

## ФОРМУВАННЯ СОНЯЧНОГО ЕЛЕМЕНТА З НАНОСТРУКТУРОВАНИМ ШАРОМ ZnO, СЕНСИБІЛІЗОВАНИМ КВАНТОВИМИ ТОЧКАМИ SnS

*З метою створення нової конструкції сонячного елемента (СЕ) з наноструктурованим одновимірним (1-D) шаром ZnO, сенсифілізованим квантовими точками (КТ) SnS, застосоване імпульсне електроосадження масивів 1-D ZnO, а також нанесення квантових точок SnS і тонкої плівки широкозонного напівпровідника p-типу CuSCN методом рідиннофазного молекулярного нашарування (Successive Ionic Layer Adsorption and Reaction, SILAR). В роботі досліджені морфологія, структура і оптичні властивості всіх напівпровідникових шарів. Продемонстровано діодну характеристику розробленої нами нової конструкції СЕ на КТ, яка підтверджує її функціональність. Бібл. 5, рис. 4.*

*Ключові слова:* сонячний елемент, 1-D ZnO, квантові точки SnS, імпульсне електроосадження, метод рідиннофазного молекулярного нашарування.

*С целью создания новой конструкции солнечного элемента (СЭ) с наноструктурированным одномерным (1-D) слоем ZnO, сенсифицированным квантовыми точками (КТ) SnS, использовано импульсное электроосаждение массивов 1-D ZnO, а также нанесение квантовых точек SnS и тонкой пленки широкозонного полупроводника p-типа CuSCN методом жидкофазного молекулярного наслаивания (Successive Ionic Layer Adsorption and Reaction, SILAR). В работе исследованы морфология, структура и оптические свойства всех полупроводниковых слоев. Продемонстрирована диодная характеристика разработанной нами новой конструкции СЭ на КТ, подтверждающая его функциональность. Библ. 5, рис. 4.*

*Ключевые слова:* солнечный элемент, 1-D ZnO, квантовые точки SnS, импульсное электроосаждение, метод жидкофазного молекулярного наслаивания.

**Вступ.** Збільшення світового попиту на недорогі поновлювані джерела енергії спонукає дослідників до розробки нових підходів до використання сонячної енергії. Фотоелектричне перетворення є чистою технологією виробництва електроенергії за рахунок використання сонячних елементів (СЕ). Проте, високі витрати, пов'язані зі створенням найбільш широко поширених СЕ на пластинах з кремнію на стадіях синтезу матеріалів і подальшого виготовлення приладів, знижують економічну доцільність повсюдної експлуатації кремнієвих сонячних батарей. Твердотільні СЕ на основі наноструктур широкозонних електронних напівпровідників з великою площею поверхні, на які наносять фоточутливі напівпровідникові квантові точки (КТ), а зверху них – широкозонний напівпровідник p-типу, розглядаються [1] у якості перспективних недорогих і ефективних СЕ. Дана концепція сонячного елемента дозволяє використовувати напівпровідникові матеріали низької структурної і електронної якості завдяки малій відстані, яку необхідно долати фотогенерованим носіям, перш ніж вони потраплять у напівпровідникові фази відповідного типу, призначені для транспорту електронів або дірок. Невисока ціна таких СЕ обумовлена не тільки наявністю в їх складі недорогих матеріалів, але також і можливістю використання дешевих і придатних для широкомасштабного виробництва процесів їх формування. На відміну від добре відомих електрохімічних сонячних елементів, сенсифілізованих барвниками (DSSC) або квантовими точками (QDSSC), до складу твердотільних СЕ на КТ, які вважаються [2] оновленим варіантом цієї старої концепції, не входить рідкий або гелеподібний електроліт, що, природно, створює переваги в експлуатації. У повністю твердотільних СЕ на КТ, які розробляються на даний час, наноструктурований напівпрозорий шар з широкозонного напів-

провідника n-типу, наприклад, з мезопористого TiO<sub>2</sub> або з масиву одновимірних або ієрархічних наноструктур ZnO, покривають шаром напівпровідникових квантових точок, які поглинають світло. Потім на шар КТ наносять тонку плівку широкозонного напівпровідника p-типу. У досі створених сенсифілізованих квантовими точками сонячних елементах різних типів були здебільшого використані КТ з токсичних матеріалів, а саме CdS, CdSe, CdTe і PbS [1]. В [3] було запропоновано квантові точки з не тільки не отруйного, але і широко доступного сульфиду олова SnS на поверхні пористого шару TiO<sub>2</sub>. Однак для нанесення TiO<sub>2</sub> на поверхню скляної підкладки з прозорим електропровідним шаром легovanого фтором оксиду олова (FTO) в [3] використовувалася досить складна двоетапна золь-гель технологія, яка включала два відпали.

**Постановка задачі.** У запропонованій нами роботі при створенні СЕ у якості широкозонного напівпровідника n-типу, на який наносять квантові точки SnS, використовується наноструктурований масив 1-D ZnO, який вирощується безпосередньо на поверхні FTO із застосуванням дешевого і придатного для широкомасштабного виробництва одноетапного методу імпульсного електролізу, переваги якого описані в [4]. Для осаження квантових точок SnS і для нанесення на їх поверхню тонкої плівки широкозонного напівпровідника p-типу CuSCN був використаний дешевий і доступний хімічний метод рідиннофазного молекулярного нашарування (Successive Ionic Layer Adsorption and Reaction, SILAR), який отримав широке визнання виробників подібних сонячних елементів [3]. У даній роботі досліджені морфологія, структура і оптичні властивості компонентів, а також продемонстровано діодну характеристику розробленої нами нової конструкції сонячного елемента на квантових точках.

**Методика проведення експерименту.** Виготовлення масивів нанострижнів ZnO виконували аналогічним описаному в [4] методом імпульсного катодного електрохімічного осадження в термостатичній трьох-електродній електрохімічній комірниці з водним електролітом, що містив 0,01 М Zn(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> і 0,1 М NaNO<sub>3</sub>, при температурі 70 °С без перемішування. В якості підкладок (катодів, або робочих електродів) використовували пластини FTO марки TEC 7 фірми Pilkington, USA. Протиелектродом слугувала платинова спіраль, а електродом порівняння – насичений хлорсрібний електрод Ag/AgCl. Відповідно до рекомендації [3], на першому етапі електроосадження створювався зародковий шар ZnO за допомогою подачі в тому ж електроліті на робочий електрод FTO постійного потенціалу  $U = -1,3$  В протягом 30 с. Після цього за допомогою імпульсного потенціостата ПІ-50-1.1, оснащеного програматором ПР-8, для здійснення імпульсного електролізу протягом 30 хв. на підкладку-катод подавали прямокутні імпульси потенціалу: нижня межа катодного потенціалу  $U_{off}$  становила  $-0,7$  В, верхня межа  $-U_{on} = -1,3$  В (потенціали наведені відносно електрода порівняння Ag/AgCl). Робочий цикл (duty cycle), тобто відношення тривалості імпульсу до суми тривалостей імпульсу і паузи, і частота як величина, зворотна сумі тривалостей імпульсу і паузи, становили 0,4 і 2 Гц, відповідно. Таким способом були виготовлені, показані на рис. 1, масиви нанострижнів ZnO товщиною  $\approx 1,5$  мкм.

Для виготовлення шарів квантових точок сульфід олова методом SILAR скляну підкладку зі скла К8 або пластину FTO з масивом нанострижнів ZnO послідовно занурювали в водний розчин 0,01 М SnSO<sub>4</sub> (протягом 20 с при температурі 70-80 °С), потім в дистильовану воду (протягом 10 с при 20 °С), потім в водний розчин Na<sub>2</sub>S 0,01 М (протягом 20 с при 20 °С) і знову в дистильовану воду (протягом 10 с при 20 °С). Дана процедура становила 1 цикл SILAR ( $n = 1$ ). Для створення квантових точок сульфід олова з різноманітними розмірами і оптичними властивостями число циклів при виготовленні КТ SnS змінювалося від  $n = 20$  до  $n = 140$ .

Нанесення шарів CuSCN на скляні підкладки і на поверхню шарових композицій скло|FTO|ZnO|SnS здійснювали методом SILAR. У якості катіонного прекурсора використовували водний розчин 0,1 М CuSO<sub>4</sub> і 0,1 М Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, в якому утворювався комплекс тіосульфату міді(I). Підкладку занурювали в катіонний прекурсор на 10 с. Моношар іонів міді Cu<sup>+</sup> був адсорбований на поверхні підкладки, а не адсорбовані іони видалялися промиванням підкладки в дистильованій воді протягом 5 с.

Для реакції з іонами SCN<sup>-</sup> підкладку занурювали в аніонний прекурсор 6,25 мМ KSCN протягом 20 с. Після цього погано пов'язані з підкладкою частки і іони видаляли промиванням в дистильованій воді протягом 5 с. Перераховані процедури становили один цикл SILAR CuSCN. Цикли SILAR CuSCN повторювали 52 рази ( $n = 52$ ). Таким способом були виготовлені як плівка тіоціаніду міді на скляній підкладці К8 для дослідження оптичних властивостей і структури CuSCN, так і основа СЕ на КТ у вигляді

шарової композиції скло|FTO|ZnO|SnS|CuSCN.

Верхній електричний контакт було створено за рахунок притиснення скляної пластини з FTO до поверхні плівки тіоціаніду міді. На рис. 2,а схематично зображено конструкцію виготовленої шарової композиції скло|FTO|ZnO|SnS|CuSCN|FTO|скло для сонячного елемента на квантових точках SnS.

Дослідження оптичних властивостей наноструктурованих шарів оксиду цинку, квантових точок SnS і тонких плівок CuSCN здійснювалося за допомогою спектрофотометра СФ-2000. В якості контрольних зразків при реєстрації спектрів оптичного пропускання  $T(\lambda)$  використовували відповідні підкладки (скло з FTO для ZnO і скло К8 для SnS і CuSCN). Спектри поглинання (оптичної густини)  $A(\lambda)$  були отримані із залежності  $A = -\lg T$ . Ширину забороненої зони прямих оптичних переходів  $E_g$  для шарів ZnO і КТ SnS визначали за допомогою екстраполяції на вісь енергій лінійної ділянки залежності  $[-\ln(T) \cdot hv]^2$  від  $hv$ . Товщини  $d$  плівок CuSCN визначали з використанням інтерференційних піків за формулою:

$$d = (M \cdot \lambda_1 \lambda_2) / (2 \cdot n(\lambda_1) \cdot \lambda_2 - n(\lambda_2) \cdot \lambda_1), \quad (1)$$

де  $M$  – кількість максимумів між  $\lambda_1$  і  $\lambda_2$ ;  $\lambda_1$  і  $\lambda_2$  – довжини хвиль, що відповідають максимумам в спектрі  $T(\lambda)$ ;  $n(\lambda)$  – показник заломлення CuSCN при довжинах хвиль в інтервалі між  $\lambda_1$  і  $\lambda_2$ .

Знаходження ширини забороненої зони для прямих оптичних переходів у плівках CuSCN здійснювали із використанням даних про коефіцієнт оптичного поглинання  $\alpha = -d^{-1} \cdot \ln(T)$  шляхом екстраполяції на вісь енергій лінійних ділянок залежностей  $(\alpha \cdot hv)^2$  від  $hv$ . Для визначення ширини забороненої зони для прямих дозволених оптичних переходів аналогічним чином використовували залежності  $(\alpha \cdot hv)^{1/2}$  від  $hv$ . Фактор розсіювання світла ( $H_f$ ) розраховували як відношення дифузного відбиття до загального відбиття  $R$  (суми дифузного і дзеркального відбиття).

З метою аналізу структурних і субструктурних параметрів масивів ZnO, шарів квантових точок SnS і тонких плівок CuSCN рентгенівські спектри (XRD) реєструвалися за допомогою дифрактометра ДРОН-4 в випромінюванні CoK <sub>$\alpha$</sub>  ( $\lambda_{CoK\alpha} = 1,7889$  Å). Сканування проводилося при фокусуванні по Бреггу-Брентано ( $\theta$ - $2\theta$ ). Обробка отриманих рентген-дифрактограм, а також розрахунок параметрів профілю дифракційних ліній виконувалися за допомогою програм «New\_Profile v.3.4 (486)» і «OriginPro v.7.5». Наявність кристалічних фаз виявлялася шляхом порівняння даних експериментальних рентген-дифрактограм з базою еталонних даних JCPDS за допомогою програми «PCPDFWIN v.1.30». Оцінка областей когерентного розсіювання  $D$  проводилися шляхом аналізу розширення рентгенівських дифракційних максимумів, з урахуванням наявності інструментального розширення методом апроксимації Вільямсона-Холла і за методом Шеррера. Для дослідження текстури електроосаджених масивів оксиду цинку за методом Харріса використовували значення інтегральних інтенсивностей рентген-дифрактометричних піків. Для кожного піку розраховували значення полюсної густини  $P(hkl)$ , яка характеризує ймовірність, з якою нормаль до поверхні кристаліта збігається з нормаллю до площини

(*hkl*), тобто визначає кількість кристалітів, у яких площини (*hkl*) є паралельними поверхні зразка. Полюсні густини розраховували для всіх зареєстрованих рентген-дифрактометричних піків, значення  $P(hkl) \gg 1$  приписували осям текстури.

Дослідження морфології поверхні масивів оксиду цинку здійснювали напівконтактним методом атомної силової мікроскопії (АСМ) на установці «НаноЛабораторія Нтегра Прима NT-MDT».

Для визначення типу провідності був використаний стандартний метод термозонда. Вимірювання темної вольт-амперної характеристики (ВАХ) шарової композиції скло|FTO|ZnO|SnS|CuSCN|FTO|скло здійснювали за схемою характеріографа за допомогою промислового характеріографа L2-56 з прямою візуалізацією ВАХ на екрані.

**Результати та їх обговорення.** На рис. 1,а,б наведено отримані за допомогою АСМ тривимірне зображення поверхні і профіль поверхні електроосадженого в імпульсному режимі шару ZnO, які демонструють, що даний шар є масивом нанострижнів, орієнтованих перпендикулярно до поверхні підкладки. Аналіз рентгенівської дифрактограми (рис. 1,в) показує, що масив ZnO є однофазним і має гексагональну структуру ZnO модифікації вюрцит (JCPDS PDF № 36-1451). Електроосаджений масив оксиду цинку є нанокристалічним (*D* в інтервалі від 70 до 190 нм), характеризується збільшенням параметром кристалічної решітки вздовж осі *c* (*c* = 5,22 Å) у порівнянні з еталонним ZnO (відповідно до JCPDS PDF № 36-1451, *c* = 5,207 Å), а також незначними мікронапруженнями  $\sim 10^{-3}$  і залишковим напруженням стиску  $\approx -0.4$  ГПа. Масив ZnO має аксіальну текстуру  $P(002) = 2,35$ , а отже має переважну орієнтацію в напрямку  $\langle 001 \rangle$ , тобто перпендикулярно поверхні підкладки, що добре узгоджується з даними АСМ. Оптичні властивості електроосадженого в імпульсному режимі наноструктурованого масиву ZnO демонструють його досить високу прозорість і невелике поглинання у видимій області спектра. Ширина забороненої зони для прямих оптичних переходів становить 3,36 еВ, тобто майже не відрізняється від  $E_g = 3,37$  еВ для монокристала ZnO. Вимірювання методом термозонда показали, що електроосаджений в імпульсному режимі оксид цинку має характерний для ZnO *n*-тип провідності.

На рис. 3 зображені результати дослідження оптичних властивостей шарів квантових точок SnS, нанесених на скляні поверхні. Як можна бачити на рис. 3,а зі збільшенням числа циклів SILAR не тільки зменшується пропускання видимого світла шарами SnS, а

й відбувається зрушення смуги поглинання в бік довгих хвиль. У вставці рис. 4,а відзначено інтенсивне поглинання світла шаром SnS, отриманим SILAR за *n* = 140, майже у всьому видимому діапазоні. На рентген-дифрактограмі того ж зразка є три слабкі піки SnS (120), (101) і (111) модифікації герценбергіт (Herzenbergite,  $\beta$ -SnS, JCPDS PDF № 39-0354). Оскільки, відповідно до [3], розмір часток SnS монотонно зростає зі збільшенням числа циклів, наночастинки SnS, отримані нами при максимальному *n* = 140, були найбільшими. Згідно розрахунків за методом Шеррера, їх *D*  $\approx$  28 нм. Зауважимо, що у шарів SnS, отриманих за меншу кількість циклів SILAR, на рентген-дифрактограмах не було виявлено піків, що, на нашу думку, свідчило про рентгеноаморфність шарів, викликану ще меншими розмірами наночастинок SnS. Отримані нами експериментальні результати добре узгоджуються з наявними в літературі. Наприклад, проведений в [5] порівняльний аналіз даних просвічуючої електронної мікроскопії та рентгенівської дифрактометрії показав, що тільки для КТ SnS більших, ніж 10-14 нм на рентгенівських дифрактограмах реєструються лише два ледве помітних піки (120) і (111). Рис. 3,б демонструє характерний ефект зменшення ширини забороненої зони  $E_g$  з ростом *n*, а значить з укрупненням наночастинок SnS. Шляхом збільшення числа циклів SILAR від *n* = 20 до *n* = 140 вдалося знизити  $E_g$  сульфиду олова від 3,9 до 2,1 еВ. Згідно [1], величина Борівського радіусу SnS становить, за розрахунками, 7,24 нм, тобто, строго кажучи, квантовими точками є наночастинки сульфиду олова з розмірами меншими за це значення. Оскільки діапазон наведених в літературі значень для ширини забороненої зони SnS дуже широкий і становить від 1,0 до 2,3 еВ, важко точно визначити кількість циклів SILAR, яке забезпечує усунення квантово-розмірного ефекту в наночастинках SnS через перевищення ними розмірів Борівського радіуса, але судячи з характеру залежності  $E_g$  від *n* на рис. 3,б, це  $n \geq 120$ . Виходячи з того, що конструкція СЕ на КТ передбачає, з одного боку, використання гранично тонкого шару КТ, а з іншого – найбільше поглинання світла наночастинами SnS, в нашому випадку при створенні сонячного елемента у якості компромісного був використаний поглинаючий шар КТ SnS, осаджений за *n* = 100 циклів SILAR. На поверхню цього шару в якості широкозонного *p*-типу напівпровідникового матеріалу методом SILAR за 52 циклі було нанесено плівку тіоціаніду міді.

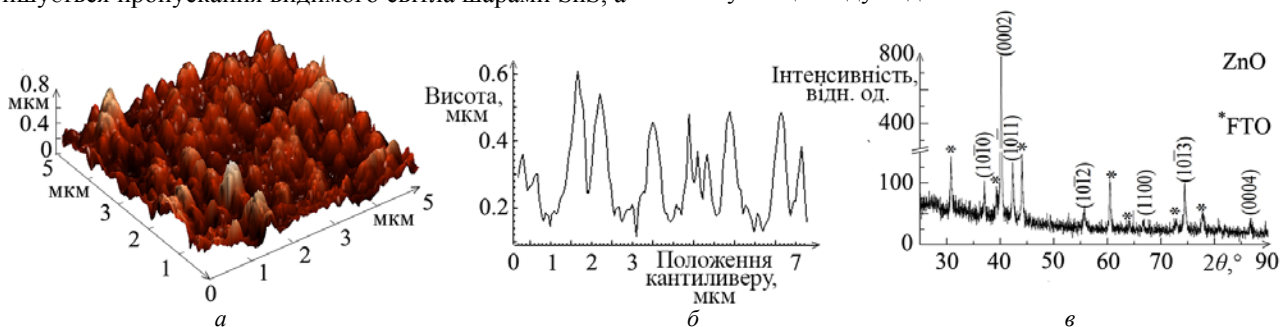


Рис. 1. Отримане методом АСМ тривимірне зображення ZnO (а) і відповідний профіль нанострижнів оксиду цинку (б). Рентгенівська дифрактограма ZnO (в)

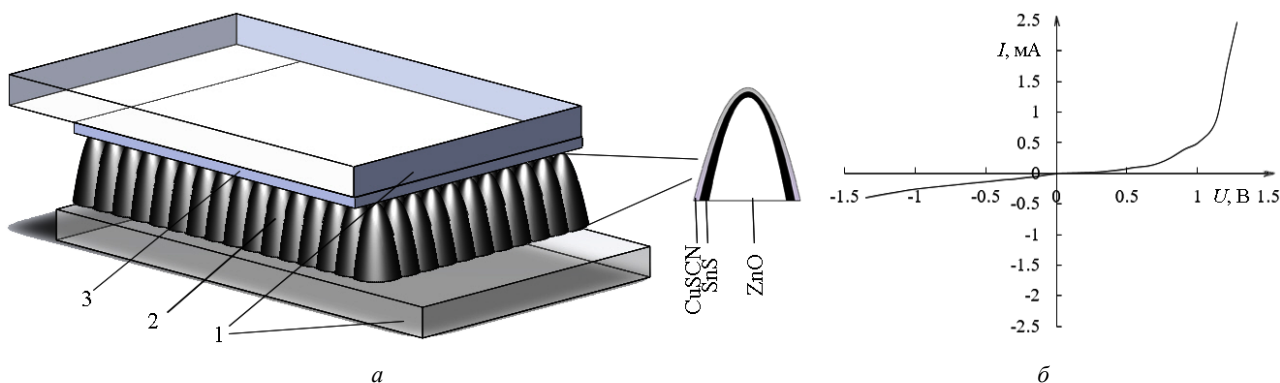


Рис. 2. Схематичне зображення шарової композиції скло|FTO|ZnO|SnS|CuSCN|FTO|скло для твердотільного гібридного сонячного елемента на квантових точках SnS (а). Темнова ВАХ експериментального зразка CE на КТ (б).  
1, 3 – підкладки скло|FTO; 2 – нанострижки ZnO з шаром КТ SnS і тонкою плівкою CuSCN

Рис. 4 демонструє оптичні властивості виготовленої на контрольному зразку зі скла К8 такої ж плівки CuSCN, товщина якої згідно з розрахунком за рівнянням (1) становила  $\sim 0,6$  мкм. Як показано на рис. 4,а, плівка тіоціаніду міді прозора в усьому видимому діапазоні і має характерні для CuSCN ширину забороненої зони для прямих і непрямих оптичних переходів 3,9 еВ і 3,5 еВ, відповідно. На рис. 4,б можна бачити, що інтерференційні осциляції характерні не тільки для спектра пропускання, але і для спектра відбиття плівки CuSCN, однак, як впливає з графіка залежності розсіювання світла ( $H_f$ ) від довжини хвилі (вставка в рис. 4,б), вона не була абсолютно рівною і ідеально прозорою. На рис. 4,в показано рентгенівську дифрактограму цієї плівки, яка підтверджує наявність CuSCN тригональної сингонії ( $\beta$ -CuSCN PDF № 29-0581). Розрахунки по Вільямсону-Холу показали, що розміри  $D$  в цій плівці знаходяться в діапазоні 40-70 нм, мікронапруження – від  $2 \cdot 10^{-3}$  до  $4 \cdot 10^{-3}$ . Вимірювання по методу термозонда показали, що отримана методом SILAR плівка тіоціаніду міді має характерний для CuSCN  $p$ -тип провідності.

Виготовлена шарова композиція скло|FTO|ZnO|SnS|CuSCN була покрита зверху плас-

тиною скло|FTO. ВАХ створеного таким чином прототипу сонячного елемента, яку показано на рис. 2,б, демонструє випрямляючий бар'єр, який обумовлено наявністю в композиції області збіднення, де зосереджене вбудоване електричне поле гетеропереходу з характерною для CE на КТ  $p$ - $i$ -структурою. Аналіз форми зворотної гілки на ВАХ дозволив обчислити по тангенсу її нахилу шунтуючий опір шарової композиції скло|FTO|ZnO|SnS|CuSCN|FTO|скло, який виявився рівним 5 кОм, тобто здатним забезпечувати функціональність цієї нової конструкції CE на КТ.

**Висновки.** У даній роботі нами продемонстровано формування шарової композиції ZnO|SnS|CuSCN для сонячного елемента на квантових точках з двома контактами FTO, для виготовлення якої використані безпечні для навколишнього середовища, недорогі і придатні для широкомасштабного виробництва електрохімічний і хімічний методи. Результати дослідження структури і оптичних властивостей окремих шарів і вольт-амперна характеристика шарової композиції ZnO|SnS|CuSCN підтвердили перспективність цієї нової конструкції CE на КТ у якості дешевої і ефективної альтернативи існуючим конструкціям сонячних елементів.

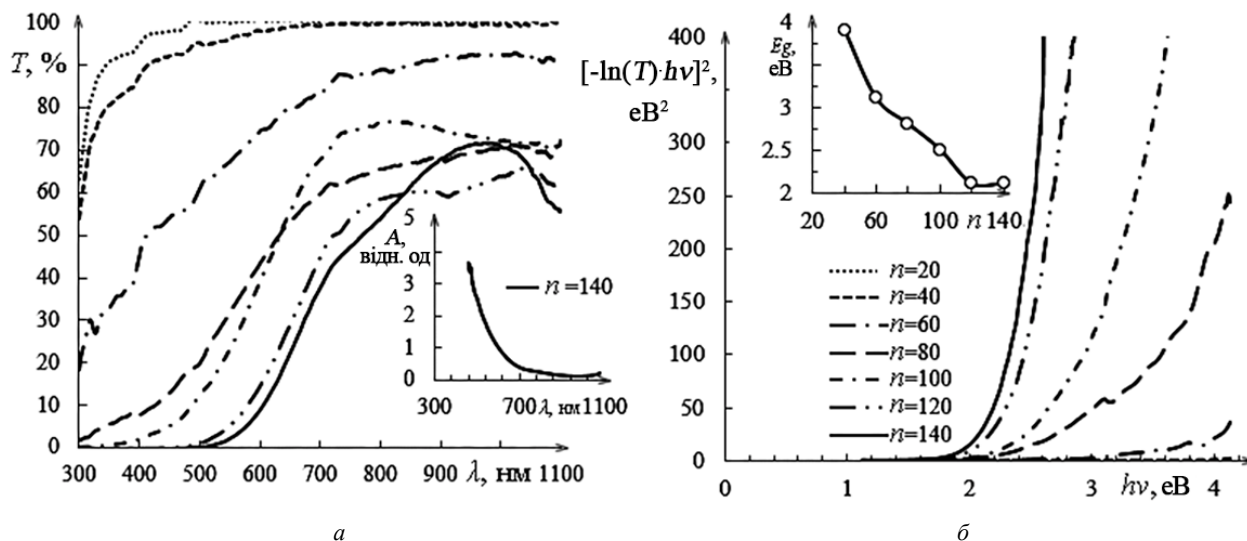


Рис. 3. Оптичні властивості шарів квантових точок SnS, нанесених методом SILAR на скляні підкладки за  $n$  циклів: спектр оптичного пропускання (а), у вставці – спектр оптичного поглинання шару квантових точок SnS, отриманих SILAR за  $n = 140$ ; графік для визначення  $E_g$  SnS (б), у вставці – залежність  $E_g$  від  $n$

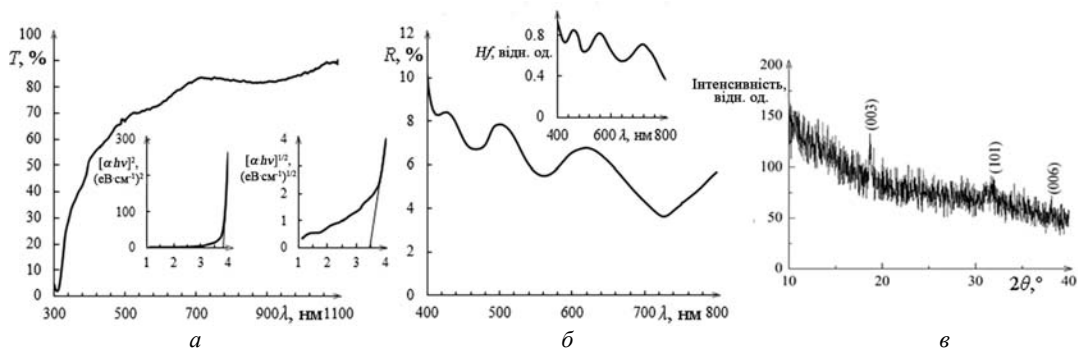


Рис. 4. Оптичні властивості і кристалічна структура плівки CuSCN товщиною 0,6 мкм на склі К8: спектр оптичного пропускання (а), у вставках – графіки для визначення  $E_g$  для прямих і непрямих оптичних переходів; спектр оптичного відбиття (б), у вставці – спектральна залежність фактора розсіювання світла; рентген-дифрактограма CuSCN тригональної сингонії ( $\beta$ -CuSCN PDF № 29-0581) (в)

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Li Y., Wei L., Chen X., Zhang R., Sui X., Chen Y., Jiao J., Mei L. Efficient PbS/CdS co-sensitized solar cells based on TiO<sub>2</sub> nanorod arrays. *Nanoscale Research Letters*. – 2013. – vol. 8. – no.67. – pp. 1-9.
- Deepa K.G., Nagaraju J. Development of SnS quantum dot solar cells by SILAR method. *Materials Science in Semiconductor Processing*. – 2014. – vol. 27. – pp. 649-653.
- Skompska M., Zarębska K. Electrodeposition of ZnO nanorod arrays on transparent conducting substrates—a review. *Electrochimica Acta*. – 2014. – vol. 127. – pp. 467-488.
- Klochko N.P., Khrypunov G.S., Myagchenko Y.O., Melnychuk E.E., Kopach V.R., Klepikova E.S., Lyubov V.M., Kopach A.V. Controlled growth of one-dimensional zinc oxide nanostructures in the pulsed electrodeposition mode. *Semiconductors*. – 2012. – vol. 46. – pp. 825–831.
- Deepa K.G., Nagaraju J. Growth and photovoltaic performance of SnS quantum dots. *Materials Science and Engineering B*. – 2012. – vol. 177. – pp. 1023–1028.

#### REFERENCES

- Li Y., Wei L., Chen X., Zhang R., Sui X., Chen Y., Jiao J., Mei L. Efficient PbS/CdS co-sensitized solar cells based on TiO<sub>2</sub> nanorod arrays. *Nanoscale Research Letters*, 2013, vol. 8:67, pp. 1-9. doi: [10.1186/1556-276X-8-67](https://doi.org/10.1186/1556-276X-8-67).
- Deepa K.G., Nagaraju J. Development of SnS quantum dot solar cells by SILAR method. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2014, vol. 27, pp. 649-653. doi: [10.1016/j.mssp.2014.08.006](https://doi.org/10.1016/j.mssp.2014.08.006).
- Skompska M., Zarębska K. Electrodeposition of ZnO nanorod arrays on transparent conducting substrates—a review. *Electrochimica Acta*, 2014, vol. 127, pp. 467-488. doi: [10.1016/j.electacta.2014.02.049](https://doi.org/10.1016/j.electacta.2014.02.049).
- Klochko N.P., Khrypunov G.S., Myagchenko Y.O., Melnychuk E.E., Kopach V.R., Klepikova E.S., Lyubov V.M., Kopach A.V. Controlled growth of one-dimensional zinc oxide nanostructures in the pulsed electrodeposition mode. *Semiconductors*, 2012, vol. 46, pp. 825-831.
- Deepa K.G., Nagaraju J. Growth and photovoltaic performance of SnS quantum dots. *Materials Science and Engineering B*, 2012, vol. 177, pp. 1023-1028. doi: [10.1016/j.mseb.2012.05.006](https://doi.org/10.1016/j.mseb.2012.05.006).

Надійшла (received) 21.01.2016

Клочко Наталія Петрівна<sup>1</sup>, к.т.н., с.н.с.,  
Хрипунов Геннадій Семенович<sup>1</sup>, д.т.н., проф.  
Клепикова Катерина Сергіївна<sup>1</sup>, асп.,  
Копач Володимир Романович<sup>1</sup>, к.т.н., с.н.с.,  
Лук'янова Олександра Віталіївна<sup>1</sup>, асп.,  
Волкова Неоніла Дмитрівна<sup>2</sup>, к.х.н., проф.,  
Корсун Валерія Євгенівна<sup>1</sup>, асп.,  
Любов Віктор Миколаєвич<sup>1</sup>, н.с.,  
Кириченко Михайло Валерійович<sup>1</sup>, к.т.н., с.н.с.,

<sup>1</sup> Національний технічний університет

«Харківський політехнічний інститут»,

61002, Харків, вул. Кирпичова, 21,

тел/phone +38 048 7058494, e-mail: klochko\_np@mail.ru

<sup>2</sup> Національний аерокосмічний університет

ім. М.С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»,

61070, Харків, вул. Чкалова, 17.

N.P. Klochko<sup>1</sup>, G.S. Khrypunov<sup>1</sup>, K.S. Klepikova<sup>1</sup>, V.R. Kopach<sup>1</sup>,  
O.V. Lukianova<sup>1</sup>, N.D. Volkova<sup>2</sup>, V.E. Korsun<sup>1</sup>, V.M. Lyubov<sup>1</sup>,  
M.V. Kyrychenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,  
21, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

<sup>2</sup> Kharkiv Aviation Institute National Aerospace University,  
17, Chkalova Str., Kharkiv, 61070, Ukraine.

#### Development of a solar cell with nanostructured ZnO layer sensitized by SnS quantum dots.

**Purpose.** To study morphology, structure and optical properties of the zinc oxide (ZnO), tin sulfide (SnS) and copper thiocyanate (CuSCN) and current-voltage characteristic of the composition FTO|ZnO|SnS|CuSCN|FTO for the creation of a new design of the solar cell with electrodeposited nanostructured one-dimensional ZnO layer sensitized by SnS quantum dots. **Methodology.** To achieve this purpose we have made nanostructured zinc oxide arrays on glass plates coated with transparent conductive layers of the fluorine doped tin oxide (FTO) by pulsed electrochemical deposition. For application of SnS quantum dots on the nanostructured ZnO array surfaces and an upper transparent electrode p-CuSCN we have used a liquid-phase successive ionic layer adsorption and reaction method. To characterize obtained semiconductor layers we have carried out the surface morphology study with using atomic force microscopy, structural and optical investigations by using X-Ray diffractometry and spectrophotometry methods. We have also analyzed the current-voltage characteristic of obtained composition FTO|ZnO|SnS|CuSCN|FTO. **Results.** Integrated analysis of surface morphology, crystal structure and optical properties of the obtained separated semiconductor layers and the composition ZnO|SnS|CuSCN and its current-voltage characteristic revealed the perspective of this design as a cheap and effective alternative to existing solar cell designs. **Originality.** The offered new design of the solar cell with electrodeposited nanostructured one-dimensional ZnO layer sensitized by SnS quantum dots do not contain toxic or rare materials and can be realize by using low-cost and affordable liquid-phase methods such as pulsed electrochemical deposition and successive ionic layer adsorption and reaction method. **Practical value.** We have manufactured the prototype of the new solar cell based on the electrodeposited one-dimensional ZnO array sensitized by SnS quantum dots having diode current-voltage characteristic with shunt resistance 5 kOhms that is able to provide functionality of this new design of solar cell. References 5, figures 4.

**Key words:** solar cell, 1-D ZnO, SnS quantum dot, pulse electrodeposition, successive ionic layer adsorption and reaction.