

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ  
Кафедра энергофизики**

**РЕФЕРАТ ДИПЛОМНОЙ РАБОТЫ**

**СТРУКТУРНЫЕ СВОЙСТВА ТОНКИХ ПЛЕНОК  $(\text{Ag}, \text{Cu})_2\text{ZnSnS}_4$ ,  
ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ СПРЕЙ-ПИРОЛИЗА**

Студентки 5 курса  
Зглюй Алеси Анатольевны

Научный руководитель:  
доцент кафедры энергофизики, кандидат  
физ.-мат. наук, доцент М.С. Тиванов

Рецензент:  
доцент кафедры физики твердого тела,  
кандидат физ.-мат. наук, доцент  
В.И. Шиманский

Минск, 2022

## РЕФЕРАТ

Дипломная работа 58 стр., 18 рис., 7 табл., 74 источника.

### ТОНКИЕ ПЛЕНКИ $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ , СПРЕЙ-ПИРОЛИЗ, СУЛЬФУРИЗАЦИЯ, ЛЕГИРОВАНИЕ Ag, СТРУКТУРА, МОРФОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТИ.

Объектом исследования являются тонкие пленки  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ , синтезированные методом спрей-пиролиза, подвергшиеся последующему отжигу в атмосфере S и легированные Ag.

Цель работы: установление влияния температуры отжига и степени легирования Ag на структуру и морфологию тонких пленок  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ , полученных методом спрей-пиролиза.

Методы исследования: электронный микронализ, сканирующая электронная микроскопия, сканирующая зондовая микроскопия, рентгенодифракционный анализ, комбинационное рассеяние света и регистрация спектров оптического отражения света.

Тонкие пленки  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  были синтезированы методом спрей-пиролиза с последующим отжигом при температурах 425 °C, 475 °C и 525 °C и легированием Ag с концентрациями 1%, 2% и 3%.

Для обработки экспериментальных данных был использован пакет программ OriginLab, позволяющий анализировать численные и графические данные. С его помощью, а также на основе полученных указанными методами исследования результатов, были изучены фазовый и элементный состав выбранных образцов тонких пленок  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ , оценена морфология и структура их поверхности, рассчитаны топографические и структурные параметры и ширина запрещенной зоны.

Все пленки имеют тетрагональную кристаллическую структуру кестерита  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  с преимущественной ориентацией зерен в плоскости (112), а также морфологию поверхности без заметных пустот и трещин и ширину запрещенной зоны от 1,32 эВ до 1,48 эВ.

Областью возможного практического применения является использование полученных методом спрей-пиролиза пленок  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  в составе гетероструктур для солнечных элементов.

## РЭФЕРАТ

Дыпломная работа 58 стар., 18 мал., 7 табл., 74 крыніцы.

ТОНКІЯ ПЛЁНКІ  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ , СПРЭЙ-ПРОЛІЗ, СУЛЬФУРЫЗАЦЫЯ, ЛЕГІРАВАННЕ Ag, СТРУКТУРА, МАРФАЛОГІЯ ПАВЕРХНІ.

Аб'ектам даследавання з'яўляюцца тонкія плёнкі  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ , якія былі сінтэзаваны метадам спрэй-піролізу і падвергнуты далейшаму адпалу ў атмасферы S, і легіраваныя Ag.

Мэта працы: устанаўленне ўплыву тэмпературы адпалу і ступені легіравання Ag на структуру і марфалагію тонкіх плёнак  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ , атрыманых метадам спрэй-піролізу.

Метады даследавання: электронны мікрааналіз, сканавальная электронная мікраскапія, сканавальная зондавая мікраскапія, рэнтгенадыфракцыйны анализ, камбінацыйнае рассейванне святла і рэгістрацыя спектраў аптычнага адлюстравання святла.

Тонкія плёнкі  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  былі сінтэзаваны метадам спрэй-піролізу з далейшим адпалам пры тэмпературах  $425\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $475\text{ }^{\circ}\text{C}$  і  $525\text{ }^{\circ}\text{C}$  і легіраваннем Ag з канцэнтрацыямі 1%, 2% і 3%.

Для апрацоўкі экспериментальных даных быў скарыстаны пакет праграм OriginLab, які дазваляе аналізація лікавыя і графічныя даныя. З яго дапамогай, а таксама на аснове атрыманых названымі метадамі даследавання вынікаў былі вывучаны фазавы і элементны склад выбранных узору тонкіх плёнак  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ , ацэнена марфалагія і структура іх паверхні, разлічаны тапаграфічны і структурныя параметры і шырыня забароненай зоны.

Усе плёнкі маюць тэтрагональную крышталічную структуру кестэртыу  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  з пераважнай арыентацыяй зерняў у плоскасці (112), а таксама марфалагію паверхні без прыкметных пустэч і расколін і шырыню забароненай зоны ад  $1,32\text{ }\text{eV}$  да  $1,48\text{ }\text{eV}$ .

Галіной магчымага практычнага ўжывання з'яўляецца выкарыстанне атрыманых метадам спрэй-піролізу плёнак  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  у складзе гетэраструктур для сонечных элементаў.

## ABSTRACT

Graduation work contains 58 pp., 18 fig., 7 tab., 74 sources.

### **Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> THIN FILMS, SPRAY PYROLYSIS, SULFURIZATION, Ag ALLOYING, STRUCTURE, SURFACE MORPHOLOGY.**

The object of the study are Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> thin films synthesized by spray pyrolysis, subjected to subsequent annealing in an S atmosphere and alloying with Ag.

The purpose of this work is to determine the influence of the annealing temperature and the degree of Ag alloying on the structure and morphology of Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> thin films obtained by spray pyrolysis.

Research methods are electron microanalysis, scanning electron microscopy, scanning probe microscopy, X-ray diffraction analysis, Raman scattering of light and registration of optical reflection spectra of light.

Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> thin films were synthesized by spray pyrolysis followed by annealing at temperatures of 425°C, 475°C, and 525°C and alloying with Ag at concentrations of 1%, 2%, and 3%.

To process the experimental data, was used the OriginLab software package, which makes it possible to analyze numerical and graphical data. With its help, as well as on the basis of the results obtained by the indicated methods of research, the phase and elemental composition of the selected samples of Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> thin films were studied, the morphology and structure of their surface were estimated, the topographic and structural parameters and the band gap were calculated.

All the films have a tetragonal crystal structure of kesterite Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> with (112) plane as preferred orientation. The samples had morphology without appreciable voids and pinholes and band gap from 1,32 eV to 1,48 eV.

The area of possible practical application is the use of Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> films obtained by spray pyrolysis in heterostructures for solar cells.

## **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. A Review on Development Prospect of CZTS Based Thin Film Solar Cells / Xiangbo Song [et al.] // International Journal of Photoenergy. – 2014. – Vol. 2014. – 613173.
2. Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> Thin Film Solar Cells: Present Status and Future Prospects / Minlin Jiang and Xingzhong Yan // Solar Cells - Research and Application Perspectives. – 2012. – P. 107-143.
3. Потенциал, особенности работы и экономическая эффективность солнечных фотоэлектрических станций / Усков А.Е., Буторина Е.О., Беспалов Е.Г. // Научный журнал КубГАУ. – 2014. – №98.
4. Солнечные элементы на основе полупроводниковых материалов / В.Ф. Гременок, М.С. Тиванов, В.Б. Залесский // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». – 2009. – №1. – С. 59-124.
5. Тонкие пленки Cu<sub>2</sub>ZnSn(S,Se)<sub>4</sub> для использования в солнечных элементах третьего поколения / С.А. Башкиров [и др.] // ISJAAE. – 2016. – №15-18. – С. 31-53.
6. Как заработать на Солнце / A global network of independent accounting firms. – 2018.
7. RenEn: Инновации и передовые технологии в энергетике [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://renen.ru/v-mire-bylo-ustanovлено-115-gvt-solnechnyh-elektrostantsij-v-2019-godu-meа/> – Дата доступа: 25.01.2022.
8. EU Science Hub: European commissions [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://ec.europa.eu/jrc/en> – Дата доступа: 29.01.2022.
9. Определение структурных и оптических характеристик тонких пленок полупроводниковых соединений Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> / А.У. Шелег [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2014. – 48 т., 10 вып.
10. A high-efficiency solution-deposited thin-film photovoltaic device / Mitzi, David B. [et al.] // Advanced Materials. – 2008. – Vol. 20. – P. 3657-3662.
11. A Review of CZTS Thin Film Solar Cell Technology / Md. Fakhrul Islam, Nadhrrah Md Yatim, Mohd Azman Hashim@Ismail // Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences. – 2021. – Vol. 81. – P. 73-87.
12. Spray-deposited kesterite Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> (CZTS): Optical, structural, and electrical investigations for solar cell applications / R.J. Deokate [et al.] // Ceramics International. – 2022. – Vol. 48. – P. 795-802.
13. Near-optimal composition of CZTS thin film via exploration of copper and thiourea molar concentration in spray pyrolysis technique / K. Jeganath and Raviprakash Y. // Material Research Express. – 2021. – Vol. 8. – 116404.

14. A review on Spray pyrolysis deposited CZTS thin films for solar cell applications / C.S.A. Raj, S. Sebastian and Susai Rajendran // Journal of University of Shanghai for Science and Technology. – 2021. – Vol. 23. – P. 1196-1206.
15. Design and implementation of an ultrathin dielectric/metal/dielectric transparent electrode for Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> thin-film photovoltaics // Anies Mutiari [et al.] // Solar Energy Materials and Solar Cells. – 2021. – Vol. 230. – 111247.
16. Study of CZTS and CZTSSe Solar Cells for Buffer Layers Selection / Abdelbaki Cherouana, Rebiha Labbani // Applied Surface Science. – 2017. – Vol. 424. – P. 251-255.
17. Enhancing the open-circuit voltage and efficiency of CZTS thin-film solar cells via band-offset engineering / Shahin Enayati Maklavani, Shahram Mohammadnejad // Optical and Quantum Electronics. – 2020. – Vol. 52. – 72.
18. Efficiency boost of CZTS solar cells based on double-absorber architecture: Device modeling and analysis / Tariq ALZoubi [et al.] // Solar Energy. – 2021. – Vol. 225. – P. 44-52.
19. Enhancement of Open-Circuit Voltage of Solution-Processed Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> Solar Cells with 7.2% Efficiency by Incorporation of Silver / Asim Guchhait [et al.] // ACS Energy Letters. – 2016. – Vol. 1. – P. 1256-1261.
20. Study of polycrystalline Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> films by Raman scattering / P.A. Fernandes, P.M.P. Salomé, A.F. da Cunha // Preprint submitted to Journal of Alloys and Compounds. – 2011. – Vol. 509. – P. 7600-7606.
21. Synthesis and Characterization of Kesterite Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> (CZTS) Thin Films for Solar Cell Application / Mohamed M., A. Abusnina // Electronic Theses and Dissertations. – 2016. – 1153.
22. Tail state formation in solar cell materials: First principles analyses of zincblende, chalcopyrite, kesterite and hybrid perovskite crystals / M. Nishiwaki [et al.] // Physical Review Materials. – 2018. – Vol. 2. – 085404.
23. Progress and Perspectives of Thin Film Kesterite Photovoltaic Technology: A Critical Review / Sergio Giraldo [et al.] // Advanced Materials. – 2019. – Vol. 31. – 1806692.
24. CZTS based thin film solar cells: a status review / M. P. Suryawanshi [et al.] // Materials Technology. – 2013. – Vol. 28. – P. 98-109.
25. Диэлектрические характеристики монокристаллов полупроводниковых соединений Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> и Cu<sub>2</sub>ZnSnSe<sub>4</sub> / В.Г. Гуртовой, А.У. Шелег // Весці нацыянальнай акаадэміі навук беларусі. – 2014. – №4.
26. Silver (Ag) incorporated Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> thin film for improved optical and morphological properties / K.S. Gour [et al.] // Superlattices and Microstructures. – 2018. – Vol. 120. – P. 54-59.

27. Classification of Lattice Defects in the Kesterite Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> and Cu<sub>2</sub>ZnSnSe<sub>4</sub> Earth-Abundant Solar Cell / Shiyou Chen [et al.] // Advanced materials. – 2013. – Vol. 25. – P. 1522-1539.
28. Nanoscale charge transport and local surface potential distribution to probe defect passivation in Ag doped Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> absorbing layer / Kulwinder Kaur [et al.] // Nanotechnology. – 2018. – Vol. 30. – 065706.
29. Разработка технологии создания гибких полупрозрачных солнечных батарей для строительной фотовольтаики (BIPV) на основе крупнокристаллических монозеренных порошков CdS/CZTS: отчет об исследованиях (итоговый) / Г.Ф. Новиков [и др.] – 2019.
30. Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> solar cells with over 10% power conversion efficiency enabled by heterojunction heat treatment / Chang Yan [et al.] // Nature Energy. – 2018. – Vol. 3. – P. 764-772.
31. Дунюшкина, Л.А. Введение в методы получения пленочных электролитов для твердооксидных топливных элементов: монография / Л.А. Дунюшкина // Екатеринбург: УРО РАН, 2015. – 126 с.
32. Development of Cu<sub>2</sub>SnS<sub>3</sub> (CTS) thin film solar cells by physical techniques: a status review / Lokhande, A.C. [et al.] // Solar energy materials and solar cells. – 2016. – Vol. 153. – P. 84-107.
33. Петухов В.Ю., Гумаров Г.Г. Ионно-лучевые методы получения тонких пленок. Учебно-методическое пособие для студентов физического факультета // Казань, 2010. – 87 с. Издание 2-е, исправленное и дополненное.
34. Тесленок, А.В. Методы напыления ультратонких металлических пленок / А.В. Тесленок // Высокие технологии в современной науке и технике: сборник научных трудов IV Международной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Высокие технологии в современной науке и технике» / под ред. А.Н. Яковлева; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015. – С. 40-43.
35. Обзор методов нанесения кремниевых покрытий / Клюева В.А. // Молодой ученик. – 2016. – №10. – С. 236-245.
36. Оптические свойства и механизмы протекания тока в пленках Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub>, полученных спрей-пиролизом / И.Г. Орлецкий [и др.] // Физика твердого тела. – 2016. – Том 58. – Вып. 5. – С. 1024-1029.
37. Influence of substrate material on the microstructure of Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> thin films / Yauheni V. Asakovich [et al.] // Journal of Advanced Microscopy Research. – 2018. – Vol. 13. – P. 363-367.

38. Термическая обработка стали [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.crystec.com/kllthstz.htm> – Дата доступа: 02.03.2022.
39. Growth and Properties of Sprayed CZTS Thin Films / Tarun Chandel [et al.] // Journal of Electronic Materials. – 2018. – Vol. 47. – P. 5477-5487.
40. The effect of annealing conditions: temperature, time, ramping rate and atmosphere on nanocrystal Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> (CZTS) thin film solar cell properties / Altowairqi, Y. [et al.] // Materials today: proceedings. – 2019. – Vol. 18. – P. 473-486.
41. Characterization of CZTS Absorbent Material Prepared by Field-Assisted Spray Pyrolysis / Bwamba Jonah A. [et al.] // American Journal of Materials Science. – 2014. – Vol. 4. – P. 127-132.
42. Легирование полупроводников. Энциклопедия физики и техники [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://femto.com.ua/articles/part\\_1/1937.html](http://femto.com.ua/articles/part_1/1937.html) – Дата доступа: 06.03.2022.
43. Understanding the effects of Cd- and Ag-doping in Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> solar cells / Gopala-krishnan Sai Gautam [et al.] // Chemistry of Materials. – 2018. – Vol. 30. – P. 4543-4555.
44. Silver and Potassium Incorporation in Double-Layer Solution-Processed Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> Solar Cell / Ahmad Ibrahim [et al.] // ACS Applied Energy Materials. – 2020. – Vol. 3. – P. 10402-10407.
45. Raman and X-ray Photoelectron Spectroscopic Study of Aqueous Thiol-Capped Ag-Zn-Sn-S Nanocrystals / Volodymyr Dzhagan [et al.] // Materials. – 2021. – Vol. 14. – 3593.
46. Synthesis and characterization of (Cu<sub>1-x</sub>Ag<sub>x</sub>)<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> nanoparticles with phase transition and bandgap tuning / Ning Liu [et al.] // Journal of Materials Science: Materials in Electronics. – 2020. – Vol. 31. – P. 5760-5768.
47. The effect of Ag alloying of Cu<sub>2</sub>(Zn,Cd)SnS<sub>4</sub> on the monograins powder properties and solar cell performance / Kristi Timmo [et al.] // Journal of Materials Chemistry A. – 2019. – Vol. 7. – P. 24281-24291.
48. Соловьев, В.А. Технологическая установка для получения тонких пленок методом спрей-пиролиза: текст научной статьи по специальности «Электротехника, электронная техника, информационные технологии» / Соловьев В.А. – ГОУ ВПО Пензенский государственный университет. – УДК 621.382.
49. Печерская, Е.А. Разработка технологии спрей-пиролиза для синтеза прозрачных проводящих покрытий на основе диоксида олова: текст научной статьи по специальности «Химические технологии» / Печерская Е.А. [и др.] // Электроника, измерительная техника и радиотехника. – 2020. – №4. – С. 92-103.

50. Зинченко, Т.О. Анализ факторов, влияющих на электрофизические свойства прозрачных проводящих покрытий: текст научной статьи по специальности «Технологии материалов» / Зинченко Т.О. [и др.] // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2021. – №1. – С. 64-72.
51. Fabrication and characterization of Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> thin films deposited by spray pyrolysis technique / N. Kamoun, H. Bouzouita and B. Rezig // Thin Solid Films. – 2007. – Vol. 515. – P. 5945-5952.
52. Preparation and characterization of spray-deposited Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> thin films / Y.B. Kishore Kumar [et al.] // Solar Energy Materials and Solar Cells. – 2009. – Vol. 93. – P. 1230-1237.
53. Role of precursor solution in controlling the opto-electronic properties of spray pyrolysed Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> thin films / V.G. Rajeshmon [et al.] // Solar Energy. – 2011. – Vol. 85. – P. 249-255.
54. Toward a high Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> solar cell efficiency processed by spray pyrolysis method / O. Vigil-Galán [et al.] // Journal of Renewable and Sustainable Energy. – 2013. – Vol. 5. – 053137.
55. Thin films of (Ag<sub>x</sub>Cu<sub>1-x</sub>)<sub>2</sub>ZnSnS(Se)<sub>4</sub> (x = 0.05-0.20) prepared by spray pyrolysis / L. Dermenji [et al.] // Thin Solid Films. – 2019. – Vol. 690. – 137532.
56. Углов, В.В. Методы анализа элементного состава поверхностных слоев: пособие для студентов спец. 1-31 04 01 «Физика (по направлениям)» и 1-31 04 02 «Радиофизика» / В.В. Углов, Н.Н. Черенда, В.М. Анищик – Минск: БГУ, 2007. – 167 с.
57. Гременок, В.Ф. Солнечные элементы на основе полупроводниковых материалов / В.Ф. Гременок, М.С. Тиванов, В.Б. Залесский. – Минск: Изд. Центр БГУ, 2007. – 222 с. ил., табл. – ISBN 985-476-443-5.
58. Федоров, А.В. Специальные методы измерения физических величин / Федоров А.В. [и др.] – Учебное пособие. – СПб: НИУ ИТМО, 2014. – 127 с. Рис.78. Библ. 127.
59. Вознесенский, Э. Ф. Методы структурных исследований материалов. Методы микроскопии: учебное пособие / Э.Ф. Вознесенский, Ф.С. Шарифуллин, И.Ш. Абдуллин; М-во образования и науки России, Казан. нац. исслед. технол. ун-т. – Казань: Изд-во КНИТУ, 2014. – 184 с.
60. Roughness parameters / E.S. Gadelmawla [et al.] // Journal of Materials Processing Technology. – 2002. – Vol. 123. – P. 133-145.
61. Новикова В.А., Варжель С.В., Рассеяние света и его применение в волоконной оптике – СПб: Университет ИТМО, 2019. – 39 с.

62. Effect of heat treatment in sulfur on structural, optical and electrical properties of thermally evaporated  $\text{In}_2\text{S}_3$  thin films / M.S. Tivanov [et al.] // Solar Energy. – 2021. – Vol. 222. – P. 290-297.
63. Влияние наноструктурирования поверхности кристаллов сульфида свинца в плазме на спектры оптического отражения / С. П. Зимин [и др.] // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2022. – № 2. – С. 51-57.
64. Current challenges and future prospects for a highly efficient (>20%) kesterite CZTS solar cell: A review / Krishan Pal [et al.] // Solar Energy Materials and Solar Cells. – 2019. – Vol. 196. – P. 138-156.
65.  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  thin films deposition by ultrasonic spray pyrolysis / W. Daranfed [et al.] // Journal of Alloys and Compounds. – 2012. – Vol. 542. – P. 22-27.
66. Quality improvement of CZTS thin films deposited by spray pyrolysis method using pulsed ND: YAG laser irradiation / Shamardin A. [et al.] // Applied Surface Science. – 2019. – Vol. 488. – P. 827-835.
67. Kapta ICSD № 01 - 075 – 4122.
68. Effect of Annealing on Structural Properties of Electrodeposited CZTS Thin Films / Tulshi Shiyani [et al.] // IETE Technical Review. – 2016. – Vol. 33. – P. 2-6.
69. Effect of annealing on the physical properties of thermally evaporated  $\text{In}_2\text{S}_3$  thin films / S. Rasool [et al.] // Current Applied Physics. – 2019. – Vol. 19. – P. 108-113.
70. Improved solution-processed  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  solar cells using a temporary Ag layer / Kang Gu [et al.] // Journal of Materials Science: Materials in Electronics. – 2019. – Vol. 30. – P. 20443-20450.
71. Multiwavelength excitation Raman scattering study of polycrystalline kesterite  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  thin films / M. Dimitrievska [et al.] // Applied Physics Letters. – 2014. – Vol. 104. – 021901.
72. Imaging and phase identification of  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  thin films using confocal Raman spectroscopy / A.-J. Cheng [et al.] // Journal of Vacuum Science & Technology A. – 2011. – Vol. 29. – 051203.
73. A Raman Spectroscopic Study of  $\text{MoS}_2$  and  $\text{MoO}_3$ : Applications to Tribological Systems / Bret C. Windom, W. G. Sawyer, David W. Hahn // Tribology Letters. – 2011. – Vol. 42. – P. 301-310.
74. Optical and electrical properties of thermally co-evaporated  $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$  alloy films / K. Saritha [et al.] // Materials Research Express. – 2019. – Vol. 6. – 106439.