки (хорды), а затем подсчитывается количество пересечений данного отрезка с границами зёрен на единице длины [8]. Измерения микротвердости, H_{μ} , выполнены на микротвердомере ПМТ – 3. Масса нагрузки на штоке алмазного индентора (в форме пирамидки) составляла 10 г, время выдерживания образца под нагрузкой – нагрузки 60 с. Погрешность измерения микротвердости не превышала 4 %.

Результаты и обсуждение. На рисунке 2 приведены изображения двух поверхностей полученных фольг. Сторона, прилегающая к кристаллизатору, была гладкой и зеркальной, а противоположная сторона – матовой и бугристой. Очевидно, что для проведения измерений микротвердости более пригодна сторона А.



Сторона А



Сторона Б

Рис. 2. Микрофотографии поверхностей быстрозатвердевших фольг сплава Bi-Sn

В таблице 1 приведены данные о размере зерна и микротвердости в зависимости от скорости вращения диска-кристаллизатора. Из таблицы можно видеть, что с увеличением скорости вращения диска-кристаллизатора, т.е. с увеличением скорости затвердевания, размер зерна испытывает тенденцию к уменьшению. Полученные результаты могут быть объяснены тем фактом, что для быстрозатвердевших сплавов характерна высокая химическая и фазовая однородность, достигаемые вследствие фиксации в твердом состоянии аморфной структуры расплава. В результате чего формируется микрокристаллическая (или даже нанокристаллическая) структура.

Таблица 1

Скорость вращения кристаллизатора, об/мин	Средний размер зерна, d , мкм	Микротвердость, H_{μ} , МПа
100	1,000	245
200	1,657	260
500	1,113	230
1000	0,850	224
2000	1,085	210
3000	0,926	195

Из таблицы 1 можно видеть, что между средним размером зерна и значением микротвердости существует однозначная корреляция. При этом H_{μ} обнаруживает падение с уменьшением d . Такое поведение микротвердости на первый взгляд представляется странным. Действительно, согласно классическому закону Холла-Петча (англ. Hall-Petch relationship или Hall-Petch strengthening) между пределом текучести σ_T и размером зерна d существует соотношение [9]:

$$\sigma_T = \sigma_0 + \frac{K}{\sqrt{d}}, \quad (1)$$

где σ_0 – некоторое напряжение трения, которое необходимо для скольжения дислокаций в монокристалле, K – индивидуальная для каждого материала константа, также называемая «коэффициентом Холла-Петча». С учетом того, что для пластичных поликристаллических материалов выполняется соотношение $H_{\mu} = 3\sigma$ [10], где σ – одноосное деформирующее напряжение, формулу (1) один можно преобразовать к виду

$$H_{\mu}(\sigma_T) = H_0(\sigma_0) + \frac{K}{\sqrt{d}}, \quad (2)$$

где $H_{\mu}(\sigma_T)$ – микротвердость поликристаллического материала, $H_0(\sigma_0)$ – микротвердость тела зерна. Из формулы (2) следует, что с уменьшением среднего размера зерна микротвердость должна расти. Иначе говоря, с уменьшением среднего размера зерна имеет место зернограничное упрочнение образца. В нашем же опыте наблюдается противоположное явление.

Объяснить кажущееся противоречие можно следующим образом. Соотношение (2) справедливо для поликристаллов со средним размером зерна больше одного микрометра ($d > 1$ мкм). Когда же средний размер зерна достигает минимального критического значения (порядка $d \sim 100$ нм), возникает так называемый "обратный" эффект Холла-Петча (inverse Hall-Petch effect). Суть этого эффекта заключается в том, что предел текучести σ_T остается либо неизменным, либо падает с уменьшением среднего размера зерна d [11]. Как следует из таблицы 1, в случае быстрозатвердевших фольг системы висмут-олово критический размер зерна, при котором возникает обратный эффект Холла-Петча, имеет величину порядка одного микрометра.

Причиной возникновения обратного эффекта Холла-Петча может быть смена механизма деформации. При достаточно больших d межзёрненные границы препятствуют распространению дислокаций вдоль плоскостей скольжения и упрочняют пластичные поликри-

сталлические материалы. Когда же размер зерен достигает критического значения, начинает работать специфический механизм пластической деформации деформации поликристаллов - «проскальзывания» по границам зерен (зернограничное скольжение). В этом случае перемещение зерен друг относительно друга происходит подобно движению частиц в сыпучих материалах [12-13].

Заключение. Сверхбыстрое затвердевание позволяет существенно изменять микротвердость фольг сплава висмут-олово, получаемых методом спиннингования. При этом поведение микротвердости обратно тому, которое предсказывается классическим законом Холла-Петча. При уменьшении размера зерна до одного микрометра микротвердость начинает падать. Вероятным объяснением этому эффекту может быть смена механизма пластической деформации в микрокристаллической системе висмут-олово, когда скольжение внутри зерен замещается зернограничным проскальзыванием.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ochoa, F. Effect of cooling rate on the microstructure and mechanical behavior of Sn - 3.5 Ag Solder / F. Ochoa, J.J. Williams, N. Chawla // JOM. - 2003. - V. 55. - № 6. - P. 56-60.
2. Hui-Wei, Miao Thermal cycling test in Sn - Bi and Sn - Bi - Cu solder joints / Miao Hui-Wei, Duh Jenq-Gong // J. of materials science: materials in electronics. - 2000. - V. 11. - P. 609-618.
3. Пивненко, В. Актуальность перехода к сплавам, используемым в бессвинцовых припоях // Радио компоненты. - 2006. - № 3 (9). - С. 8-35.

4. Васильев, В.А. Высокоскоростное затвердевание расплавов (теория, технология и материалы) / В.А. Васильев, Б.С. Митин, И.И. Пашков [и др.] // Под ред. Б.С. Митина. - М.: СП ИНТЕРМЕТ ИНЖИНИРИНГ, 1998. - 400 с.
5. Мирошниченко, И.С. Закалка из жидкого состояния. - М.: Металлургия, 1982. - 168 с.
6. Калиниченко, А.С. Управляемое направленное затвердевание и лазерная обработка: теория и практика / А.С. Калиниченко, Г.В. Бергманн - Мн.: Технопринт, 2001. - 367 с.
7. Вассерман, И. Г. Текстуры металлических материалов / Г. Вассерман, И. Гревен - М.: Металлургия, 1969. - С. 654.
8. Шепелевич, В.Г. Взаимосвязь структуры и физических свойств сплавов висмут - сурьма / В.Г. Шепелевич, Э.Е. Гречанников - Мозырь: УО МГПУ им. И.П. Шамякина, 2007. - 128 с.
9. Хоникомб, Р. Пластическая деформация металлов. - М., 1972.
10. Булычев, С.П. Исследование физико-механических свойств материалов в приповерхностных слоях и в микрообъемах методом непрерывного вдавливания индентора (обзор) / С.П. Булычев, В.И. Алехин, М.Х. Шоршоров // Физика и химия обработки материалов. - 1979. - № 5. - С. 69-81.
11. Conrad, H. On the grain size softening in nanocrystalline materials. Scripta Mater / H. Conrad, J. Narayan. - 2000. - № 42(11). - С. 25-30.
12. Физический энциклопедический словарь / Главный редактор А.М. Прохоров. - М.: Советская энциклопедия, 1983.
13. Carlton, C.E. What is behind the inverse Hall-Petch effect in nanocrystalline materials? / C.E. Carlton, P.J. Ferreira // Acta Materialia. - 2007. - V. 55. - P. 3749-3756.

Материал поступил в редакцию 16.11.11

PINCHUK A.I., SHEPELEVICH V.S., SCHERBACHENKO L.P. The microhardness of quickly quenched foils from Bi-Sn alloy

It has been found that quickly quenched foils from Bi-Al alloy have an average grain size approximately equals to 1 mm. In this case an inverse Hall-Petch effect takes place. The microhardness is decreased with decrease in grain size.

УДК 536.3:539.21-17

Кушнер Т.Л., Чугунов С.В.

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛООВОГО РАСШИРЕНИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТКИ НА ШИРИНУ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВ CuIn_3Se_5 И CuGa_3Se_5

Введение. В настоящее время значительное внимание со стороны исследователей вызывают тройные полупроводниковые соединения CuIn_3Se_5 и CuGa_3Se_5 , которые кристаллизуются в структуре халькопирита, относящейся к пространственной группе $R\bar{4}2c$. Установлено, что с помощью данных соединений можно оптимизировать характеристики солнечных элементов, сформированных на основе CuInSe_2 - CuGaSe_2 [1-4]. Однако лишь в ограниченном количестве работ имеются результаты исследований зависимости ширины запрещенной зоны от температуры [5-7]. Дальнейшее описание экспериментальной зависимости $E_g(T)$ связано с физически корректной аналитической интерпретацией полученных результатов. В большинстве случаев данные анализировались при помощи модели, которая позволяла получить физически адекватные величины для широкозонных полупроводников в определенном интервале температур с учетом дисперсии фононов, но не учитывала эффект теплового расширения кристаллической решетки [8]. В работе [9] данный эффект учтен, но с помощью простого, эмпирически подобранного выражения. Обе модели проверялись для соединений CuIn_3Se_5 и CuGa_3Se_5 , но полученные результаты не во всех случаях можно считать физически достоверными [5,6]. Следовательно, для получения более надежных физических параметров, необходимо учиты-

вать не только зависимость ширины запрещенной зоны от температуры, обусловленную электрон-фононным взаимодействием, но и температурные изменения коэффициентов теплового расширения кристаллической решетки.

Теоретические исследования показали, что вклад собственных колебаний решетки в сокращение интервала $E_g(T) - E_g(0)$ пропорционален среднему значению числа фононов [10], кроме того, зависит от их дисперсии. В изменении ширины запрещенной зоны полупроводников от температуры данный вклад является доминирующим и составляет 80-90%. В работе [11] было предложено описывать зависимость $E_g(T)$ формулой:

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\chi \cdot \Theta}{2} \left(\sqrt[4]{1 + \frac{\pi^2}{6} \cdot \left(\frac{2T}{\Theta}\right)^2 + \left(\frac{2T}{\Theta}\right)^4} - 1 \right), \quad (1)$$

где $E_g(0)$ - ширина запрещенной зоны при $T=0$ К; $\chi = -dE(T)/dT|_{T \rightarrow \infty}$ - коэффициент, определяемый тангенсом угла наклона касательной к кривой $E_g(T)$; Θ - характеристическая температура.

Изменение ширины запрещенной зоны с температурой согласно теории доминирования электрон-фононного взаимодействия может

Кушнер Татьяна Леонидовна, к.ф.-м.н., доцент, декан факультета довузовской подготовки Брестского государственного технического университета.

Чугунов Сергей Владимирович, старший преподаватель кафедры физики Брестского государственного технического университета. Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.