

К. ф.-м. н. Е. В. МАЙСТРУК, к. ф.-м. н. І. П. КОЗЯРСЬКИЙ,
к. ф.-м. н. Д. П. КОЗЯРСЬКИЙ, д. ф.-м. н. П. Д. МАР'ЯНЧУК

Україна, Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича
E-mail: d.koziarskyi@chnu.edu.ua

ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ НА ОПТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТОНКИХ ПЛІВОК $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$

Досліджено тонкі плівки $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$, отримані методом високочастотного магнетронного напилення попередньо синтезованого матеріалу на скляні підкладки. Було проведено вимірювання коефіцієнта відбивання за кімнатної температури, коефіцієнта пропускання в інтервалі температури від 111 до 290 K у діапазоні довжини хвилі 0,9–26 мкм. Отримані оптичні коефіцієнти дозволили визначити ширину оптичної забороненої зони досліджуваних плівок та її температурний коефіцієнт.

Ключові слова: тонкі плівки, CZTSe, оптичні коефіцієнти, ширина оптичної забороненої зони, температурний коефіцієнт.

Сучасні тенденції розвитку науки і техніки підштовхують науковців до пошуку альтернативних, екологічно чистих і, по можливості, дешевих джерел енергії, до яких можна віднести сонячну енергію. Енергія сонця перетворюється в електричну за допомогою сонячних елементів. На сьогоднішній день сонячні батареї є достатньо коштовними, що робить собівартість отриманої електроенергії вищою за вироблену з традиційних видів палива.

Використання сонячних елементів в різних галузях науки і техніки сприяє розвитку матеріалознавства та наукової діяльності у цій сфері. Відомі раніше матеріали та різного роду сполуки, які використовуються у виготовленні сонячних елементів (на заміну непрямозонного кремнію), є дорогими, рідкісними або технологія їхнього виготовлення є достатньо складною. Останнім часом науковці займаються дослідженням оптичних та електричних властивостей таких матеріалів, як кастерити [1–10]. Кастерит є природним мінералом, який складається в основному з міді, цинку, олова, сірки і селену, тобто з доволі поширених у природі елементів. Тому і сонячні елементи, розроблені на основі кастериту, матимуть, на думку дослідників, низьку вартість. Крім того, кастерити відносяться до прямозонних напівпровідників з величиною забороненої зони 0,9–1,5 eV і мають великі значення коефіцієнта оптичного поглинання ($\approx 10^4 \text{ см}^{-1}$).

Метою даної роботи є дослідження впливу температури на оптичні властивості тонких плівок кастеритів $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$, отриманих методом

ВЧ-магнетронного розпилення синтезованих раніше матеріалів.

Отримання зразків та методика проведення досліджень

Синтез проводили в електричній трубчастій печі. Для прискорення реакції між компонентами, густина яких сильно розрізняється, і одержання однорідних злитків $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ в процесі синтезу технологічна установка була обладнана пристроєм для коливання пічки з ампулою. Ампулу з шихтою поміщали у циліндричний контейнер, виготовлений із товстостінної жароміцної нержавіючої сталі, задля забезпечення рівномірного нагріву по довжині, а також запобігання руйнуванню пічки у разі її вибуху.

Під час синтезу сплавів $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ користувались діаграмами стану компонентів, що входять до складу цих сполук та твердих розчинів. Нагрів проводили поступово із витриманням температури плавлення компонентів протягом певного часу, що дозволяло вихідним компонентам краще прореагувати один з одним, внаслідок чого зменшується парціальний тиск їх парів (зокрема Se). Після досягнення температури плавлення досліджуваних кристалів їх поступово охолоджували.

Для виготовлення мішеней для ВЧ магнетронного розпилення використовували попередньо синтезовані сплави. Синтезований матеріал розтирали у фарфоровій ступі до дрібнодисперсного стану. Попередньо ступу та пест готували належним чином — промивали у плавикувній та азотній кислотах ОСЧ та дистильованій воді,

потім висушували. За допомогою гідравлічного пресу отриманий порошок впресовували у алюмінієвий стакан, внутрішній діаметр якого значно перевищував діаметр зони ерозії (зони розпилення) магнетрона, що запобігало розпиленню матеріалу стакана.

Для одержання тонких плівок методом ВЧ магнетронного розпилення використовували установку УВН-70. Для цього її обладнали магнетроном та штатний високовакуумний насос НВД-250 замінили на турбомолекулярний насос ТМН-500.

Для підтримки температури підкладок в межах від кімнатної до 600°C використовували спеціально розроблену та виготовлену пічку діаметром 100 мм з нержавіючої сталі (ніхромового дроту діаметром 0,8–0,9 мм). Така пічка має низький опір, напруга живлення становить 20–50 В, що запобігає виникненню електричного пробою. Живлення пічки здійснювалось за допомогою лабораторних стабілізованих імпульсних джерел струму ВРР 900–1500 Вт, які мають високі (десятки ампер) робочі струми. Слід зазначити, що галогенні лампи, які використовуються для нагріву підкладок, не дозволяють досягти температури вище за 300–350°C. Крім того, напруга їхнього живлення близька до мережевої, і за робочого тиску магнетронного розпилення ця величина, згідно закону Пашена, є достатньою для пробою зі струмопровідних частин на корпус, особливо під час роботи магнетрона, коли в камері присутні атоми іонізованого робочого газу у великій кількості.

Контроль температури здійснювався за допомогою хромель-алюмелевої термопари.

Досліджувались оптичні властивості тонких плівок $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$, які напилювали на підкладки з покривного скла стандартних розмірів за різних режимів: потужності магнетрону, часу напилення, температури підкладки. Для подальших досліджень використовували плівки із найкращими параметрами.

Оптичні коефіцієнти визначали методом, оснований на незалежному вимірюванні коефіцієнтів відбивання (R) та пропускання (t) [11]. Коефіцієнт відбивання досліджували за кімнатної температури з використанням спектрофотометра Nicolet 6700 та спеціальної приставки Pike, коефіцієнт пропускання – за температури від 111 до 290 К за допомогою того ж самого спектрофотометра та спеціального вакуумного криостату. Дослідження проводили у діапазоні довжини хвилі λ від 0,9 до 26 мкм.

Слід зазначити, що дослідження коефіцієнтів пропускання та відбивання необхідно проводити за однакових умов. В той же час, коефіцієнт пропускання t вимірюється за нормального падіння електромагнітного випромінюван-

ня (кут 0°), а для коефіцієнта відбивання R забезпечити такі умови на практиці дуже важко. Результати вимірювання R , які були проведені у діапазоні значень кута падіння променя від 50 до 30° (менші кути не дозволяє отримати вимірювальна приставка), показали, так само як і у [12], дуже слабку зміну величини R . Тому було прийнято, що $R(0^\circ) = R(30^\circ)$, і для розрахунків показника поглинання k використовували значення $R = R(30^\circ)$.

Результати досліджень та їх обговорення

Для коефіцієнта відбивання можна записати

$$R = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 - k^2}, \quad (1)$$

де n – показник заломлення.

У реальних напівпровідникових кристалах діапазон енергії, де поглинанням можна знехтувати, в більшості випадків малий. Однак умова $n^2 \gg k^2$ виконується в значно більшому діапазоні, тому визначення показника заломлення n на основі формули для коефіцієнта відбивання неполяризованого випромінювання (за кута падіння, близького до нормального)

$$R = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2} \quad (2)$$

дає достатньо надійне значення n в широкому інтервалі енергії фотонів (у всякому випадку, для $\hbar\omega < E_g$).

Показник поглинання k пов'язаний з коефіцієнтом поглинання α формулою $\alpha = 4\pi k/\lambda$. Значення α можна отримати з формули для обчислення коефіцієнта пропускання t пластини, яка за умови $n^2 \gg k^2$ виглядає наступним чином:

$$t = \frac{(1-R)^2 \left(1 + \left[\frac{\lambda\alpha}{4\pi n}\right]^2\right)}{e^{\alpha d} - R^2 e^{-\alpha d}}, \quad (3)$$

де d – товщина досліджуваного зразка.

Оскільки $n^2 \gg k^2$, виконується нерівність $\alpha\lambda/(4\pi n) < 1$, і в області зміни t від $(1-R)/(1+R)$ до 0,1 коефіцієнт пропускання можна вираховувати як

$$t = \frac{(1-R)^2 \exp(-\alpha d)}{1 - R^2 \exp(-2\alpha d)}, \quad (4)$$

де

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \left[\frac{(1-R)^2}{2t} + \sqrt{\frac{(1-R)^4}{4t^2} + R^2} \right]. \quad (5)$$

У нашому випадку $t < 0,1$, тому цю формулу можна спростити до

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \frac{(1-R)^2}{t}. \quad (6)$$

Таким чином, для визначення α необхідно провести вимірювання величин t та R .

Похибки отримання коефіцієнта поглинання проаналізовано в багатьох роботах, з яких випливає, що основна похибка одержується в процесі вимірювання t та R , а також визначення товщини зразка. Врахування цих похибок дає сумарну величину біля 15% за абсолютною величиною.

В [13] показано, що формула (5) є справедливою не лише для об'ємних матеріалів, а й для плівок, нанесених на прозорі підкладки, і єдине, що обмежує її використання, є вимога виконання умови $ad \gg 1$. Для тонких плівок вона виконується в області краю власного поглинання.

Для одержання спектра порівняння проводили вимірювання спектра інтенсивності світла, що проходить через віконця вакуумованого кріостата, за відсутності зразка за кімнатної температури.

Залежність коефіцієнта пропускання від довжини хвилі електромагнітного випромінювання представлено на **рис. 1**. На цих спектрах спостерігається інтерференційна картинка. Зазначимо, що зміна абсолютної величини t зі зміною температури, на наш погляд, пояснюється утворенням на вікнах кріостату конденсату, що зменшує коефіцієнт пропускання.

Отримані результати вимірювань коефіцієнтів пропускання та відбивання досліджуваних зразків були використані для отримання коефіцієнта поглинання α .

Одержані залежності $\alpha = f(h\nu)$ були перераховані в залежності $\alpha^2 = f(h\nu)$, які дали можливість визначити ширину забороненої зони E_g зразка для кожної досліджуваної температури

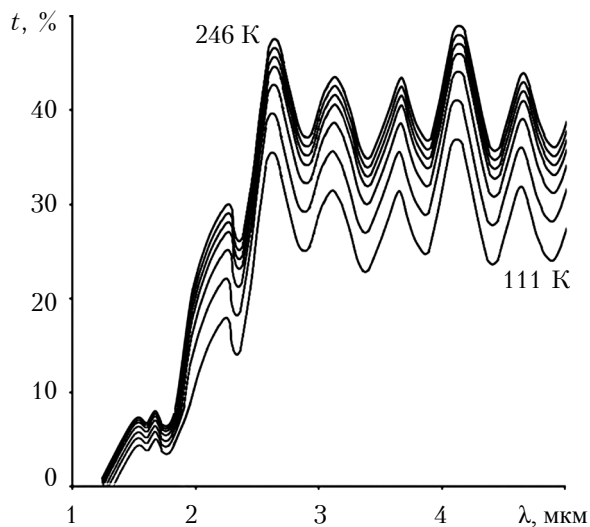


Рис. 1. Спектри коефіцієнта пропускання зразка тонкої плівки $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$, отримані за температури від 111 до 246 К (проміжні значення: 114; 130,5; 148; 169; 201 К)

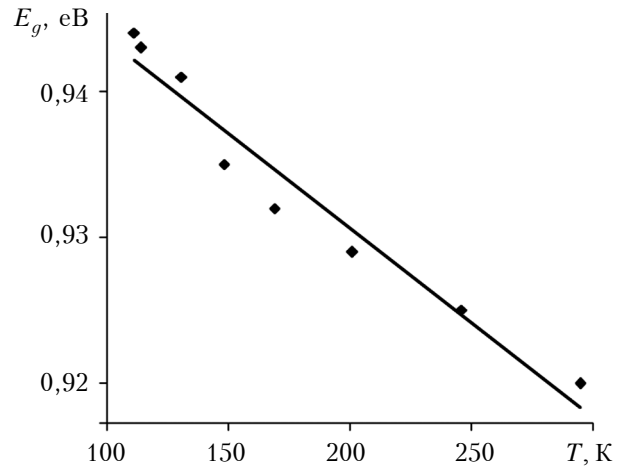


Рис. 2. Температурна залежність ширини забороненої зони зразка тонкої плівки $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$

та побудувати графік, представлений на **рис. 2**. Як видно, ширина забороненої зони досліджуваної напівпровідникової плівки зменшується при підвищенні температури. Таку поведінку можна пояснити тим, що у зв'язку із збільшенням теплової енергії зростає амплітуда коливань атомів, що призводить до збільшення між-атомної відстані, а значить, до зменшення енергії зв'язку в матеріалі і, відповідно, ширини забороненої зони.

З рис. 2 також було визначено температурний коефіцієнт ширини оптичної забороненої зони, який склав $-1,29 \cdot 10^{-4}$ eV/K.

Висновки

Дослідження оптичних коефіцієнтів тонких плівок $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$, отриманих методом високочастотного магнетронного напилення попередньо синтезованого матеріалу на скляні підкладки, показали, що в зразках спостерігаються прямі міжзонні оптичні переходи з оптичною шириною забороненої зони 0,92 eV за кімнатної температури. Отримане значення її температурного коефіцієнта становить $-1,29 \cdot 10^{-4}$ eV/K, тобто оптична ширина забороненої зони зменшується із температурою, що є характерним для класичних напівпровідників.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Maistruk E. V., Koziarskyi I. P., Koziarskyi D. P., Andrushchak G. O. Optical properties of thin films CZTSe produced by RF magnetron sputtering and thermal evaporation // IEEE 7th International Conference Nanomaterials: Application & Properties (NAP). – 2017. – Vol. CFP17F65-ART, 01PCSI28. – <https://doi.org/10.1109/NAP.2017.8190163>
2. Maistruk E. V., Koziarskyi I. P., Koziarskyi D. P. et al. Structure and optical properties of thin films CZTS obtained by the RF magnetron sputtering // Proc. SPIE 10612, Thirteenth International Conference on Correlation Optics. – 2018. – 1061215. – <https://doi.org/10.1117/12.2304801>
3. Козьярський І. П., Майструк Э. В., Козьярський Д. П., Марьянчук П. Д. Электрические свойства тонких пленок

$\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ и $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_2\text{Te}_2(\text{S}_2)$, полученных методом термовакuumного напыления // Журнал нано- та електронної фізики. – 2018. – Т. 10. № 1. – С. 01028. – [https://doi.org/10.21272/jnep.10\(1\).01028](https://doi.org/10.21272/jnep.10(1).01028)

4. Pawar S. M., Inamdar A. I., Pawar B. S. et al. Synthesis of $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (CZTS) absorber by rapid thermal processing (RTP) sulfurization of stacked metallic precursor films for solar cell applications // Materials Letters. – 2014. – Vol. 118. – P. 76–79. – <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2013.12.047>

5. Adelifard M., Torkamani R. Spray deposited $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ nanostructured absorber layer: a promising candidate for solar cell applications // Journal of Materials Science: Materials in Electronics. – 2015. – Vol. 26, iss. 6. – P. 3700–3706. – <https://doi.org/10.1007/s10854-015-2888-4>

6. Cui Y., Deng R., Wang G. et al. A general strategy for synthesis of quaternary semiconductor Cu_2MSnS_4 (M = Co^{2+} , Fe^{2+} , Ni^{2+} , Mn^{2+}) nanocrystals // J. Mater. Chem. – 2012. – Vol. 22. – P. 23136–23140. – <https://doi.org/10.1039/C2JM33574C>

7. Xin H., Katahara J. K., Braly I. L., Hillhouse H. W. 8% Efficient $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S},\text{Se})_4$ Solar Cells from Redox Equilibrated Simple Precursors in DMSO // Adv. Energy Mater. – 2014. – Vol. 4(11). – <https://doi.org/10.1002/aenm.201301823>

8. Yu X., Ren A., Wang F. et al., Synthesis and characterization of CZTS thin films by sol-gel method without sulfurization // International Journal of Photoenergy. –

2014. – Vol. 2014. – Article ID 861249. – <https://doi.org/10.1155/2014/861249>

9. Tanaka K., Fukui Y., Moritake N., Uchiki H. Chemical composition dependence of morphological and optical properties of $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ thin films deposited by sol-gel sulfurization and $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ thin film solar cell efficiency // Sol. Energy Mater. Sol. Cells. – 2011. – Vol. 95, iss. 3. – P. 838–842. – <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2010.10.031>

10. Cooper C. S., Arnou P., Wright L. D. An innovative approach for fabrication of $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ absorber layers using solutions of elemental metal powders // Thin Solid Films. – 2017. – Vol. 633. – P. 151–155. – <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2016.12.026>

11. Уханов Ю. И. Оптические свойства полупроводников // Москва: Наука, 1978.

12. Koziarskyi I. P., Marianchuk P. D., Maistruk E. V. Optical properties of $(3\text{HgSe})_{0.5}(\text{In}_2\text{Se}_3)_{0.5}$ crystals doped with Mn or Fe // Ukr.J.Phys.Opt. – 2011. – Vol. 12. – P. 137–142. – <https://doi.org/10.3116/16091833/12/3/137/2011>

13. Maistruk E. V., Mar'yanchuk P. D., Solovan M. N. et al. Optical properties of thin $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ films produced by RF magnetron sputtering // Optics and Spectroscopy. – 2017. – Vol. 123, №1. – P. 38–43. – <https://doi.org/10.1134/S0030400X17070153>

Дата надходження рукопису
в редакцію 01.10 2018 р.

Э. В. МАЙСТРУК, И. П. КОЗЯРСКИЙ,
Д. П. КОЗЯРСКИЙ, П. Д. МАРЬЯНЧУК

Украина, Черновицкий национальный университет
имени Юрия Федьковича
E-mail: d.koziarskyi@chnu.edu.ua

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТОНКИХ ПЛЕНОК $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$

Использование солнечных элементов в различных областях науки и техники способствует развитию материаловедения и научной деятельности в этой сфере. В последнее время ученые занимаются исследованием оптических и электрических свойств таких материалов, как кастериты. Кастерит является природным минералом, который состоит в основном из меди, цинка, олова, серы и селена, то есть достаточно широко распространенных в природе элементов. Поэтому и солнечные элементы, разработанные на основе кастерита, будут иметь, по мнению исследователей, низкую стоимость. Кроме того, кастериты относятся к прямозонным полупроводникам с величиной запрещенной зоны 0,9–1,5 эВ и с большим коэффициентом оптического поглощения ($\approx 10^4 \text{ см}^{-1}$).

В данной работе исследовано влияние температуры на оптические свойства тонких пленок кастеритов $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$, полученных методом ВЧ-магнетронного напыления синтезированного ранее материала на стеклянные подложки.

Оптические коэффициенты определяли методом, основанным на независимом измерении коэффициентов отражения и пропускания. Коэффициент отражения исследовали при комнатной температуре, коэффициент пропускания – в температурном диапазоне 111–290 К. Измерения проводили в диапазоне длины волны от 0,9 до 26 мкм. Полученные данные были использованы для расчета коэффициента поглощения и ширины запрещенной зоны образцов при различных температурах из исследуемого диапазона. Исследования показали, что в пленках $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ наблюдаются прямые межзонные оптические переходы. Оптическая ширина запрещенной зоны при комнатной температуре составила 0,92 эВ при температурном коэффициенте $-1,29 \cdot 10^{-4} \text{ эВ/К}$, то есть оптическая ширина запрещенной зоны уменьшается с температурой, что характерно для классических полупроводников.

Ключевые слова: тонкие пленки, CZTSe, оптические коэффициенты, температурный коэффициент ширины запрещенной зоны.

INFLUENCE OF TEMPERATURE ON OPTICAL PROPERTIES
OF THIN FILMS $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$

The use of solar cells in various fields of science and technology contributes to the development of materials science and scientific activity in this area. Recently, scientists have been researching the optical and electrical properties of materials such as custerite. Custerite is a natural mineral which consists mainly of copper, zinc, tin, sulfur and selenium, that is, elements that are fairly widespread in nature. Therefore, solar cells, developed on the basis of custerite, will have, according to the researchers, a low cost. In addition, custerites belong to direct-gap semiconductors with a band gap of 0.9–1.5 eV and with a large optical absorption coefficient ($\approx 10^4 \text{ cm}^{-1}$).

In this work, the authors investigate the effect of temperature on the optical properties of $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ thin films of custerite obtained by the method of RF magnetron sputtering of previously synthesized material on glass substrates.

Optical coefficients were determined by a method based on independent measurement of reflection and transmission coefficients. The reflection coefficient was studied at room temperature, and the transmittance – in the temperature range of 111–290 K. The measurements were made in the wavelength range from 0.9 to 26 μm . The obtained data were used to calculate the absorption coefficient and the band gap of the samples at different temperatures from the range under study. Studies have shown that direct interband optical transitions are observed in $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ films. The optical band gap at room temperature was 0.92 eV at a temperature coefficient of $-1,29 \cdot 10^{-4} \text{ eV/K}$, that is, the optical band gap decreases with temperature, which is typical of classical semiconductors.

Keywords: thin films, CZTS, optical coefficients, temperature coefficient of the optical band gap.

REFERENCES

1. Maistruk E. V., Koziarskyi I. P., Koziarskyi D. P., Andrushchak G. O. Optical properties of thin films CZTSe produced by RF magnetron sputtering and thermal evaporation. *IEEE 7th International Conference Nanomaterials: Application & Properties (NAP)*, 2017, vol. CFP17F65-ART, 01PCS128. <https://doi.org/10.1109/NAP.2017.8190163>
2. Maistruk E. V., Koziarskyi I. P., Koziarskyi D. P. et al. Structure and optical properties of thin films CZTS obtained by the RF magnetron sputtering. *Proc. SPIE 10612, Thirteenth International Conference on Correlation Optics*, 2018, 1061215. <https://doi.org/10.1117/12.2304801>
3. Koziarskyi I. P., Maistruk E. V., Koziarskyi D. P., Maryanchuk P. D. Electric properties of thin films $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ and $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_2\text{Te}_2$ (S_2) obtained by thermal vacuum deposition. *Zhurnal nano- ta elektronnoyi fizyky*. 2018, vol. 10, no. 1, pp. 01028. (Ukr) [https://doi.org/10.21272/jnep.10\(1\).01028](https://doi.org/10.21272/jnep.10(1).01028)
4. Pawar S. M., Inamdar A. I., Pawar B. S. et al. Synthesis of $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (CZTS) absorber by rapid thermal processing (RTP) sulfurization of stacked metallic precursor films for solar cell applications. *Materials Letters*, 2014, vol. 118, pp. 76–79 <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2013.12.047>
5. Adelifard M., Torkamani R. Spray deposited $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ nanostructured absorber layer: a promising candidate for solar cell applications. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2015, vol. 26, iss. 6, pp. 3700–3706. <https://doi.org/10.1007/s10854-015-2888-4>
6. Cui Y., Deng R., Wang G. et al. A general strategy for synthesis of quaternary semiconductor Cu_2MSnS_4 ($\text{M} = \text{Co}^{2+}$, Fe^{2+} , Ni^{2+} , Mn^{2+}) nanocrystals. *J. Mater. Chem*, 2012, vol. 22, pp. 23136–23140. <https://doi.org/10.1039/C2JM33574C>
7. Xin Hao, Katahara J. K., Braly I. L., Hillhouse H. W. 8% Efficient $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S},\text{Se})_4$ solar cells from redox equilibrated simple precursors in DMSO. *Adv. Energy Mater*, 2014, vol. 4(11). <https://doi.org/10.1002/aenm.201301823>
8. Yu X., Ren A., Wang F. Synthesis and Characterization of CZTS Thin Films by Sol-Gel Method without Sulfurization. *International Journal of Photoenergy*, 2014, vol. 2014, article ID 861249. <https://doi.org/10.1155/2014/861249>
9. Tanaka K., Fukui Y., Moritake N., Uchiki H. Chemical composition dependence of morphological and optical properties of $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ thin films deposited by sol-gel sulfurization and $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ thin film solar cell efficiency. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 2011, vol. 95, iss. 3, pp. 838–842. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2010.10.031>
10. Cooper C. S., Arnou P., Wright L. D. An innovative approach for fabrication of $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ absorber layers using solutions of elemental metal powders. *Thin Solid Films*, 2017, vol. 633, pp. 151–155. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2016.12.026>
11. Ukhanov Yu. I. *Opticheskiye svoystva poluprovodnikov* [Optical properties of semiconductors]. Moscow, Nauka, 1978. (Rus)
12. Koziarskyi I. P., Marianchuk P. D., Maistruk E. V. Optical properties of $(3\text{HgSe})_{0.5}(\text{In}_2\text{Se}_3)_{0.5}$ crystals doped with Mn or Fe. *Ukr. J. Phys. Opt*, 2011, vol. 12, pp.137–142. <https://doi.org/10.3116/16091833/12/3/137/2011>
13. Maistruk E. V., Mar'yanchuk P. D., Solovan M. N. et al. Optical properties of thin $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ films produced by RF magnetron sputtering. *Optics and Spectroscopy*, 2017, vol. 123, no. 1, pp. 38–43. <https://doi.org/10.1134/S0030400X17070153>

Опис статті для цитування:

Маїструк Е. В., Козярьський І. П., Козярьський Д. П., Мар'янчук П. Д. Вплив температури на оптичні властивості тонких плівок $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$. *Технологія та конструювання в електронній апаратурі*, 2018, № 5-6, с. 50–54. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2018.5-6.50>

Cite the article as:

Maistruk E. V., Koziarskyi I. P., Koziarskyi D. P., Maryanchuk P. D. Influence of temperature on optical properties of thin films $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2018, no. 5-6, pp. 50–54. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2018.5-6.50>