

Р. В. ЗАЙЦЕВ, М. В. КІРІЧЕНКО, К. О. МІНАКОВА, А. М. ДРОЗДОВ, Д. С. ШКОДА

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОМИСЛОВИХ ЗРАЗКІВ КРЕМНІЄВИХ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Досліджено можливості збільшення коефіцієнта корисної дії більш ніж на 20 % для кремнієвих фотоелектричних перетворювачів китайського виробництва. Методом комп'ютерного моделювання встановлено, що час життя нерівноважних носіїв заряду, який становить 520 мкс, реалізований у таких фотоелектричних перетворювачах, не обмежує можливості підвищення їх ефективності більш ніж на 20 %. Показано, що збільшення щільності фотоструму до 43,1 мА/см² призводить до збільшення коефіцієнта корисної дії до 20,1 %, а зниження густини струму насичення діода до 3,1·10⁻¹⁴ А/см² призводить до збільшення коефіцієнта корисної дії до 20,4 %. Одночасна зміна цих характеристик діода призводить до збільшення коефіцієнта корисної дії до 23,1 %. У роботі запропоновано фізико-технологічні підходи до збільшення густини фотоструму та зменшення густини струму насичення діода у готових фотоелектричних перетворювачах. У статті проведено дослідження впливу робочої температури на коефіцієнт корисної дії кристалічних кремнієвих фотоелектричних перетворювачів. Показано, що з підвищенням робочої температури відносно зниження коефіцієнта корисної дії монокристалічних приладів становить -0,7 відсотних %/С, що значно вище, ніж у конструкціях приладів європейського виробництва та за рахунок нетрадиційного зниження короткого замикання. Математичне моделювання впливу характеристик світлодіодів на коефіцієнт корисної дії кристалічних кремнієвих сонячних батарей показало, що зниження коефіцієнта корисної дії конструкцій приладів при підвищенні робочої температури обумовлено не тільки збільшенням густини струму насичення діода з 10⁻¹³ А до 3·10⁻¹³ А, що становить 300 %, а також за рахунок зниження опору шунта з 2,5 кОм до 1,5 кОм. Дослідження впливу робочої температури на струм насичення діода показало, що висота потенціального бар'єру в досліджуваних кремнієвих фотоелектричних перетворювачах становить 0,87 еВ, що обумовлено недостатнім рівнем легування основного матеріалу. Обмежена висота потенціального бар'єру призводить до нетрадиційного зниження опору шунта при підвищенні робочої температури.

Ключові слова: кремній, фотоелектричні перетворювачі, сонячна енергія, PV/Г системи, електричні параметри, ефективність, моделювання, оптимізація.

Р. В. ЗАЙЦЕВ, М. В. КИРИЧЕНКО, К. А. МИНАКОВА, А. Н. ДРОЗДОВ, Д. С. ШКОДА

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБРАЗЦОВ КРЕМНИЕВЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Исследованы возможности повышения коэффициента полезного действия кремниевых фотоэлектрических преобразователей китайского производства более чем на 20 %. Методом компьютерного моделирования установлено, что время жизни неравновесных носителей заряда, составляющее 520 мкс, реализуемое в таких фотоэлектрических преобразователях, не ограничивает возможности повышения их коэффициента полезного действия более чем на 20%. Показано, что увеличение плотности фототока до 43,1 мА/см² приводит к увеличению коэффициента полезного действия до 20,1 %, а уменьшение плотности тока насыщения диода до 3,1·10⁻¹⁴ А/см² приводит к увеличению коэффициента полезного действия до 20,4 %. Одновременное изменение этих характеристик диодов приводит к увеличению коэффициента полезного действия до 23,1 %. В статье предложены физические и технологические подходы к увеличению плотности фототока и снижению плотности тока насыщения диодов в готовых фотоэлектрических преобразователях. В статье проведено исследование влияния рабочей температуры на коэффициент полезного действия фотоэлектрических преобразователей из кристаллического кремния. Показано, что при повышении рабочей температуры относительное снижение коэффициента полезного действия монокристаллических устройств составляет -0,7 отн. %/С, что значительно выше, чем в приборных конструкциях европейского производства, и за счет нетрадиционного снижения короткого замыкания. Математическое моделирование влияния характеристик светодиода на коэффициент полезного действия солнечных элементов из кристаллического кремния показало, что снижение коэффициента полезного действия приборных структур с повышением рабочей температуры связано не только с увеличением плотности тока насыщения диода с 10⁻¹³ А до 3·10⁻¹³ А, что составляет 300 %, но также за счет уменьшения сопротивления шунта с 2,5 кОм до 1,5 кОм. Исследование влияния рабочей температуры на ток насыщения диода показало, что высота потенциального барьера в исследованных кремниевых фотоэлектрических преобразователях составляет 0,87 эВ из-за недостаточного уровня легирования основного материала. Ограниченная высота потенциального барьера приводит к необычному уменьшению сопротивления шунта с увеличением рабочей температуры.

Ключевые слова: кремний, фотоэлектрические преобразователи, солнечная энергия, фотоэлектрические системы, электрические параметры, эффективность, моделирование, оптимизация.

R. V. ZAITSEV, M. V. KIRICHENKO, K. A. MINAKOVA, A. N. DROZDOV, D. S. SHKODA

IMPROVING THE EFFICIENCY OF INDUSTRIAL SAMPLES OF SILICON SOLAR ELEMENTS

Possibilities of increasing the efficiency by more than 20 % for silicon photoelectric converters made in China have been investigated. It has been established by the method of computer simulation that the life-times of nonequilibrium charge carriers, which are 520 μs, realized in such photoelectric converters, do not limit the possibility of increasing their efficiency by more than 20 %. It is shown that an increase in the photocurrent density to 43.1 mA/cm² leads to an increase in efficiency to 20.1 %, and a decrease in the diode saturation current density to 3.1·10⁻¹⁴ A/cm² leads to an increase in efficiency to 20.4 %. Simultaneous change of these diode characteristics leads to an increase in efficiency to 23.1 %. The paper proposes physical and technological approaches to increase the photocurrent density and reduce the diode saturation current density in ready-made photovoltaic converters. The study of the influence of operating temperature on the efficiency of crystalline silicon photoelectric converters is carried out in the article. It is shown that with increasing operating temperature the relative decrease in the efficiency of single-crystal devices is -0.7 relative %/C, which is significantly higher than in the instrument structures of European production and due to non-traditional decrease in short-circuit current density. Mathematical modeling of the influence of light-emitting diode characteristics on the efficiency of crystalline silicon solar cells showed that the decrease in the efficiency of instrument structures with increasing operating temperature is due not only to an increase in diode saturation current density from 10⁻¹³ A to 3·10⁻¹³ A, which is 300 %, but also by reducing the shunt resistance from 2.5 kOhm to 1.5 kOhm. A study of the effect of operating temperature on

© Р. В. Зайцев, М. В. Кіріченко, К. О. Мінакова, А. М. Дроздов, Д. С. Шкода, 2021

the diode saturation current showed that the height of the potential barrier in the studied silicon photovoltaic converters is 0.87 eV, due to the insufficient level of doping of the base material. The limited height of the potential barrier leads to an unconventional decrease in the shunt resistance with increasing operating temperature.

Keywords: silicon, photovoltaic converters, solar energy, PV/T systems, electrical parameters, efficiency, modelling, optimization.

Вступ. Основною проблемою широкомасштабного наземного використання найбільш поширених фотоелектричних панелей (ФЕП) на основі кристалічного кремнію є забезпечення конкурентоспроможності виробленої такими приладовими структурами електричної енергії порівняно з традиційними джерелами електроенергії [1]. Це може бути досягнуто шляхом зниження вартості 1 Вт пікової потужності за рахунок збільшення коефіцієнта перетворення (ККД) сонячної енергії та зменшення собівартості технології їх виготовлення [1].

В даний час західними фірмами розроблено та реалізовано конструктивно-технологічні рішення (КТР) ФЕП на основі кристалічного кремнію (ФЕП) з ефективністю понад 20 % в умовах промислового виробництва [2–4]. Реалізація у промислових масштабах у Росії таких КТР вимагає технічного переозброєння вітчизняних підприємств електронного профілю, що займаються промисловим випуском ФЕП на основі кристалічного кремнію, за рахунок закупівлі дорогого наукомісткого обладнання, яке не має вітчизняних аналогів.

Нині, внаслідок різкого збільшення інвестицій у розвиток виробництва, провідні китайські фірми знизили вартість ФЕП з ККД лише на рівні 18 % більш ніж 1,4 рази, а найближчі три роки вартість буде знижено ще 1,3 рази [5]. Таким чином, економічно доцільно, як вихідні приладові структури використовувати Si-ФЕП китайського виробництва. При цьому актуальним завданням слід вважати аналіз ефективності фотоелектричного перетворення в таких структурах приладів для дослідження можливості підвищення ККД готових ФЕП китайського виробництва понад 20 %.

Методика проведення експерименту. В умовах промислового виробництва при контролі технологічного процесу шляхом аналітичної обробки світлової вольт-амперної характеристики (ВАХ) визначають вихідні параметри ФЕП: напруга холостого ходу (U_{XX}), щільність току короткого замикання ($J_{KЗ}$), фактор заповнення світлової ВАХ (FF) та коефіцієнт корисної дії (ККД). Однак ці параметри являють собою технічні характеристики приладу, що не мають однозначного зв'язку з фотоелектричними процесами, що визначають роботу ФЕП. Тому поруч із вихідними параметрами необхідно аналізувати світлові діодні характеристики, однозначно визначають однодіодну модель ФЕП [6]. До таких діодних характеристик відносяться щільність фотоструму (J_ϕ), щільність діодного струму насичення (J_0), коефіцієнт ідеальності (A), шунтуючий ($R_{Ш}$) та послідовний ($R_{П}$) опори, розраховані на одиницю площі ФЕП. Зв'язок ефективності ФЕП зі світловими діодними характеристиками в неявному вигляді описується теоретичною світловою ВАХ ФЕП [6]:

$$J_H = -J_\phi + J_0 \left\{ \exp \left[\frac{e(U_H - J_H R_{П})}{A k T} \right] - 1 \right\} + \frac{U_H - J_H R_{П}}{R_{Ш}}, \quad (1)$$

де J_H – щільність току, що протікає через навантаження;

e – заряд електрона;

k – стала Больцмана;

T – температура сонячного елемента;

U_H – падіння напруги на навантаженні.

Шляхом апроксимації експериментально отриманих значень I_H та U_H теоретичним виразом (1) можна визначити вихідні параметри, світлові діодні характеристики та ККД ФЕП. Аналітична обробка світлових ВАХ досліджуваних ФЕП проводилася за допомогою персонального комп'ютера за розробленою програмою. Відповідно до програми аналітичний вираз для світлової ВАХ (1) перетворюється на вираз:

$$J_H = A_0 - A_1 U_H - A_2 \exp(A_3 U_H + A_4 U_H), \quad (2)$$

де

$$A_0 = \frac{(J_\phi + J_0) R_{Ш}}{R_{П} + R_{Ш}}; A_1 = \frac{1}{R_{П} + R_{Ш}}; \\ A_2 = \frac{J_0 R_{Ш}}{R_{П} + R_{Ш}}; A_3 = \frac{e}{A k T}, A_4 = \frac{e R_{П}}{A k T}.$$

Використовуючи вираз (2) та експериментально отримані значення J_H та U_H , шляхом варіювання значень, вказаних вище коефіцієнтів A_0, A_1, A_2, A_3, A_4 , програма здійснює найкращу апроксимацію експериментальних даних $I_H = I_H(U_H)$ кривою, що описується перетвореним теоретичним виразом (2). Зазвичай при аналітичній обробці середньоквадратичне відхилення не перевищує 10^{-8} , що відповідає відносній похибці у визначенні вихідних параметрів та світлових діодних характеристик на рівні не більше 1 %. Після знаходження вказаних коефіцієнтів, що забезпечують найкращу апроксимацію, визначаються вихідні параметри ФЕП: $J_{KЗ}, U_{XX}, FF, ККД$. Світлові діодні характеристики $R_{П}, R_{Ш}, A$ та I_0 обчислюються за знайденими коефіцієнтами A_0, A_1, A_2, A_3, A_4 . Світлові ВАХ ФЕП вимірювалися за допомогою лабораторного стенду при опроміненні приладових структур імітатором сонячного випромінювання у наземних умовах з потужністю світлового потоку 100 мВт/см². Як джерело, що імітує сонячне випромінювання, була використана галогенова лампа потужністю 1000 Вт, підключена до стабілізованого блоку живлення.

Ефективність фотоелектричних процесів – генерації, дифузії, дрейфу, поділу та збирання генерованих під дією світла нерівноважних носіїв

заряду істотно залежить від часу їхнього життя. Тому під час аналізу ефективності ФЕП ми шляхом спаду напруги холостого ходу визначали час життя нерівноважних носіїв заряду в досліджуваних приладових структурах [7].

Дослідження спектральної залежності коефіцієнта квантової ефективності $Q(\lambda)$ дозволяє аналізувати інтегральну ефективність фотоелектричних процесів залежно від енергії падаючого випромінювання [7]. Тому такі дослідження також є необхідними під час оптимізації КТР ФЕП. Між струмом короткого замикання $I_{КЗ}$ та величиною $Q(\lambda)$ існує функціональний зв'язок, що описується при досить великому шунтуючому опорі $R_{Ш}$ співвідношенням [7]:

$$I_{КЗ} = e \int_0^{\lambda_{КР}} Q(\lambda) \cdot N(\lambda) d\lambda - I_{Д}, \quad (3)$$

де λ – довжина хвилі світла;

$\lambda_{КР}$ – червона межа фотоэффекту;

$N(\lambda)$ – швидкість надходження фотонів на поверхню ФЕП;

$I_{Д}$ – діодний струм ФЕП.

В реальних умовах інтенсивність сонячного випромінювання, що надходить на поверхню СЕ, така, що при значенні послідовного опору, що спостерігалось, приладової структури $I_{Д} \ll I_{КЗ}$, тому вираз (3) перетворюється до вигляду:

$$I_{КЗ} = Q(\lambda) \cdot N(\lambda). \quad (4)$$

Величина $N(\lambda)$, що входить до рівняння (4) може бути виражена через інтенсивність світла $I_{С}(\lambda)$, що надходить на поверхню ФЕП:

$$Q(\lambda) = \frac{I_{КЗ}(\lambda) \cdot E(\lambda)}{eS \cdot I_{С}(\lambda)}. \quad (5)$$

При проведенні досліджень спектральної залежності фотовідгуку ФЕП розміщувався на вихідній щілині подвійного монохроматора та проводився вимір $I_{КЗ}$ при плавній зміні довжини хвилі падаючого випромінювання з наступним розрахунком $Q(\lambda)$, використовуючи співвідношення (5). Інтенсивність світла $I_{С}(\lambda)$ є характеристикою використовуваного джерела світла як, якого використовувалася 1000 Вт галогенова лампа.

Експериментальні дослідження промислових зразків кремнієвих фотоелектричних перетворювачів китайського виробництва. Для досліджень було обрано найефективніші промислові зразки ФЕП китайського виробництва.

Були виміряні світлові ВАХ 10 структур приладів. Результати свідчать про те, що ККД складає від 17,7 % до 18,4 %.

Для аналізу було обрано світлову ВАХ ФЕП з характерним значенням ККД – 18.1% (рис. 1, крива 1).

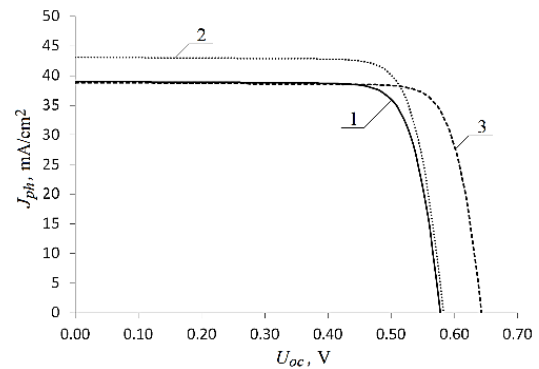
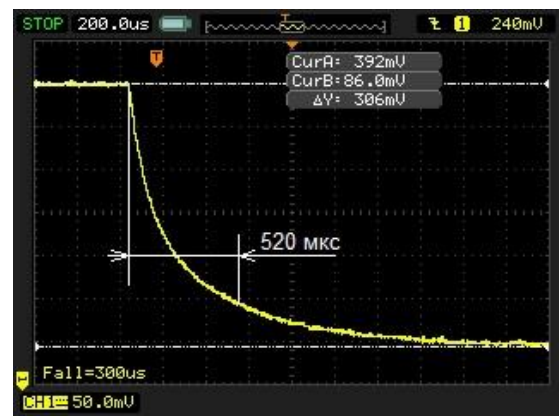
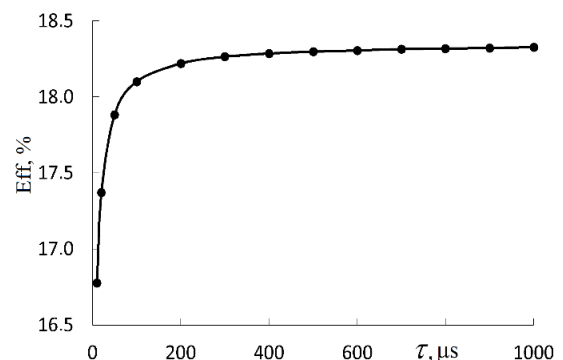


Рисунок 1 – Світлові вольт-амперні характеристики:
1 – вихідна, $J_{\Phi}=39,0$ мА/см², $J_0=5,4 \cdot 10^{-13}$ А/см², ККД=18,02 %
2 – $J_{\Phi}=43,0$ мА/см², $J_0=5,4 \cdot 10^{-13}$ А/см², ККД=20,02 %
3 – $J_{\Phi}=39,0$ мА/см², $J_0=3,1 \cdot 10^{-14}$ А/см², ККД=20,4 %



а)



б)

Рисунок 2 – Дослідження часу життя нерівноважних носіїв заряду у промислових зразках ФЕП китайського виробництва (а) та моделювання впливу часу життя на їх ККД (б)

Аналітична обробка світлової ВАХ дозволила визначити вихідні параметри та світлові діодні характеристики ФЕП (таблиця 1).

Дослідження вихідних параметрів та світлових діодних характеристик були доповнені дослідженнями часу життя. За спадом напруги холостого ходу (див. рис. 2 а) було встановлено, що час життя нерівноважних носіїв заряду становить 520 мкс.

Таблиця 1 – Вихідні параметри та світлові діодні характеристики ФЕП, отримані в результаті експерименту та моделювання

Вихідні параметри та світлові діодні характеристики	Експериментальний зразок	Моделювання впливу J_0	Моделювання впливу J_ϕ	Моделювання впливу J_ϕ і J_0
$J_{кз}$, мА/см ²	39,0	39,0	43,1	43,1
$U_{хх}$, мВ	578	643	583	658
FF , відн. од.	0,80	0,82	0,80	0,82
η , %	18,1	20,4	20,1	23,1
J_ϕ , мА/см ²	38,8	39,0	43,1	43,1
$R_{л}$, Ом·см ²	0,45	0,45	0,45	0,45
$R_{ш}$, Ом·см ²	1013	1013	1013	1013
A , відн. од.	0,9	0,9	0,9	0,9
J_0 , А/см ²	$5,4 \cdot 10^{-13}$	$3,1 \cdot 10^{-14}$	$5,4 \cdot 10^{-13}$	$3,1 \cdot 10^{-14}$

Результати дослідження спектральної залежності коефіцієнта квантової ефективності (рис. 3 крива 1) показують, що спектральний інтервал фоточутливості ФЕП становить 0,42–1,20 мкм. Максимальне значення $Q(\lambda)$ спостерігається у спектральному інтервалі 0,90–1,10 мкм, а починаючи з 0,80 мкм, $Q(\lambda)$ суттєво знижується.

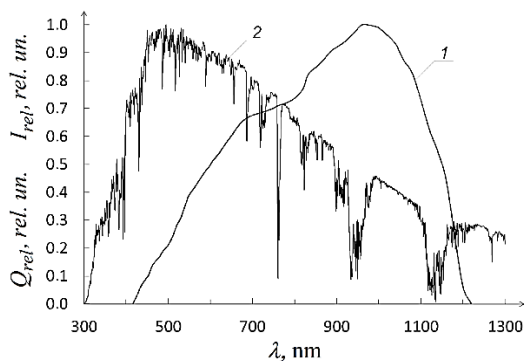


Рисунок 3 – Спектральні залежності коефіцієнта квантової ефективності ФЕП китайського виробництва
1 – $Q(\lambda)$ ФЕП; 2 – сонячний спектр AM1.5G

Моделювання впливу життя нерівноважних носіїв заряду на ефективність промислових зразків кремнієвих фотоелектричних перетворювачів китайського виробництва. Оскільки значення ККД досліджуваних промислових зразків китайського виробництва поступалося ефективності кращих промислових зразків європейського виробництва, що перевищує 20 %, то для пошуку шляхів збільшення ККД було проведено чисельне моделювання параметрів досліджених ФЕП за допомогою персонального комп'ютера. Для моделювання використовувалася програма PC1D 5.9, що була у вільному доступі, розроблена в Університеті Нового Південного Уельсу (Австралія).

За допомогою цього програмного забезпечення було створено електронну модель ФЕП. Такі параметри базового кремнієвого кристала ФЕП, як ширина забороненої зони, відносна діелектрична проникність, власна концентрація носіїв заряду,

рухливості електронів і дірок, входили до складу програмного забезпечення PC1D 5.9. Крім того, при моделюванні враховувалися такі характеристики досліджуваних ФЕП як:

- рівень легування базового кристала p -типу, який складав $1,5 \cdot 10^{16}$ см⁻³;
- товщина n^+ -шару 0,1 мкм, p^+ -шару – 1,15 мкм, середній рівень їх легування при *erfc*-розподіленні – 10^{20} см⁻³ і 10^{18} см⁻³, відповідно;
- товщина покриття, що просвітлює, виготовленого з Si₃N₄– 53 нм;
- висота рельєфу хаотично текстурованої фронтальної поверхні – 3 мкм;
- швидкості рекомбінації на фронтальній та тильній поверхнях $S_n = S_p = 10^3$ м/с;
- послідовний та шунтуючий опори, які були визначені шляхом аналітичної обробки експериментальних світлових ВАХ (таблиця 1).

Моделювання роботи ФЕП проводилося для його температури 25 °С у режимі опромінення AM1,5G при енергетичному освітленні фронтальної поверхні 1000 Вт/м². Параметром, що варіюється, в даній моделі був час життя неосновних носіїв заряду, який змінювався від 10 мкс до 1000 мкс.

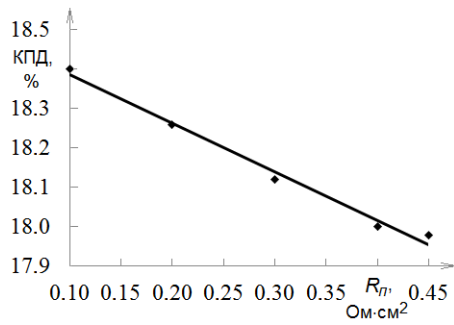
Аналіз отриманих даних (рис. 2 б) показує, що починаючи зі значень часу життя 300 мкс подальше його збільшення не впливає на ККД.

Оскільки для досліджуваних промислових зразків ФЕП експериментальне значення часу життя становило 520 мкс, це свідчить лише тому, що якість базового кристала перестала бути чинником, що обмежує ККД досліджуваних ФЕП лише на рівні 18 %.

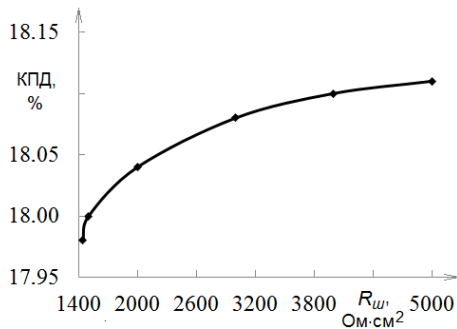
Моделювання впливу світлових діодних показників на ефективність промислових зразків кремнієвих фотоелектричних перетворювачів китайського виробництва. Аналізуючи вираз (1), можна показати, що про зростанні J_ϕ , $R_{ш}$ та при зменшенні J_0 , A , $R_{л}$ ефективність ФЕП збільшується. Однак для ідентифікації фізичних механізмів, що визначають ККД ФЕП, корисніше встановлювати кількісний зв'язок між ефективністю приладової структури та її світловими діодними характеристиками. Це дозволяє визначати домінуючі світлові діодні характеристики, зміна яких за зміни КТР ФЕП обумовлює зміну його ККД.

В результаті з'являється можливість суттєво зменшити обсяг подальших експериментальних досліджень щодо встановлення фізичних закономірностей впливу КТР на ефективність ФЕП.

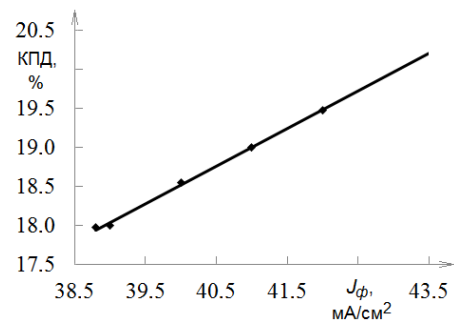
Тож у дослідженні, використовуючи розроблену комп'ютерну програму, проводилося моделювання впливу зміни кожної із світлових діодних характеристик ФЕП на ефективність. При цьому всі світлові діодні характеристики ФЕП, крім однієї, фіксуються, а саме світлова діодна характеристика набуває значення обраного інтервалу.



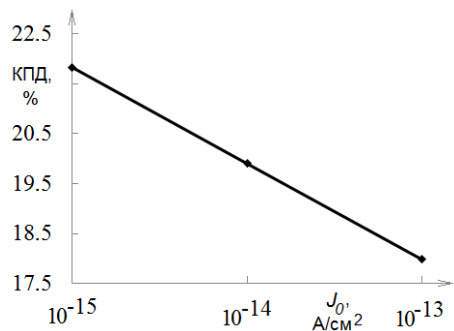
а)



б)



в)



г)

Рисунок 4 – Моделювання впливу послідовного опору (а), шунтуючого опору (б), щільності фотоструму (в) та щільності діодного струму насичення (г) на ККД Si-ФЕП китайського виробництва

За набором світлових діодних характеристик, відповідно до виразу (1), програма розраховувала теоретичну світлову ВАХ та визначала ККД. Потім вибирається таке значення світлової діодної характеристики вибраного інтервалу та розраховується наступна теоретична світлова ВАХ, з якої визначається

ККД. В результаті ми отримуємо теоретичну залежність ККД від зміни в обраному діапазоні однієї діодної характеристики при фіксованих інших. Подібне моделювання повторюється кожної світлової діодної характеристики ФЕП. Аналізуючи теоретичні залежності ККД від зміни світлових діодних характеристик, ми оцінювали кількісний внесок зміни кожної із світлових діодних характеристик у можливість досягнення ККД понад 20 %.

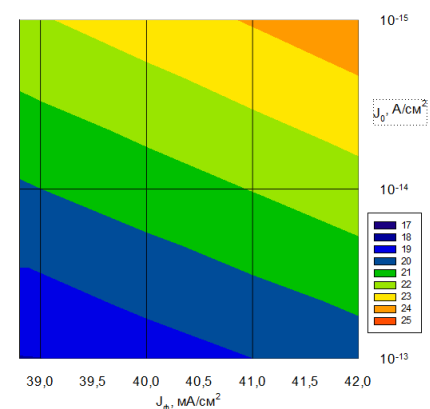
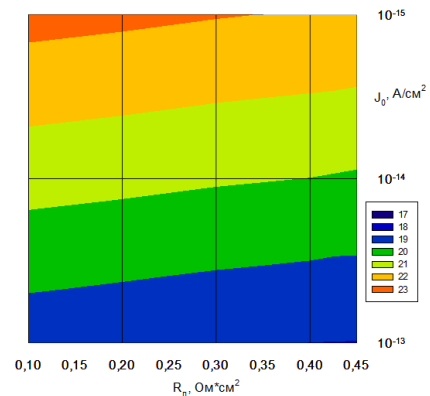
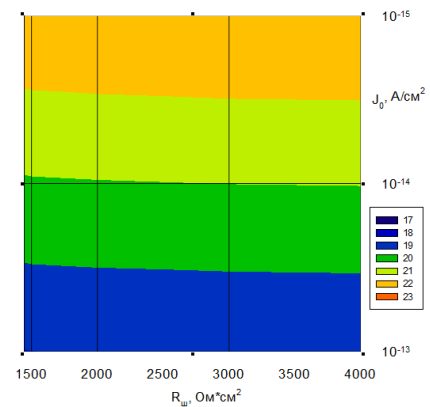


Рисунок 5 – Побудовані за результатами моделювання діаграми розподілу ККД досліджуваних ФЕП

Результати моделювання показують, що збільшення шунтуючого опору та зниження послідовного опору при фіксованих інших діодних характеристиках для ФЕП з ККД 18,1 % не призводить до суттєвого збільшення ефективності (рис. 4 а і б). Так

зростання шунтуючого опору від $R_{III} = 1000 \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$ до $R_{III} = 4000 \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$ обумовлює зростання ефективності на 0,1 %. Зниження послідовного опору від $R_{II} = 0,45 \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$ до $R_{II} = 0,1 \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$ призводить до зростання ККД на 0,5 %.

Згідно з експериментальними даними (рис. 3), короткохвильова межа fotocутливості досліджених зразків ФЕП становить 0,42 мкм, тому в приладових структурах не перетворюється ультрафіолетова частина спектра. Тому зростання щільності фотоструму для досліджуваних ФЕП може бути отримане при нанесенні на поверхню готової структури приладової люмінесцентного покриття. Таке покриття поглинає фотони в ультрафіолетовій частині сонячного спектра та генерує фотони в інфрачервоній частині сонячного спектра. Найбільш оптимальним для промислових зразків ФЕП китайського виробництва є економічний хімічний метод, за допомогою якого наноситься, люмінесцентне покриття на основі квантових точок сульфід свинцю [8]. Такі квантові точки поглинають світло у спектральному діапазоні 0,30–0,40 мкм та генерують фотони з довжиною близько 1,05 мкм [8], що відповідає області максимальних експериментальних значень квантової ефективності, досліджених у роботі ФЕП (рис. 3). Згідно з результатами моделювання, представленими в роботі [8] використання таких люмінесцентних покриттів теоретично дозволяє збільшити вихідну щільність струму короткого замикання більш ніж в 1,1–1,2 рази, що, згідно з результатами проведених нами досліджень, достатньо для досягнення ККД у промислових зразків ФЕП китайського виробництва понад 20 %.

Експериментальні дослідження впливу температури на вихідні параметри і світлові діодні характеристики промислових зразків кремнієвих фотоелектричних перетворювачів китайського виробництва. Аналіз показує, що зі зростанням температури спостерігається практично лінійне зниження ККД (рис. 6 а). При цьому коефіцієнт зниження, який описує відносну зміну ККД при зміні температури на один градус, складає 0,7 %/°C.

Для напруги холостого ходу і щільності струму короткого замикання також спостерігається зниження їх величини при збільшенні робочої температури (рис. 6 б і в). Було експериментально встановлено, що чинник заповнення світлових ВАХ практично не змінюється зі зростанням температури.

Аналіз світлових діодних характеристик показує, що зафіксоване зниження ККД обумовлено збільшенням щільності діодного струму насичення (рис. 7 а) і зниженням шунтуючого опору (рис. 7 б).

Отримані експериментальні результати лише частково можуть бути прокоментовані в рамках традиційних уявлень про вплив температури на ефективність фотоелектричних процесів в ФЕП, які в узагальненому вигляді викладені в [7].

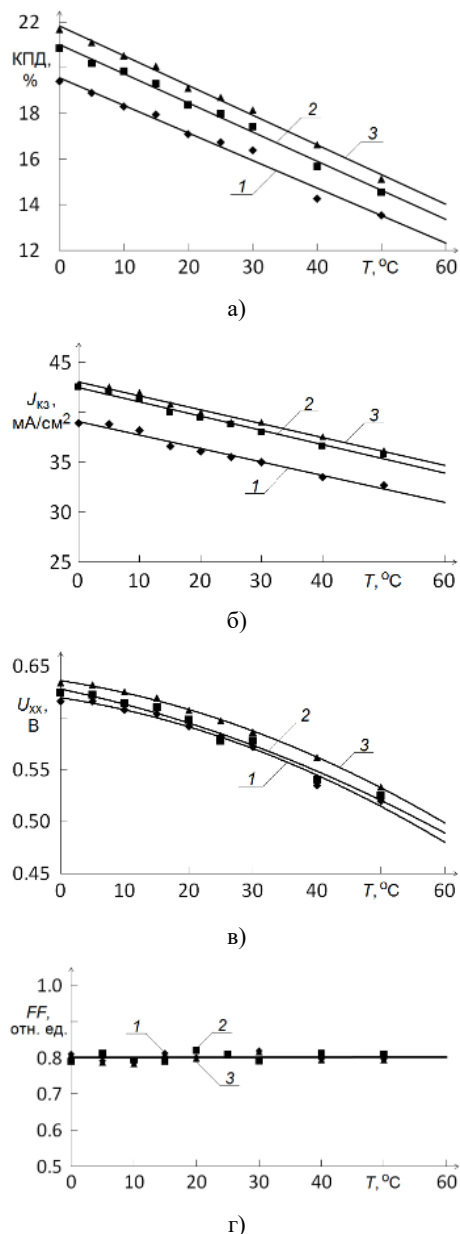


Рисунок 6 – Вплив робочої температури на ККД (а), щільність струму короткого замикання (б), напругу холостого ходу (в) та фактор заповнення світлової ВАХ (г) досліджуваних ФЕП:

зразок 1 з ККД = 16,7 % при температурі 25 °C;
зразок 2 з ККД = 18,1 % при температурі 25 °C;
зразок 3 з ККД = 18,7 % при температурі 25 °C

Згідно з традиційним уявленням, яке відповідає експериментальним дослідженням ФЕП при збільшенні температури дифузійна довжина нерівноважних носіїв в Si зростає. Це обумовлено тим, що коефіцієнт дифузії не змінюється або збільшується, а час життя неосновних носіїв зростає при підвищенні температури. Збільшення дифузійної довжини неосновних носіїв приводить до зростання щільності струму короткого замикання при збільшенні температури. Проте цей ефект незначний і складає порядку 0,07 %/°C. Зниження напруги холостого ходу значно перевищує збільшення щільності струму короткого замикання і складає 0,4 %/°C. Плавніша

форма світловий ВАХ при підвищених температурах призводить до зменшення чинника заповнення світловий ВАХ. Тому в цілому підвищення температури призводить до відносного зниження ККД на $0,5\% / ^\circ\text{C}$.

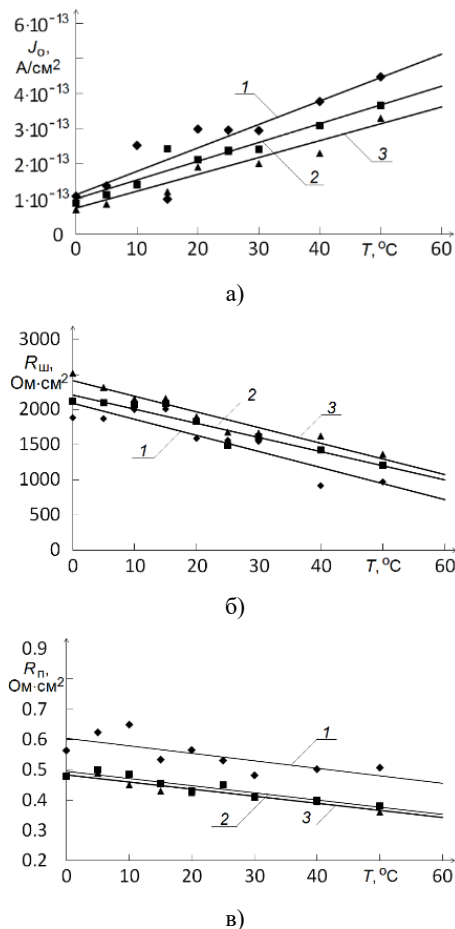


Рисунок 7 – Вплив робочої температури на щільність діодного струму насичення (а), шунтуючий (б) та послідовний (в) опору досліджуваних Si-ФЕП: зразок 1 з ККД = 16,7 % при температурі 25 °С; зразок 2 з ККД = 18,1 % при температурі 25 °С; зразок 3 з ККД = 18,7 % при температурі 25 °С

Згідно з отриманими експериментальними даними у ФЕП китайського виробництва відносно зниження ККД вище і складає $0,7\% / ^\circ\text{C}$. При цьому щільність струму короткого замикання знижується, а чинник заповнення світлових ВАХ практично не змінюється.

Згідно з існуючими фізичними уявленнями щільність діодного струму насичення є найважливішою світловою діодною характеристикою, яка контролює зміну вихідних параметрів ФЕП при зміні робочої температури. Без врахування шунтуючого і послідовного опору теоретичний вираз для щільності діодного струму насичення має вигляд [2]:

$$J_0 = C \cdot T^3 \exp \left(-qE_g / kT \right), \quad (6)$$

де C – параметр, який змінюється при зміні робочої температури T ,

q – заряд електрона,

E_g – ширина забороненої зони.

У цій роботі було показано, що при $C \cdot T^3 = 1,5 \cdot 10^5 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ спостерігається найкраща відповідність між експериментальними температурними змінами вихідних параметрів і їх теоретичними залежностями. Оскільки $C \cdot T^3$ є константою, то експоненціальне збільшення щільності діодного струму насичення свідчить про те, що основним фізичним механізмом збільшення J_0 є термічно активоване зростання концентрації носіїв заряду. Оскільки експериментальні залежності $J_0(T)$ не лінеаризуються в координатах $\ln J_0 - 1000/T$, то вказаний вище механізм не є єдиним. Не його існування вказує зафіксоване експериментальне нетрадиційне зниження щільності струму короткого замикання із зростанням робочої температури. Оскільки експериментальні залежності $J_0(T)$ не лінеаризуються в координатах $\ln J_0 - 1000/T$, то вказаний вище механізм не є єдиним. На його існування вказує зафіксоване експериментальне нетрадиційне зниження щільності струму короткого замикання зі зростанням робочої температури.

Аналіз діодних характеристик показує, що аномальне високе зниження ККД і нетрадиційне зменшення щільності струму короткого замикання обумовлене зафіксованим експериментальним зменшенням шунтуючого опору. Струм по ділянках високої провідності зменшує величину внеску фотоструму в струм короткого замикання і є додатковим фізичним механізмом, що знижує ККД. Моделювання впливу зростання щільності діодного струму насичення і зниження шунтуючого опору (рис. 7 а і б) показало, що вони співрозмірні.

Оскільки в ході досліджень було експериментально встановлено високу швидкість зниження КПД ФЕП китайського виробництва, то це в процесі експлуатації нівелює їх досить високі вихідні параметри і обумовлює доцільність їх використання у складі фотоелектричного теплового модуля (PV/T), який представляє гібрид ФЕП і сонячного колектора і дозволяє за рахунок циркуляції теплоносія забезпечувати охолодження кремнієвої приладової структури. Залежно від необхідних технологічних вимог вироблено три основні режими роботи PV/T [8]: забезпечення максимально ефективного вироблення електроенергії, забезпечення максимальної ефективності теплової енергії і забезпечення максимальної сумарної ефективності. У [9] розроблено конструкції, які для забезпечення максимальної електричної потужності забезпечують можливість теплового відходу від лицьової поверхні ФЕП в довкілля і від тильної сторони до контура теплоносія. Основною особливістю конструкції модуля, що відповідає даному режиму роботи, є відсутність повітряного прошарку між ФЕП і світлопрозорим покриттям. При даному режимі роботи температура теплоносія в контурі має бути не більш $35\text{ }^\circ\text{C}$. Але оскільки рідина, що нагрівається модулем, має низьку

температуру, то потрібне її подальше підігрівання, що призводить до необхідності в додатковому устаткуванні. Так, наприклад, такий режим роботи PV/T забезпечує комбінована система гарячого водопостачання, опалювання і кондиціонування на основі теплового насоса і PV/T.

Висновки. Було показано, що реалізовані для промислових зразків Si-ФЕП китайського виробництва часи життя нерівноважних носіїв заряду, що становлять 520 мкс, не обмежують можливості збільшення їх ККД понад 20 %. Досягнуті величини послідовного та шунтуючого опору промислових зразків Si-ФЕП китайського виробництва, які складають 0,45 Ом·см² та 1000 Ом·см², відповідно, не потребують подальшої оптимізації. Показано, що збільшення щільності фотоструму від 39,0 мА/см² до 43,1 мА/см² у промислових зразках Si-ФЕП китайського виробництва без зміни інших діодних характеристик призводить до зростання ефективності до 20,1 %. Для подібного підвищення щільності фотоструму на поверхні готової приладової структури необхідно формувати люмінесцентні покриття, що містять квантові точки сульфиду свинцю. Встановлено, що зниження щільності діодного струму насичення від $5,4 \cdot 10^{13}$ А/см² до $3,1 \cdot 10^{14}$ А/см² у промислових зразків Si-ФЕП китайського виробництва без зміни інших діодних характеристик призводить до зростання ефективності до 20,4 %. Можливими фізико-технологічними підходами зменшення щільності діодного струму насичення готових ФЕП є нанесення плазмонних покриттів чи обробка приладових структур у магнітному полі. Одночасне збільшення щільності фотоструму та щільності діодного струму насичення до зазначених вище значень дозволяє збільшити ККД до 23,1 %.

Дослідження впливу робочої температури на ефективність кремнієвих фотоелектричних перетворювачів китайського виробництва показало, що зі зростанням робочої температури зниження ККД складає 0,07 %/°C, що істотно вище, ніж в приладових структурах європейського і вітчизняного виробництва і обумовлено нетрадиційним зниження щільності струму короткого замикання. Ідентифікована температурна залежність ККД свідчить про доцільність використання фотоелектричних перетворювачів китайського виробництва в конструкції фотоелектричної теплової установки, яка разом з тепловим насосом входить до складу комбінованої системи гарячого водопостачання, опалювання і кондиціонування.

Список літератури

1. Razykov T. M., Ferekides C. S., Morel D., Stefanakos E., Ullal H. S., Upadhyaya H. M. Solar photovoltaic electricity: Current status and future prospects. *Solar Energy*. 2011. Vol. 85, no. 8. P. 1580–1608. doi: 10.1016/j.solener.2010.12.002.
2. Rehman A., Lee S. H. Advancements in n-Type Base Crystalline Silicon Solar Cells and Their Emergence in the Photovoltaic Industry.

3. Binetti S., Acciarri M., Le Donne A., Morgano M., Jestin Y. Key Success Factors and Future Perspective of Silicon-Based Solar Cells. *International Journal of Photoenergy*. 2013. Vol. 2013. P. 1–6. doi: 10.1155/2013/470347.
4. Saga T. Advances in crystalline silicon solar cell technology for industrial mass production. *NPG Asia Materials*. 2010. Vol. 2, no. 3. P. 96–102. doi: 10.1038/asiamat.2010.82.
5. Bye G., Ceccaroli B. Solar grade silicon: Technology status and industrial trends. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2014. Vol. 130. P. 634–646. doi: 10.1016/j.solmat.2014.06.019.
6. Möller H. J. *Semiconductors for solar cells*. Boston: Artech House, 1993.
7. Raushenbach H. S. *Solar Cells Array Design*. New York: Litton Education Publishing, 1980.
8. Shcherbatyuk G. V., Inman R. H., Wang C., Winston R., Ghosh S. Viability of Using Near Infrared PbS Quantum Dots as Active Materials in Luminescent Solar Concentrators. *Applied Physics Letters*. 2010. Vol. 96, no. 19. P. 191901–191903. doi: 10.1063/1.3422485
9. Catchpole K. R., Polman A. Plasmonic solar cells. *Optics Express*. 2008. Vol. 16, no. 26. P. 21793–21800. doi: 10.1364/oe.16.021793.
10. Макара В. А., Васильев М. А., Стебленко Л. П., Коплак О. В., Курлюк А. Н., Кобзарь Ю. Л., Науменко С. Н. Вызванные действием магнитного поля изменения примесного состава и микротвердости приповерхностных слоев кристаллов кремния. *Физика и техника полупроводников*. 2008. Т. 42. Вып. 9. С. 1061–1064.

References (transliterated)

1. Razykov T. M., Ferekides C. S., Morel D., Stefanakos E., Ullal H. S., Upadhyaya H. M. Solar photovoltaic electricity: Current status and future prospects. *Solar Energy*. 2011, vol. 85, no. 8, pp. 1580–1608. doi: 10.1016/j.solener.2010.12.002.
2. Rehman A., Lee S. H. Advancements in n-Type Base Crystalline Silicon Solar Cells and Their Emergence in the Photovoltaic Industry. *Scientific World Journal*. 2013, vol. 2013, pp. 1–13. doi: 10.1155/2013/470347.
3. Binetti S., Acciarri M., Le Donne A., Morgano M., Jestin Y. Key Success Factors and Future Perspective of Silicon-Based Solar Cells. *International Journal of Photoenergy*. 2013, vol. 2013, pp. 1–6. doi: 10.1155/2013/470347.
4. Saga T. Advances in crystalline silicon solar cell technology for industrial mass production. *NPG Asia Materials*. 2010, vol. 2, no. 3, pp. 96–102. doi: 10.1038/asiamat.2010.82.
5. Bye G., Ceccaroli B. Solar grade silicon: Technology status and industrial trends. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2014, vol. 130, pp. 634–646. doi: 10.1016/j.solmat.2014.06.019.
6. Möller H. J. *Semiconductors for solar cells*. Boston: Artech House, 1993.
7. Raushenbach H. S. *Solar Cells Array Design*. New York: Litton Education Publishing, 1980.
8. Shcherbatyuk G. V., Inman R. H., Wang C., Winston R., Ghosh S. Viability of Using Near Infrared PbS Quantum Dots as Active Materials in Luminescent Solar Concentrators. *Applied Physics Letters*. 2010, vol. 96, no. 19, pp. 191901–191903. doi: 10.1063/1.3422485
9. Catchpole K. R., Polman A. Plasmonic solar cells. *Optics Express*. 2008, vol. 16, no. 26, pp. 21793–21800. doi: 10.1364/oe.16.021793.
10. Makara V. A., Vasil'ev M. A., Steblenko L. P., Koplak O. V., Kurilyuk A. N., Kobzar' Yu. L., Naumenko S. N. Vyzvannye deystviem magnitnogo polya izmeneniya primesnogo sostava i mikrotverdosti pripoverkhnostnykh sloev kristallov kremniya [Changes in the impurity composition and microhardness of the near-surface layers of silicon crystals caused by the action of a magnetic field]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*. 2008, vol. 42, no. 9, pp. 1061–1064.

Надійшла (received) 07.10.2021

Зайцев Роман Валентинович (Зайцев Роман Валентинович, Roman Zaitsev) – доктор технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри фізичного матеріалознавства для електроніки та геліоенергетики, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2286-8452>; e-mail: roman.zaitsev@khpі.edu.ua.

Кіріченко Михайло Валерійович (Кириченко Михаил Валерьевич, Mykhailo Kirichenko) – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри фізичного матеріалознавства для електроніки та геліоенергетики, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4847-506X>; e-mail: mykhailo.kirichenko@khpі.edu.ua.

Мінакова Ксенія Олександрівна (Минакова Ксения Александровна, Kseniia Minakova) – кандидат фізико-математичних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший науковий співробітник кафедри фізичного матеріалознавства для електроніки та геліоенергетики, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8869-1082>; e-mail: kseniia.minakova@khpі.edu.ua.

Дроздов Антон Миколайович (Дроздов Антон Николаевич, Anton Drozdov) – кандидат фізико-математичних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри фізичного матеріалознавства для електроніки та геліоенергетики, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5736-0697>; e-mail: anton.drozdov@khpі.edu.ua.

Шкода Дмитро Сергійович (Шкода Дмитрий Сергеевич, Dmytro Shkoda) – аспірант кафедри фізичного матеріалознавства для електроніки та геліоенергетики, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3592-9755>; e-mail: dmytro.skoda@khpі.edu.ua.