

УДК 621.315.592

МРНТИ 29.15.05; 29.17.27; 29.19.03

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2025-22-4-365-373>

^{1*}**Шонғалова А.Қ.,**

PhD, старший научный сотрудник ФТИ, ORCID ID: 0000-0002-7352-9007,

*e-mail: shongalova.aigul@gmail.com

²**Токмолдин Н.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0002-0663-0228, e-mail: tokmoldin@pdi-berlin.de,

³**Өміртай М.,**

магистрант, ORCID ID: 0009-0003-2275-9018, e-mail: m.omirtay@gmail.com

¹Физико-технический институт, Satbayev University, г. Алматы, Казахстан

²Институт физики и астрономии, Потсдамский университет, г. Потсдам, Германия

³Satbayev University, г. Алматы, Казахстан

ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛЕНКИ СЕЛЕНИДА СУРЬМЫ ПУТЕМ СЕЛЕНИЗАЦИИ

Аннотация

В данной работе представлены метод синтеза пленки селенида сурьмы (Sb_2Se_3), а также исследования его морфологии, структурных и оптических свойств. Метод синтеза состоял из двух этапов. На первом этапе с помощью магнетронного распыления был получен прекурсор из сурьмы. На втором этапе была проведена селенизация в парах селена при температуре 400 °C в течение 10 минут. Морфология полученных пленок была исследована с помощью сканирующей электронной микроскопии. Результаты исследования морфологии показали, что пленка имеет поликристаллическую структуру с хорошей адгезией к кремниевой подложке. С помощью энергодиспергирующей спектроскопии (ЭДС) был исследован элементный состав пленки. По результатам ЭДС соотношение атомного процента Se/Sb составило 1,59, что указывает на получение пленки, близкой к стехиометрическому. Данные, полученные ЭДС, были подтверждены исследованием фазового состава, выполненным методом рентгенофазного исследования. Было выяснено, что пленка кристаллизуется в орторомбической сингонии (Pnma). Дополнительных фаз в структуре не было обнаружено. Для исследования оптоэлектронных свойств пленки был снят спектр отражения. Из спектра отражения методом Таука была определена ширина запрещенной зоны, равная 1,69 эВ, что является оптимальным для применения в оптоэлектронных устройствах.

Ключевые слова: селенид сурьмы, селенизация, магнетронное распыление, оптоэлектроника, пленки.

Введение

Одним из важных направлений разработки новых материалов является поиск и создание экономически эффективных возобновляемых источников энергии. В число таких перспективных технологий входят ветровая, био-, гидро-, солнечная энергетика. В глобальном масштабе на данный момент мощность всех солнечных энергостанций в мировом электроэнергетическом балансе составляет лишь 1% [1]. Основными факторами небольшого спроса на данный момент являются цена и относительно низкая эффективность фотоэлементов, присутствующих на рынке солнечной энергетике. По этой причине исследователи изучают новые недорогие материалы, находящиеся в избытке в земной коре, оптимизируют существующие структуры и разрабатывают инновационные концепты структуры солнечных элементов, превосходящие обычный одиночный p-n-переход с точки зрения стоимости и эффективности.

В настоящее время солнечные батареи на основе поли- и монокристаллического кремния составляют более 80% рынка солнечной энергетике, по данным 2024 г. [2]. Остальные составляют фотоэлементы, изготовленные по тонкопленочной технологии из аморфного кремния

(a-Si), селенида меди, индия, галлия (Cu(In,Ga)Se_2 (CIGS)) [3], теллурида кадмия (CdTe) [4]. Эффективность солнечных элементов на основе CIGS и CdTe составляет свыше 20%, у a-Si – выше 13% [5]. Однако технологии CIGS и CdTe имеют существенные недостатки: в структурах CIGS вследствие ограниченности In, а в CdTe вследствие содержания тяжелых металлов, что вызывает озабоченность по причине воздействия на окружающую среду [6–7]. Как альтернатива появились новые материалы, состоящие из относительно распространенных элементов. В последнее десятилетие такие соединения, как $\text{Cu}_2\text{ZnSn(Se,S)}$ [8], CuSbS [9] и $\text{Sb}_2(\text{Se,S})_3$ [10], исследуются в качестве перспективных материалов для СЭ. Кроме того, набирает популярность новое поколение фотоэлектрических материалов, в том числе из гибридов органических и неорганических материалов – органо-неорганических перовскитов (например, $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$) с эффективностью выше 20% [11].

Селенид сурьмы (Sb_2Se_3) – полупроводниковый халькогенид группы $A_m^{\text{VI}}B_n^{\text{VI}}$, кристаллизующийся в орторомбической сингонии, пространственная группа Pnma (62), обладающий оптимальной шириной запрещенной зоны в диапазоне 1,04–1,8 эВ для Sb_2Se_3 , высоким коэффициентом поглощения ($\alpha > 10^4 \text{ cm}^{-1}$) в видимой области спектра [12]. На основании электрохимических, опто- и термоэлектрических свойств были опубликованы более 100 трудов-исследований о возможностях применении этих материалов в качестве анодных материалов для литий-ионных батарей и для хранения водорода, в устройствах оптической записи, в опто- и термоэлектрических охлаждающих устройствах, в солнечных и фотоэлектрохимических элементах.

Технология синтеза имеет прямое влияние на структуру получаемых пленок, тем самым влияя на эффективность элемента. Известно три наиболее распространенных метода получения соединения $\text{Sb}_2(\text{S,Se})_3$: методы химического, термического и электрического осаждения [13].

Магнетронное распыление относится к методам распыления материалов ионной бомбардировкой. Нанесение покрытий в вакууме с помощью магнетронных систем заключается в распылении твердой мишени напыляемого материала ионами инертного газа, образующимися в плазме аномального тлеющего разряда при наложении на него магнитного поля, силовые линии которого ортогонально пересекают силовые линии магнитного поля. К основным достоинствам магнетронного распыления относятся: легкая контролируемость химического состава в тонких пленках и хорошая воспроизводимость материала катода, невысокая температура подложки, возможность нанесения однородных пленок, высокая адгезия, однородность толщины пленки, возможность управления структурой. Метод магнетронного распыления широко используется для получения CIGS структур. Как показывают результаты измерений характеристик пленок, полученных по данной методике, они обладают высоким качеством кристаллической структуры и высокой эффективностью по сравнению с пленками, полученными другими методами [14]. Недостатками метода магнетронного распыления является высокая энергоемкость процесса.

В данной работе представлен синтез поликристаллической пленки с использованием магнетронного распыления, и исследования ее характеристик.

Материалы и методы

Синтез. Получение пленки селенида сурьмы состояло из двух этапов. На первом этапе методом магнетронного распыления были получены пленки сурьмы. Далее пленка сурьмы проходила этап селенизации в трубчатой печи. В качестве источника сурьмы была использована мишень собственного производства. Мишень сурьмы была получена из кусков сурьмы путем их дробления до состояния крупнозернистого песка и спеканием в трехзонной печи быстрого отжига в атмосфере аргона при температуре ~650 °С. Перед спеканием полученная масса была подвержена очистке от грязи и жира: обрабатываемая дистиллированной водой, уксусом, спиртом в ультразвуковой ванне в течение 15 мин. последовательно, далее сушилась в

сушильном шкафу при температуре 100 оС до высыхания. Форма для мишени была изготовлена из кварцевого стекла. Диаметр полученной формы составляет ~55 мм. Перед спеканием полученная форма была очищена по вышеприведенной схеме. После подготовки материалы были помещены в печь. Мишень спекалась в течение 20 мин., поток аргона во время процесса был одинаков – 300 ст. см³/мин. После спекания мишень была доведена до необходимого диаметра катода магнетрона – 50 мм путем распиливания лишних краев. На рисунке 1а) приведен элементный анализ, полученный методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопией спеченной мишени. Мишень состоит исключительно из сурьмы, сторонних элементов в спектре не наблюдается.

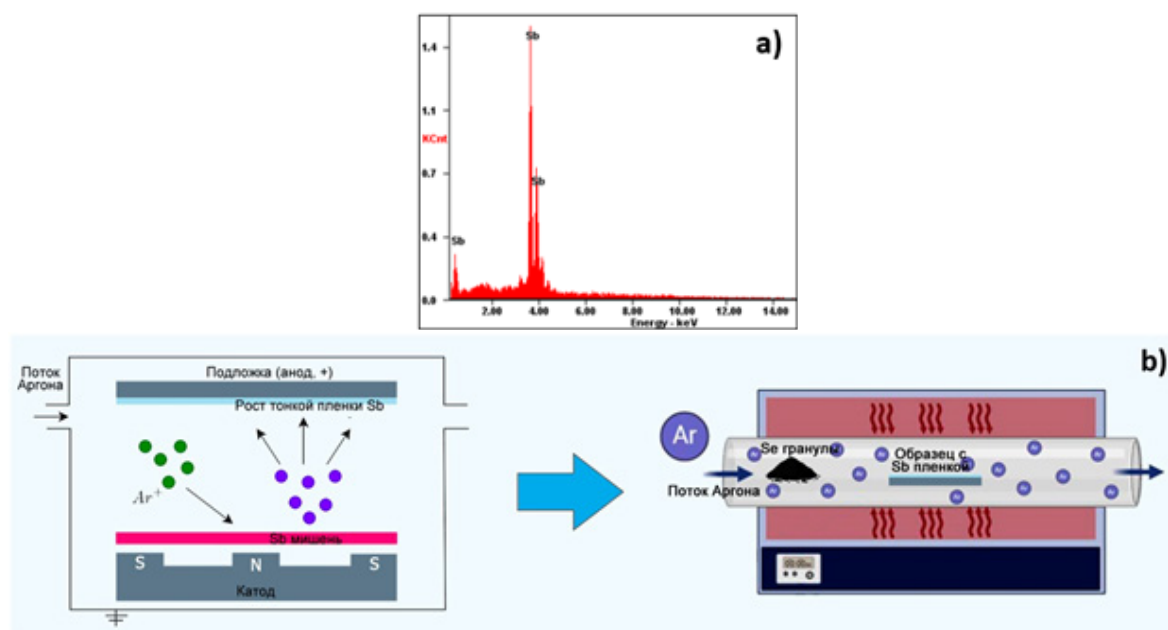


Рисунок 1 – Схема получения пленки селенида сурьмы: напыление пленки сурьмы магнетронным распылением и дальнейшая селенизация

Пленка сурьмы осаждалась на подложки из кремния n-типа методом радиочастотного магнетронного распыления в атмосфере аргона при рабочем давлении $1,8 \times 10^{-3}$ Торр. Пленка осаждалась в течение 20 мин.

Селенизация пленок сурьмы, осажденных на кремний, проводилась в кварцевой печи. Печь состоит из системы нагрева, состоящей из проволоки никель-хромового сплава, намотанной вокруг трубки, которая подсоединена к лабораторному автотрансформатору. Температура нагрева трубы регулировалась путем подачи напряжения к концам проволоки с помощью лабораторного автотрансформатора.

Процесс нагрева печи состоит из нескольких этапов. Предварительно объем печи наполняли аргоном, чтобы очистить атмосферу от кислорода. Затем печь с двух концов закрывали для предотвращения попадания воздуха во время отжига. В качестве источника селена были использованы гранулы селена. Гранулы были помещены в открытую емкость из никель-хромовой фольги. При помощи лабораторного автотрансформатора подавалось напряжение, и температура печи постепенно повышалась. Для достижения необходимой температуры селенизации печь нагревалась в течение 30–40 мин. Скорость нагрева составляла ~ 15 °С/мин. Далее образцы удерживались при фиксированной температуре 400 °С в течение 10 мин. Температура селенизации, представленная в данной работе, является одной из многих, испытанных в ранней нашей работе [15]. После селенизации образцы охлаждались в печи до комнатной температуры в атмосфере селена.

Исследование характеристик. Были исследованы морфология и элементный состав пленки селенида сурьмы на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) и энергодиспергирующем спектро스코пе (ЭДС) (JEOL). Структурный и фазовый состав изучались с помощью рентгеноструктурного анализа и спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС). Измерения спектроскопии КРС проводили с использованием Solver Spectrum. Поверхность образца была сфокусирована с помощью объектива 100× с диаметром лазерного пятна ~ 1 мкм. В качестве источника возбуждения использовался HeNe лазер (632,8 нм). Рентгеноструктурный анализ пленок проводился на рентгеновском дифрактометре RIGAKU MiniFlex 600 с программным обеспечением PPXL2.0.

Результаты и обсуждение

На рисунке 2 приведены изображения пленки сурьмы: (а) на кремнии и после селенизации (b). До селенизации пленка сурьмы имеет зеркальную поверхность, после селенизации, т.е. пленка Sb_2Se_3 имеет матовую поверхность. У полученной пленки хорошая адгезия.

При исследовании элементной структуры пленок по анализу были идентифицированы три элемента: Sb, Se (элементы пленки) и Si (материал подложки). Соотношение селена к сурьме по результатам элементного анализа с помощью ЭДС составило 1,59, что очень близко к стехиометрическому значению – 1,5. По данным ЭДС, содержание элементов в пленке составляет 61 ат.% селена и 39 ат.% сурьмы при исключении кремния.

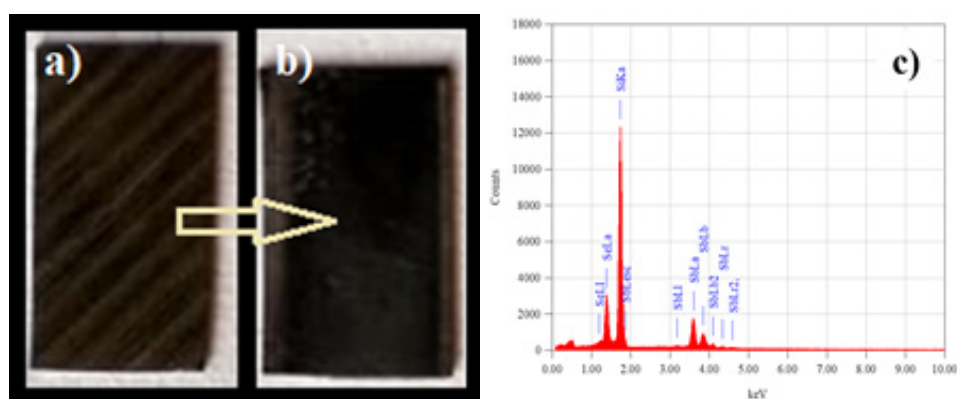


Рисунок 2 – а) пленка сурьмы на кремнии; b – пленка селенида сурьмы;
с) спектры энергодисперсионной спектроскопии для пленки селенида сурьмы

Изображения поверхности пленки селенида сурьмы с различным увеличением представлены на рисунке 3. Поверхность пленки при низком увеличении показывает относительно однородное покрытие без выраженных дефектов (рисунок 3а). А при более высоком увеличении пленка демонстрирует зернистую структуру с разными формами, что указывает на поликристаллический характер (рисунок 3б). Поперечное сечение пленки показывает столбчатый рост кристаллитов перпендикулярно поверхности подложки, с хорошей адгезией слоя к подложке (рисунок 3с).

Результаты спектроскопии КРС полученный при нормальных условиях представлены на рисунке 4. В спектре наблюдаются характерные для Sb_2Se_3 пики, расположенные при ~100, ~120, ~153, ~190, ~210 cm^{-1} . На спектре не обнаружено наличие другой фазы.

Результаты рентгеноструктурного анализа (рисунок 4) показали, что пленки Sb_2Se_3 кристаллизуются в орторомбической сингонии, пространственная группа $Pnma$ (62). Фазовый анализ проводился на основании банка данных Международного центра дифракционных данных (ICDD, карта PDF № 01-083-7430). Согласно данным рентгеноструктурного анализа, кро-

ме фазы селенидов сурьмы, других фаз в образце не определено. Показания рентгеноструктурного анализа соответствуют результатам спектроскопии КРС.

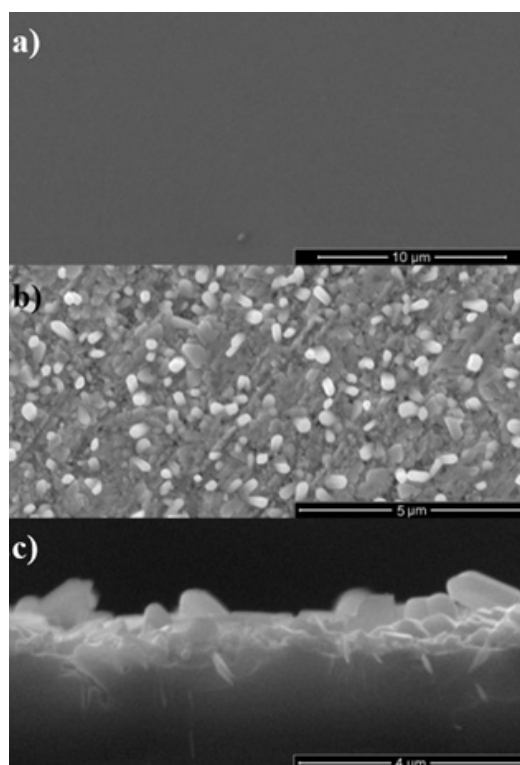


Рисунок 3 – Морфология пленки селенида сурьмы, полученного методом сканирующей электронной микроскопии

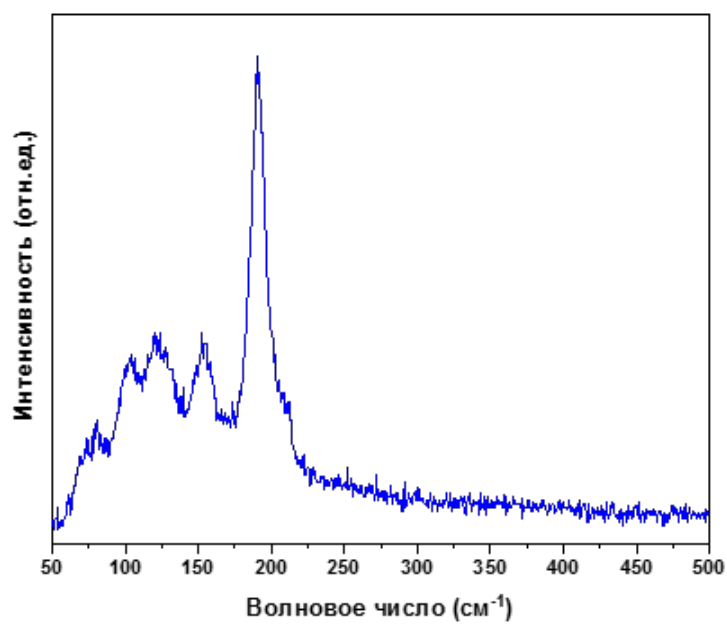


Рисунок 4 – Спектр комбинационного рассеяния света пленки селенида сурьмы

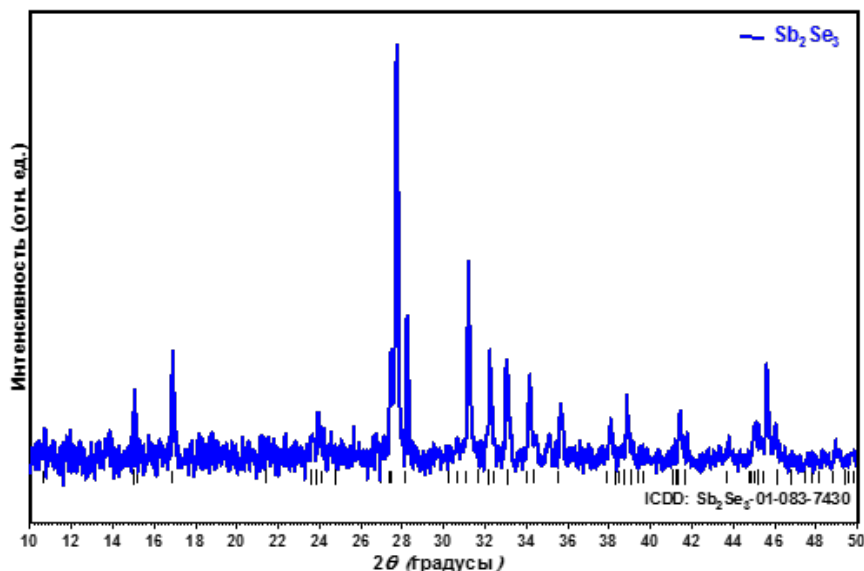


Рисунок 5 – Спектры рентгеноструктурного анализа для пленок селенида сурьмы

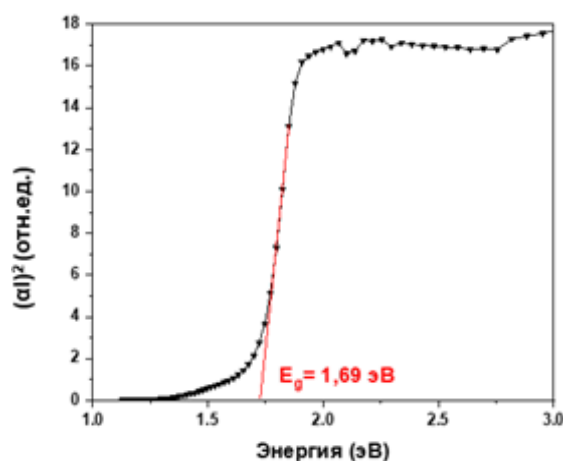


Рисунок 6 – Определение ширины запрещенной зоны пленки Sb₂Se₃ методом Таука

Для исследования оптоэлектронных характеристик был снят спектр отражения пленки. Ширина запрещенной зоны была определена методом Таука исходя из зависимости $A(h\nu - E_g) = (\alpha h\nu)^2$, где показатель $n = 2$, соответствует прямозонному переходу от энергии фотонов (рисунок 6). Путем экстраполяции зоны кривой была определена ширина запрещенной зоны, равная 1,69 эВ. В нижней части спектра, ближе к энергетической оси, наблюдается дополнительный «хвост», который связан с подложкой из кремния. Этот край соответствует ширине запрещенной зоны кремния – примерно 1,1 эВ, что подтверждает корректность интерпретации и выделения вкладов пленки и подложки [16].

По литературным данным, в зависимости от соотношения селена и сурьмы, а также кристаллической структуры ширина запрещенной зоны обычно варьируется от ~1,1 эВ до 1,8 эВ [17].

Таким образом, значение 1,69 эВ представляет собой максимальный диапазон по сравнению с данными для объемных образцов. Это может быть связано со структурой тонкой пленки, дефектами или локализованными состояниями, расширяющими край поглощения, что является распространенным эффектом для тонких пленок Sb_2Se_3 [18].

Заключение

Полученные результаты продемонстрировали, что комбинация магнетронного распыления прекурсора из сурьмы и дальнейший отжиг/селенизация позволяют эффективно синтезировать селенид сурьмы. Данный метод позволил получить структуру с оптимальными характеристиками и имеет перспективу применения в оптоэлектронных устройствах.

Исследования элементного состава пленки показали соотношение селена к сурьме 1,59. Этот показатель очень близок к теоретическому показателю стехиометрии – 1,5, показывая оптимальность примененных параметров синтеза. Морфология пленки продемонстрировала хорошую адгезию к подложке, а также зернистую структуру пленки. Рентгеноструктурный анализ и спектр КРС пленок подтвердил данные, полученные методом ЭДС. Дополнительных, нежелательных фаз в кристаллической фазе пленки не было обнаружено. Было определено, что пленка кристаллизуется в орторомбической сингонии и соответствует данным международной кристаллографии.

Ширина запрещенной зоны, определенная методом Таука, составила 1,69 эВ. Второй «хвост» 1,1 эВ, наблюдаемый в спектре, был определен как ширина запрещенной зоны подложки.

Проведенные исследования показали, что синтезированная пленка селенида сурьмы имеет потенциал для применения в качестве одного из недорогих, сравнительно экологически чистых и энергоэффективных полупроводников в будущих солнечных элементах, оптоэлектронных устройствах и фотоэлектрохимических системах.

Информация о финансировании

Исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета науки Министерства образования и науки Республики Казахстан, грант AP19178659 «Исследование динамики решетки селенида сурьмы методом колебательной спектроскопии».

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Le Marois, J.B., Pales, A.F., Bennett, S. Reaching net zero emissions demands faster innovation, but we've already come a long way. International Energy Agency, 13 (2023).
- 2 Lee, T.D., Ebong, A.U. A review of thin film solar cell technologies and challenges. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 70, 1286–1297 (2017).
- 3 Machkih, K., Oubaki, R., Makha, M. A review of CIGS thin film semiconductor deposition via sputtering and thermal evaporation for solar cell applications. Coatings, 14(9), 1088 (2024).
- 4 Scarpulla. M.A. et al. CdTe-based thin film photovoltaics: Recent advances, current challenges and future prospects. Solar Energy Materials and Solar Cells, 255, 112289 (2023).
- 5 Stuckelberger, M., Biron, R., Wyrsh, N., Haug, F.J., Ballif, C. Progress in solar cells from hydrogenated amorphous silicon. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 76, 1497–1523 (2017).
- 6 Han, T., Luo, M., Liu, Y., Lu, C., Ge, Y., Xue, X., Xu, X. $\text{Sb}_2\text{S}_3/\text{Sb}_2\text{Se}_3$ heterojunction for high-performance photodetection and hydrogen production. Journal of Colloid and Interface Science, 628, 886–895 (2022).
- 7 Mavlonov, A., Razykov, T., Raziq, F., Gan, J., Chantana, J., Kawano, Y., Qiao, L. A review of Sb_2Se_3 photovoltaic absorber materials and thin-film solar cells. Solar Energy, 201, 227–246 (2020).

- 8 Qin, X., Xu, B., Lin, J., Chen, J., Tong, H., Chen, Y., Sun, L. Above 10% efficient electrodeposited $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S}, \text{Se})_4$ solar cell achieved by modifying precursor. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 242, 111781 (2022).
- 9 Singh, P.K., Rai, S., Lohia, P., Dwivedi, D.K. Comparative study of the CZTS, CuSbS_2 and CuSbSe_2 solar photovoltaic cell with an earth-abundant non-toxic buffer layer. *Solar Energy*, 222, 175–185 (2021).
- 10 Zhang, L., Zheng, J., Liu, C., Xie, Y., Lu, H., Luo, Q., Mai, Y. Over 10% Efficient $\text{Sb}_2(\text{S}, \text{Se})_3$ Solar Cells Enabled by CsI-Doping Strategy. *Small*, 20(27), 2310418 (2024).
- 11 Nowshad, N., Islam, R., Uddin, M.N. Photovoltaic Performance Analysis of $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ Perovskite Solar Cells Using SCAPS Simulation. *Chemistry of Inorganic Materials*, 100107 (2025).
- 12 Maurya, K.K., Singh, V. NSb_2Se_3 versus Sb_2S_3 solar cell: a numerical simulation. *Solar Energy*, 228, 540–549 (2021).
- 13 Zeng, K., Xue, D. J., Tang, J. Antimony selenide thin-film solar cells. *Semiconductor Science and Technology*, 31(6), 063001 (2016).
- 14 Greene, J.E. Tracing the recorded history of thin-film sputter deposition: From the 1800s to 2017. *Journal of Vacuum Science & Technology A.*, 35(5) (2017).
- 15 Shongalova, A., Correia, M.R., Teixeira, J.P., Leitão, J.P., González, J.C., Ranjbar, S., Fernandes, P.A. Growth of Sb_2Se_3 thin films by selenization of RF sputtered binary precursors. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 187, 219–226 (2018).
- 16 Oliphant, E., Mantena, V., Brod, M., Snyder, G.J., Sun, W. Why does silicon have an indirect band gap? *Materials Horizons*, 12(9), 3073–3083 (2025).
- 17 Nicolás-Marín, M.M., González-Castillo, J.R., Vigil-Galán, O., Courel, M. The state of the art of $\text{Sb}_2(\text{S}, \text{Se})_3$ thin film solar cells: current progress and future prospect. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 55(30), 303001(2022).
- 18 Cifuentes, N., Ghosh, S., Shongalova, A., Correia, M.R., Salomé, P.M., Fernandes, P.A., González, J.C. Electronic conduction mechanisms and defects in polycrystalline antimony selenide. *The Journal of Physical Chemistry C*, 124(14), 7677–7682 (2020).

^{1*}Шонгалова А.Қ.,

PhD, ФТИ аға ғылыми қызметкері, ORCID ID: 0000-0002-7352-9007,

*e-mail: shongalova.aigul@gmail.com

²Токмолдин Н.,

PhD, ORCID ID: 0000-0002-0663-0228,

e-mail: tokmoldin@pdi-berlin.de

³Өміртай М.,

магистрант, ORCID ID: 0009-0003-2275-9018,

e-mail: m.omirtay@gmail.com

¹Физика-техникалық институт, Satbayev University, Алматы қ., Қазақстан

²Физика және астрономия институты, Потсдам университеті, Потсдам қ., Германия

³Satbayev University, Алматы қ., Қазақстан

СЕЛЕНДЕУ ӘДІСІМЕН СҮРМЕ СЕЛЕНИДІН АЛУ ЖӘНЕ ЗЕРТТЕУ

Аңдатпа

Осы жұмыста сүрме селениді (Sb_2Se_3) жұқа қабықшаларын синтездеу әдісі, сондай-ақ олардың морфологиялық, құрылымдық және оптикалық қасиеттерін зерттеу нәтижелері ұсынылған. Синтездеу әдісі екі кезеңнен тұрды. Бірінші кезеңде магнетрондық тозаңдату әдісі арқылы сурьмадан прекурсор қабықша алынды. Екінші кезеңде 400°C температурада 10 минут бойы селен буларында селенизация процесі жүргізілді. Алынған қабықшалардың морфологиясы сканерлеуші электрондық микроскопия әдісімен зерттелді. Морфологиялық зерттеу нәтижелері қабықшаның кремнийлі төсемге жақсы адгезиясымен сипатталатын поликристалдық құрылымға ие екенін көрсетті. Қабықшаның элементтік құрамы энергодисперсиялық спектроскопия (ЭДС) әдісімен анықталды. ЭДС нәтижелері бойынша Se/Sb атомдық пайыздық қатынасы 1,59-ға тең болды, бұл алынған қабықшаның стехиометриялық құрамға жақын екенін көрсетеді. ЭДС арқылы

алынған деректер рентгендік фазалық талдау әдісімен жүргізілген фазалық құрамды зерттеу нәтижелерімен расталды. Қабықшаның орторомбиялық сингонияда (Pnma) кристалданатыны анықталды. Құрылымда қосымша фазалар табылған жоқ. Қабықшаның оптоэлектрондық қасиеттерін зерттеу үшін шағылу спектрі өлшенді. Шағылу спектрінен Таука әдісі арқылы тыйым салынған аймақтың ені 1,69 эВ екені анықталды, бұл мән оптоэлектрондық құрылғыларда қолдану үшін оңтайлы болып табылады.

Тірек сөздер: сүрме селениді, селендеу, магнетронды бүрку, оптоэлектроника, жұқа қабықшалар.

¹**Shongalova A.K. ***,

PhD, Senior Researcher at IPT, ORCID ID: 0000-0002-7352-9007,

*e-mail: shongalova.aigul@gmail.com

²**Tokmoldin N.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0002-0663-0228,

e-mail: tokmoldin@pdi-berlin.de

³**Omirtay M.,**

Master's student, ORCID ID: 0009-0003-2275-9018,

e-mail: m.omirtay@gmail.com

¹Institute of Physics and Technology, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

²Institute of Physics and Astronomy, University of Potsdam, Potsdam, Germany

³Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

PREPARATION AND INVESTIGATION OF ANTIMONY SELENIDE FILM BY SELENIZATION

Abstract

In this work, a method for synthesizing antimony selenide (Sb₂Se₃) thin films is presented, along with investigations of their morphology, structural, and optical properties. The synthesis method consisted of two stages. In the first stage, an antimony precursor film was deposited by magnetron sputtering. In the second stage, selenization was carried out in selenium vapor at a temperature of 400 °C for 10 minutes. The morphology of the obtained films was examined using scanning electron microscopy. The morphological analysis showed that the film has a polycrystalline structure with good adhesion to the silicon substrate. The elemental composition of the film was analyzed by energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS). According to the EDS results, the atomic percentage ratio of Se/Sb was 1.59, indicating that the obtained film is close to stoichiometric composition. The EDS data were confirmed by phase composition analysis performed using X-ray diffraction. It was found that the film crystallizes in the orthorhombic structure (Pnma). No secondary phases were detected in the structure. To investigate the optoelectronic properties of the film, a reflectance spectrum was recorded. From the reflectance spectrum, the band gap energy was determined using the Tauc method and found to be 1.69 eV, which is optimal for applications in optoelectronic devices.

Keywords: antimony selenide, selenization, magnetron sputtering, optoelectronics, films.

Дата поступления статьи в редакцию: 03.09.2025