

Моделювання робочих характеристик сонячного елемента зі структурою $p^+-\text{CuO} / p\text{-ZnTe} / n\text{-CdSe} / n\text{-MoSe}_2 / \text{Mo}$

А.С. Опанасюк¹, М.М. Іващенко², І.П. Бурик², В.А. Мороз²

¹ Сумський державний університет, вул. Римського-Корсакова, 2, 40007 Суми, Україна

² Конопольський інститут Сумського державного університету, пр. Миру, 24, 41600 Конополь, Україна

(Одержано 05.03.2015; опубліковано online 10.06.2015)

У роботі проведено моделювання основних експлуатаційних характеристик (світлові вольт-амперні характеристики, спектральні залежності квантового виходу) сонячного елемента (СЕ) $\text{CuO} / \text{ZnTe} / \text{CdSe} / \text{MoSe}_2 / \text{Mo}$. В результаті визначені напруга холостого ходу U_{oc} , густина струму короткого замикання J_{sc} , фактор заповнення FF , коефіцієнт корисної дії приладу в залежності від його конструктивних особливостей (товщини віконного, поглинального та приконтактного шарів) та робочої температури. Встановлені параметри СЕ з максимальною ефективністю.

Ключові слова: Сонячний елемент, Гетероперехід $p\text{-ZnTe}/n\text{-CdSe}$, Моделювання, Фактор заповнення, Коефіцієнт корисної дії.

PACS numbers: 85.60.Bt, 78.20.Bh, 73.61.Ga

1. ВСТУП

Одним із шляхів подолання глобальної енергетичної кризи є масове використання наземних фотоелектричних перетворювачів (ФЕП) сонячної енергії [1, 2]. На даний час найпоширенішими сонячними елементами (СЕ), що використовуються, є такі, які базуються на кремнієвих технологіях [3]. Альтернативою їм є тонкоплівкові гетероперехідні ФЕП на основі прямозонних напівпровідників. Особливий інтерес науковців, завдяки можливості створення на їх основі високоєфективних перетворювачів сонячної енергії, при цьому привертають напівпровідникові сполуки групи A_2B_6 [4]. Так плівки селеніду кадмію (CdSe) широко використовуються у геліоенергетиці як поглинальний (базовий) шар одноперехідних СЕ, оскільки ширина забороненої зони (ЗЗ) матеріалу є наближеною до оптимальної (оптимум Шоклі-Квайсера) ($E_g = 1,50$ еВ) [1] і складає $E_g = 1,70$ еВ [5]. Слід відмітити, що наряду з цим CdSe є перспективним матеріалом поглинального шару першого елемента тандемних СЕ, другим елементом яких є ФЕП с базовим шаром CuInSe_2 (CIS) або Cu(In, Ga)Se_2 (CIGS) [6-7].

Віконним шаром приладів, який утворює гетероперехід, у цьому випадку може виступати телурид цинку (ZnTe) який має ширину ЗЗ, що дорівнює $E_g = 2,39$ еВ та p -тип провідності [8]. Важливою особливістю гетеропереходів $p\text{-ZnTe} / n\text{-CdSe}$ є близькість до ідеальних, оскільки невідповідність ґраток напівпровідників з кубічною структурою у цій парі є меншою ніж 1 % [9]. Це дозволяє знизити практично до нуля рекомбінаційні втрати генерованих світлом носіїв заряду на гетеромежі матеріалів. Окрім основних шарів СЕ завжди містять струмознімальні контакти - фронтальний та тильний, до яких висувається цілий ряд суперечливих вимог [10].

Діхалькогеніди перехідних металів (WS_2 , WTe_2 , WSe_2 , MoS_2 , MoTe_2 , MoSe_2) розглядаються як новий клас матеріалів для створення тильних контактів СЕ [11-15]. Ці матеріали дозволяють отримати хороший омичний контакт до поглинальних шарів ФЕП

який має високу часову стабільність та забезпечує їх високу адгезію до підкладки [16]. Крім того, внаслідок різниці у значеннях E_g між поглинальним шаром та плівкою діхалькогеніду, остання може відігравати роль «електронного дзеркала», що призводить до підвищення рівня рекомбінації електронно-діркових пар на границі переходу та забезпечує високу якість омичного контакту [17]. В результаті, як показано у [18], такий прошарок збільшує ККД СЕ. У цілому ряді випадків шари діхалькогенідів при високих температурах утворюються самостійно в результаті взаємної термічної дифузії компонентів напівпровідникових шарів та молібдену який традиційно використовується як тильний контакт більшості СЕ зі структурою «substrate» [11].

У наш час ККД СЕ на основі гетеропереходів $p\text{-ZnTe} / n\text{-CdSe}$ складає 10,8 % [19]. Подальше збільшення ефективності таких ФЕП можливо лише шляхом оптимізації їх конструкції, що можливо шляхом моделювання фізичних процесів, які відбуваються у приладах при опроміненні сонячним світлом. Це і обумовило мету роботи, числове моделювання основних робочих характеристик ФЕП на основі гетеросистеми $p^+-\text{CuO} / p\text{-ZnTe} / n\text{-CdSe} / n\text{-MoSe}_2 / \text{Mo}$ в залежності від конструкційних характеристик приладу та температури його експлуатації.

2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЧИСЛОВОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Для проведення числового моделювання світлових вольт-амперних характеристик (ВАХ) та спектральної залежності квантового виходу СЕ у наш час використовують наступні програмні пакети: AMPS [20], wx-AMPS [21], PC-1D [22], ASA [23], SCAPS [24-26]. Останній пакет, завдяки можливості врахування як індивідуальних властивостей напівпровідникових шарів, так і процесів рекомбінації, що відбуваються на міжфазній границі був обраний нами для розрахунків (SCAPS-3102). Крім цього програма SCAPS-3102 дозволяє моделювати фізичні процеси у структурах, що складаються з семи напівпровідникових

шарів, з різними профілями легування та довільним енергетичним розподілом донорів чи акцепторів у цих шарах та на гетеромежі.

З світових ВАХ в подальшому визначалися такі важливі параметри фотоперетворювачів як густина струму короткого замикання (J_{sc}), напруга холостого ходу (U_{oc}), фактор заповнення ВАХ (FF) та ККД (η) ФЕП [27].

Схематичний вид конструкції ФЕП зі структурою $p^+-CuO / p-ZnTe / n-CdSe / n-MoSe_2 / Mo$ для якої проводилося моделювання наведений на рис. 1. Як верхній струмознімальний контакт до шару $p-ZnTe$, був обраний оксид міді (CuO), він є прозорим у видимій області спектру та має p -тип провідності [28].

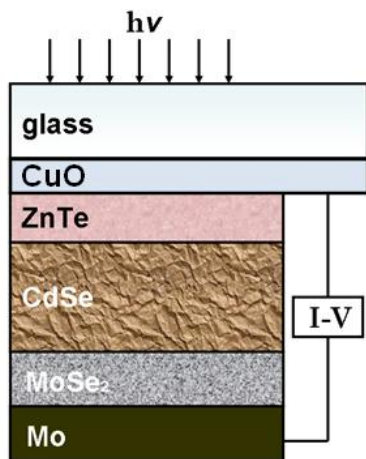


Рис. 1 – Схематичний вигляд конструкції СЕ зі структурою $p^+-CuO / p-ZnTe / n-CdSe / n-MoSe_2 / Mo$

Перед тим, як розпочати процедуру моделювання, необхідно, перш за все, задати вхідні параметри матеріалів, що входять до складу ФЕП, такі як, товщина віконного та поглинального шару (d), ширина забороненої зони матеріалів (E_g), їх електронна спорідненість (χ), діелектричні сталі напівпровідників (ϵ / ϵ_0), рухливості електронів та дірок (μ), їх ефективні маси m_e, m_h , густини станів у зоні провідності та валентній зоні N_C, N_V та ін. [29-30].

Основні базові параметри, що використовувалися нами при проведенні числового моделювання фізичних процесів у СЕ, наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Вхідні параметри моделювання

Шар	$p-ZnTe$	$n-CdSe$	$n-MoSe_2$
Параметри			
d , мкм	0,05-0, 50	1,00-5,00	0,05-0,50
E_g , eV	2,39	1,74	1,26
χ , eV	3,53	4,95	4,05
ϵ / ϵ_0	7,28	6,10	15,40
N_C , cm^{-3}	$2,24 \times 10^{18}$	$1,75 \times 10^{18}$	$1,05 \times 10^{18}$
N_V , cm^{-3}	$1,60 \times 10^{19}$	$2,10 \times 10^{19}$	$1,40 \times 10^{19}$
μ_n , cm^2/c	–	650	280
μ_p , cm^2/c	100	–	–
m_n/m_0	0,20	0,13	0,28
m_p/m_0	0,20	0,45	0,50

У більшості випадків моделювання проводилося в умовах освітлення АМ 1,5 та кімнатній температу-

рі ($T = 300$ К). Товщина віконного шару $ZnTe$ змінювалася у інтервалі $d_{ZnTe} = (0,05-0,50)$ мкм, поглинального – $d_{CdSe} = (1,0-5,0)$ мкм, підшару $MoSe_2$ – $d_{MoSe_2} = (0,1-0,5)$ мкм. Звичайно фіксувалося два параметри моделювання в той час як третій змінювався.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Товщина поглинального шару є важливою характеристикою СЕ, яка впливає на кількість поглинутого приладом випромінювання, тому дослідження її впливу на електрофізичні характеристики ФЕП є актуальною задачею.

У таблиці 2 та на рис. 2 наведені результати моделювання світових ВАХ СЕ при зміні товщини поглинального шару. Товщина інших двох шарів приймалася рівною $d_{ZnTe} = 0,10$ мкм, $d_{MoSe_2} = 0,2$ мкм.

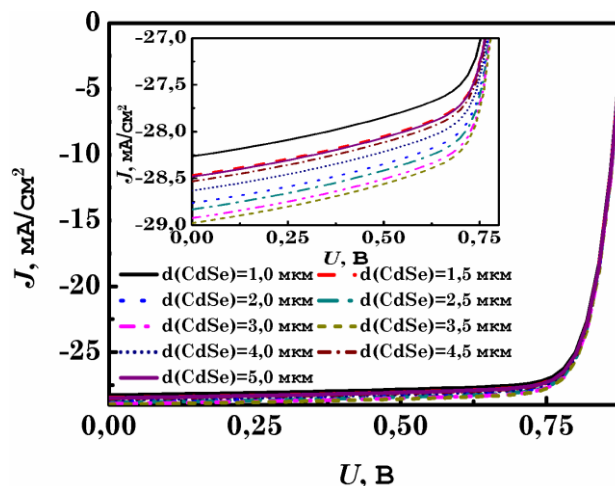


Рис. 2 – Світлові ВАХ СЕ зі структурою $p^+-CuO / p-ZnTe / n-CdSe / n-MoSe_2 / Mo$ при різній товщині поглинального шару CdSe

Таблиця 2 – Робочі характеристики СЕ при різній товщині поглинального шару CdSe

d_{CdSe} , мкм	U_{oc} , В	J_{sc} , mA/cm^2	FF, %	η , %
1,0	0,88	28,28	82,14	20,38
1,5	0,88	28,47	82,14	20,56
2,0	0,88	28,60	82,14	20,78
2,5	0,88	28,83	82,14	20,93
3,0	0,88	28,93	82,14	21,01
3,5	0,88	28,98	82,14	21,04
4,0	0,88	28,63	82,14	20,76
4,5	0,88	28,53	82,14	20,69
5,0	0,88	28,48	82,14	20,56

З аналізу результатів моделювання видно, що при збільшенні товщини поглинального шару до $d_{CdSe} = 3,5$ мкм спостерігається деяке підвищення ККД СЕ до рівня 21,04 %. Це обумовлене збільшенням значення J_{sc} від 28,60 до 28,98 mA/cm^2 при постійних значеннях $U_{oc} = 0,88$ В та $FF = 82,14\%$. При подальшому збільшенні товщини шару CdSe ефективність СЕ починає знижуватися. Це можна пояснити тим, що при товщині абсорбуючого шару 3,5 мкм відбувається повне поглинання світла СЕ і, відпові-

дно, кількість генерованих електронно-діркових пар виходить на насичення. Подальше збільшення товщини шару d_{CdSe} веде до збільшення послідовного опору приладу та віддалення області генерації носіїв від гетеропереходу. В результаті відбувається загальне зниження ККД приладу.

На зниження ефективності СЕ при малій товщині поглинального шару впливає підвищена рекомбінація генерованих носіїв на глибоких центрах, розташованих на границі розділу поглинального шару і струмозмінального контакту.

Таким чином, в результаті проведених розрахунків встановлено, що оптимальною товщиною поглинального шару СЕ на основі гетеропереходу ZnTe / CdSe є значення $d = 3,5$ мкм. Саме це значення і було використане нами при подальших розрахунках.

Товщина віконного шару в ФЕП є важливою характеристикою, оскільки визначає кількість випромінювання, що надходить до поглинального шару СЕ, тому потрібна оптимізація його товщини.

Результати моделювання світлових ВАХ приладів з різною товщиною шару ZnTe наведені на рис. 3 та у таблиці 3.

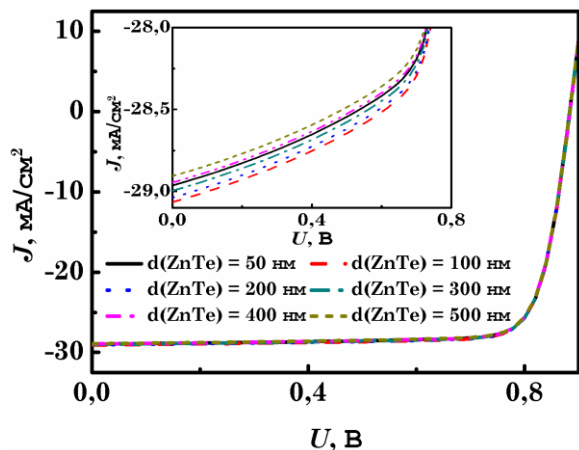


Рис. 3 – Світлові ВАХ СЕ зі структурою $p^+ \text{-CuO} / p \text{-ZnTe} / n \text{-CdSe} / n \text{-MoSe}_2 / \text{Mo}$ при різній товщині віконного шару ZnTe

Таблиця 3 – Робочі характеристики СЕ при різній товщині віконного шару ZnTe

d_{ZnTe} , нм	U_{oc} , В	J_{sc} , mA/cm^2	FF , %	η , %
50	0,88	28,63	82,14	20,78
100	0,88	29,07	82,14	21,10
200	0,88	29,02	82,14	21,07
300	0,88	29,00	82,14	21,04
400	0,88	28,91	82,14	21,02
500	0,88	28,89	82,14	20,98

В результаті проведених розрахунків було встановлено, що при підвищенні товщини віконного шару від 0,10 до 0,50 мкм спостерігається незначне зниження ККД СЕ. Це пов'язано з тим, що при збільшенні товщини віконного шару ZnTe в ньому починає поглинатися більша кількість фотонів з енергією $h\nu > E_g$ матеріалу. Це призводить до зменшення значення квантового виходу СЕ в області довжин хвиль випромінювання $\lambda < 530$ нм. При малій тов-

щині віконного шару ($d = 0,05$ мкм) суттєво зростає роль рекомбінаційних процесів на поверхні ФЕП, що веде до зниження їх ККД. Слід відзначити, що експериментально отримати суцільні плівки ZnTe меншої товщини проблематично, тому моделювання при меншій товщині шару ZnTe не проводилося.

Моделювання процесів, що відбуваються у СЕ дозволило визначити оптимальні конструкційні характеристики реального ФЕП, а саме товщина віконного шару повинна складати 0,1 мкм.

Зміна товщини приконтактного шару MoSe2 також може впливати на ефективність СЕ. На рис. 4 та в таблиці 4 наведені результати моделювання світлових ВАХ гетеросистеми в залежності від товщини цього шару.

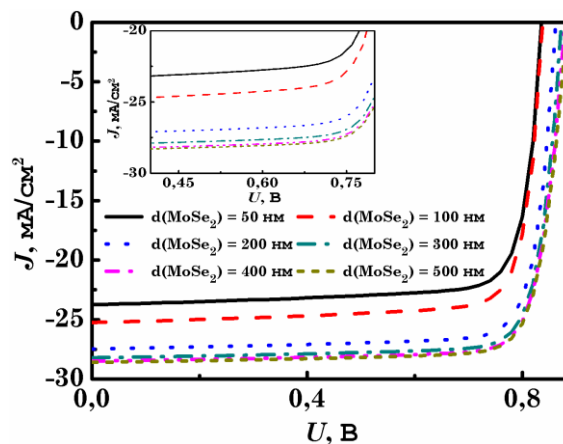


Рис. 4 – Світлові ВАХ СЕ зі структурою $p^+ \text{-CuO} / p \text{-ZnTe} / n \text{-CdSe} / n \text{-MoSe}_2 / \text{Mo}$ при різній товщині шару MoSe2

Таблиця 4 – Робочі характеристики СЕ при різній товщині шару MoSe2

d_{MoSe_2} , нм	U_{oc} , В	J_{sc} , mA/cm^2	FF , %	η , %
50	0,83	24,78	80,29	16,56
100	0,84	25,25	81,28	17,20
200	0,86	27,46	82,75	19,59
300	0,87	28,21	82,68	20,37
400	0,88	28,50	82,39	20,65
500	0,88	28,60	82,14	20,76

З аналізу результатів моделювання видно, що при підвищенні товщини проміжного шару спостерігається підвищення ККД СЕ до рівня 20,76 %. При цьому спостерігається відповідне збільшення значень U_{oc} від 0,83 В до 0,88 В, та J_{sc} від 24,78 до 28,60 mA/cm^2 .

В процесі експлуатації під дією сонячного випромінювання СЕ можуть розігріватися, що може суттєво вплинути на їх робочі характеристики. В зв'язку з цим, нами проводились дослідження впливу робочої температури на вигляд ВАХ ФЕП. Моделювання проводилося в інтервалі температур, які реально можуть реалізуватися при експлуатації СЕ $T = 280\text{-}320$ К для оптимізованих значень товщини всіх шарів. Результати розрахунків основних характеристик ФЕП в залежності від температури експлуатації наведені на рис. 5 та в таблиці 5.

Встановлено, що при збільшенні температури

експлуатації від 280 К до 320 К ККД СЕ зменшувався від 21,60 % (280 К) до 19,83 % (320 К). Результат теж є фізично зрозумілим, оскільки при підвищенні T зменшується ширина забороненої зони матеріалу,

Таблиця 5 – Робочі характеристики СЕ при різній експлуатаційній температурі

T , К	U_{oc} , В	J_{sc} , mA/cm^2	FF , %	η , %
280	0,91	29,03	81,64	21,60
290	0,90	29,07	81,87	21,41
300	0,88	29,00	82,14	21,06
310	0,85	29,15	82,25	20,33
320	0,83	29,18	82,05	19,83

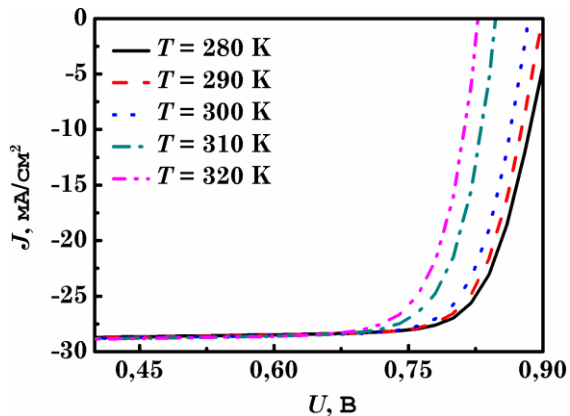


Рис. 5 – Світлові ВАХ СЕ зі структурою $p^+ \text{-CuO} / p\text{-ZnTe} / n\text{-CdSe} / n\text{-MoSe}_2 / \text{Mo}$ при різній температурі експлуатації

відповідно зменшується контактна різниця потенціалів на гетеропереході, одночасно збільшуються струми витоку освітленого діоду.

Залежності квантового виходу СЕ $p^+ \text{-CuO} / p\text{-ZnTe} / n\text{-CdSe} / n\text{-MoSe}_2 / \text{Mo}$ з урахуванням різних фізико-технологічних режимів отримання шарів приведені на рис. 6. Як і очікувалося ФЕП є фоточутливими в інтервалі довжини хвилі випромінювання 512-978 нм.

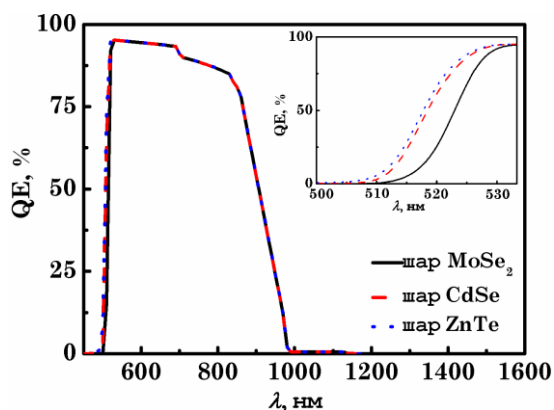


Рис. 6 – Залежності квантового виходу СЕ зі структурою $p^+ \text{-CuO} / p\text{-ZnTe} / n\text{-CdSe} / n\text{-MoSe}_2 / \text{Mo}$ від товщини шарів гетеросистеми

На рис. 7 та 8 наведені узагальнені залежності напруги холостого ходу U_{oc} , густини струму коротко-

го замикання J_{sc} , фактора заповнення ВАХ FF та ККД СЕ $p^+ \text{-CuO} / p\text{-ZnTe} / n\text{-CdSe} / n\text{-MoSe}_2 / \text{Mo}$ від товщини поглинального (CdSe), віконного (ZnTe) та приконтактного (MoSe_2) шарів. Вони дозволяють остаточно визначити оптимальні товщини цих шарів. Вони дорівнюють: для поглинального шару CdSe – 3,5 мкм, віконного шару ZnTe – 0,10 мкм, приконтактного шару MoSe_2 – 0,5 мкм.

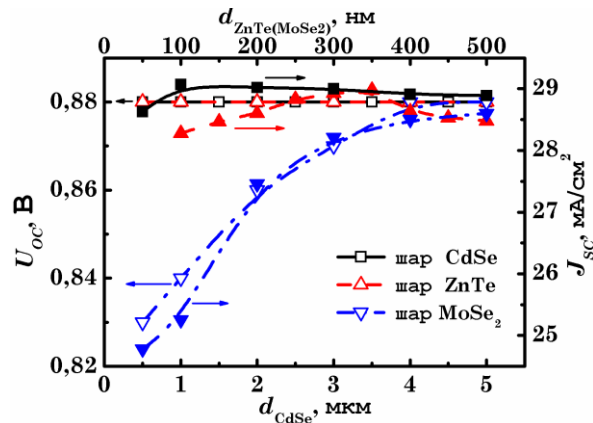


Рис. 7 – Залежності U_{oc} та J_{sc} СЕ $p^+ \text{-CuO} / p\text{-ZnTe} / n\text{-CdSe} / n\text{-MoSe}_2 / \text{Mo}$ від товщини шарів

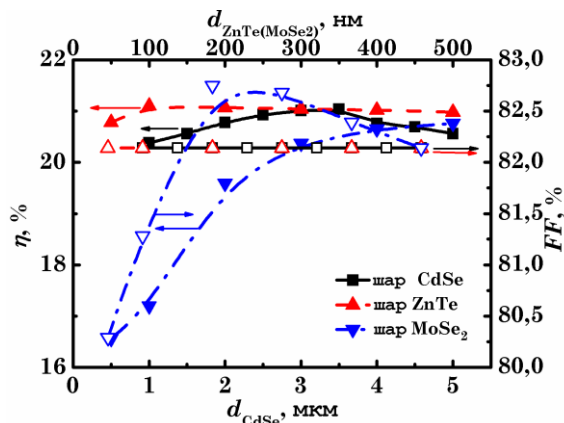


Рис. 8 – Залежності FF та η СЕ $p^+ \text{-CuO} / p\text{-ZnTe} / n\text{-CdSe} / n\text{-MoSe}_2 / \text{Mo}$ від товщини шарів

ВИСНОВКИ

В роботі було проведено моделювання світлових ВАХ, а також спектральних розподілів квантової ефективності СЕ зі структурою $\text{ZnTe}/\text{CdSe}/\text{MoSe}_2/\text{Mo}$. В результаті були встановлені оптимальні конструктивні параметри ФЕП, що забезпечують їх максимальний ККД при температурі 280 К, а саме товщина поглинального шару CdSe – 3,5 мкм, віконного шару ZnTe – 0,10 мкм, проміжного шару MoSe_2 – 0,5 мкм. Максимальна ефективність фотоперетворювачів на основі ГП $\text{ZnTe}/\text{CdSe}/\text{MoSe}_2/\text{Mo}$ з оптимальною конструкцією може сягати значень $\eta = 21,60\%$ ($U_{oc} = 0,91$ В, $J_{sc} = 29,03$ mA/cm^2 , $FF = 82,05\%$). Відповідні прилади на їх основі можуть мати широку область фоточутливості, яка лежить в інтервалі $\lambda = (512\text{-}978)$ нм.

Моделирование рабочих характеристик солнечного элемента со структурой $p^+-\text{CuO} / p\text{-ZnTe} / n\text{-CdSe} / n\text{-MoSe}_2 / \text{Mo}$

А.С. Опанасюк¹, М.Н. Ивашенко², И.П. Бурыйк², В.А. Мороз²

¹ Сумский государственный университет, ул. Римского-Корсакова, 2, 40007 Сумы, Украина

² Конопотский институт Сумского государственного университета, пр. Мира, 24, 41600 Конопот, Украина

В работе проведено моделирование основных эксплуатационных характеристик (световые вольт-амперные характеристики, спектральные зависимости квантового выхода) солнечного элемента (СЭ) $\text{CuO} / \text{ZnTe} / \text{CdSe} / \text{MoSe}_2 / \text{Mo}$. В результате были определены напряжение холостого хода U_{oc} , плотность тока короткого замыкания J_{sc} , фактор заполнения FF , коэффициент полезного действия прибора в зависимости от его конструктивных особенностей (толщины оконного, поглощающего и приконтактного слоев) и рабочей температуры. Установлены параметры СЭ с максимальной эффективностью.

Ключевые слова: Солнечный элемент, Гетеропереход $p\text{-ZnTe} / n\text{-CdSe}$, Моделирование, Фактор заполнения, Коэффициент полезного действия.

Working Characteristics Simulation of $p^+-\text{CuO} / p\text{-ZnTe} / n\text{-CdSe} / n\text{-MoSe}_2 / \text{Mo}$ Solar Cell

A.S. Opanasyuk¹, M.M. Ivashchenko², I.P. Buryk², V.A. Moroz²

¹ Sumy State University, 2, Rymsky-Korsakov Str., 40007 Sumy, Ukraine

² Konotop Institute, Sumy State University, 24, Myru Ave., 41600 Konotop, Ukraine

In this paper it was carried out the simulation of the main working characteristics (light I-V curves, quantum yield spectral dependencies) of $\text{CuO} / \text{ZnTe} / \text{CdSe} / \text{MoSe}_2 / \text{Mo}$ solar cell (SC). As a study result there were determined open-circuit voltage U_{oc} , short-circuit current density J_{sc} , fill-factor FF , and the device's efficiency depending on its constructive features (window, absorber and per-contact layers thickness) and working temperature. There were estimated SC's parameters with the maximum conversion efficiency of solar energy.

Keywords: Solar cell, $p\text{-ZnTe} / n\text{-CdSe}$ heterojunction, Simulation, Fill factor, Solar cell efficiency.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- M.A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, W. Warta, *Prog. Photovoltaics* **18**, 346 (2010).
- K.L. Chopra, P.D. Paulson, V. Dutta, *Prog. Photovoltaics* **12**, 69 (2004).
- S. Maity, S. Dey, C.T. Bhunia, H. Saha, *J. Nano- Electron. Phys.* **6** No 4, 04005(7) (2014).
- T. Chu, S. Chu, *Solid State Electron.* **38** No 3, 533 (1995).
- Yu.P. Gnatenko, A.S. Opanasyuk, M.M. Ivashchenko, P.M. Bukivskij, I.O. Faryna, *Mat. Sci. Semicond. Proc.* **26**, 663 (2014).
- Y.G. Xiao, Z.Q. Li, M. Lestrade, Z.M. Simon Li, *Proc. SPIE: Thin Film Solar Technology II* **7771**, 77710K (2010).
- M.W. Wang, *34th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, art. no. 11152356, 000489 (Philadelphia, PA. USA: IEEE: 2009).
- A.B.M.O. Islam, N.B. Chaura, J. Wellings, G. Tolan, I.M. Dharmadasa, *Mater. Charact.* **60** No 2, 160 (2009).
- F. Buch, A.L. Fachrenbruch, R.H. Bube, *Appl. Phys. Lett.* **28** No 10, 593 (1976).
- S. Kluska, F. Granek, M. Rüdiger, M. Hermle, S.W. Glunz, *Sol. Energy Mat. Sol. C.* **94**, 568 (2010).
- A. Jäger-Waldau, M.C. Lux-Steiner, E. Bücher, *Solid State Phenom.* **37-38**, 479 (1994).
- B. Shin, Y. Zhu, N.A. Bojarczuk, S.J. Chey, S. Guha, *Appl. Phys. Lett.* **101**, 053903 (2012).
- S. Lee, J. Koo, S. Kim, S.-H. Kim, T. Cheon, J.S. Oh, S.J. Kim, W.K. Kim, *Thin Solid Films* **535**, 206 (2013).
- L. Assmann, J.C. Bernede, A. Drici, C. Amory, E. Halgand, M. Morsli, *Appl. Surf. Sci.* **246**, 159 (2005).
- N. Kohara, S. Nishiwaki, Y. Hashimoto, T. Negami, T. Wada, *Sol. Energy Mat. Sol. C.* **67**, 209 (2001).
- N. Dhar, T.H. Chowdhury, M.A. Islam, N.A. Khan, M.J. Rashid, M.M. Alam, Z.A. Alotman, K. Sopian, N. Amin, *Chalcogenide Lett.* **11** No 6, 271 (2014).
- J. Engman, *Experimental study of $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{Se},\text{S})_4$ thin films for solar cell applications: PhD thesis*, 155 (Uppsala: Uppsala University, Sweden: 2011).
- S.M. Delphine, M. Jayachandran, C. Sanjeeviraja, *Crystallogr. Rev.* **17** No 4, 281 (2011).
- P. Gashin, A. Focsha, T. Potlog, A.V. Simashkevich, V. Leonard, *Sol. Energy Mat. Sol. C.* **46** No 4, 323 (1997).
- N. Hernandez-Como, A. Morales-Acevedo, *Sol. Energy Mat. Sol. C.* **94**, 62 (2010).
- Y. Liu, Y. Sun, A. Rockett, *Sol. Energy Mat. Sol. C.* **98**, 124 (2012).
- M. Belarbi, A. Benyousef, B. Benyousef, *Adv. Energ.* **1** No 3, 1 (2014).
- R.E.I. Schropp, M. Zeman, *Amorphous and Microcrystalline Silicon Solar Cells: Modeling, Materials and Device Technology* (Boston: Kluwer: 1998).
- M. Burgelman, P. Nolett, S. Degrave, *Thin Solid Films* **361-362**, 527 (2000).
- A. Morales-Acevedo, N. Hernandez-Como, G. Casados-Cruz, *Mat. Sci. Eng. B.* **177**, 1430 (2012).
- M. Hädrich, H. Metzner, U. Reislöhner, C. Kraft, *Sol. Energy Mat. Sol. C.* **95**, 887 (2011).
- A.С. Опанасюк, Д.І. Курбагов, Т.О. Бересток, О.А. Доброжан, Р.В. Лопатка, *Вісник НТУ «ХПІ»* **18** No 991, 149 (2013).
- Y. Ohya, S. Ito, T. Ban, Y. Takahashi, *Key Eng. Mat.* **181-182**, 113 (2000).
- A.D. Pogrebnyak, A.K.M. Muhammed, *J. Nano- Electron. Phys.* **3** No 3, 51 (2011).
- N.Y. Jamil, S.N. Abdulla, A.K. Muhammed, A.D. Pogrebnyak, M.M. Ivashchenko, *Proc. NAP.* **1** No 4, 04NMEEE09(3) (2012).