

что поверхность структуры более неравномерная, основной рельеф имеет перепады до 2 – 3 нм по высоте и большую площадь. При анализе топографии поверхности кремния с покрытиями на основе Co, полученных при разных ускоряющих потенциалах, становится заметно, что шероховатость поверхности нелинейно уменьшается с ростом энергии ассистирования. По нашему мнению, это связано с тем, что при более низком ускоряющем потенциале плотность энергии, выделенной в каскадах атомных столкновений, становится гораздо выше, что приводит к увеличению коэффициента распыления поверхности и шероховатости поверхности. Однако, плотность выделенной в каскадах атомных столкновений энергии зависит кроме прочего от материала основы покрытия.

**Заключение.** При ионно-ассистированном нанесении Co – покрытий качества поверхности пластин модифицированного кремния высокие и удовлетворяют требованиям микроэлектроники. Характеристика поверхности при малом времени нанесения, когда толщина покрытия составляет 270 нм позволяют рассматривать возможность применения таких покрытий в качестве лицевых контактов, поскольку нанесение таких покрытий оказывает малое влияние на их морфологию и шероховатость поверхности и, как следствие, на эффективность солнечного элемента.

Список использованных источников

1. Paranthaman M.P., Wong-Ng W., Bhattacharya R.N. Semiconductor Materials for Solar Photovoltaic Cells. Springer International Publishing, 2016. 25 p.
2. Ташлыков И.С., Белый И.М. Способ нанесения покрытий. Патент РБ №2324. IC1 ВУ, C23 C4/12. C4/18, C14/16. Оpubл. 1999. офиц. бюл. гос. пат. ведом. РБ №1.
3. Бобрович О.Г., Ташлыков И.С., и др./ Изучение ядерно-физическими методами металлосодержащих (Ti, Co) – покрытий, осажденных методом ионного ассистирования на кремний // Физика и химия обработки материалов. – 2006. – №1. – С. 54–58.

**Гуртовой В.Г., Шёлковая Т.В., к.ф.-м.н., Чумак В.А.**

**ГНПО «Научно-практический центр Национальной академии наук  
Беларуси по материаловедению», Минск**

**СТРУКТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМЫ  $Cu_2CdSn_{1-x}Si_xSe_4$**

Медьсодержащие халькогениды являются перспективными материалами для использования их в качестве базовых слоёв фотопреобразователей, так как они являются прямозонными полупроводниками и обладают большим коэффициентом поглощения в видимой и ближней ИК-области спектра. В

настоящее время КПД фотопреобразователей солнечного излучения на основе твёрдых растворов  $\text{Cu}(\text{Ga},\text{In})\text{Se}_2$  составляет 21.7 % [1]. В связи с тем, что In и Ga достаточно дорогие и редкие металлы их стали замещать более дешёвыми и доступными элементами: Zn, Sn, Si, Ge, Cd и др.

Однако, несмотря на многочисленные исследования этих соединений, максимальный КПД преобразования солнечного излучения к настоящему времени получен не более 12.6 % для  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$  [2]. Одной из причин низкой эффективности фотоэлектрического преобразования этих соединений является значительное отклонение от стехиометрического состава при их синтезе и получении плёнок, что приводит к высокой концентрации собственных структурных дефектов разной природы и образованию примесей в виде двойных или тройных фаз. Поэтому продолжают интенсивные работы по синтезу и исследованию физических свойств этих четверных соединений. Особый интерес представляют твёрдые растворы на основе соединений этого семейства, которые имеют разные кристаллические структуры. К таким соединениям относятся соединения  $\text{CuCdSnSe}_4$  и  $\text{Cu}_2\text{CdSiSe}_4$  и твёрдые растворы на их основе. Целью данной работы были синтез четверных соединений  $\text{Cu}_2\text{CdSnSe}_4$ ,  $\text{Cu}_2\text{CdSiSe}_4$ , твёрдых растворов  $\text{Cu}_2\text{CdSn}_x\text{Si}_{1-x}\text{Se}_4$  и определение кристаллографических характеристик полученных соединений и твёрдых растворов в зависимости от состава.

Синтез четверных соединений  $\text{Cu}_2\text{CdSnSe}_4$ ,  $\text{Cu}_2\text{CdSiSe}_4$  и твёрдых растворов  $\text{Cu}_2\text{CdSn}_{1-x}\text{Si}_x\text{Se}_4$  проводили в вертикальной однозонной печи, а исходными веществами служили элементарные компоненты: медь, кадмий, олово, кремний чистоты 99.999 % и селен марки ОСЧ. Однотемпературный метод синтеза обеспечивает чистоту получаемого вещества и отсутствие потерь компонентов. Синтез проводился в вакуумированных двойных кварцевых ампулах. Ампулы устанавливали на стеклянный штوك в вертикальной однозонной печи. Конец штока присоединяли к механическому вибратору. Температуру в печи изменяли поэтапно, с двухчасовым выдерживанием, и поднимали до значений на 20 – 30 °С превышающих температуру плавления соединения, либо температуры ликвидуса соответствующего твёрдого раствора. При достижении нужной температуры включали вибрационное перемешивание и выдерживали в течении 24 часов. Затем вибрацию отключали и уменьшали температуру со скоростью 5 град/час до полного затвердевания состава. Для гомогенизации полученных слитков соединений и твёрдых растворов проводили их изотермический отжиг в вакууме при 750 °С в течении 300 ч.

Определение кристаллографических характеристик соединений  $\text{Cu}_2\text{CdSnSe}_4$ ,  $\text{Cu}_2\text{CdSiSe}_4$  и твёрдых растворов  $\text{Cu}_2\text{CdSn}_{1-x}\text{Si}_x\text{Se}_4$  проводили рентгенографическим методом на дифрактометре ДРОН-3М, используя монохроматическое  $\text{CuK}_\alpha$  излучение.

На рис. 1 приведены дифрактограммы твёрдых растворов  $\text{Cu}_2\text{CdSn}_{1-x}\text{Si}_x\text{Se}_4$  различного состава с  $x = 0; 0.2; 0.4; 0.6; 0.8; 1$  снятые при комнатной температуре. Как видно из рисунка, при  $x = 0 - 0.4$  на дифрактограммах наблюдаются рефлексы характерные только для тетрагональной структуры. В то время как дифрактограммы для составов с  $x = 0.6 - 1$  полностью соответствуют орторомбической структуре. Из этого следует, что в системе  $\text{Cu}_2\text{CdSn}_{1-x}\text{Si}_x\text{Se}_4$  с ростом концентрации при  $x \approx 0.5$  происходит структурный фазовый переход из тетрагональной фазы в орторомбическую. Из рис. 1 видно, что в системе  $\text{Cu}_2\text{CdSn}_{1-x}\text{Si}_x\text{Se}_4$  при замещении атомов олова атомами кремния с меньшим атомным радиусом все рефлексы с увеличением  $x$  смещаются в область больших углов, т.е. происходит сжатие кристаллической решётки. По полученным дифракционным спектрам определены параметры элементарной ячейки исследуемой системы  $\text{Cu}_2\text{CdSn}_{1-x}\text{Si}_x\text{Se}_4$ . На рисунке 2 приведены зависимости определённых параметров элементарной ячейки  $a$ ,  $b$ ,  $c$  системы  $\text{Cu}_2\text{CdSn}_{1-x}\text{Si}_x\text{Se}_4$  от состава. Как видно из рисунка, параметры  $a$ ,  $b$ ,  $c$  как для тетрагональной, так и для орторомбической фазы с ростом значений  $x$  плавно уменьшаются по линейному закону, что соответствует правилу Вегарда и свидетельствует об образовании в системе  $\text{Cu}_2\text{CdSn}_{1-x}\text{Si}_x\text{Se}_4$  двух рядов твёрдых растворов: одного на основе соединения  $\text{Cu}_2\text{CdSnSe}_4$  с тетрагональной структурой в области  $x \leq 0.4$ , а другого на основе соединения  $\text{Cu}_2\text{CdSiSe}_4$  орторомбической структурой в области  $x \geq 0.6$ .

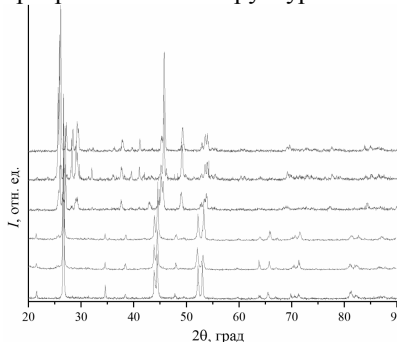


Рисунок 1. Дифрактограммы твёрдых растворов  $\text{Cu}_2\text{CdSn}_{1-x}\text{Si}_x\text{Se}_4$  для  $x$ :

1 - 0; 2 - 0.2; 3 - 0.4; 4 - 0.6;  
5 - 0.8; 6 - 1

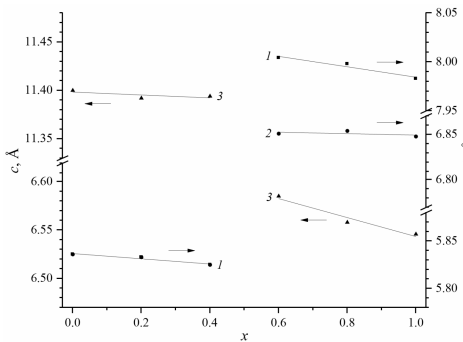


Рисунок 2. Зависимости параметров элементарной ячейки системы  $\text{Cu}_2\text{CdSn}_{1-x}\text{Si}_x\text{Se}_4$  от состава:

1 -  $a$ ; 2 -  $b$ ; 3 -  $c$

Следует отметить, что значения параметров элементарной ячейки синтезированных нами соединений  $\text{Cu}_2\text{CdSnSe}_4$  ( $a = 5.836 \text{ \AA}$ ,  $c = 11.400 \text{ \AA}$ ) и

$\text{Cu}_2\text{CdSiSe}_4$  ( $a = 7.983 \text{ \AA}$ ,  $b = 6.848 \text{ \AA}$ ,  $c = 6.546 \text{ \AA}$ ) хорошо согласуются с литературными данными [3, 4].

Список использованных источников

- 1 Properties of  $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$  solar cells with new record efficiencies up to 21.7% / P. Jackson [et al.] // *Physica Status Solidi (RRL)*. – 2015. – V. 9. N 1. – P. 28-31.
- 2 Device Characteristics of CZTSSe Thin-Film Solar Cells with 12.6% Efficiency / W. Wang [et al.] // *Advanced Energy Materials*. – 2014. – V. 4. N 7. – P. 36-45.
- 3 Thermal analysis and synthesis from the melts of Cu-based quaternary compounds  $\text{Cu-III-IV-VI}_4$  and  $\text{Cu}_2\text{-II-IV-VI}_4$  (II=Zn, Cd; III=Ga, In; IV=Ge, Sn; VI=Se) / H. Matsushita [et al.] // *Journal of Crystal Growth*. – 2000. — V. 208. N 1-4. — P. 416-422.
- 4 Zur Sytematik tetraedrischer Verbindungen vom Typ  $\text{Cu}_2\text{MeIIIVMe}_4\text{VI}$  (Stannite und Wurtzstannite) / W. Schäfer, R. Nitsche // *Z. Kristal.* – 1977. – V. 145. – P. 356-370.

**Долгий В.К., к.ф.-м.н., доцент**

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

**Мисевич А.В., канд. физ.-мат. наук, доцент;**

***Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет»***

**ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК  
БЕЗМЕТАЛЬНОГО ФТАЛОЦИАНИНА**

Огромное количество органических полупроводников является перспективным электронным материалом при разработке таких элементов органической электроники, как светоизлучающие диоды, солнечные батареи, полевые транзисторы и газовые сенсоры [1]. Фталоцианины – это класс органических полупроводников, особенностью которых является высокая термическая и химическая стойкость, способность к обратимой сорбции различных субстанций (газов, органических молекул). Для практических применений фталоцианины приготавливают преимущественно в виде тонких пленок, электрофизические свойства которых определяются примесями, сорбированными из окружающей среды, например молекулярным кислородом. Потому целью данной работы является установление механизма влияния адсорбированного кислорода на проводимость тонких плёнок безметалльного фталоцианина.