

УДК 621.315.592

**Морфологические и структурные характеристики тонких пленок
Sb₂Se₃ синтезированных методом химического молекулярно-
пучкового осаждения**

**Т.М. Разыков, А.Х. Шукуров*, К.М. Кучкаров, Б.А. Эргашев,
Р.Р. Хуррамов, Ж.Г. Бекмирзоев, А.А. Мавлонов**

Физико-технический институт НПО «Физика-Солнце» АН РУз.,
Узбекистан, 100084, Ташкент, ул. Чингиза Айтматова, 2Б
тел.: +99(871)235-41-03 *e-mail: a_shukurov@yahoo.com

Дата поступления: 12.03.2018 После доработки: 29.01.2019 Принята в печать: 03.05.2019

Аннотация. Представлены структурные и морфологические характеристики тонких пленок селенида сурьмы (Sb₂Se₃), которые были осаждены методом химического молекулярно-пучкового осаждения (ХМПО), при атмосферном давлении потока водорода на подложке из щелочного стекла. Установлено, что температура осаждения влияет на морфологию и структуру пленки. Температура подложки 720 К дает предпочтительно ориентацию (211), то есть одномерные (1D) цепи Sb₂Se₃ выравниваются вдоль направления роста. Морфологические исследования показывают, что размер зерен увеличивается с ростом температуры подложки, однако 1D цепи Sb₂Se₃ имеют тенденцию выравниваться вдоль бокового направления. Установлено, что пленки Sb₂Se₃, осажденные при температурах подложки 720 К, имеют предпочтительную ориентацию (211) и имеют поликристаллическую структуру. При более высокой температуре подложки 770 К и 820 К также имеют поликристаллическую структуру, но с ориентацией (120). Исследования морфологии поверхности показывают, что при низких температурах подложки образцы имеют мелкие зерна с размерами (200-300) нм, но довольно плотно упакованные и с 1D цепочками Sb₂Se₃, которые выровнены вдоль роста соответствующее ориентации (211). Было установлено, что благодаря своим анизотропным свойствам, тонкие пленки Sb₂Se₃ с ориентацией (211) подходят для слоя поглотителя фотоэлементов.

Ключевые слова: Sb₂Se₃, тонкая пленка, фотовольтаика, поглощающий слой

UDC 621.315.592

**Morphological and structural characteristics of Sb₂Se₃ thin films fabricated by
chemical molecular beam deposition**

**T.M. Razykov, A.Kh. Shukurov*, K.M. Kuchkarov, B.A. Ergashev,
R.R. Khurramov, J.G. Bekmirzoyev, A.A. Mavlonov**

Physical-technical institute of SPA "Physics-Sun" of Uz AS,
house 2B, Chingiz Aytmatov str., 100084, Tashkent, Uzbekistan
tel.: +99(871)235-41-03 *e-mail: a_shukurov@yahoo.com

Submitted: 12.03.2019 Revised: 29.01.2019 Accepted: 03.05.2019

Abstract. The work presents the structural and morphological characteristics of antimony selenide (Sb₂Se₃) thin films, deposited by the chemical molecular beam deposition (CMBD) in atmospheric pressure hydrogen flow on glass substrate. It was found that the deposition temperature affects the morphology and structure of the films. At low deposition temperature of the 720 K the film depicts the preferable (211) crystal orientation for photovoltaic application, that is one-dimensional (1D) Sb₂Se₃ ribbons are aligned along the growth direction. Morphological studies show that the grain size increases with the temperature

of the substrate, however, the 1D Sb_2Se_3 chains tend to align along the lateral direction. Sb_2Se_3 films were fabricated using chemical molecular beam deposition at substrate temperatures of 720 K. Sb_2Se_3 films deposited at 720 K substrate temperatures were found to have a preferred orientation (211) and have a polycrystalline structure. At higher substrate temperatures, of 770 K and 820 K also have a polycrystalline structure, but with an orientation (120). At low substrate temperatures, the samples have fine grains with sizes of (200-300) nm, but rather tightly packed and with 1D chains of Sb_2Se_3 , which are aligned along the growth corresponding to (211). It was found that due to its anisotropic properties, Sb_2Se_3 thin films with orientation (211) are suitable for an absorber layer of solar cells.

Keywords: Sb_2Se_3 , thin film, photovoltaic absorber layer, chemical molecular beam deposition

Введение

Селенид сурьмы (Sb_2Se_3) является подходящим фотоэлектрическим поглощающим материалом благодаря его хорошим электрооптическим свойствам, таким как, ширина запрещенной зоны (1.1-1.2 эВ), высокий коэффициент поглощения ($> 10^5 \text{ см}^{-1}$) и довольно простой состав, например, по сравнению с тонкопленочными солнечными элементами Cu (In, Ga) Se_2 [1-3]. Как показано на рис. 1, тонкопленочные солнечные элементы на основе Sb_2Se_3 демонстрируют хороший прогресс: за последние 2 года коэффициент полезного действия (КПД) достиг значения 6.5% [4]. Однако показатель КПД по-прежнему намного ниже, чем КПД тонкопленочных солнечных элементов на основе Cu (In, Ge) Se_2 , CdTe и Si [4, 5].

Для увеличения эффективности тонкопленочных солнечных элементов на основе Sb_2Se_3 , важно осаждать пленки Sb_2Se_3 с оптимальными физическими свойствами. Многие авторы осаждали пленки Sb_2Se_3 разными методами: - быстрое термическое испарение в вакууме [6-8], термическое испарение [9], - жидкофазное химическое осаждение [10], - магнетронное распыление [11], - химическое осаждение из паровой фазы [12] и др. [13]. Было установлено, что благодаря своим анизотропным свойствам, тонкие пленки Sb_2Se_3 с ориентацией (221) подходят для слоя поглотителя фотоэлементов [14].

В данной работе были исследованы структурные и морфологические свойства пленок Sb_2Se_3 , синтезированных методом химического молекулярного пучкового осаждения (ХМПО).

Эксперимент

Исходный материал Sb_2Se_3 , со стехиометрическим составом, был синтезирован из гранул Sb и Se с чистотой 99,999%. Для изготовления твердого раствора Sb_2Se_3 , гранулы Sb и Se определенной пропорцией помещали в кварцевую ампулу, которая откачивалась до давления 10^{-5} Торр, и нагревалась в муфельной печи до 900 K в течение 8 час. Затем, ампула с Sb_2Se_3 быстро охлаждалась в ледяной воде, и после чего образцы извлекались. Для изучения кристаллографической структуры исходного материала Sb_2Se_3 , были проведены исследования рентгеновской дифракцией (XRD). Данные XRD исследования показали существование почти всех пиков из карты JCPDS для монокристалла Sb_2Se_3 (JCPDS-00-015-0861) [13]. Далее этот исходный материал использовался для выращивания тонких пленок Sb_2Se_3 .

Тонкие пленки на основе Sb_2Se_3 были выращены методом ХМПО при атмосферном давлении в потоке водорода, при температуре источника 900 ± 10 K и при различных температурах подложки (T_n), время осаждения составляло ~ 30 мин. В качестве подложки было использовано щелочное стекло. Подробная информация о методе ХМПО приведена в работе [15].

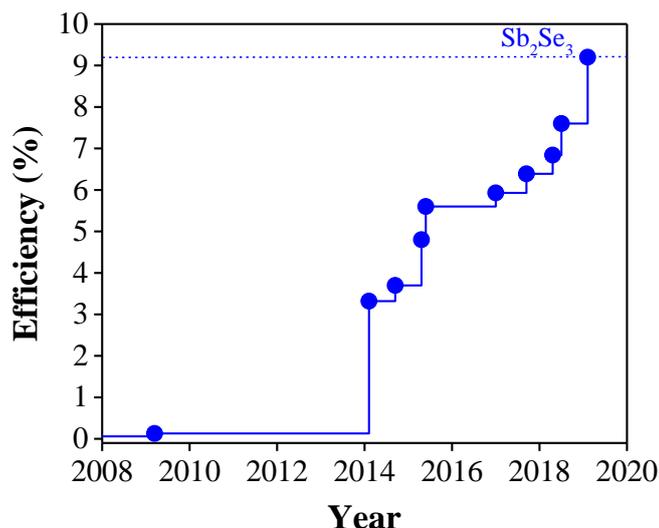


Рис. 1. Эволюция эффективности преобразования тонкопленочных солнечных элементов на основе Sb₂Se₃ [4, 16-26]

Fig. 1. Evolution efficiency of the Sb₂Se₃ thin film solar cells [4, 16-26]

Измерения рентгеновской дифракции (XRD) проводились с использованием дифрактометра УМ-1 и дифрактометра «Panalytical Empyrean» (излучение CuK α , $\lambda=1,5418 \text{ \AA}$), с углами исследования 2θ в диапазоне (10-55°) и (10-90°), соответственно. Исследования морфологии пленок проводились с использованием сканирующего электронного микроскопа (SEM-EVO MA 10).

Обсуждение результатов

На рис. 2 приведены EDX пленок Sb₂Se₃ полученных при температурах подложки 720 К, 770 К и 820 К. Все пленки были обогащены Sb. Как видно из рис.2, с повышением температуры подложки в пленке Se уменьшается. Это объясняется тем, что с увеличением температуры подложки повышается кинетическая энергия атомов Se, и происходит десорбция атомов селена. Это уменьшает количество селена в пленке. Было установлено, что качество пленки ухудшалось при температурах подложки 770-820 К.

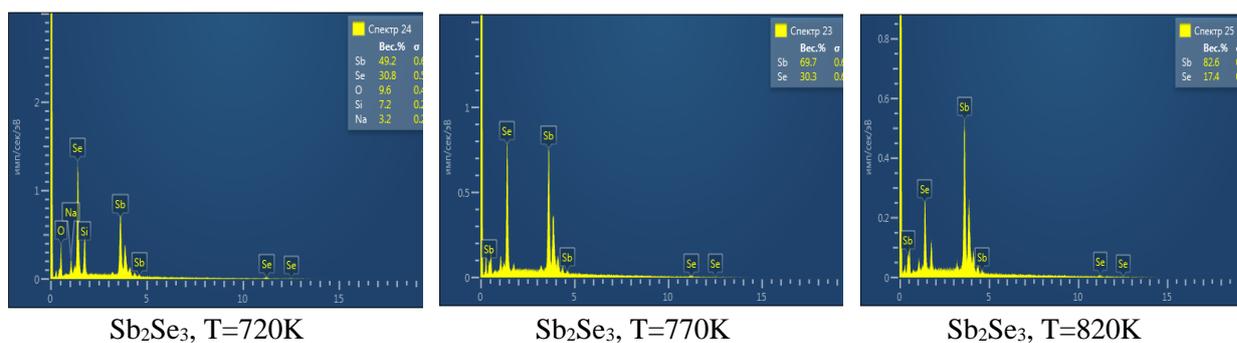


Рис. 2. Результаты энерго-дисперсионного анализа для пленок Sb₂Se₃, осаждённых при разных температурах подложки

Fig. 2. Results of energy-dispersive analysis for Sb₂Se₃ films deposited at different substrate temperatures

Для исследования кристаллографической фазы синтезированных пленок Sb₂Se₃, проводились исследования рентгеновской дифракции (XRD). На рис. 3 представлены результаты исследования пленок Sb₂Se₃ при разных температурах подложки. Видно, что образцы имеют различную кристаллографическую структуру.

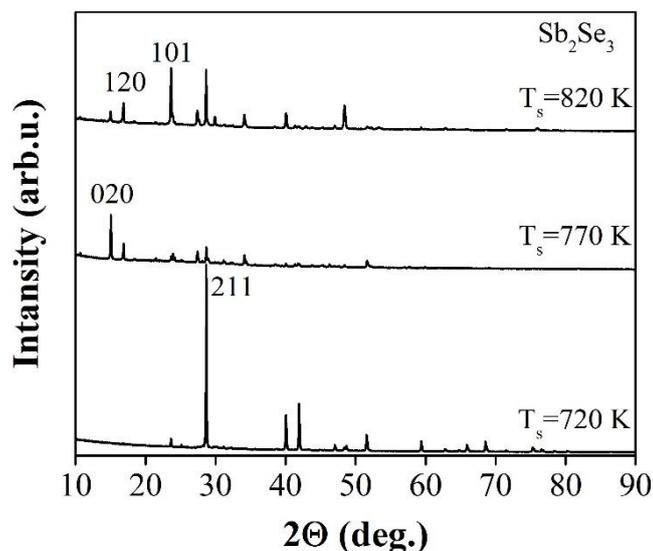
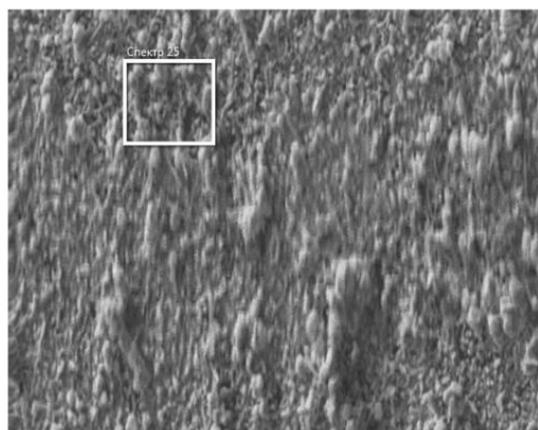


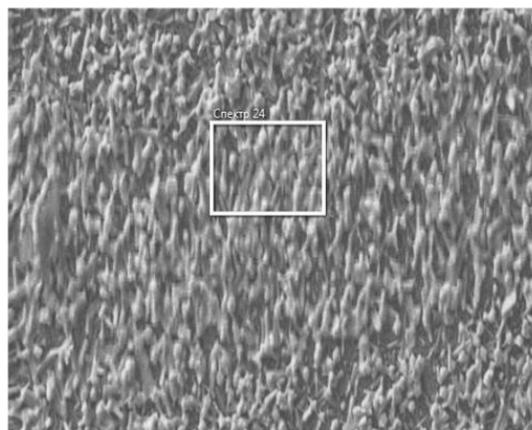
Рис. 3. Рентгеновские дифракционные исследования пленок Sb_2Se_3 , синтезированных при температуре испарения материала Sb_2Se_3 900 ± 10 К и температурах подложки 720 К, 770 К, 820 К

Fig. 3. X-ray diffraction studies of the Sb_2Se_3 films synthesized at evaporation temperature of material Sb_2Se_3 900 ± 10 K and substrate temperature at 720 K, 770 K, 820 K respectively

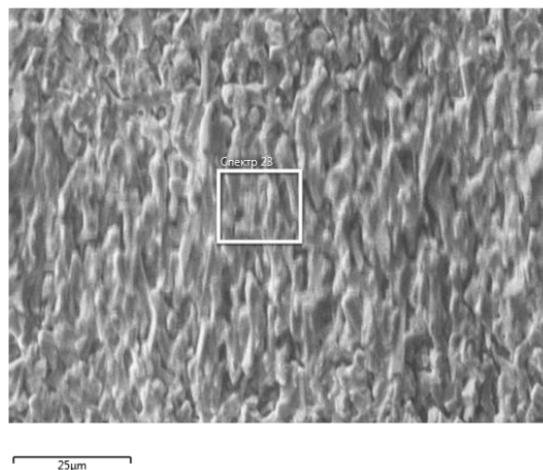
При низкой температуре подложки $T_{\text{п}}=720$ К пленка Sb_2Se_3 имеет поликристаллическую структуру, и в спектре выявляется только один большой пик, соответствующий (211) ориентации Sb_2Se_3 (JCPDS-00-015-0861). При увеличении температуры подложки до $T_{\text{п}}=770$ К, тонкая пленка Sb_2Se_3 по-прежнему остается поликристаллической, но интенсивность пика (211) Sb_2Se_3 сильно уменьшается, и появляется слабый (120) пик. При температуре роста $T_{\text{п}}=820$ К пленка получается поликристаллической, однако пик (211) немного уменьшается и при этой температуре также появляется слабый (120) пик Sb_2Se_3 . Возможно, что при $T_{\text{п}}=720$ К 1D цепочки Sb_2Se_3 выравниваются вдоль направления роста, то есть перпендикулярно поверхности подложки. С другой стороны, когда тонкая пленка Sb_2Se_3 синтезируется при $T_{\text{п}}=770$ К и $T_{\text{п}}=820$ К, 1D цепи Sb_2Se_3 выравниваются вдоль поперечного направления, что соответствует ориентации (120) (см. рис. 2), что является неэффективным для использования в солнечных элементах. С этой точки зрения, осаждение пленки Sb_2Se_3 при температуре подложки $T_{\text{п}}=720$ К или даже при более низких температурах является предпочтительным. Авторами [4] было установлено, что Sb_2Se_3 с ориентацией (221) подходит для фотовольтаического применения. Поскольку пленки Sb_2Se_3 с этой предпочтительной ориентацией получают при низких температурах подложки методом ХМПО, который может быть дополнительно оптимизирован для получения слоев поглотителя Sb_2Se_3 .



(a) $T_s = 720$ К



(b) $T_s = 770$ К



(c) $T_s = 820$ K

Рис. 4. SEM- изображения тонких пленок Sb_2Se_3 , синтезированных при различных температурах подложки T_n , Температура испарения исходного материала 900 ± 10 K

Fig. 4. SEM images of the thin films Sb_2Se_3 synthesized at different substrate temperatures T_s and evaporation temperature source of material is 900 ± 10 K

На рис. 4 показаны SEM-изображения пленок Sb_2Se_3 , осажденных при трех различных температурах подложки. При 720 K пленки имеют кристаллиты с размером ~ 300 нм, хотя они контактируют друг с другом. Это может быть причиной плохой электропроводности вдоль поперечного направления поверхности пленки. При 770 K кристаллиты имеют более высокую плотность, однако их размер становится меньше, находясь в диапазоне (200-300) нм, а также пленка показала слабую электропроводность вдоль поперечного направления. С другой стороны, пленки Sb_2Se_3 , осажденные при $T_n=820$ K, демонстрировали более крупные зерна > 1 мкм. На поверхности этого образца изображены цепи 1D Sb_2Se_3 , которые выровнены вдоль поперечного направления. Это может объяснить появление сильного пика (120) и исчезновение пика (211) при высокой температуре подложки (рис. 2), что также наблюдалось в [17].

Заключение

Изготовлены пленки Sb_2Se_3 методом ХМПО. Обнаружены, что пленки Sb_2Se_3 , осажденные при температурах подложки 720 K, предпочтительную ориентацию (211) и имеют поликристаллическую структуру. При более высокой температуре подложки 770 K и 820 K пленки также имеют поликристаллическую структуру, но с ориентацией (120). Исследования морфологии поверхности показывают, что при низких температурах подложки образцы имеют мелкие зерна с размерами (200-300) нм, но довольно плотно упакованные и с 1D цепочками Sb_2Se_3 , которые выровнены вдоль направления роста соответствующего (211). Было установлено, что благодаря своим анизотропным свойствам, тонкие пленки Sb_2Se_3 с ориентацией (211) подходят для слоя поглотителя фотоэлементов.

Благодарности

Благодарим Центр Передовых технологий для проведения измерений SEM, XRD и EDX. Работа выполнена в рамках проекта Фундаментальных исследований Академии наук Узбекистана (№ ФА-Ф3-003) и Министерства инновационного развития РУз, Центра передовых технологий (№ БФ2-027).

Acknowledgments

Thanks to the Center for Advanced Technologies for the providence Measurement SEM, XRD and EDX. Work carried out in the framework of fundamental research projects of the Academy of Sciences of Uzbekistan (№ FA-F3-003) and The Ministry of Innovative Development of the Republic of Uzbekistan, Center for Advanced Technologies (№ BF2-027).

Литература

- [1] P. Sun, Z. Wu, C. Ai, M. Zhang, et al., “Thermal evaporation of Sb₂Se₃ as novel counter electrode for dye-sensitized solar cells”, *Chemistry Select*, no. 1, pp. 1824–1831, 2016.
- [2] C. Chen, W. Li, Y. Zhou, et al., “Optical properties of amorphous and polycrystalline Sb₂Se₃ thin films prepared by thermal evaporation”, *Applied Physics Letters*, vol. 107, no. 4, 2015.
- [3] A. Zakutayev, “Brief review of emerging photovoltaic absorbers”, *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, no. 4, pp. 8-15, 2017.
- [4] C. Chen, L. Wang, L. Gao, et al., “6.5% certified efficiency Sb₂Se₃ solar cells using PbS colloidal quantum dot film as hole-transporting layer”, *ACS Energy Letters*, no. 2, pp. 2125-2132, 2017.
- [5] M.A. Green, Y. Hishikawa, W. Warta, et al., “Solar cell efficiency tables”, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 25, pp. 668-676, 2016.
- [6] X. Liu, C. Chen, L. Wang, et al., “Improving the performance of Sb₂Se₃ thin film solar cells over 4% by controlled addition of oxygen during film deposition”, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 23, pp. 1828-1836, 2015.
- [7] L. Wang, D. Li, K. Li, et al., “Enhanced electrical conductivity and photoconductive properties of Sn-doped Sb₂Se₃ crystals”, *Nature Energy*, vol. 24, no. 2, pp. 1-9, 2017.
- [8] C. Chen, Y. Zhao, S. Lu, et al., “Highly efficient syntheses of azetidines, pyrrolidines, and indolines via palladium catalyzed intramolecular amination of C(sp³)–H and C(sp²)–H bonds at γ and δ positions”, *Advanced Functional Materials*, vol. 34, pp. 3-6, 2017.
- [9] X. Liu, J. Chen, M. Luo, et al., “Thermal evaporation and characterization of Sb₂Se₃ thin film for substrate Sb₂Se₃/CdS solar cells”, *ACS Applied Materials & Interfaces*, no. 6, pp. 10687-10695, 2014.
- [10] Y.H. Kwon, Y.B. Kim, M. Jeong, et al., “Crystal growth direction-controlled antimony selenide thin film absorbers produced using an electrochemical approach and intermediate thermal treatment”, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, vol. 172, pp.11-17, 2017.
- [11] G.X. Liang, X.H. Zhang, H.L. Ma, et al., “Facile preparation and enhanced photoelectrical performance of Sb₂Se₃ nano-rods by magnetron sputtering deposition”, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, vol. 160, pp. 257-262, 2017.
- [12] Т.М. Разыков, А.Х. Шукуров, К.М. Кучкаров и др., “Характеристика тонких пленок Sb₂Se₃, изготовленных методом химического парового осаждения”, *Гелиотехника*, № 3, стр. 7-11, 2017.
- [13] Y. Zhou, M. Leng, Z. Xia, et al., “Solution-processed antimony selenide heterojunction solar cells”, *Advanced Energy Materials*, no. 8, 2014. <https://doi.org/10.1002/aenm.201301846>
- [14] C. Chen, D.C. Bobela, Y. Yang, et al., “Characterization of basic physical properties of Sb₂Se₃ and its relevance for photovoltaics”, *Frontiers of Optoelectronics*, vol. 10, pp. 18-30, 2017.
- [15] Т.М. Разыков, Г.С. Болтаев, А. Босио, et al., “Characterisation of SnSe thin films fabricated by chemical molecular beam deposition for use in thin film solar cells”, *Solar Energy*, vol. 159, pp. 834-840, 2018.
- [16] L. Wang, D. Li, K. Li, et al., “Evidence for light-by-light scattering in heavy-ion collisions with the ATLAS detector at the LHC”, *Nature Energy*, no. 2, pp. 852-858, 2017.
- [17] Y. Zhou, L. Wang, S. Chen, et al., “Thin-film Sb₂Se₃ photovoltaics with oriented one-dimensional ribbons and benign grain boundaries”, *Nature Photonics*, vol. 9, pp. 409-415, 2015.
- [18] T.T. Ngo, S. Chavhan, I. Kosta, et al., “Electrodeposition of antimony selenide thin films and application in semiconductor sensitized solar cells”, *ACS Applied Materials & Interfaces*, no. 6, pp. 2836-2841, 2014.
- [19] M. Luo, M. Leng, X. Liu, et al., “Thermal evaporation and characterization of superstrate CdS/Sb₂Se₃ solar cells”, *Applied Physics Letters*, vol. 104, no. 17, 2014. <https://doi.org/10.1063/1.4874878>
- [20] Y.C. Choi, T.N. Mandal, W.S. Yang, et al., “Sb₂Se₃ sensitized inorganic–organic heterojunction solar cells fabricated using a single source precursor”, *Angewandte Chemie*, vol. 126, no. 5, pp. 1353-1357, 2014.
- [21] M. Leng, M. Luo, C. Chen, et al., “Selenization of Sb₂Se₃ absorber layer: An efficient step to improve device performance of CdS/Sb₂Se₃ solar cells”, *Applied Physics Letters*, vol. 105, no. 8, 2014.
- [22] D.B. Li, X. Yin, C.R. Grice, et al., “Stable and efficient CdS/Sb₂Se₃ solar cells prepared by scalable close space sublimation”, *Nano Energy*, vol. 49, pp. 346-353, 2018.

- [23] X. Liu, C. Chen, L. Wang, et al., “Improving the performance of Sb₂Se₃ thin film solar cells over 4% by controlled addition of oxygen during film deposition”, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 23, no. 12, pp. 1828-1836, 2015.
- [24] X. Wen, C. Chen, S. Lu, et al., “Vapor transport deposition of antimony selenide thin film solar cells with 7.6% efficiency”, *Nature Communications*, vol. 9, no. 1, pp. 2179, 2018.
- [25] Z. Li, X. Liang, G. Li, et al., “9.2%-efficient core-shell structured antimony selenide nanorod array solar cells”, *Nature Communications*, no. 10, pp. 125, 2019. doi:10.1038/s41467-018-07903-6
- [26] S. Messina, M. Nair, and P. Nair, “Antimony selenide absorber thin films in all-chemically deposited solar cells”, *Journal of the Electrochemical Society*, vol. 156, no. 5, pp. 327-332, 2009.

References

- [1] P. Sun, Z. Wu, C. Ai, M. Zhang, et al., “Thermal evaporation of Sb₂Se₃ as novel counter electrode for dye-sensitized solar cells”, *Chemistry Select*, no. 1, pp. 1824–1831, 2016.
- [2] C. Chen, W. Li, Y. Zhou, et al., “Optical properties of amorphous and polycrystalline Sb₂Se₃ thin films prepared by thermal evaporation”, *Applied Physics Letters*, vol. 107, no. 4, 2015.
- [3] A. Zakutayev, “Brief review of emerging photovoltaic absorbers”, *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, no. 4, pp. 8-15, 2017.
- [4] C. Chen, L. Wang, L. Gao, et al., “6.5% certified efficiency Sb₂Se₃ solar cells using PbS colloidal quantum dot film as hole-transporting layer”, *ACS Energy Letters*, no. 2, pp. 2125-2132, 2017.
- [5] M.A. Green, Y. Hishikawa, W. Warta, et al., “Solar cell efficiency tables”, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 25, pp. 668-676, 2016.
- [6] X. Liu, C. Chen, L. Wang, et al., “Improving the performance of Sb₂Se₃ thin film solar cells over 4% by controlled addition of oxygen during film deposition”, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 23, pp. 1828-1836, 2015.
- [7] L. Wang, D. Li, K. Li, et al., “Enhanced electrical conductivity and photoconductive properties of Sn-doped Sb₂Se₃ crystals”, *Nature Energy*, vol. 24, no. 2, pp. 1-9, 2017.
- [8] C. Chen, Y. Zhao, S. Lu, et al., “Highly efficient syntheses of azetidines, pyrrolidines, and indolines via palladium catalyzed intramolecular amination of C(sp³)-H and C(sp²)-H bonds at γ and δ positions”, *Advanced Functional Materials*, vol. 34, pp. 3-6, 2017.
- [9] X. Liu, J. Chen, M. Luo, et al., “Thermal evaporation and characterization of Sb₂Se₃ thin film for substrate Sb₂Se₃/CdS solar cells”, *ACS Applied Materials & Interfaces*, no. 6, pp. 10687-10695, 2014.
- [10] Y.H. Kwon, Y.B. Kim, M. Jeong, et al., “Crystal growth direction-controlled antimony selenide thin film absorbers produced using an electrochemical approach and intermediate thermal treatment”, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, vol. 172, pp.11-17, 2017.
- [11] G.X. Liang, X.H. Zhang, H.L. Ma, et al., “Facile preparation and enhanced photoelectrical performance of Sb₂Se₃ nano-rods by magnetron sputtering deposition”, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, vol. 160, pp. 257-262, 2017.
- [12] T.M. Razykov, A.X. Shukurov, K.M. Kouchkarov, et al., “Xarakteristika tonkix plenok Sb₂Se₃, izgotovlennix metodom ximicheskogo parovogo osajdeniya” [Characterization of Sb₂Se₃ thin films, fabricated by chemical vapor deposition], *Geliotekhnika*, no. 3, pp. 7-11, 2017.
- [13] Y. Zhou, M. Leng, Z. Xia, et al., “Solution-processed antimony selenide heterojunction solar cells”, *Advanced Energy Materials*, no. 8, 2014. <https://doi.org/10.1002/aenm.201301846>
- [14] C. Chen, D.C. Bobela, Y. Yang, et al., “Characterization of basic physical properties of Sb₂Se₃ and its relevance for photovoltaics”, *Frontiers of Optoelectronics*, vol. 10, pp. 18-30, 2017.
- [15] T.M. Razykov, G.S. Boltaev, A. Bosio, et al., “Characterisation of SnSe thin films fabricated by chemical molecular beam deposition for use in thin film solar cells”, *Solar Energy*, vol. 159, pp. 834-840, 2018.
- [16] L. Wang, D. Li, K. Li, et al., “Evidence for light-by-light scattering in heavy-ion collisions with the ATLAS detector at the LHC”, *Nature Energy*, no. 2, pp. 852-858, 2017.
- [17] Y. Zhou, L. Wang, S. Chen, et al., “Thin-film Sb₂Se₃ photovoltaics with oriented one-dimensional ribbons and benign grain boundaries”, *Nature Photonics*, vol. 9, pp. 409-415, 2015.
- [18] T.T. Ngo, S. Chavhan, I. Kosta, et al., “Electrodeposition of antimony selenide thin films and application in semiconductor sensitized solar cells”, *ACS Applied Materials & Interfaces*, no. 6, pp. 2836-2841, 2014.

- [19] M. Luo, M. Leng, X. Liu, et al., “Thermal evaporation and characterization of superstrate $\text{CdS}/\text{Sb}_2\text{Se}_3$ solar cells”, *Applied Physics Letters*, 104, 2014.
- [20] Y.C. Choi, T.N. Mandal, W.S. Yang, et al., “ Sb_2Se_3 sensitized inorganic–organic heterojunction solar cells fabricated using a single source precursor”, *Angewandte Chemie*, vol. 126, no. 5, pp. 1353-1357, 2014.
- [21] M. Leng, M. Luo, C. Chen, et al., “Selenization of Sb_2Se_3 absorber layer: An efficient step to improve device performance of $\text{CdS}/\text{Sb}_2\text{Se}_3$ solar cells”, *Applied Physics Letters*, vol. 105, no. 8, 2014.
- [22] D.B. Li, X. Yin, C.R. Grice, et al., “Stable and efficient $\text{CdS}/\text{Sb}_2\text{Se}_3$ solar cells prepared by scalable close space sublimation”, *Nano Energy*, vol. 49, pp. 346-353, 2018.
- [23] X. Liu, C. Chen, L. Wang, et al., “Improving the performance of Sb_2Se_3 thin film solar cells over 4% by controlled addition of oxygen during film deposition”, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 23, no. 12, pp. 1828-1836, 2015.
- [24] X. Wen, C. Chen, S. Lu, et al., “Vapor transport deposition of antimony selenide thin film solar cells with 7.6% efficiency”, *Nature communications*, vol. 9, no. 1, pp. 2179, 2018.
- [25] Z. Li, X. Liang, G. Li, et al., “9.2%-efficient core-shell structured antimony selenide nanorod array solar cells”, *Nature communications*, no. 1, pp. 125-125, 2019.
- [26] S. Messina, M. Nair, and P. Nair, “Antimony selenide absorber thin films in all-chemically deposited solar cells”, *Journal of the Electrochemical Society*, vol. 156, no. 5, pp. 327-332, 2009.