

## REFERENCES

1. Paranthaman, M.P. Semiconductor Materials for Solar Photovoltaic Cells / M.P. Paranthaman, W. Wong-Ng, R.N. Bhattacharya. – Springer International Publishing, Switzerland, 2016. – V. 218. P. 25.
2. Effects of selenization time and temperature on the growth of  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$  thin films on a metal substrate for flexible solar cells / A.V. Stanchik [et al.] // Solar Energy. – 2019. – V. 178. – P. 142–149.
3. Vauche, L. Process development and scale-up for low-cost high-efficiency kesterite thin film photovoltaics: Diss.: Micro and nanotechnologies: Soutenuue 27.11.2015. – France, 2015. – 189 p.
4. Direct preparation of  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$  films by microwave irradiation and its dependence on the Sn/(Sn + Zn) ratio / R. Kaigawa [et al.] // Japanese Journal of Applied Physics. – 2015. – V. 54. – P. 08KC02.
5. Earth-abundant absorber based solar cells onto low weight stainless steel substrate / S. López-Marino [et al.] // Sol. Energ. Mat. Sol. C. – 2014. – V. 130. – P. 347–353.
6. Alkali doping strategies for flexible and light-weight  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$  solar cells / S. Lopez-Marino [et al.] // J. Mater. Chem. A. – 2016. – Vol. 4, N. 5. – P. 1895–1907.
7. Co-Electrodeposition of Metallic Precursors for the Fabrication of CZTSe Thin Films Solar Cells on Flexible Mo Foil / M.I. Khalil [et al.] // J. of The Electrochemical Society. – 2017. – V. 164. – P. D302–D306.
8. Sim, J.H. The characteristics of flexible CZTSe / J.H. Sim, K.J. Yang // XXVI Int. Materials Research Congress, Cancun (Mexico), 20–25 August 2017 / Sociedad Mexicana de Materiales (SMM); ed: Armando Salinas Rodriguez. – Cancun, 2017. – P. SB.6-P031.
9. Microstructure and Raman Scattering of  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$  Thin Films Deposited onto Flexible Metal Substrates / A. V. Stanchik [et al.] // Semiconductors. – 2018. – V. 52, N. 2. – P. 215–220.
10. Influence of the Substrate Type on the Surface Morphology of  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$  Thin Films / S.M. Baraishuk [et al.] // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2018. – V. 12, N. 6. – P. 1077–1081.

**Станчик А.В., ГНПО «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению», Минск, РБ**

**Жигулин Д.В.**

**ОАО «Интеграл», Минск, Республика Беларусь**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВОГО И ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА  
ПРЕКУРСОРОВ  $\text{ZnS/Sn/Cu}$  ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК  
 $\text{Cu}_2\text{ZnSn(S,Se)}_4$**

**Введение.** Благодаря своим оптическим и электрическим свойствам тонкие пленки  $\text{Cu}_2\text{ZnSn(S,Se)}_4$  (CZTSSe) являются перспективными для

использования в качестве светопоглощающего слоя в солнечных элементах [1]. Кроме того, CZTSSe является хорошей альтернативой используемым в настоящее время светопоглощающим тонким пленкам CIGS и CdTe, содержащих токсичные и редкие элементы.

В данной работе представлены результаты исследования фазового и химического состава прекурсоров ZnS/Sn/Cu, что позволит в дальнейшем изучить их влияния на формирование/кристаллизацию тонких пленок CZTSSe.

**Методика эксперимента.** Прекурсоры ZnS/Sn/Cu были получены путем послойного напыления на подложку стекло/Мо с помощью магнетронной распылительной системы (Nanovak, NVT5500), оборудованной тремя двухдюймовыми мишенями. Для напыления прекурсоров использовались мишени Cu, Sn и ZnS с чистотой 99,99 %. Напыление происходило с последовательностью ZnS, Sn и затем Cu при комнатной температуре. В таблице 1 представлены условия напыления слоев прекурсоров ZnS/Sn/Cu.

Морфологию прекурсоров ZnS/Sn/Cu исследовали методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на растровом электронном микроскопе «S-4800» (Hitachi). Химический состав прекурсоров определялся методом энергодисперсионного рентгеновского микроанализа (ЭРМ) с помощью микроанализатора «Quantex 200» (Bruker, Германия). Рентгенофазовый анализ (РФА) осуществлен с помощью дифрактометра ДРОН-3М с использованием  $\text{CuK}_\alpha$ -излучения ( $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$ ). Фазовый состав определяли путем сопоставления экспериментально измеренных данных со стандартными данными, опубликованными Crystallography Open Database (COD) при помощи программы «Match».

Таблица 1 – Параметры напыления прекурсоров ZnS/Sn/Cu

Слой прекурсора	Условия напыления		
	давление, мТорр	мощность, Вт	время, с
ZnSe	20	100	60
Sn	20	50	30
Cu	20	40	28

**Результаты и их обсуждение.** Из представленных данных в таблице 2 видно, что химический состав прекурсоров ZnS/Sn/Cu серии **А** и **Б** отличается не значительно. Тем не менее, состав прекурсоров ZnS/Sn/Cu серии **Б** характеризуется небольшим обогащением Sn и Zn по сравнению с серией **А**.

Таблица 2 – Элементный состав прекурсоров ZnS/Sn/Cu

Серия образца	Cu		Zn		Sn		S	
	at.%	wt.%	at.%	wt.%	at.%	wt.%	at.%	wt.%
<b>А</b>	77,54	67,04	1,94	1,74	18,89	30,51	1,63	0,71
<b>Б</b>	73,51	62,01	2,13	1,85	22,41	35,31	1,94	0,83

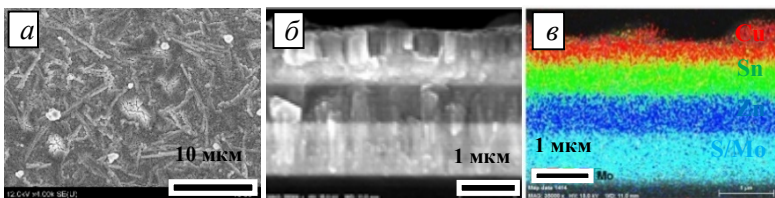


Рисунок 1 – Типичные СЭМ-изображения поверхности (а) и поперечного сечения (б) прекурсоров ZnS/Sn/Cu, а также ЭПМ-картирование поперечного сечения (в)

На поверхности прекурсоров ZnS/Sn/Cu сформированы единичные зерна (рис. 1,а) сферической формы диаметром 0,5–2 мкм и нитевидные образования длиной до 8 мкм. Толщина слоя ZnS/Sn/Cu в прекурсорах А и Б серии составляет 0,8 мкм (рис. 1,б). Посредством элементного картирования изображения поперечного сечения прекурсоров ZnS/Sn/Cu (рис. 1,в) показано, что исследуемые прекурсоры имеют слоистую структуру и напыляемые слои Cu, Sn и ZnS распределены авномерно. Кроме того, на-

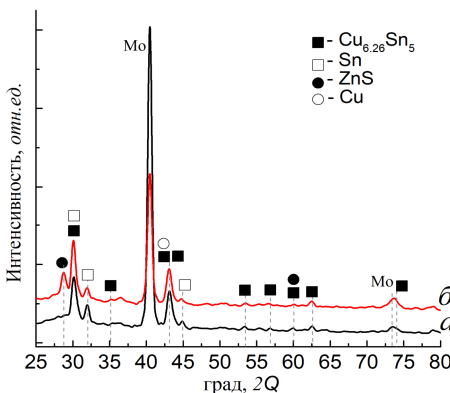


Рисунок 2 – Рентгенограммы прекурсоров ZnS/Sn/Cu серии А (а) и Б (б)

блюдается незначительная диффузия Sn в Zn, а также взаимодиффузия Cu и Sn, Zn и S/Mo. Исследования также показали, что на поверхности прекурсоров присутствуют зерна, которые имеют сильную концентрацию Cu и Sn, что может быть связано с образование сплава Cu-Sn.

Образование фазы  $Cu_{6,26}Sn_5$  (одна из фаз, которую включает сплав Cu-Sn [2]) в прекурсорах ZnS/Sn/Cu серии А и Б подтверждается РФА (рис. 2). В обоих случаях также присутствуют фазы Sn и Mo. Кроме того, в составе прекурсоров ZnS/Sn/Cu серии А возможно также существование чистой фазы Cu, определения которой затруднено из-за перекрытия основных рефлексов с фазой  $Cu_{6,26}Sn_5$ . Тем не менее, существование фазы Cu в составе данной серии образцов может быть связано с обогащением Cu их химического состава по сравнению с серией Б (табл. 1). Кроме того, на рентгенограмме прекурсоров ZnS/Sn/Cu серии Б также присутствуют рефлексы, принадлежащие ZnS. Образование данной фазы в прекурсорах

**Б** серии возможно происходит из-за обогащения Zn химического состава по сравнению с прекурсорами **А** серии.

**Заключение.** Прекурсоры ZnS/Sn/Cu, полученные путем послойного магнетронного напыления, имеют слоистую структуру и напыляемые слои Cu, Sn и ZnS распределены равномерно. РФА показал, что прекурсоры ZnS/Sn/Cu содержат фазы  $Cu_{6,26}Sn_5$ , Sn, а также возможно существование фаз Cu и ZnS в зависимости от химического состава прекурсоров. Работа выполнена при поддержке БРФФИ (№ Т19М-022).

Список использованных источников

1. Paranthaman, M.P. Semiconductor Materials for Solar Photovoltaic Cells / M.P. Paranthaman, W. Wong-Ng, R.N. Bhattacharya. – Springer International Publishing, Switzerland, 2016. – V. 218. P. 25.
2. Liquidus projection and thermodynamic modeling of Sn–Zn–Cu ternary system / H. Yu-Chih [et al.] // Journal of Alloys and Compounds. – 2009. – Vol. 477, N 1-2. – P. 283–290.

**Ткаченко Т.М. к.ф.-м.н., доцент, Барайшук С.М. к.ф.-м.н., доцент, Белорусский государственный аграрный технический университет,**

**П. Будзинский к.ф.-м.н.,**

**Люблинский Технический университет, Люблин, Польша**

**З. Суrowец к.ф.-м.н.**

**Институт физики Университета М. Кюри-Склодовской, Люблин, Польша**

## **ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ НЕОДИМОВОГО МАГНИТА ПРИ ЕГО ЭКСПЛУАТАЦИИ В КОРРОЗИОННО АКТИВНЫХ СРЕДАХ**

**Аннотация.** Исследованы механические характеристики цилиндрического неодимового магнита, полученного методом порошковой металлургии, обработанного водными растворами соли. Установлен рост коэффициента трения относительно карбида вольфрама и снижение износа обработанных образцов.

**Введение.** Постоянные магниты на основе фазы  $Nd_2Fe_{14}B$  имеют широкое коммерческое применение в технике благодаря высоким значениям основных магнитных характеристик - температуры Кюри, намагниченности насыщения, константы магнитной анизотропии [1]. Свойства материалов на основе фазы  $Nd_2Fe_{14}B$ , полученных с применением различных технологий, достаточно подробно изучены [2, 3]. К серьезным недостаткам таких магнитов относятся хрупкость и низкая коррозионная стойкость, которая обычно устраняется нанесением разнообразных защитных покрытий [4, 5], повреждение которых вызывает коррозионные процессы