Морфологические, структурные и электрические свойства пленок Sb_2Se_3, полученных методом ХМПО от отдельных источников элементов Sb и Se, для солнечных элементов

Т.М. Разыков, К.М. Кучкаров*, А.А. Мавлонов, Б.А. Эргашев, М.А. Махмудов, Р.Р. Хуррамов, Д.З. Исаков

Физико-технический институт НПО «Физика-Солнце» АН РУз, ул. Чингиза Айтматова, 2Б, 100084, Ташкент, Узбекистан

Получена 25.10.2021

* Corresponding author: e-mail: k.kuchkarov@mail.ru, Phone: +99871-235-41-03, Fax: + 99871-235-42-91

Методом химического молекулярно-пучкового осаждения (ХМПО) получены высококристаллические пленки Sb_2Se_3 от отдельных источников элементов Sb и Se при температуре подложки 500°C. Исследовано влияние соотношения состава Sb/Se на морфологические и электрические свойства пленок Sb_2Se_3. На основе представленных изображений сканирующего электронного микроскопа и рентгеноструктурного анализа выявлено, что все пленки имеют кристаллическую (орторомбическую) структуру, размеры кристаллитов составляют 2–3 мкм. Электропроводность пленок, измеренных методом Ван-Дер Пау, варьируется в пределах 4.3×10^{-5}–1×10^{2} $(Ом\cdot см)^{-1}$ в зависимости от соотношения состава парциального давления элементов Sb/Se.

Ключевые слова: Sb_2Se_3, Sb/Se, химическое молекулярно-пучковое осаждение, тонкие пленки, рентгенограмма, структура, электропроводность.

Highly crystalline Sb_2Se_3 films from a separate sources of Sb and Se elements at a substrate temperature of 500°C were obtained by chemical molecular beam deposition (CMBD) method. The effect of the Sb/Se composition ratio on the morphological and electrical properties of Sb_2Se_3 films has been studied. Based on the presented images of the scanning electron microscope and X-ray diffraction analysis, it was revealed that all films have a crystalline (orthorhombic) structure and the crystallite size is 2–3 μm. The electrical conductivity of the films measured by the Van der Paw method varies in the range4.3×10^{-5}–1×10^{2} $(Ohm\cdot cm)^{-1}$ depending on the composition ratio of the partial pressure of the elements Sb/Se.

Keywords: Sb_2Se_3, Sb/Se, chemical molecular beam deposition, thin films, X-ray diffraction pattern, structure, electrical conductivity..

DOI: https//doi.org/10.52304/.v23i3.264

I. Введение

В настоящее время солнечные элементы на основе поликристаллического и монокристаллического Si занимают лидирующие позиции на рынке фотоэлектрических систем, составив более 95%, в 2020 г., хотя, когда речь идет о малом весе, гибкости и создании интегрированных систем, кристаллический Si (c-Si) несколько громоздок. Альтернативно, технологии тонкопленочных солнечных элементов позволяют использовать различные подложки, в том числе гибкие и легкие. В настоящее время основными технологиями тонкопленочных солнечных элементов являются

$Cu(In,Ga)Se_2$ (CIGS) [1], CdTe [2] и органически-неорганические гибридные перовскиты (например, $CH_3NH_3PbI_3$) [3]. Все они достигли эффективности более 20% в лабораторных условиях [4]. В то время как CIGS и CdTe были индустриализированы и составляют около 7% от общей вырабатываемой фотоэлектрической энергии в 2020 г. [5], галоидные перовскиты все еще находятся в стадии разработки. Тем не менее, материалы CIGS и CdTe имеют фундаментальные ограничения, когда речь идет о массовом производстве. Из-за дефицита In технология CIGS ограничивается производственной мощностью ниже уровня 10^{12} Вт [6], тогда как CdTe содержит тяжелые металлы, что вызывает экологические проблемы. В качестве альтернативы появились новые материалы, не содержащие токсичных элементов.

В последнее десятилетие такие соединения, как $Cu_2ZnSn(Se,S)_4$ (CZTSSe) [7], Sn(Se,S) [8], $Cu_2Sn(Se,S)_3$ [9], Cu_2O [10], $CuSbS_2$ [11], Cu_3N [12], FeS_2 [13], $Cu_2BaSn(Se,S)_4$ [14], $Sb_2(Se,S)_3$ [15] были исследованы как поглотители для тонкопленочных солнечных элементов. Эти новые материалы привлекательны и имеют такие же свойства, как $Cu(In,Ga)Se_2$, так как ширина их запрещенной зоны лежит в диапазоне 0.87–1.7 эВ. Эффективность солнечных элементов на их основе достигла 4–9% [16-20]. В настоящее время исследователи работают над увеличением эффективности таких солнечных элементов.

На сегодняшний день исследователи всего мира уделяют особое внимание применению халькогенидных бинарных соединений Sb_2Se_3, Sb_2S_3 и твердых растворов $Sb_2(S_x,Se_{1-x})_3$ на их основе (химическая формула Sb_2X_3) в качестве поглощающего слоя для солнечных элементов. Это обусловлено тем, что физические свойства (*p*-тип проводимости, запрещенная зона E_g=1.1–1.8 эВ, высокий коэффициент поглощения $\alpha \geq 10^5$ $см^{-1}$, видимая область солнечного излучения, низкая температура плавления, для Sb_2Se_3 823 К, для Sb_2S_3 885 К, и высокое парицальное давление) этих материалов очень близки к свойствам $Cu(In,Ga)(Se,S)_2$. Кроме того, элементы, входящие в эти материалы, имеют относительно низкую стоимость, стабильность при внешних воздействиях и нетоксичность. Это дает возможность изготовить экологически чистые и эффективные солнечные модули, а также открывает пути их широкого изготовления в промышленном масштабе.

Все указанные выше свойства делают пленки Sb_2X_3 конкурентоспособной заменой обычных поглотителей (CdTe/CIGSe/CZTSe) в тонкопленочных солнечных элементах. Однако, несмотря на упомянутые свойства, пленки на основе Sb_2X_3 недостаточно изучены. Последние представленные исследования констатируют их низкую эффективность по сравнению с материалами CdTe и CIGSe. Следовательно, необходимо сфокусировать исследования на изучении пленок на основе Sb_2X_3, усилить исследования по повышению эффективности этих пленок.

Эффективность солнечного элемента на основе Sb_2Se_3 сильно зависит от физических свойств базового слоя. Сегодня для получения базового слоя в солнечных элементах применяются безвакуумные (electrodeposition [21], successive ionic-layer adsorption and reaction (SILAR) [22], chemical bath deposition [23], spin-coating [24], aerosol assisted chemical vapor deposition [25]), высоковакуумные и низковакуумные методы (thermal evaporation [26], vacuum evaporation [27], rapid thermal evaporation [28], vapor transport deposition [29], magnetron sputtering [30], close-spaced sublimation [31]). Однако электропроводимость пленок Sb_2Se_3, полученных этими методами, чрезвычайно низкая $\sim 10^{-8}$–10^{-6} $(Ом \cdot см)^{-1}$. Увеличение электропроводимости базового слоя Sb_2Se_3 даст возможность повышения эффективности данного солнечного элемента.

Ранее авторами были исследованы морфологические, структурные и электрические свойства пленок Sb_2Se_3, полученных методом химического молекулярно-пучкового осаждения (ХМПО) из порошков при атмосферном давлении газа. [32].

II. Описание объекта и методов исследования

В данной работе также изучены структурные, морфологические и электрические свойства пленок Sb_2Se_3 полученных методом химически молекулярно-пучкового осаждения (ХМПО), но от отдельных источников элементов Sb и Se при температуре подложки 500℃.

Получение пленок Sb_2Se_3 различного состава методом ХМПО подробно описано в работе [33]. В качестве исходного вещества были использованы материалы Sb и Se полупроводниковой чистоты (99.999%), которые испарялись в потоке водорода при атмосферном давлении. Температурный интервал испарения материалов Sb и Se для вы-

©Академия наук Республики Узбекистан, 2021 г.

ращивания пленок находился в пределах 800°C–900°C для Sb, 400°C–500°C для Se Поток газа носителя водорода составляет ~ 20 $см^3$/мин. Длительность процесса осаждения находится в интервале от 30 до 60 мин (зависит от требуемой толщины пленок). Толщина осажденных пленок Sb_2Se_3 различного состава составляет 2–3 мкм. В качестве подложек использовали натриево-известковое стекло. Состав получаемых пленок Sb_2Se_3 изменяли, управляя соотношением парциальных давлений Sb и Se в паровой фазе в процессе роста.

Рентгеновские исследования образцов выполняли на рентгеновском дифрактометре «Panalytical Empyrean» с Cu трубкой (K_α = 1.5406 Å). Измерения проводили при комнатной температуре в интервале углов 2θ от 20° до 80° в режиме пошагового сканирования с шагом 0.02 градуса и временем накопления сигнала в точке 5 с. Морфологические исследования проводили с помощью сканирующего электронного микроскопа SEM-EVO MA 10, а составы пленок определяли с помощью энергодисперсионного элементного анализатора марки EDX (Oxford Instrument, – Aztec Energy Advanced X-act SDD).

Методом вакуумного напыления на свежеосажденные пленки наносили омические контакты для проведения электрических измерений. В качестве омического контакта к пленкам дырочной проводимости использовали серебро и серебряную пасту, а к пленкам электронной проводимости – индий или сплав индий-галлий. Тип проводимости образцов определяли по знаку термо-ЭДС. Толщину пленок (до 2–3 мкм) определяли методом прецизионного микровзвешивания на весах FA 120 4C (с точностью 0.1 мг). После получения омических контактов были измерены темновые вольтамперные характеристики пленок. Анализ темновой ВАХ пленок Sb_2Se_3 показал, что все образцы имели омичность, т.е. выпрямления в интервале измеряемых напряжений (U=0.01–2 В) не обнаружено.

III. Описание и анализ результатов

На рис. 1 представлена рентгенограммы тонких пленок с различными соотношениями Sb/Se. Все тонкие пленки имеют заметные пики, хорошо согласующиеся со стандартной картой JCPDS (№ 15–0861) орторомбической фазы Sb_2Se_3 без каких либо обнаруживаемых примесей.

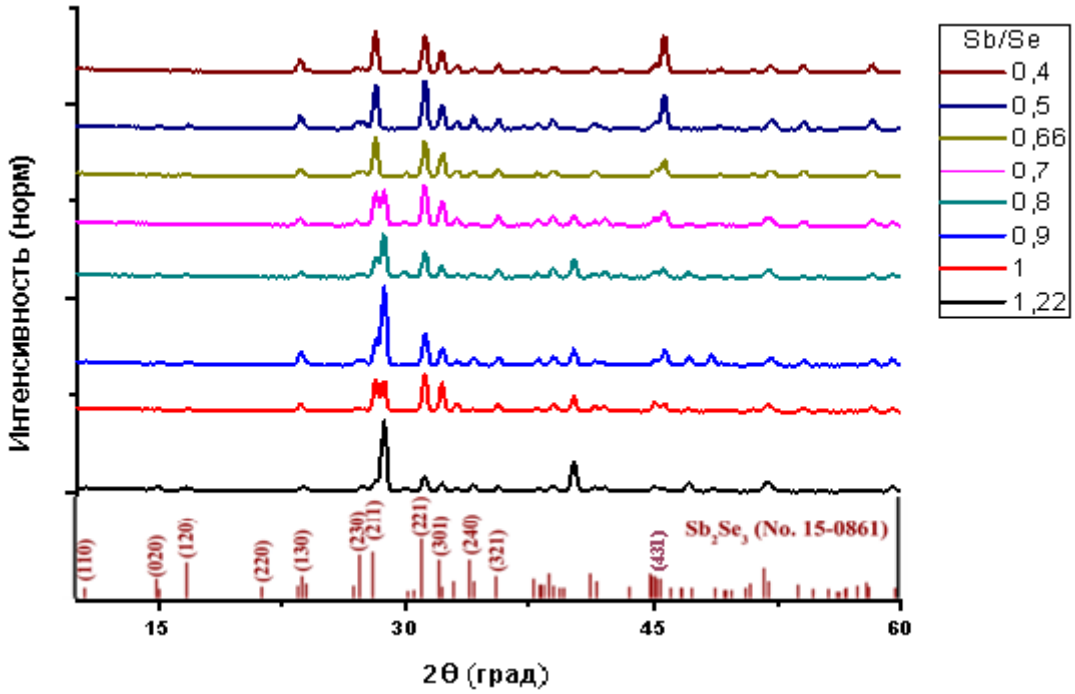


Рисунок 1. Типичная рентгенограмма пленки Sb_2Se_3 различного состава на стекле с подслоем молибдена.

©Академия наук Республики Узбекистан, 2021 г.

Два основных дифракционных пика (211) и (221) демонстрируют резкие характеристики, указывающие на его высококристаллическую природу с преимущественной кристаллографической ориентацией вдоль (hk1). Sb_2Se_3 в основном состоит из лент $(Sb_4Se_6)_n$ в виде одномерных цепочечных структур. Ленты (Sb_4Se_6) накладываются друг на друга в направлении [001] за счет прочных ковалентных связей Sb-Se. Однако в направлениях [100] и [010] ленты связаны силами Ван-дер-Ваальса [34-36]. Миграция носителей по лентам $(Sb_4Se_6)_n$ происходит намного быстрее, чем между лентами [37, 38]. Поэтому для обеспечения эффективного переноса носителей особенно важно контролировать ориентацию роста тонких пленок Sb_2Se_3. Тем не менее, когда ленты [211] и [221] ориентированы наверху подложки, носитель заряда может легко перемещаться вдоль лент, что уменьшает рекомбинацию фотогенерированных носителей. Очевидно, что в зерне с ориентацией [120] последовательное сопротивление намного выше, чем в зернах с ориентацией [211] и [221]. Следовательно, чтобы способствовать переносу носителей и улучшить характеристики солнечных элементов, эти лент $(Sb_4Se_6)_n$ должны расти перпендикулярно подложке, например, в направлении [211] или [221].

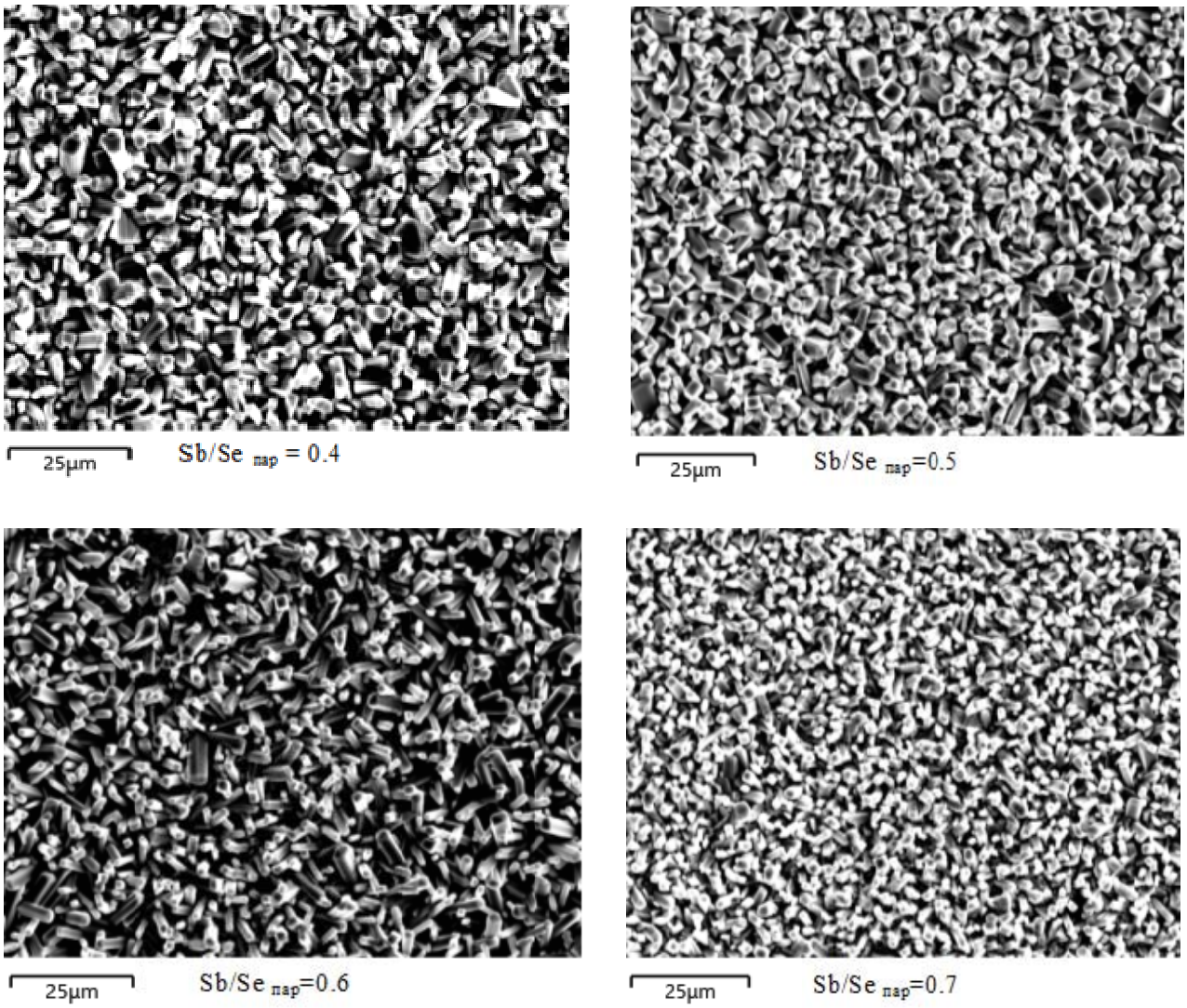


Рисунок 2. Снимки сканирующего электронного микроскопа для пленок Sb_2Se_3 различного состава при 500°C.

©Академия наук Республики Узбекистан, 2021 г.

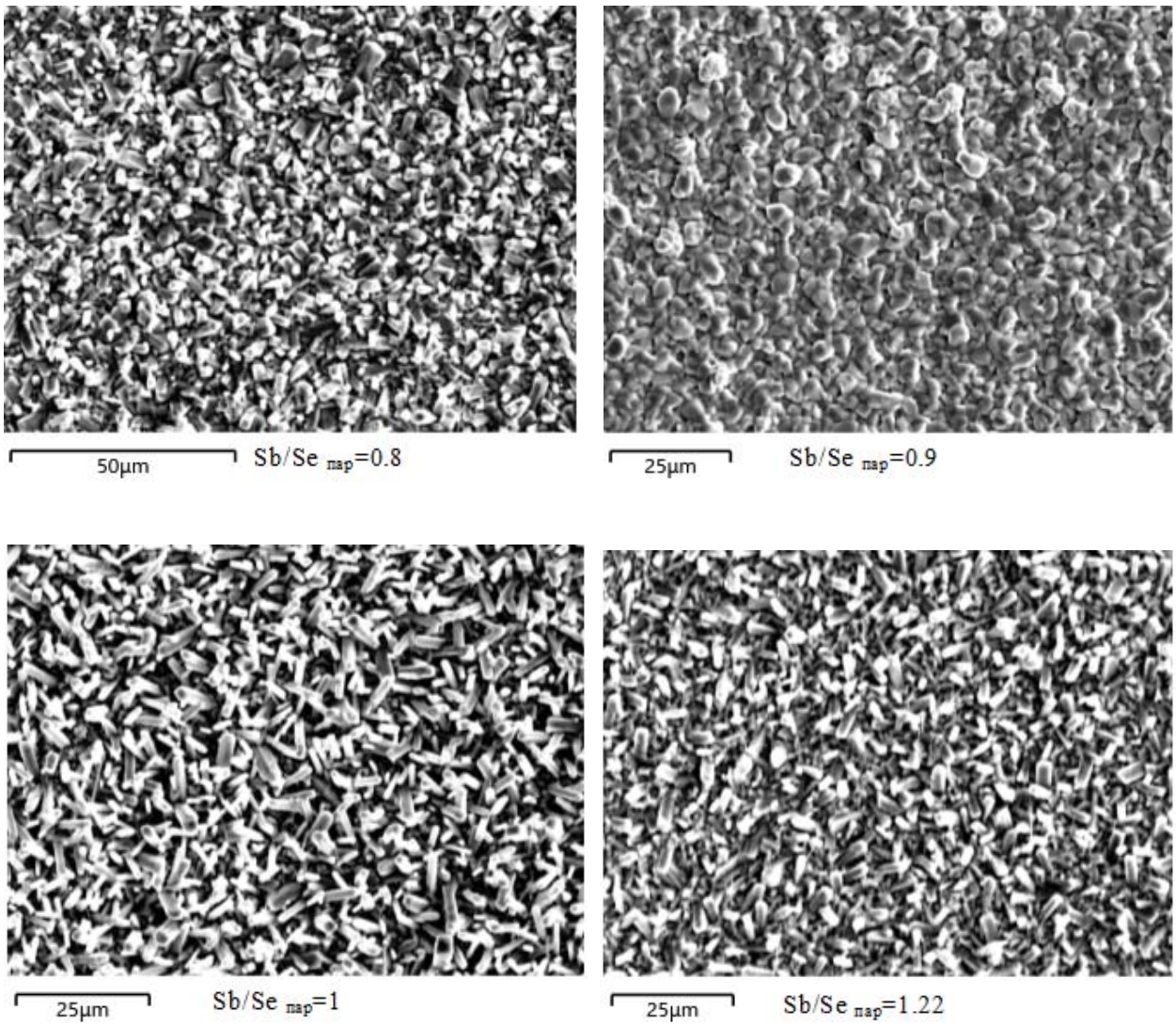


Рисунок 2 (продолжение). Снимки сканирующего электронного микроскопа для пленок Sb_2Se_3 различного состава при 500°C.

Результаты рентгеноструктурного анализа показывают, что полученные пленки Sb_2Se_3 различного состава имеют поликристаллическую орторомбическую структуру с преимущественной ориентации (211) и (221). На рис. 2 показаны снимки СЭМ для всех образцов, осажденных по отдельности от источников элементов Sb и Se при температуре подложки 500°C. Микрокристаллы пленок Sb_2Se_3 равномерно распределены по поверхности подложки. Как видно из рисунка, размеры кристаллов для всех образцов составляет 2–3 мкм, и имеют длинную стержнеобразную форму. При изменении состава Sb/Se пленки в интервале 0.4–0.9 наблюдается перпендикулярный рост кристаллов относительно подложки, дальнейшее изменение соотношения состава (Sb/Se=1–1.2) приводит к горизонтальному росту кристаллов.

Для изучения влияния соотношения парциального давления элементов Sb/Se на электрические свойства пленок Sb_2Se_3 были измерены удельные сопротивления методом Ван-дер-Пау, а также исследованы температурные зависимости электропроводности. Электрические параметры пленок Sb_2Se_3 (σ, $E_{ак}$ и тип проводимости) приведены в таблице.

©Академия наук Республики Узбекистан, 2021 г.

Таблица. Электрические параметры пленок Sb/Se при различных соотношениях состава.

Sb/Se	0.5	0.7	0.8	0.9
Тип проводимости	*p*	*p*	*n*	*n*
Электропроводность $(Ом·см)^{-1}$ при 300 К	4.38×10^{-5}	7.1	36	2×10^{2}
Энергия активации (мВ)	230; 140	~3	~3	~3

Как видно из таблицы, с увеличением соотношения парциального давления элементов Sb/Se в диапазонах 0.3–0.66 электропроводимость ($\sim10^{-5}$ $(Ом·см)^{-1}$) пленок Sb_2Se_2 почти не изменилась. Наблюдается резкое увеличение проводимости с 10^{-5} $(Ом·см)^{-1}$ при Sb/Se ≥0.66 до 10^{2} $(Ом·см)^{-1}$ при Sb/Se = 0.9, далее она почти не меняется до Sb/Se = 1.22.

Более того, установлено изменение типа проводимости носителей заряда в зависимости от соотношения Sb/Se. Образцы имели *p*-тип проводимости в диапазоне составов 0.3≤Sb/Se≤0.7, а при 0.8≤Sb/Se≤1.22 *n*-тип. В то же время обнаружена инверсия типа проводимости при Sb/Se = 0.7, что соответствует стехиометрическому составу Sb_2Se_3.

Для объяснения изменения электропроводимости полученных образцов в зависимости от соотношения элементов Sb/Se были изучены температурные зависимости электропроводимости.

Из этих зависимостей найдены энергии активации образцов различного состава. Энергия активации пленки составляет около 230 мэВ для высокотемпературной области и 140 мэВ для низкотемпературной области. В то время как образцы, полученные при Sb/Se = 0.7; 0.8 и 0.9, имели вырожденный характер (уровень Ферми расположен на краю зоны проводимости) с энергией активации ~3 мэВ (см. таблицу).

Энергии активации E_a = 230 мэВ и 140 мэВ соответствуют «дефекту 2» и «дефекту 1» соответственно, описанных в работе [5]. Высказывается предположение, что в образцах с высоким содержанием селена преобладающими дефектами являются вакансия сурьмы V_{Sb} и антиструктурный дефект Se_{Sb}. Для образцов с высоким содержанием сурьмы преобладающими дефектами являются вакансия селена V_{Se} и межузельная сурьма Sb_i.

IV. Заключение

Получены высококачественные пленки Sb_2Se_3 различного состава химическим молекулярно-пучковым осаждением по отдельности от источников элементов Sb и Se при температуре подложки 500°C.

Результаты сканирующего электронного микроскопа и рентгеноструктурного анализа показали, что все пленки имеют орторомбическую структуру с преимущественной ориентацией (211) и (221), размеры кристаллитов пленок составляют 2–3 мкм.

Результаты измерения электрических свойств пленок показали, что с увеличением соотношения парциального давления элементов Sb/Se в диапазонах 0.3–0.66 электропроводимость ($\sim10^{-5}$ $(Ом·см)^{-1}$) пленок Sb_2Se_2 почти не изменилась и наблюдалось резкое увеличение проводимости с 10^{-5} $(Ом·см)^{-1}$ при Sb/Se ≥ 0.66 до 10^{2} $(Ом·см)^{-1}$. Также образцы имели *p*-тип проводимости в диапазоне составов 0.3≤Sb/Se≤0.7, а при 0.8≤Sb/Se ≤1.22 *n*-тип. Обнаружена инверсия типа проводимости при Sb/Se = 0.7, что соответствует стехиометрическому составу Sb_2Se_3.

Метаданные

Morphological, structural and electrical properties of Sb_2Se_3 films obtained by CMBD from a separate sources of Sb and Se elements for solar cells

T.M. Razykov, K.M. Kuchkarov, A.A. Mavlonov, B.A. Ergashev, M.A. Makhmudov, R.R. Khurramov, D.Z. Isakov.

Physical-Technical Institute of the Academy of Sciences of the RUz, Chingiz Aytmatov Street 2B, 100084, Tashkent, Uzbekistan

Highly crystalline Sb_2Se_3 films from a separate sources of Sb and Se elements at a substrate temperature of 500°C were obtained by chemical molecular beam deposition (CMBD) method. The effect of the

©Академия наук Республики Узбекистан, 2021 г.

Sb/Se composition ratio on the morphological and electrical properties of Sb_2Se_3 films has been studied. Based on the presented images of the scanning electron microscope and X-ray diffraction analysis, it was revealed that all films have a crystalline (orthorhombic) structure and the crystallite size is 2–3 μm. The electrical conductivity of the films measured by the Van der Paw method varies in the range 4.3×10^{-5}–1×10^{2} $(Ohm\cdot cm)^{-1}$ depending on the composition ratio of the partial pressure of the elements Sb/Se.

Keywords: Sb_2Se_3, Sb/Se, chemical molecular beam deposition, thin films, X-ray diffraction pattern, structure, electrical conductivity

Литература (References)

[1] P. Jackson, D. Hariskos, L. Lotter, et al. New world record efficiency for Cu(In,Ga)Se_2 thin-film solar cells beyond 20%. Progress Photovoltaics: Research Applications **19**, 894–897 (2011).

[2] J.M. Burst, J.N. Duenow, D.S. Albin, et al. CdTe solar cells with open-circuit voltage breaking the 1 V barrier. Nature Energy **1**, 16015 (2016).

[3] W.S. Yang, J.H. Noh, N.J. Jeon, et al. High performance photovoltaic perovskite layers fabricated through intramolecular exchange. Science **348**, 1234-1237 (2015).

[4] Green, et. al. Progress in Photovoltaics **27**, No.1,3-12 (2019).

[5] https://www.ise.fraunhofer.de/ content/documents/st udies / Photovoltaics-Report.pdf /

[6] A. Polizzotti, I.L. Repins, R. Noufi, et al. The state and future prospects of kesterite photovoltaics. Energy Environmental Sciense **11**, 3171-3182 (2013).

[7] W. Wang, M.T. Winkler, O. Gunawan, et al. Device characteristics of CZTSSe thin-film solar cells with 12.6% efficiency. Advanced Energy Materials **4**, 1-5 (2014).

[8] T.M. Razykov, K.M. Kuchkarov, B.A. Ergashev, et al. Poluchenie i fizicheskie svoystva plenok SnSe dlya ispol'zovaniya v tonkoplenochnykh solnechnykh elementakh. Geliotekhnika No.2, 3-8 (2017).

[9] Jakapan Chantana, Kanta Tai, Haruki Hayashi, et al. Investigation of carrier recombination of Na-doped Cu_2SnS_3 solar cell for its improved conversion efficiency of 5.1%. Solar Energy Materials & Solar Cells **206**, 1-8 (2020).

[10] S.W. Lee, Y.S. Lee, J. Heo, et al. Improved Cu_2O-based solar cells using atomic layer deposition to control the Cu oxidation state at the p-n junction. Advanced Energy Materials **4**, 1301916 (2014).

[11] B. Yang, L. Wang, J. Han, et al. $CuSbS_2$ as a promising earth abundant photovoltaic absorber material: a combined theoretical and experimental study. Chemistry of. Materials **26**, 3135-3143 (2014).

[12] N. Yamada, K. Maruya, Y. Yamaguchi, et al. *p*- to *n*-type conversion and nonmetal-metal transition of lithium-inserted Cu_3N films. Chemistry of Materials **27**, 8076-8083 (2015).

[13] L. Luo, W. Luan, B. Yuan, et al. High efficient and stable solid solar cell: based on FeS_2 nanocrystals and P3HT: PCBM. Energy Procedia **75**, 2181-2186 (2015).

[14] J. Ge, P. Koirala, C.R. Grice, et al. Oxygenated CdS buffer layers enabling high open-circuit voltages in earth abundant Cu_2BaSnS_4 thin-film solar cells. Advanced Energy Materials **7**, 1601803 (2017).

[15] T.M. Razykov, A.Kh. Shukurov, O.K. Atabayev, et al. Gas-transport deposition: Optimization of growth technique for Sb_2Se_3 thin film deposition. Geliotekhnika No.3, 7-11 (2017).

[16] Wei Wang, Mark T. Winkler, Oki Gunawan, et al. Device characteristics of CZTSSe thin-film solar cells with 12.6% efficiency. Advanced Energy Materials (2013). DOI: 10.1002/aenm.201301465).

[17] Vasudeva Reddy, Minnam Reddy. Perspectives on SnSe-based thin film solar cells: a comprehensive review. Journal of Materials Science: Materials in Electronics **27**, No.6, 5491-5508 (2016).

[18] Mingrui He, Jihun Kim, M.P. Suryawanshi, et.al. Influence of sulfurization temperature on photovoltaic properties of Ge alloyed Cu_2SnS_3(CTGS) thin film solar cells. Solar Energy Materials and Solar Cells **174**, 94-101 (2018).

[19] César Macíasa, Shadai Lugob, Ángel Beníteza, et al. Thin film solar cell based on $CuSbS_2$ absorber prepared by chemical bath deposition (CBD). Materials Research Bulletin **87**, 161-166 (2017).

[20] Z. Li, X. Liang, G. Li, et al. 9.2%-efficient core-shell structured antimony selenide nanorod array solar cells. Nature Communications **10**, No.1, 125-125 (2019).

[21] 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 and Solar Cells **172**, 11-17 (2017).

[22] H. Pathan, C. Lokhande. Deposition of metal chalcogenide thin films by successive ionic layer adsorption and reaction (SILAR) method. Bulletin of Materials Science **27**, No.2, 85–111 (2004).

[23] A. Kulkarni, S. Arote, H. Pathan, et.al. Sb_2Se_3 sensitized heterojunction solar cells. Materials for Renewable and Sustainable Energy **4**, 1 (2015).

[24] Y. Zhou, M. Leng, Z. Xia, et.al. Solution-processed antimony selenide heterojunction solar cells. Advanced Energy Materials **4**, 1301846 (2014).

[25] M.D. Khan, M. Aamir, M. Sohail et.al. Novel single source precursor for synthesis of Sb_2Se_3 nanorods and deposition of thin films by AACVD: Photo-electrochemical study for water reduction catalysis. Solar Energy **169**, 526 (2018).

[26] X. Liu, J. Chen, M. Luo, et al. Thermal evaporation and characterization of Sb_2Se_3 thin film for substrate Sb_2Se_3/CdS solar cells. ACS Applied Materials Interfaces **6**, 10687 (2014).

[27] F.I. Mustafa, S. Gupta, N. Goyal, et al. Effect of temperature on the optical parameter of amorphous Sb-Se thin films. Journal of Optoelectronics and Advanced Materials **11**, No.12 (2019).

[28] L. Wang, D-B. Li, K. Li, Chen, et al. Stable 6%-efficient Sb_2Se_3 solar cells with a ZnO buffer layer. Nature Energy **2**, No.4, 17046 (2017).

©Академия наук Республики Узбекистан, 2021 г.

[29] X. Liu, X. Xiao, Y. Yang, et al. Enhanced Sb_2Se_3 solar cell performance through theory-guided defect control. Progress in Photovoltaics: Research and Applications **25**, No.10, 861–870 (2017).
[30] G.X. Liang, X.H. Zhang, H.L. Ma, et al. Facile preparation and enhanced photoelectrical performance of Sb_2Se_3 nanorods by magnetron sputtering deposition. Solar Energy Materials and Solar Cells **160**, 257–262 (2017).
[31] O.S. Hutter, L.J. Phillips, P.J. Yates, et al. CSS antimony selenide film morphology and high efficiency PV devices. In: 2018 IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC) (A Joint Conference of 45-th IEEE PVSC, 28-th PVSEC & 34-th EU PVSEC). IEEE, pp. 0027–0031
[32] T.M. Razykov, A.Kh. Shukurov, K.M. Kuchkarov, et al. Morphological and structural characteristics of Sb_2Se_3 thin films fabricated by chemical molecular beam deposition. Applied Solar Energy **55**, 376-379 (2019).
[33] T.M. Razykov. Chemical molecular beam deposition of II-VI binary and ternary compound films in gas flow. Applied Surface Science **48/49**, No.1,89-92 (1991).
[34] D. Wang, C. Song, X. Fu, X. Li. Growth of one-dimensional Sb_2S_3 and Sb_2Se_3 crystals with straw-tied-like architectures. Journal of Crystal Growth **281**, 611-615 (2005).
[35] V.L. Deringer, R.P. Stoffel, M. Wuttig, R. Dronskowski. Vibrational properties and bonding nature of Sb_2Se_3 and their implications for chalcogenide materials. Chem. Sci. **6**, 5255-5262 (2015).
[36] Y. Zhou, Y. Li, J. Luo, D. Li, X. Liu, C. Chen, H. Song, J. Ma, D.-J. Xue, B. Yang, J. Tang. Buried homojunction in CdS/Sb_2Se_3 thin film photovoltaics generated by interfacial diffusion. Applied Physics Letters **111**, 013901 (2017).
[37] D.B. Li, X. Yin, C.R. Grice, L. Guan, Z. Song, C. Wang, C. Chen, K. Li, A.J. Cimaroli, R.A. Awni, D. Zhao, H. Song, W. Tang, Y. Yan, J. Tang. Stable and efficient CdS/Sb_2Se_3 solar cells prepared by scalable close space sublimation. Nano Energy **49**, 346-353 (2018).
[38] Y. Zhou, L. Wang, S. Chen, S. Qin, X. Liu, J. Chen, D.J. Xue, M. Luo, Y. Cao, Y. Cheng, E.H. Sargent, J. Tang. Thin-film Sb_2Se_3 photovoltaics with oriented one-dimensional ribbons and benign grain boundaries, Nature Photonics **9**, 409-415 (2015).

Қуёш элементлари учун КМДО усулида Sb ва Se элементларининг алоҳида манбадан олинган Sb_2Se_3 юпқа қатламларининг морфологик, структуравий ва электр хоссалари

Т.М. Разиков, К.М. Қўчқоров, А.А. Мавлонов, Б.А. Эргашев, М.А. Маҳмудов, Р.Р. Хуррамов, Д.З. Исоқов.

Кимёвий молекулалар дасталаридан олиш (КМДО) усули билан таглик ҳароратининг 500□ да Sb ва Se элементларнинг алоҳида манбаларидан юқори кристалли Sb_2Se_3 юпқа қатламлари олинган. Sb/Se таркиби нисбатининг Sb_2Se_3 юпқа қатламларининг морфологик ва электр хоссаларига таъсири ўрганилган. Сканерли электрон микроскоп ва рентген дифраксион таҳлилларининг тақдим этилган тасвирлари асосида барча юпқа қатламлар кристалл (орторомбик) тузилишга эга эканлиги ва кристаллит ўлчами 2-3 микрон эканлиги аниқланган. Ван дер Пау усули билан ўлчанган юпқа қатламларнинг электр ўтказувчанлиги Sb/Se элементлари босимларининг нисбатига боғлиқ равишда 4.3×10^{-5}–1×10^{2} (Ом см)$^{-1}$ оралиғида ўзгаради.

Калит сўзлар: Sb_2Se_3, Sb/Se, кимёвий молекуляр дасталаридан олиш, юпқа қатламлар, рентгенограмма, тузилиш, электр ўтказувчанлик.

©Академия наук Республики Узбекистан, 2021 г.