

звания в качестве слабопоглощающего материала для многослойных интерференционных наноструктур в рентгеновском диапазоне и диапазоне экстремального ультрафиолета [1—3]. Более того, впервые было показано, что в диапазоне длин волн выше 17,1 нм Ве может действовать и как рассеивающий материал, одновременно обеспечивая рекордные значения пиковых коэффициентов отражения и спектральной селективности [4].

Перспектива использования многослойных зеркал на основе пар Mo/Ве и Cu/Ве на длине волны 11,2—12,4 нм для нужд нанолитографии и многослойных зеркал Al/Ве на длине волны выше 17,1 нм в качестве отражающих элементов космических телескопов для солнечной астрономии привела к возобновлению экспериментальных работ по созданию высокоотражающих многослойных наноструктур на основе бериллия, которые были прекращены в начале столетия во многом из-за высоких санитарных норм при работе с бериллием.

Однако, полученные ранее экспериментально показатели отражения для многослойных зеркал Mo/Ве [1], Cu/Ве [2] и Al/Ве [4] были существенно далеки от теоретически возможных. Исследователи связывают падение отражательной способности как правило с ростом межслоевой шероховатости и взаимодиффузии основных слоев. Для подбора эффективных методов интерфейса инжиниринга требуется детальное исследование состава и протязненности межслоевых областей. Помимо этого, не менее важны исследование стабильности поверхностных областей под действием низкотемпературных процессов окисления и влияния высокотемпературных процессов на качество интерфейсов во всей структуре.

Традиционные методы изучения состава межслоевой области, как правило, носят разрушающий характер, и поэтому не могут дать полной объективной информации о строении интерфейса. Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС), являясь неразрушающим методом, позволяет проводить послыйный фазовый химический анализ структуры путем изменения угла эмиссии электронов при фиксированной энергии возбуждающих фотонов.

В рамках нашей работы методами рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии проведено исследование состава модельных систем и многослойных наноструктур Mo/Ве, Cu/Ве и Al/Ве. Показано формирование бериллидов молибдена в зависимости от порядка напыления в многослойных зеркалах Mo/Ве: MoVe<sub>2</sub> на границе Mo на Ве, MoVe<sub>2</sub> — Ве на Mo [5]. Пролемонстрировано влияние на состав межслоевой области внесения барьерных слоев Si и V<sub>4</sub>C [6]. Исследована термическая стабильность

многослойных структур Mo/Ве с и без барьерных слоев [7]. В модельных системах Cu/Ве обнаружено образование бериллидов рутения. Исследовано влияние на состав межслоевой области введения барьерного слоя молибдена, приволящего к росту отражательной способности зеркал. Проведен анализ влияния низкотемпературных процессов окисления на качество структуры приповерхностных областей в многослойных наноструктурах Al/Ве.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 19-72-20125-П. Авторы также выражают свою благодарность Междисциплинарному исследовательскому центру по направлению «Нанотехнология», ресурсным центрам «Рентгенодифракционные методы исследования» и «Физические методы исследования поверхности» Научного парка СПбГУ и Курчатовскому комплексу синхротронно-нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» (Лабораторный модуль ЭСХА) за предоставленные исследования.

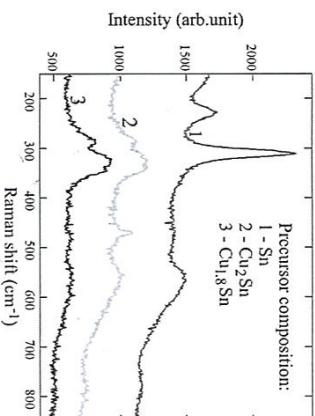
#### Литература

1. Montcalm, C., Vajit, S., Mirkarimi, P. V., Sprille, E. A., Weber, F. J., & Folta, J. A. (1998, June). In Emerging Lithographic Technologies II (Vol. 3331, pp. 42—51). SPIE.
2. Vajit, S., Velumet, R. D., Mirkarimi, P. V., Montcalm, C., Wall, M. A., Medovsky, M., & Folta, J. A. (1999, November). In EUV, X-Ray, and Neutron Sources and Sources (Vol. 3767, pp. 259—270). SPIE.
3. Polkovnikov, V. N., Salashchenko, N. N., Sveshnikov, M. V., & Chikhido, N. I. (2020). Physics-Uspokhi, 63(1), 83.
4. Chikhido, N. I., Ratiev, D. E., Polkovnikov, V. N., Salashchenko, N. N., Sveshnikov, R. A., Sironieva, I. L., ... & Zaev, S. Y. (2017). Thin Solid Films, 631, 106—111.
5. Kasatikov, S. A., Filalova, E. O., Sakhonenkov, S. S., Gaisin, A. U., Polkovnikov, V. N., & Smetin, R. M. (2019). The Journal of Physical Chemistry C, 123(42), 25747—25755.
6. Filalova, E. O., Sakhonenkov, S. S., Kasatikov, S. A., Gaisin, A. U., Faleeva, E. S., Smetin, R. M., & Polkovnikov, V. N. (2020). The Journal of Physical Chemistry C, 124(41), 22601—22609.
7. Gaisin, A. U., Karataev, A. V., Solomonov, A. V., Pleshkov, R. S., Chikhido, N. I., & Filalova, E. O. (2021). Physical Chemistry Chemical Physics, 23(41), 23978—23985.



ких плёнок  $\text{Cu}_2\text{SnS}_3$ , из-за наличия примесных фаз и присутствия дефектов кристаллической структуры [4]. Нашим научным коллективом показана возможность формирования тонких плёнок  $\text{Cu}_2\text{SnS}_3$  или  $\text{Cu}_2\text{SnSe}_3$  без включения примесных фаз по двухстадийной методике: напыления на подложку металлического слоя-прекурсора с последующим отжигом его в парах халькогена [5].

При анализе фазового состава плёнок  $\text{Cu}_2\text{SnS}_3$  возникают сложности, вызванные тем, что данное соединение может кристаллизоваться в трёх модификациях — кубической, тетрагональной или моноклинной в зависимости от степени упорядочения Cu и Sn в катионной подрешётке кристалла. Рентгенофазовый анализ не позволяет отличить одну модификацию от другой, в то время как на спектрах комбинационного рассеяния света (КРС) такое отличие заметно.



**Рис.** Спектры КРС для образцов сульфидов, сформированных в результате отжига в парах серы при температуре подложки  $420^\circ\text{C}$  в течение 20 минут из слоя металлизации различного состава. Давление паров серы при этом составляло  $10^{-2}$  мм рт. ст.

В данной работе представлены результаты исследования КРС на плёнках сульфидов, сформированных из металлических слоёв различного состава (см. рисунок). Показано, что в условиях обеднения медью удаётся сформировать плёнку  $\text{Cu}_2\text{SnS}_3$  смеси тетрагональной и моноклинной модификаций с некоторой степенью упорядочения в катионной подрешётке. Для этих модификации характерны пики КРС, с волновыми числами 290, 335 и  $350\text{ см}^{-1}$  [4]. Наиболее разупорядоченная модификация  $\text{Cu}_2\text{SnS}_3$  — кубическая даёт пики КРС на значениях волновых чисел 303 и  $360\text{ см}^{-1}$ , каковых на рисунке не наблюдается.

Малые вариации состава металлического прекурсора существенно влияют на фазовый состав формируемой в ходе отжига плёнки сульфида. В частности, наличие нежелательной примеси сульфида меди  $\text{CuS}$  в плёнке  $\text{Cu}_2\text{SnS}_3$  всегда наблюдается в условиях стехиометрического состава прекурсора  $\text{Cu}:\text{Sn} = 2:1$  в атомных долях [4]. На рисунке соединению  $\text{CuS}$  отвечает пик КРС, соответствующий рамановскому сдвигу в  $470\text{ см}^{-1}$ . Использование прекурсора, который обеднён медью, начиная с соотношения элементов  $\text{Cu}:\text{Sn} = 1,8:1$  в атомных долях, позволяет формировать плёнку  $\text{Cu}_2\text{SnS}_3$  без примеси  $\text{CuS}$ . Этот эффект объясняется в литературе [2] особенностями физико-химических процессов, происходящих на границе раздела конденсированная среда — паровая фаза. В ходе высокотемпературного отжига могут формироваться молекулы относительно легкого сульфида олова  $\text{SnS}$ , которые покидают плёнку и вызывают в ней дефицит олова. Для предупреждения такого явления и приходится корректировать исходный состав металлизации-прекурсора.

#### Литература

1. W. Nertche, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 590—595.
2. V. K. M. Reddy, Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2019, 76, 39.
3. Jie Liang, Solar Energy, 2019, 194, 986—994.
4. M. Y. Zaki, Scientific Reports - Nature, 2022, 12, 7958.
5. Д. В. Буданов, Конденсированные среды и межфазные границы, 2019, 21, 24—29.

#### РЕНТГЕНОСПЕКТРАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СОСТАВА МЕЖСЛОЕВЫХ ОБЛАСТЕЙ МНОГОСЛОЙНЫХ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ НАНОСТРУКТУР НА ОСНОВЕ БЕРИЛЛИЯ ДЛЯ ЭУФ ДИАПАЗОНА

**А. У. Гайсин<sup>1</sup>, С. С. Сахоненков<sup>1</sup>, Е. О. Филатова<sup>1</sup>**  
<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет,  
 ул. Ульяновская, д. 1, Санкт-Петербург, Россия  
 e-mail: a.gaisin@srbu.ru

Благодаря малой плотности, а как следствие, малому поглощению рентгеновски во всем спектральном диапазоне рентгеновский лучей, бериллий является чрезвычайно перспективным материалом для исполь-