

## СЕКЦИЯ № 3 СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБУЧЕНИЯ ФИЗИКЕ

УДК 387.14

**С.М. Барайшук<sup>1</sup>, М. Вертель<sup>2</sup>, С.И. Янущик<sup>1</sup>, М. Суровец<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> – Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск

<sup>2</sup> – Институт физики, университета М. Кюри-Скловдовской, Люблин, Польша

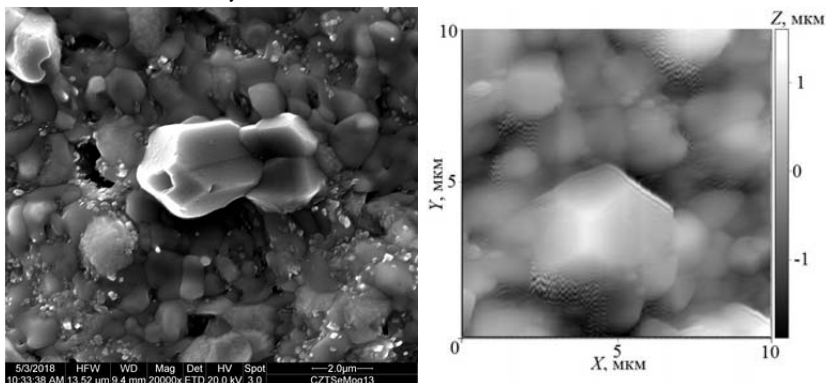
### **ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В РАМКАХ МЕЖВУЗОВСКОЙ СТУДЕНЧЕСКОЙ НАУЧНОЙ ЛАБОРАТОРИИ**

**Введение.** Студенческие научные лаборатории являются неотъемлемой частью процесса совершенствования подготовки молодых специалистов в любом университете и создание условий для реализации творческих способностей студентов, активно участвующих в научно-исследовательской, инновационной деятельности. Наиболее интересно участие в СНИЛ, позволяющих взаимодействовать со студентами из других ВУЗов и даже стран, что становится возможным с переходом белорусского образования на стандарты европейской системы обучения. В частности при изучение свойств полупроводников в рамках СНИЛ БГАТУ проводятся исследования свойств поверхностей различных полупроводниковых компонентов, в том числе в содружестве с молодыми исследователями проходящими обучение на факультете Физики, Математики и Информатики университета М. Кюри-Скловдовской, Люблин, Польша. Так при изучении студентами возобновляемых источников энергии интересным представляется изучить и перспективные Фотопреобразователи на гибких подложках, которые ввиду их малого веса, высокой удельной мощности и гибким возможностям монтажа [1] представляют определенный интерес. Кроме того, гибкие солнечные элементы позволяют использовать рулонную технологию, что значительно упрощает производство. Одним из наиболее перспективных функциональных соединений является четырехкомпонентное полупроводниковое соединение  $Cu_2ZnSnSe_4$  (CZTSe). Это перспективный материал для тонкопленочных солнечных элементов, благодаря соответствующей ширине запрещенной зоны (1.0 эВ), высокому коэффициенту поглощения излучения в видимом диапазоне (более  $10^4$  см<sup>-1</sup>) и проводимости р-типа [2]. CZTSe содержит широко распространенные дешевые и нетоксичные компоненты. Эффективность фотоэлектрического преобразования для солнечных элементов на основе данного материала составляет 6,1 % [3] на гибких металлических подложках. Необходимо изучать микроструктуру и топографию поверхности подложек как один из основных факторов повышения эффективности солнечных элементов [4, 5].

**Экспериментальная часть.** Для получения пленок CZTSe использовалась методика, включающая последовательное электрохимическое осаждение металлических прекурсоров Cu-Zn-Sn на металлическую фольгу, предварительный отжиг прекурсоров в атмосфере 95 % Ar + 5 % H<sub>2</sub> при температуре 350 °С в течение 30 минут и селенизацию [6]. Поверхность

пленок CZTSe исследовалась Белоруской стороной с использованием атомно-силового микроскопа NT 206 в контактном режиме. Для оценки поверхности было выбрано не менее пяти площадок сканирования размером  $10 \times 10$  мкм с разных участков поверхности, что позволило проводить усреднение параметров рельефа. Обработка изображений проводилась студентами по ранее разработанной методике описанной в [7]. Польские коллеги исследовали морфологию поверхности пленок CZTSe исследовали методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ).

**Результаты и обсуждение.** При изучении поверхности стекла с нанесенным Mo покрытием, были получены так же данные о топографии и шероховатости поверхности и проведен сравнительный анализ визуальных данных.



*Рисунок 1 – СЭМ и АСМ – снимки соответственно поверхности осажденных пленок CZTSe на подложках Mo-фольге*

АСМ-исследования показали, что на поверхности пленок CZTSe на гибких подложках сформирована зернистая структура. На поверхности можно выделить зерна двух типов: крупные и мелкие. Для пленок CZTSe характерны следующие размеры зерен:  $400 \times 200$  и  $270 \times 130$  нм, высота 160–194 нм. В случае пленки на фольге Mo размер зерен  $6 \times 7.2$  и  $1 \times 1.1$  мкм соответственно, и они приблизительно одинаковой высоты ~280 нм, что хорошо согласуется с параметрами, рассчитанными по СЭМ-изображениям.

На рисунке видно, что на поверхности пленок CZTSe на подложках всех типов отсутствуют трещины и микропоры, что указывает на большую компактность и однородность слоя CZTSe, обусловленных дальнейшим ростом зерен и агломерацией материала. Средний размер зерен пленок CZTSe во всех случаях имеет тенденцию к увеличению, что стало причиной роста шероховатости поверхности пленок по сравнению с прекурсорами.

Значения параметров шероховатости пленок CZTSe, осажденных на подложку Mo/стекло [8] и металлические подложки, неожиданно мало расходятся, если учесть, что подложки из фольг изначально характеризовались более высокими значениями шероховатости и дефектами в виде царапин, а также различной морфологией поверхности прекурсоров после

предварительного отжига. Поэтому морфология поверхности металлических подложек оказывает незначительное влияние на микро- и нанорельеф полупроводниковых тонких пленок, что согласуется с данными [9].

**Заключение.** В результате проведения совместных исследований студенты, участвующие в работе СНИЛ сделали заключение о возможности использования гибкой металлической фольги в качестве подложки для тонкопленочных солнечных элементов, поскольку пленки CZTSe на стеклянной подложке с подслоем молибдена, изученные ранее, и на металлических фольгах имеют близкие значения шероховатостей. Студенты получили опыт совместных исследований с коллегами из другой организации, для изучения проблемы при помощи взаимодополняющих методов.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Pagliaro, M. Flexible Solar Cells / M. Pagliaro, G. Palmisano, R. Ciriminna. – Italy, Wiley-VCH Verlag GmbH and Co.KgaA, 2008. – 203 p.
2. Paranthaman M.P., Wong-Ng W., Bhattacharya R.N. Semiconductor Materials for Solar Photovoltaic Cells. Springer International Publishing, 2016. 25 p.
3. Alkali doping strategies for flexible and light-weight Cu<sub>2</sub>ZnSnSe<sub>4</sub> solar cells / Y. Lopez-Marino [et al.] // J. Mater. Chem. A. – 2016. – P. 1–16.
4. Impact of substrate roughness on CuIn<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>Se<sub>2</sub> device properties // W. K. Batchelor [et al.] // Solar Energy Materials and Solar Cells. – 2004. – Vol. 83. – P. 67–80.
5. The Application of Metallic Foils as Substrate for CIGS Thin Film Solar Cells / G. San Vicente [et al.] // Proc. of the 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference, London, UK, 2001 / James & James Science Publishers Ltd.; Edited by P. Fath [et al.]. – London, UK, 2001. – P. 638–642.
6. Microstructure and Raman Scattering of Cu<sub>2</sub>ZnSnSe<sub>4</sub> Thin Films Deposited onto Flexible Metal Substrates / A.V Stanichik [et al.] // Semiconductors. – 2018. – Vol. 52, №2. – P. 227–232.
7. Элементный состав, топография и смачиваемость поверхности графита, модифицированного ионно-ассистированным осаждением хромовых покрытий/ И.С. Ташлыков, С.М. Барайшук// Известия вузов. Сер. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – Москва. – № 1. – 2008. – С. 30–35.
8. Влияние типа подложки на морфологию поверхности тонких пленок Cu<sub>2</sub>ZnSnSe<sub>4</sub> / С. М. Барайшук и др. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2018, № 11, с. 35–41.
9. Kondrotas R., Juskenas A., Naujokaitis A. et al. // Solar En. Mater. Solar Cells. 2015. V. 132. P. 21. DOI: 10.1016/j.solmat.2014.08.010.