

Рисунок 1 – Достоверность аппроксимации между измеренными и рассчитанными значениями H_D/H_Q

Статистическая обработка результатов исследования выполнена с помощью статистического пакета STATISTICA v.10.

Выше представленные результаты, полученные по ОМН Минск, являются адекватными для эмпирической оценки поступления сумм прямой и рассеянной радиации поступающей на горизонтальную поверхность в границах Беларуси.

Вертель М.¹, к.ф.-м.н., ст. специалист, С.М. Барайшук², к.ф.-м.н., доцент, М. Будзинский¹, д.ф.-м.н., директор

¹Институт физики, университета М. Кюри-Склодовской, Люблин, Польша

²УО «Белорусский государственный аграрный технический университет», Минск, Республика Беларусь

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПЕРСПЕКТИВНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ СОЕДИНЕНИЙ Cu-Zn-Sn ОСАЖДЕННЫХ НА ПОДЛОЖКИ Mo/СТЕКЛО и Mo-фольга

Ключевые слова: тонкие пленки $Cu_2ZnSnSe_4$, прекурсоры, гибкие металлические подложки, атомно-силовая микроскопия, сканирующая электронная микроскопия.

Аннотация. В работе рассмотрены возможность построения тонкопленочных фотопреобразователей на основе нетоксичных и доступных компонентов $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ (CZTSe) на подложках из стекла и гибкой металлической фольги. Фольговые подложки открывают новые возможности применения гибких тонкопленочных фотопреобразователей. Полученные структуры исследованы методом атомно-силовой микроскопии и методом сканирующей электронной микроскопии в сочетании с энергодисперсионной спектроскопией вторичных электронов.

1. Введение.

В настоящее время активно ведется работа по увеличению КПД фотопреобразователей, для повышения её эффективности, в том числе, при использовании в установках возобновляемой энергетики применяемых в АПК. Основными материалами для изготовления фотопреобразователей являются поликристаллический Si и тонкопленочные полупроводниковые соединения CdS/CdTe и $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$. Однако данные материалы содержат токсичные составляющие (кадмий, теллур) и редкие элементы (индий, галлий), что приводит к невозможности широкого использования и удорожанию фотопреобразователей на их основе, поэтому возникает необходимость в поиске альтернативного материала для светопоглощающих слоев. В этом качестве может быть использован полупроводниковый материал $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ (CZTSe) [1-2]. Оптические и электрические свойства данного материала, а также широкодоступные нетоксичные составляющие (медь, цинк, олово, селен) позволяют им стать перспективным поглощающим слоем в тонкопленочных фотопреобразователях и основой для новых более доступных солнечных панелей.

Использование в качестве подложки гибкой металлической фольги вместо стекла позволяет расширить спектр применения тонкопленочных фотопреобразователей [3, 4], а так же исключает необходимость осаждения проводящего тыльного слоя, что значительно снижает стоимость изготовления модулей фотопреобразователей. Подложки из фольги позволяют использовать промышленную рулонную технологию производства пленок. Необходимо отметить, что поверхность пленки и подложки, характеризующиеся большой шероховатостью играют важную роль в улучшении поглощения падающего света на полупроводниковый слой за счет уменьшения потерь на отражение, что подтверждается в [5–7].

В данной работе представлены результаты исследования сканирующей электронной микроскопии (СЕМ) в сочетании с энергодисперсионной спектроскопией влияния типа подложек (Мо/стекло и Мо-фольга) на структуру поверхности прекурсоров Cu-Zn-Sn пленок CZTSe.

2. Эксперимент. Для получения тонких пленок CZTSe используется двухстадийная методика: на первом этапе получают металлические прекурсоры Cu-Zn-Sn, а на втором проводят селенизацию прекурсоров при температуре 500-550 °С. Металлические прекурсоры Cu-Zn-Sn послойно электрохимически осаждены на подложки Мо/стекло и Мо-фольга в следующем порядке: подложка/Cu/Sn/Cu/Zn. В качестве анодов для осаждения соответствующих металлических слоев использовались пластины из промышленной анодной меди, высокочистого олова (99,999 %) и цинка.

Элементный состав пленок определялся методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии с использованием электронного сканирующего микроскопа EDX Oxford Instruments AZtecEnergy – Advanced с кремний-дрейфовым (SDD) детектором X-act с активной площадью кристалла 10 мм², работающим при комнатной температуре. Морфология поверхности образцов исследовалась методом сканирующей электронной микроскопии на электронном микроскопе TESCAN Vega 3LMU используя детектор вторичных электронов типа Everhart-Thornley (с кристаллом YAG)-ВЭ детектор, Детектор вторичных электронов.

3. Результаты и обсуждение.

На рис. 1 представлены характерные изображения, полученные методом сканирующей электронной микроскопии, поверхности осажденных прекурсоров CZT, с распределением элементов в выделенной области полученным методом энергодисперсионной спектроскопией.

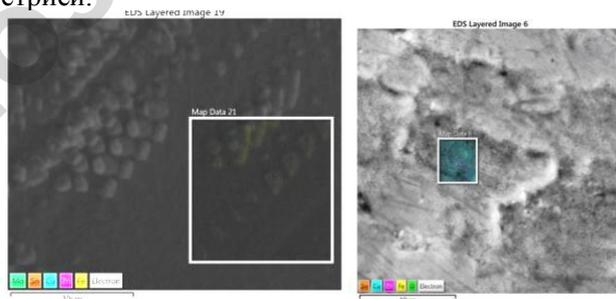


Рис. 1. СЕМ-изображения поверхности осажденных прекурсоров CZT на подложке Мо/стекло (а), Мо-фольга (б)

На поверхности прекурсора Cu-Zn-Sn, осажденного на подложку Мо/стекло (рис. 1,б), наблюдается локальная зернистая структура, также присутствуют эрозийные участки, которые в процессе осаждения образуют кластеры размерами 1,2×1,5 мкм. Зерна имеют приблизительно одинаковую форму: продолговатые, ориентированные в одном направлении вдоль нормали к подложке. Размер зерен составляет 600×600 нм высотой до 500 нм. Параметры шероховатости прекурсоров Cu-Zn-Sn приведены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры топографии исследуемых образцов.

| | Подложка | | Cu-Zn-Sn | |
|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | Мо/стекло | Мо-фольга | Мо/стекло | Мо-фольга |
| R_a , нм | 8,15 | 144,21 | 68,34 | 116,59 |

На изображениях СЕМ так же хорошо видно, что на поверхности покрытия формируется мелкозернистая структура (рис. 1 а).

Шероховатость поверхности прекурсоров на подложке Мо/стекло (табл. 1) в 8–9 раз выше, чем шероховатость подложки. В то же время, для прекурсоров на подложке из Мо-фольги, характерно уменьшение шероховатости поверхности по сравнению с шероховатостью подложки на 16-20%. Значения шероховатости прекурсоров Cu-Zn-Sn на Мо фольге больше, чем на подложке Мо/стекло, что подтверждает влияние поверхности подложки из Мо-фольги на формирование топологии прекурсоров.

Анализ результатов энергодисперсионной спектроскопии показывает, что в приповерхностной области элементы распределены равномерно с концентрациями указанными в таблице 2.

Таблица 2. Элементный состав (ат%) поверхности прекурсоров.

| Элемент | | C | Cu | Zn | Sn | Si | Mo | O |
|----------|-----------|------|------|------|------|----|------|------|
| Подложка | Мо/стекло | 18,2 | 21,2 | 10,5 | 15,2 | 3 | 16,6 | 14,8 |
| | Мо-фольга | 12,3 | 35,6 | 16,5 | 19,1 | | 8,3 | 7,5 |

Анализ приведенных данных показывает наличие зависимости элементного состава покрытия от состава подложки и наличие встречной диффузии элементов стеклянной подложки в покрытие, что согласуется с проведенными ранее исследованиям [7, 8].

Шероховатости поверхностей пленок прекурсоров, осажденных на подложки Мо/стекло и Мо-фольги (табл.1), имеют незначительное различие при значительном различии в шероховатости подло-

жек. Более того, нанесение покрытия способствовало устранению дефектов на подложке фольги в виде царапин по сравнению с подложкой из стекла с подслоем молибдена. Очевидно, что шероховатость металлических подложек оказывает незначительное влияние на параметры топографии получаемых покрытий, то есть подложки такого качества могут быть использованы для тонкопленочных фотопреобразователей.

Заключение.

На топологические свойства прекурсоров CZT, полученных электрохимическим осаждением, оказывает влияние тип подложки её элементный состав и состав наносимых пленок. Во всех случаях образуется зернистая структура на поверхности пленок CZTSe. Пленки CZTSe на исследуемых подложках имеют близкие значения шероховатостей, что говорит о возможности использования гибкой металлической фольги в качестве подложки для пленок. Элементный состав прекурсоров CZT и пленок CZTSe, определенный методом энергодисперсионной спектроскопии, не содержал посторонних элементов в пределах чувствительности.

ЛИТЕРАТУРА

1. M.P. Paranthaman, W. Wong-Ng, R.N. Bhattacharya. //Switzerland: Springer International Publishing, 2016. – V. 218. P. 25.
2. Fthenakis V.M., Moskowitz P.D. // Prog. Photovoltaics Res. Appl., 1995, vol. 3, pp. 295–306. doi: 10.1016/j.enpol.2016.04.036.
3. K. Seifart, W. Göhler, T. Schmidt, R. John, S. Langlois. // Proceedings of the 7th ESPC. Italy, 2005, pp. 200–210.
4. Otte K., Makhova L., Braun A., Konovalov I. //Thin Solid Films, 2006, vol. 511–512, pp. 613–622. doi: 10.1016/j.tsf.2005.11.068.
5. J. Huang [et al.] // American Control Conference, San Francisco, CA, USA June 29 - July 01, 2011./ Agilent Technologies; Edited by Martha Grover [et al.]. USA, 2011. – P. 2957–2962.
- A. Poruba, A. Fejfar // Journal of Applied Physics. – 2000. – Vol. 88. – P. 148–160.
6. S. F. Rowlands, J. Livingstone, C. P. Lund // Solar Energy. – 2004. – Vol. 76. – P. 301–307. [8]. Tashlykov I.S., Baraishuk S.M. // Russian Journal of Non-Ferrous Mat. 2008. Т. 49. № 4. С. 303-307.
7. Tashlykov I., Baraishuk S., Mikkalkovich O., Antonovich I. // Przegląd Elektrotechniczny. 2008. Т. 84. № 3. С. 111-113.
8. И.С. Ташлыков, С.М. Барайшук, В.В. Тульев, В.Ф. Гременок //Физика и химия обработки материалов. 2011. № 1. С. 66-70.