

УДК 621.383.52:537.311.4

**РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ФОРМУВАННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ
Cu/PCCu/POR-Si/N-Si/P-Si/P⁺-Si/ITO І Al/PCAL/POR-Si/N-Si/P-Si/P⁺-Si/ITO
ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЇХ ПАРАМЕТРІВ**

Є. І. Зубко, Є. Я. Швець

Запорізька державна інженерна академія

вул. Добролюбова, 22, м. Запоріжжя, 69000, Україна. E-mail: evgeniya-zubko@mail.ru

О. П. Чорний

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: evgeniya-zubko@mail.ru

Удосконалено технологію виготовлення сонячних елементів шляхом упродовження способу формування контактного шару на антивідбиттєвому покритті сонячних елементів і створення бар'єрних структур Cu/PcCu/por-Si/n-Si/p-Si/p⁺-Si/ITO і Al/PcAl/por-Si/n-Si/p-Si/p⁺-Si/ITO з коефіцієнтом корисної дії 16,01 % і 15,8 %, фактором заповнення 0,79 і 0,74 відповідно та затіненням контактною мережею, що не перевищує 1 %. Впродовження додаткового контактного шару з PcCu до структури Cu/PcCu/por-Si/n-Si/p-Si/p⁺-Si/ITO знижує значення послідовного опору на 25 %. Уточнено порядок величин послідовного опору SE, які підтверджують перевищення опору пористого кремнію і n-шару над опором бази в 600 і 200 разів. На моделі кусочно-лінійної апроксимації встановлені відхилення форми вольт-амперних характеристик приладів і доповнені наукові дані про вплив тильної контактної металізації з ITO шару на коефіцієнт корисної дії приладів: для сонячних елементів з основним і додатковим наноструктурованим контактним шаром із Al на антивідбиттєвому покритті з пористого кремнію становили 0,5 %, з Cu – 2,21 %; для структур з основним контактом на антивідбиттєвому покритті з Al – 8,81 %, з Cu – 3,19 %; для стандартних сонячних елементів без антивідбиттєвого покриття з Al контактами мали вплив у розмірі 15,02 %, з Cu – 13,42 %.

Ключові слова: омичні втрати, послідовний опір, фталоціанін міді, фталоціанін алюмінію, сонячний елемент.

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ
Cu/PCCu/POR-Si/N-Si/P-Si/P⁺-Si/ITO И Al/PCAL/POR-Si/N-Si/P-Si/P⁺-Si/ITO
И ИССЛЕДОВАНИЕ ИХ ПАРАМЕТРОВ**

Е. И. Зубко, Е. Я. Швец

Запорожская государственная инженерная академия

ул. Добролюбова, 22, г. Запорожье, 69000, Украина. E-mail: evgeniya-zubko@mail.ru

А. П. Черный

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского

ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: evgeniya-zubko@mail.ru

Усовершенствована технология изготовления солнечных элементов путем внедрения способа формирования контактнoго слоя на антиотражателъном покрытии солнечных элементов и создания барьерных структур Cu/PcCu/por-Si/n-Si/p-Si/p⁺-Si/ITO и Al/PcAl/por-Si/n-Si/p-Si/p⁺-Si/ITO с коэффициентом полезного действия 16,01 % и 15,8 %, фактором заполнения 0,79 и 0,74 соответственно и затенением контактной сеткой, которое не превышает 1 %. Внедрение дополнительного контактнoго слоя из PcCu в структуру Cu/PcCu/por-Si/n-Si/p-Si/p⁺-Si/ITO снижает значение последовательного сопротивления на 25 %. Уточнен порядок величин последовательного сопротивления солнечных элементов, который подтверждает превышение сопротивления пористого кремния и n-слоя над сопротивлением базы в 600 и 200 раз. На модели кусочно-линейной аппроксимации установлены отклонения формы вольт-амперной характеристики приборов и дополнены научные данные о влиянии тильной контактнoй металлизации с ITO слоем на коэффициент полезного действия приборов: для солнечных элементов с основным и дополнительным наноструктурированным контактнoм слоем с Al на антиотражателъное покрытие с пористого кремния составляли 0,5 %, с Cu – 2,21 %; для структур с основным контактом на антиотражателъном покрытии с Al – 8,81 %, с Cu – 3,19 %; для стандартных солнечных элементов без антиотражателъного покрытия с Al контактами имело место влияние в размере 15,02 %, с Cu – 13,42 %.

Ключевые слова: омические потери, последовательное сопротивление, фталоціанін міді, фталоціанін алюмінія, сонячний елемент.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Технологічний процес виготовлення сонячних елементів (СЕ) на виробництві регламентується технологічними картами, які формують з багатьох операцій. Основними для монокристалічних кремнієвих СЕ є підготовка кремнієвих пластин, утворення на них р-п переходу, нанесення контактів і просвітлення. Всі ці операції взаємозалежні між собою, та їх вплив на структуру визначає якість виробу, що прагне досягти термодинамічної межі кремнієвих СЕ з одним р-п перехо-

дом, що дорівнює 25 % в умовах одного сонця [1]. Тому роботи дослідників в останні роки визначили напрямки оптимізації конструкції СЕ в однорідності і періодичності антивідбиттєвого покриття шляхом текстуризації лицьової і тильної поверхні кремнієвого монокристалічного СЕ [2]. При цьому досить мало уваги приділено контактним мережам, що формуються на пористому кремнії. Також досить обмежено розглядаються питання пов'язані з технологічною черговістю процесів формування

контактної мережі і антивідбиттєвого покриття (АВП) на основі пористого кремнію (ПК).

Таким чином, слід звернути увагу на технологію формування СЕ, а також дослідження параметрів отриманих структур. Так як ефективність перетворення сонячного світла залежить від технологічних новацій, впроваджених у виробництво, а геометричні і електричні параметри сонячних елементів суттєво впливають на ККД прилада [3, 4]. При цьому одним із важливіших для контактних систем слід назвати послідовний опір (R_s) структури, площу затінення і омичні втрати, великі значення яких значно погіршують ефективність перетворення і фактор заповнення СЕ [5]. Таким чином, необхідно зосередити увагу на питаннях формування контактної мережі з низьким опором, гарною адгезією до напівпровідника. Також важливим моментом при виготовленні приборної структури є оптимізація розмірів контактів. При цьому, з одного боку, зменшення послідовного опору забезпечить процес збільшення товщини контакту, що необхідно для послідовних операцій монтажу елементів у батарею. З іншого боку виступає затінення контактною мережею активної фронтальної частини фотоелемента, що суттєво знижує потужність структури. Одним зі шляхів зменшення затінення виступають наноструктуровані матеріали з твердою матрицею, до яких слід віднести багатоконпонентні електронні приладові композиції (БЕПК) на основі пористого кремнію (ПК) [6]. До переваг таких матеріалів слід віднести: простоту виконання, дешевизну вихідних матеріалів, високий ступінь чистоти отриманих плівок, пасивацію ПК, низькотемпературну хімічну технологію виготовлення на великих площах, застосування пластин кремнію сонячної якості і мультикристалічного кремнію та економічну доцільність. Тому впровадження БЕПК на основі ПК у конструкцію СЕ може підвищити ефективність перетворення сонячного випромінювання фотоперетворювачів.

Застосування композитних шарів типу БЕПК на основі ПК як системи «антивідбиттєве покриття – контактний шар» відкриває нові можливості вдосконалення технологічного процесу виготовлення СЕ з одним р-п переходом, шляхом упровадження таких шарів як додаткових контактних систем, що можуть бути інтегровані в сучасний технологічний процес виробництва кремнієвих СЕ.

Також, крім вищезазначених СЕ, виготовлені структури лише з основною контактною мережею і ті, що мають АВП на основі ПК. Для сформованих структур із відповідними контактними системами треба провести вимірювання опорів і товщин бази та шарів для виявлення закономірності порядку величини послідовного опору СЕ, що відбиває еволюцію їх конструктивного виконання. Також порівняння отриманих емпіричних R_{S1} із розрахунковими R_{S2} ідеальних СЕ, які були отримані за аналітичними виразами, що розраховані в роботі [7], показують вплив внутрішніх опорів на R_s .

Зокрема, дані операції виконувались з метою визначення емпіричного послідовного опору СЕ і омичних втрат в них, а також визначення впливу

опору фронтального струмоз'ємного електрода і тильного контакту на ККД і форму ВАХ, що визначається фактором заповнення прилада (ff).

Мета роботи – розробка технологічних засад виготовлення і дослідження електричних параметрів структур $Cu/PcCu/por-Si/n-Si/p-Si/p^+-Si/ITO$ і $Al/PcAl/por-Si/n-Si/p-Si/p^+-Si/ITO$.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- вдосконалити технологічний процес виготовлення сонячного елементу р-п типу з АВП на основі ПК шляхом формування низькорозмірної контактної мережі з $PcCu$ або $PcAl$;

- створити структури $Cu/PcCu/por-Si/n-Si/p-Si/p^+-Si/ITO$ і $Al/PcAl/por-Si/n-Si/p-Si/p^+-Si/ITO$;

- провести дослідження електричних параметрів структур $Cu/PcCu/por-Si/n-Si/p-Si/p^+-Si/ITO$ і $Al/PcAl/por-Si/n-Si/p-Si/p^+-Si/ITO$ – складових послідовного опору і омичних втрат;

- визначити геометричні величини фронтального струмоз'ємного електрода (площа затінення СЕ);

- отримати дані щодо впливу внутрішніх опорів на форму ВАХ і ККД.

У ході роботи було запропоновано спосіб виготовлення контактної шару на АВП СЕ, що включає електрохімічне травлення на лицьовій стороні кремнієвої підкладки для утворення АВП і нанесення контактної мережі, який полягає в тому, що після електрохімічного травлення підкладку просушують і наносять $PcCu$ або $PcAl$, після цього сушать протягом не більше двох годин, відпалюють при температурах 250–300 °С на повітрі впродовж 5–10 хвилин. Слід зауважити, що $PcCu$ використовується як розчинник 1 г очищеного $PcCu$ у $C_3H_6O:H_2O = 20:30$ ваг. ч., а $PcAl$ – як розчин 1 г очищеного $PcAl$ у $C_2H_5OH:H_2O = 30:20$ ваг. ч. Тому було розроблено технологічний процес операцій формування СЕ з основним і додатковим наноструктурованим контактним шаром на АВП, який містить у собі цілу низку допоміжних і основних операцій. Їх послідовність подана у вигляді узагальненої технологічної блок-схеми (рис. 1).

Слід зазначити, що перевагою даної конструкції СЕ є оптимізація геометрії фронтального струмоз'ємного електрода порівняно із гребінчастим фронтальним електродом, що виготовлений за технологією [8], тому що при використанні еліпсоподібної макроструктури пористого кремнію падаюче сонячне випромінювання максимально відбивається на просвітлююче покриття [2]. У зв'язку із цим даний критерій можна віднести і до конструктивно-технологічних рішень вітчизняних ФП космічного призначення.

Згідно з технологічним циклом виготовлення СЕ першим етапом формування є підготовка пластин кремнію: полірування, відбраковка неплоскопаралельних підкладок. У роботі використовували пластини монокристалічного кремнію р-типу провідності з орієнтацією (100). Після операції травлення порушеного шару в розчині гідроокису натрію або калію пластини відмивались в перок-

сидних розчинах. Наступним етапом були процеси дифузії, за якими на лицьову і зворотню сторони пластини наносилися склоподібні пасти, що скла-

даються з легованих домішок п'ятиокису фосфора і окису бору відповідно.

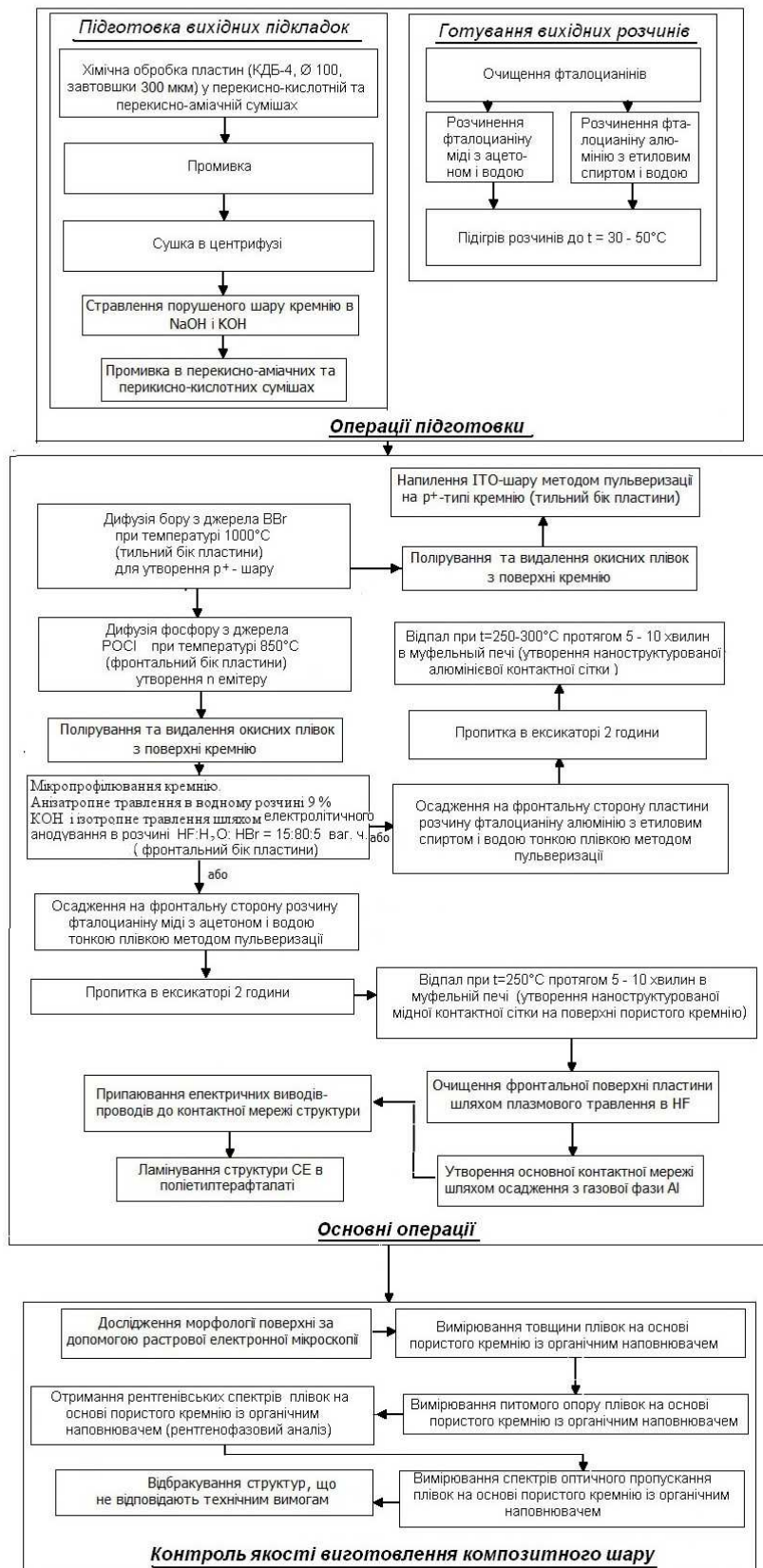


Рисунок 1 – Технологічна блок-схема виробництва сонячного елемента із шаром «контактний шар – антивідбиттєве покриття»

Далі проводилась дифузія в аргоні при температурі 980 °С в плинні 20 хвилин. Отриманий р⁺-шар на тильній стороні пластини має опір 25–35 Ом. Потім знімались окисні плівки з обох боків поверхні пластини в розчині HF із масовою концентрацією 5 %. Наступною операцією було формування шару ITO на р⁺-шар майбутнього СЕ.

Мікропрофільювання здійснювалось в два етапи за допомогою анізотропного та ізотропного травлення монокристалічних кремнієвих пластин. По-перше, для утворення затравочних центрів шляхом анізотропного травлення у 9 % водному розчині КОН при температурі 75 °С з текстуруванням поверхні підкладки у формі пірамід вишиною від 20 до 500 нм під кутом 54,7° до фронту. По-друге, для розтравлювання поверхні з утворенням макропористого кремнію у формі еліпсоподібних пор за допомогою ізотропного травлення у водних розчинах HF із додаванням інгібітора розчинення Si HBr. Даний ефект на кремнії n-типу спостерігали при структуруванні поверхні за методом електролітичного анодування у розчині HF:H₂O:HBr = 15:80:5 ваг. ч. із підсвічуванням фронтального боку пластини [9].

Наявність ПК обумовлена двома причинами. Перша пов'язана з ефектом багаторазового відбивання від фронтальної поверхні і багаторазового повного внутрішнього відбивання від меж поділу. При цьому збільшується ефективна довжина оптичного шляху всередині СЕ, що дозволяє більш ефективно використовувати падаюче випромінювання та керувати відбивальністю і поглинальною властивостями матеріалу. Друга причина пов'язана з гетеруючими властивостями ПК.

На наступному етапі методом пульверизації на зворотню сторону напівпровідникової пластини після утворення ПК осаджувалась тонка плівка фталоціаніну міді з товщиною в межах 600–1500 нм. Товщина (I_{ph}) виготовлених плівок фталоціаніну вимірювалась за допомогою п'єзореzonансного мікрозважування і варіювалась, виходячи з товщини ПК.

Приготування розчинів фталоціанінів здійснювали у наступних концентраціях навішення 1 г очищеного фталоціаніну міді в розчинниках C₂H₆O:H₂O = 20:30 ваг. ч. або 1 г фталоціаніну алюмінію в розчинниках C₂H₅OH : H₂O = 30 : 20 ваг. ч. Напилення проводили при температурі підкладки T_n = 70 °С і температурі розчину T_p = 50 °С.

Після нанесення фталоціаніну міді підкладку переміщали в ексікатор, де в плинні до 2 годин розчин фталоціаніну міді насичував ПК. Потім її піддавали відпалу при температурі 250 – 300 °С протягом 5–10 хвилин в муфельній печі для утворення сітчастої структури мідного допоміжного контакту з розмірами в межах 300–1200 нм. Наступною операцією є промивка пластин в перекисно-кислотних і перекисно-аміачних сумішах.

Далі за допомогою шаблонів на фронтальну поверхню методом вакуумного осадження з газової фази напилюється 2 П-образна контактна мережа з міді товщиною 5 мкм.

Для СЕ з допоміжним контактом з фталоціаніну алюмінію на фронтальну поверхню кремнієвої підкладки методом пульверизації наносили контакт з розчину фталоціаніна алюмінію, проводили сушку в ексікаторі в плинні до 2 годин і відпалення в муфельній печі 5–10 хвилин. Отримана наноструктурована сітка з алюмінію мала товщину 800–1400 нм. Наступною операцією є промивка пластин в перекисно-кислотних і перекисно-аміачних сумішах.

Потім за допомогою шаблонів на фронтальну поверхню методом вакуумного осадження з газової фази напилюється 2П – образна контактна мережа з алюмінію товщиною 5 мкм і шириною контактних пальців 1 мм.

Схеми структур зображені на рис. 2. При цьому ПК може варіюватись в межах від 20 нм до 250 нм – для мілкозалигаючого р-n переходів СЕ і 1 – 1,2 мкм – для глибокозалигаючих р-n переходів СЕ. Дані структури виготовлені, виходячи з енергетичних зонних діаграм гетероструктур (рис. 3, 4). На яких показано, що контактна різниця потенціалів між фталоціаніном міді і кремнієм складала 1 В, відповідно до контактної різниці між фталоціаніном алюмінію і кремнієм - 0,7 В (для побудови енергетичної зонної діаграми використані дані про ширину забороненої зони та роботу виходу фталоціанінів і ПК, кремнію з різною концентрацією домішок [10], а оцінку положення рівня Фермі в фталоціанінах проведено, використовуючи відомі співвідношення для невідроджених неорганічних напівпровідників [11]).

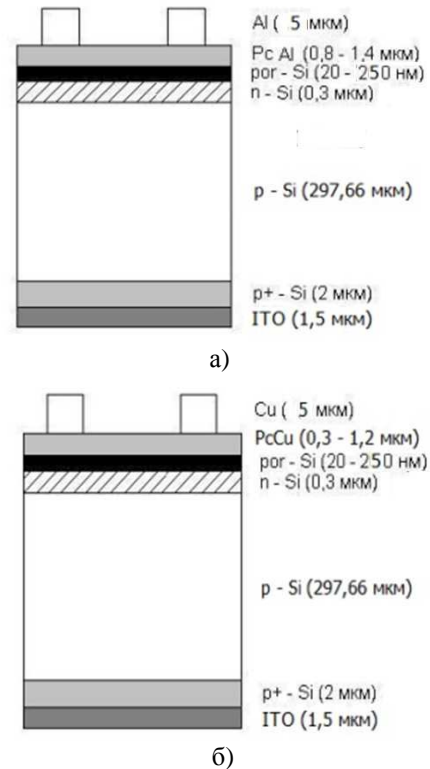
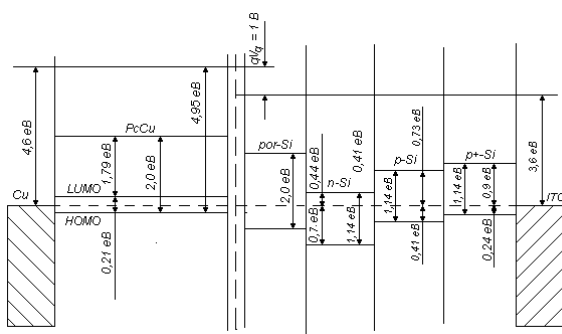
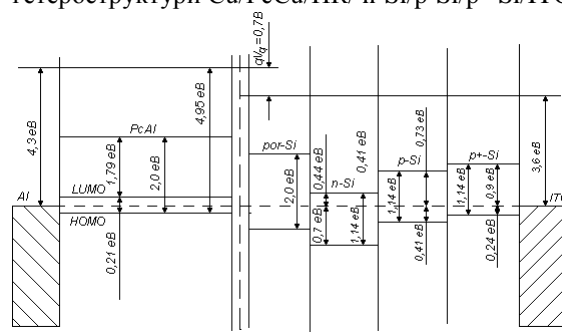


Рисунок 2 – Структури СЕ з мілкозалигаючим р-n переходом і системою «антивідбиттєве покриття – контактний шар»


 Рисунок 3 – Енергетична зонна діаграма гетероструктури Cu/PcCu/ПК/ n-Si/p-Si/p⁺-Si/ITO

 Рисунок 4 – Енергетична зонна діаграма гетероструктури Al/PcAl/por-Si/n-Si/p-Si/p⁺-Si/ITO

Зображення поверхні СЕ з оптимізованою товщиною ПК і додаткової контактної сітки з PcCu, а також основної контактної сітки з Cu, зображено на рис. 5. Дана фрактограма отримана за допомогою оптичного мікроскопа "NEOPHOT-32".

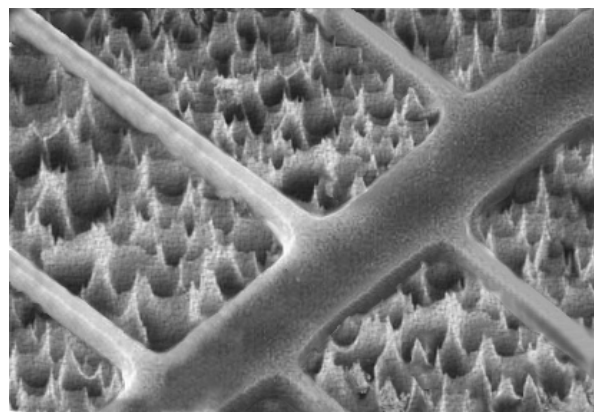


Рисунок 5 – Зображення поверхні СЕ з глибоко-козалигаючим р-n переходом зі збільшенням ×200

Згідно технологічного регламенту були виготовлені структури: Al/n-Si/p-Si/p⁺-Si/ITO, Al/por-Si/n-Si/p-Si/p⁺-Si/ITO, Al/PcAl/por-Si/n-Si/p-Si/p⁺-Si/ITO, Cu/n-Si/p-Si/p⁺-Si/ITO, Cu/por-Si/n-Si/p-Si/p⁺-Si/ITO, Cu/PcCu/por-Si/n-Si/p-Si/p⁺-Si/ITO. Для даних структур були отримані вихідні характеристики, що представлені в табл. 1.

Дослідження параметрів структур. Сонячний елемент (СЕ) з планарним р-n-переходом, який з фронтального боку має полосковий контакт, а на тильному – суцільний, перетворює сонячне випромінювання, що падає на всю світлочутливу поверхню.

Таблица 1 – Вихідні і діодні характеристики СЕ за серіями структур

Тип СЕ	Al/n-Si/p-Si/p ⁺ -Si/ITO	Al/por-Si/n-Si/p-Si/p ⁺ -Si/ITO	Al/PcAl/por-Si/n-Si/p-Si/p ⁺ -Si/ITO	Cu/PcCu/por-Si/n-Si/p-Si/p ⁺ -Si/ITO	Cu/n-Si/p-Si/p ⁺ -Si/ITO	Cu/por-Si/n-Si/p-Si/p ⁺ -Si/ITO	
Номер серії СЕ	1	2	3	4	5	6	
Технологічні параметри створення струмозбираючої мережі	Вакуумне осадження з маскою (на n-Si). Процес пульверизації (на p ⁺ -Si)	Вакуумне осадження з маскою (на n-Si). Процес пульверизації (на p ⁺ -Si)	Композитний шар (T _n = 70°C, T _p = 50°C, відпал) і головна с. м. (вакуумне осадження з маскою(на n-Si), процес пульверизації (на p ⁺ -Si)).	Композитний шар (T _n = 70°C, T _p = 50°C, відпал) і головна с. м. (вакуумне осадження з маскою(на n-Si), процес пульверизації (на p ⁺ -Si))	Вакуумне осадження з маскою (на n-Si). Процес пульверизації (на p ⁺ -Si)	Вакуумне осадження з маскою (на n-Si). Процес пульверизації (на p ⁺ -Si)	
Вихідні параметри	U _{oc} , мВ	560	580	620	615	400	450
	I _{sc} , мА	120	145	175	169	95	110
	I _m , мА	105	130	158	157	75	85
	U _m , мВ	450	470	510	520	350	390
	FF, від. од.	0,71	0,73	0,74	0,79	0,691	0,6697
	η, %	9,26	11,9	15,8	16,01	5,15	6,5
	P, мВт	47250	61100	80580	81640	28500	36550

При цьому під кожною ділянкою цієї поверхні утворюються електронно-діркові пари, які розділяються р-n-переходом. Слід зазначити, що такі фотогенеровані електрони рухаються до полоскового контакту і долають шарові опори фронтальної області р-n-переходу, далі – контактний опір (опір перехідного шару між n – ділянкою і полосковим контактом) і опір металевої контактної полоски до вивода зовнішнього ланцюга навантаження. В послідовний ланцюг струму навантаження включене також опір бази (р-типу) і контактний опір на тильній поверхні [4]. Таким чином, величина R_s складається з цілого ряду опорів різних шарів і контактних опорів. Також до контактного опору входить опір розтікання струму, що є важливою складовою властивостей контактної мережі СЕ.

Розглядаючи всі вищезазначені опори розрахуємо послідовний опір R_s структури, що значно впливає на ефективність перетворення сонячного світла фотоперетворювачем.

Так на структурах сендвіч типу М/por-Si/p-Si/М був зареєстрований фотовольтаїчний ефект. Контакт з ПК на фронтальній стороні здійснювався Pt голчастим зондом, а тильовий контакт – розпиленням Au на р-Si [10]. Вимірювання даного прилада дали наступні дані: $V_{OC} = 0,3 - 0,4$ В і $I_{SC} = 2 \cdot 10^{-6}$ А при повітряній масі 1,5. Ефективність перетворення цих структур була досить низькою, що було пов'язано з послідовним опором R_s структури. Розрахунки якого дали значення ~ 1 МОм. Таким чином, треба комплексно досліджувати параметри СЕ

Таблиця 2 – Експериментальні дані для розрахунку опорів

№	Тип структури	Питомий опір вихідного кремнію $\rho_{вих}$, Ом·мм	Товщина бази δ , мм	Питомий опір шару n-Si, ρ_{n-Si} Ом·мм	Глибина шару n-Si x , мм	Питомий опір шару ПК, ρ_{por-Si} Ом·мм	Глибина шару ПК x , мм
1	Al/PcAl/ por-Si /n-Si/p-Si/p ⁺ -Si/ITO	0,25	0,028	$0,33 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$2,7 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$
2	Al/por-Si/n-Si/p-Si/p ⁺ -Si/ITO	0,31	0,029	$0,38 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$2,26 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$
3	Al/n-Si/p-Si/p ⁺ -Si/ITO	0,35	0,028	$0,58 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-4}$	-	-
4	Cu/PcCu/ por-Si/n-Si/p-Si/p ⁺ -Si/ITO	0,32	0,028	$0,52 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$1,06 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$
5	Cu/por-Si/n-Si/p-Si/p ⁺ -Si/ITO	0,25	0,029	$0,53 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$2,65 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$
6	Cu/n-Si/p-Si/p ⁺ -Si/ITO	0,55	0,028	$0,75 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-4}$	-	-

Таблиця 3 – Розрахунок порядку величини послідовного опору

№	Тип структури	Опір бази, R_p , Ом	Опір шару n-Si, R_n , Ом	Опір шару ПК, R_{por-Si} , Ом	Контактний опір, R_k , Ом	Послідовний опір, R_{S1} , Ом	Послідовний опір, R_{S2} , Ом
1	Al/PcAl/ por-Si /n-Si/p-Si/p ⁺ -Si/ITO	0,0014	0,234	0,765	0,0874892	0,42086	0,2467
2	Al/por-Si/n-Si/p-Si/p ⁺ -Si/ITO	0,001763	0,27	0,6403	0,001617	0,3054	0,3221
3	Al/n-Si/p-Si/p ⁺ -Si/ITO	0,00192	0,411	-	0,002441	0,14003	0,432
4	Cu/PcCu/ por-Si/n-Si/p-Si/p ⁺ -Si/ITO	0,00176	0,3683	0,3003	0,0379287	0,26140	0,25345
5	Cu/por-Si/n-Si/p-Si/p ⁺ -Si/ITO	0,001422	0,3754	0,75084	0,001924	0,377815	0,410781
6	Cu/n-Si/p-Si/p ⁺ -Si/ITO	0,00302	0,531	-	0,002467	0,18056	0,46941

Визначення R_N і затінення контактною мережею структур. Питомі опори бази і шарів вимірювались та розраховувались по площі пластини за чотирьохзондовим методом. Товщина шарів визначалась за методикою формування шліфа і розломом структури навпіл. Результати вимірів занесено в табл. 2. Розрахунок величин опорів проводився на дослідних зразках зі стандартними геометричними розмірами (довжина елемента $d = 1,7$ мм; ширина $l = 3$ мм) за формулами:

- для опорів шару $R_n = \rho \frac{d}{2lx}$;

- для опору бази $R_p = \rho_{вих} \frac{\delta}{dl}$.

Порядок величини послідовного опору СЕ знайдено в табл. 3. В якій послідовний опір розкладено на складові - шарові і контактні опори. При цьому для визначення R_s був застосований метод малого параметра для моделі СЕ з послідовним опором [5]. Обмеженнями цього методу є досить низькі значення опору фронтального шару, що для розрахунку даної роботи є доречним. Таким чином, послідовно з'єднаний резистор:

$$R_S = \left(\frac{1}{3}\right) \cdot R_{шар} \quad (1)$$

При цьому опір верхнього шару $R_{\text{шар}}$ за тих же умов є розподіленим. Також треба включити R_k , оскільки він є зосередженим відносно до всієї поверхні p-n переходу. Вираз в цьому випадку прийме вид:

$$R_s = \left(\frac{1}{3}\right) \cdot R_{\text{шар}} + R_k. \quad (2)$$

Також в табл. 3 на структурах Cu/PcCu/por-Si/n-Si/p-Si/p⁺-Si/ITO встановлено, що завдяки додатковому контактному шару з PcCu знижені значення послідовного опору на 25 %. Також були наведені результати розрахунків R_{S2} за аналітичними виразами, що були розраховані в роботі [7]. При порівнянні R_{S1} і R_{S2} спостерігалися розбіжності. Це пов'язано з тим, що R_{S2} , який було розраховано за аналітичними виразами, розглядає ідеальний SE без омічних втрат. Тобто вони дорівнюють нулю. А в реальних SE розрахунки R_s враховують шарові і контактні опори, товщину шару та матеріал контакту. Таким чином, отримані результати R_{S1} різняться з результатами розрахованими за прямим аналітичним методом. Вони виявили достатньо високий контактний опір для структур Al/PcAl/por-Si/n-Si/p-Si/p⁺-Si/ITO, що пояснюється створенням додаткового мережевого наноструктурованого контакту. Для зменшення контактної опору і затінення фронтальною контактною мережею поверхні SE пропонується, у якості технологічної новачки, змінити основний контакт з Al на контакти ZnO, леговані Al з концентрацією $0,95 \cdot 10^{-20} - 1 \cdot 10^{-20} \text{ см}^{-3}$. Рівень легування обумовлений тим, що легування з концентрацією вище $1 \cdot 10^{-20} \text{ см}^{-3}$ неможливе через межу розчинності алюмінію в оксиді цинку в твердому стані, а концентрація нижче $0,95 \cdot 10^{-20} \text{ см}^{-3}$ не забезпечує достатньо високої провідності. Такі контакти є прозорими і у видимій частині спектру пропускають близько 80 % сонячного випромінювання і їх технологічно не складно створювати на поверхні SE після операцій формування ПК і додаткового контактної шару з фталоціанінів.

Однак, методика визначення R_s має деякі обмеження. Слід звернути увагу на те, що в даному розрахунку не враховується тильний опір контактної шару. Все одно її можливо застосовувати при коригуванні значень R_s , які були розраховані за аналітичними виразами.

З табл. 3 бачимо, що основна доля R_s припадає на опір шару ПК, в той час як опір бази складає соті долі ома. Так як опір шару ПК перевищує опір бази в 600 разів. Даний факт пояснює, чому виробники рідко використовують дану технологію при створенні антивідбиттєвих шарів для кремнієвих SE.

Наступним за величиною становить тонкий легований поверхневий шар n-типу (перевищення над опором бази в 200 разів). Обидва ці шари взагалі будуть визначати повний опір структури.

Таким чином, необхідно зменшити опір цих шарів, а це можливо лише при зміні конструкції SE і розташуванні верхнього електрода. Також необхідно підвищити провідність збідненого шару ПК, який має високий питомий опір. Для цього необхідно мікропрофілювати його і створити на ньому суцільний контактний шар, що і було зроблено при формуванні структур Al/PcAl/por-Si/n-Si/p-Si/p⁺-Si/ITO і Cu/PcCu/por-Si/n-Si/p-Si/p⁺-Si/ITO. Але слід дотримуватись і вимог мінімального затінення поверхні SE, що вимагає формування електронно-діркових пар на світлочутливих ділянках. Річ у тім, що тільки їх кількість визначає рівень ефективності SE. Отже, фронтальний електрод повинен забезпечити мінімальний шлях для носіїв струму в ПК і шарі n-типу. Тому на робочу поверхню SE треба наносити додаткові наноструктуровані контакти, що з'єднані з основним верхнім електродом. До переваг даних технологічних особливостей слід назвати зменшення тильного опору. Це стало можливим при використанні низькоомного р-типу Si (до 0,1 Ом), що володіє малим часом життя неосновних носіїв заряду. Хоча даний матеріал не рекомендується впроваджувати в структуру SE, що мали лише основну контактну мережу.

Однак при цьому повинні збігатись розглянені вище умови. При яких додатковий контакт має забезпечувати найвигідніші умови протікання струму і займати під контакт як можливо найменшу робочу поверхню SE, що і було здійснено в даній роботі. До переваг таких структур відноситься суттєве зменшення основного контакту за рахунок наноструктурованого додаткового контакту. Так як для сучасних структур основний контакт би займав не більше 5 % поверхні. А при формуванні додаткової контактної мережі площа основного контакту менша. Результати по затіненню контактною мережею поверхні структур SE наведено в табл. 4.

Виходячи з даних табл. 4 результати по затіненню можна вважати адитивними. Так як рівень затінення поверхні сучасних кремнієвих монокристалічних SE визначається товщиною контактної мережі, що повинна бути близько 5 мкм і затінення контактних пальців повинно не перевищувати 5 %. При цьому загальна площа затінення структур, які були виготовлені в даній роботі, не перевищує 1 % від площі SE.

Дослідження омічних втрат SE. Так як R_s включено послідовно з опором навантаження R_n . Тому частина ЕРС, що виробляється SE буде втрачатись на ньому. Таким чином втрати напруги будуть дорівнювати за формулою:

$$\Delta U = I_n R_s. \quad (3)$$

Максимальні втрати напруги спостерігаються в режимі короткого замкнення при якому R_n дорівнює нулю і розраховується за формулою:

$$\Delta U_{\text{max}} = I_{k,3} R_s. \quad (4)$$

Таблиця 4 – Затінення контактною мережею поверхні СЕ

№	Тип структури	Площа СЕ S, мм ²	Площа затінення S _з , мм ²		Загальна площа затінення S _з , мм ²	Площа затінення в % до площі СЕ		Загальна площа затінення в % до площі СЕ S _{з%}
			Основна мережа S _{з1}	Додаткова мережа S _{з2}		Основна мережа S _{з%1}	Додаткова мережа S _{з%2}	
1	Al/n ⁺ -Si/p-Si/p ⁺ -Si/ITO	5,1	0,045	-	0,045003	0,8824	-	0,8824
2	Al/por-Si/n-Si/p-Si/p ⁺ -Si/ITO	5,1	0,045	-	0,045003	0,8824	-	0,8824
3	Al/PcAl/por-Si/n-Si/p-Si/p ⁺ -Si/ITO	5,1	0,045	5,3874·10 ⁻⁰⁶	0,045005	0,8824	1,0564·10 ⁻⁰⁶	0,8825
4	Cu/n ⁺ -Si/p-Si/p ⁺ -Si/Al	5,1	0,045	-	0,045003	0,8824	-	0,8824
5	Cu/por-Si/n-Si/p-Si/p ⁺ -Si/ITO	5,1	0,045	-	0,045003	0,8824	-	0,8824
6	Cu/PcCu/por-Si/n-Si/p-Si/p ⁺ -Si/ITO	5,1	0,045	3,4054·10 ⁻⁰⁶	0,045003	0,8824	6,6773·10 ⁻⁰⁷	0,88242

Таблиця 5 – Аналіз омичних втрат

№	Тип структури	Омичні втрати за напругою, ΔU ₁	Омичні втрати за напругою, ΔU ₂	Омичні втрати за струмом, I _{ш1}	Максимальні омичні втрати в режимі короткого замкнення, ΔU _{m1}	Максимальні омичні втрати в режимі короткого замкнення, ΔU _{m2}
1	Al/PcAl/por-Si/n-Si/p-Si/p ⁺ -Si/ITO	66,4964	38,975	0,8923	73,6511	43,1701
2	Al/por-Si/n-Si/p-Si/p ⁺ -Si/ITO	39,698	41,872	0,528	44,278	46,704
3	Al/n-Si/p-Si/p ⁺ -Si/ITO	14,703	77,666	0,452	16,803	51,8396
4	Cu/PcCu/por-Si/n-Si/p-Si/p ⁺ -Si/ITO	41,0403	39,793	0,7323	44,177	42,8341
5	Cu/por-Si/n-Si/p-Si/p ⁺ -Si/ITO	32,114	34,916	0,421	41,559	45,186
6	Cu/n-Si/p-Si/p ⁺ -Si/ITO	18,958	35,205	0,331	17,153	44,594

Опір R_{sh} включено паралельно ланцюгу R_n – R_s і утворює втрати по струму I_{sh}, що знаходиться за формулою:

$$I_{sh} = \frac{U_{sh}}{R_{sh}} = \frac{(U_n + I_n R_s)}{R_{sh}} \quad (5)$$

Результати розрахунків омичних втрат для R_{s2}, визначеного за аналітичними виразами та емпіричними даними R_{s1} представлено в табл. 5.

Виходячи з табл. 5 найбільші омичні втрати за напругою мають структури з додатковим контактним шаром, що пояснюється значною складовою контактного опору в повному опорі СЕ. Величини омичних втрат за струмом малі, що пояснюється значними значеннями R_s.

Спостерігаємо закономірність, що чим більше величина R_s СЕ, тим більше буде падіння напруги на ньому. Тобто більші омичні втрати за напругою.

Вплив внутрішніх омичних опорів на форму ВАХ. Окрім впливу геометрії фронтального струмомоз'ємного електроду і поліпшення конструкції СЕ на характеристики - R_s і омичні втрати необхідно розглянути зміни форми навантажувальної ВАХ СЕ при дії внутрішнього опору. Так як ВАХ СЕ буде близьким до реальної форми ВАХ СЕ тільки в тому випадку, коли падіння напруги на опорі (1/3)·R_{шар} не перевищують $\frac{AkT}{q}$ (умову малого параметра) [4].

Точні розрахунки розкриють головну особливість навантажувальної ВАХ СЕ з розподіленими

параметрами в порівнянні з ВАХ СЕ з послідовним опором – сглаженість перегину між горизонтальним і похилим ділянками кривої. Але ж саме на перегині розташовується точка оптимального навантаження, від правильного визначення положення якої залежить точність розрахунків вихідної електричної потужності і ККД СЕ. Тобто ККД в зв'язку зі впливом внутрішнього опору буде змінено і наведені нові дані, що буде розглянено далі.

Однак для вирішення задачі про вплив внутрішніх омичних втрат на форму ВАХ СЕ застосовуються декілька підходів. Перший полягає в максимальному спрощенні задачі за яким еквівалентна схема СЕ складається з зосередженого діода і ефективного послідовного опору. Другий підхід полягає в вирішенні задачі в чисельному вигляді за допомогою персональної електронної обчислювальної машини. Третій шлях є проміжним між першими двома так як дозволяє застосування кусочно-лінійної апроксимації (КЛА) ВАХ діодів в окремих ланках еквівалентної схеми. Перевагами даного підходу слід назвати виявлення закономірностей формоутворення навантажувальних ВАХ СЕ в умовах розподілених внутрішніх омичних втрат.

Згідно методики КЛА визначення координат крапок навантажувальної ВАХ виявляється за формулами [4]:

$$I_{n1} = \frac{I_{ph}}{3} \left(1 + \frac{2+a}{1+3a+a^2} \right),$$

$$U_{н1} = U_{x,x} - \frac{2AkT}{q} - \left(\frac{R_{шар}}{6} + R_k\right) \cdot I_{н1},$$

$$I_{н2} = \frac{I_{ph}}{3} \left(2 + \frac{1}{1+a}\right),$$

$$U_{н2} = U_{xx} - \frac{2AkT}{q} - \left(\frac{R_{шар}}{6} + R_k\right) \cdot I_{н2} + \left(\frac{R_{шар}}{9}\right) \cdot I_{ph},$$

$$I_{н3} = I_{ph}, \quad I = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{U + IR_s}{n\phi_T}\right) - 1 \right] - \frac{U + IR_s}{R_{sh}},$$

де $a = \frac{1}{9} \cdot \frac{q \cdot I_{ph} \cdot R_{шар}}{2AkT}$.

Режиму холостого ходу відповідає початок координат, а режиму короткого замкнення – крапки, що мають абсцису $U = U_{xx}$.

Проілюструємо результати розрахунків і порівняємо їх з експериментальними даними, уточнемо максимальні значення напруги та струму для кожної структури СЕ (рис. 6, 7).

На зображенні рис. 6 криві б, г, е зображують навантажувальну ВАХ СЕ, отриману при вимірюваннях струму і напруги автоматизованим пристроєм для визначення параметрів ФЕП, а криві а, в, д – навантажувальну ВАХ СЕ за омічних втрат при розрахунку за методикою, заснованою на КЛА.

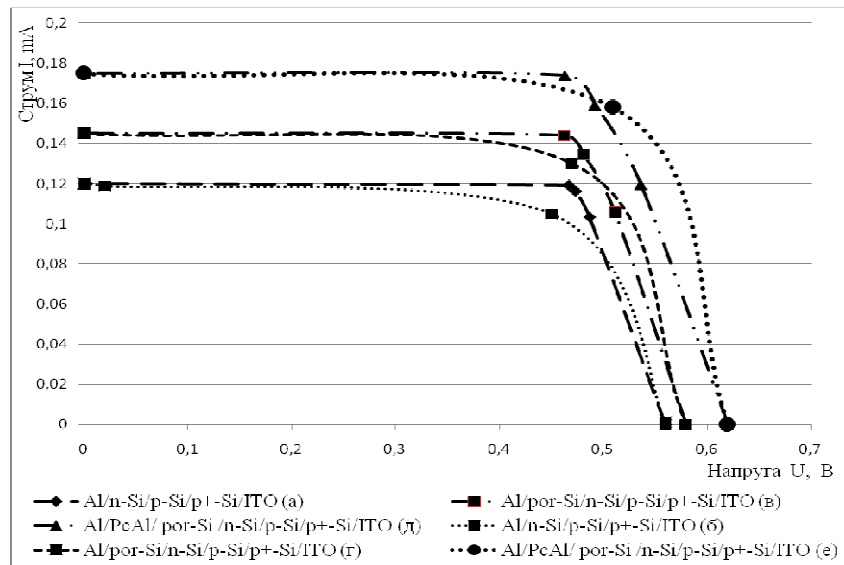


Рисунок 6 – Побудова навантажувальної ВАХ кремнієвих монокристалічних СЕ з Al контактами на фронтальній стороні із різною структурою по КЛА (а, в, д) і її порівняння з експериментальними ВАХ (б, г, е)

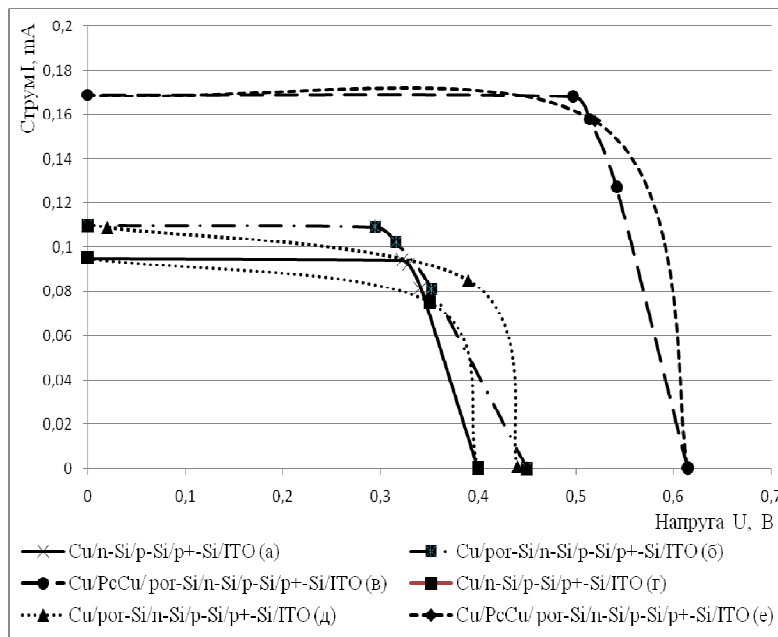


Рисунок 7 – Побудова навантажувальної ВАХ кремнієвих монокристалічних СЕ з Cu контактами на фронтальній стороні із різною структурою по КЛА (а, б, в) і її порівняння з експериментальними ВАХ (г, д, е)

З рис. 6 і 7 бачимо, що криві розраховані за КЛА мають кращі значення. Це пояснюється тим, що в розрахунках не враховується тильний контактний опір структури (опір металізації і опір розтікання тильного електрода).

Зареєстровано, що навантажувальні ВАХ є лініями з одним зломом. Також бачимо, що розрахунок по багатоланковій еквівалентній схемі навіть при малому числі ланок забезпечує отримання форми навантажувальної ВАХ зі згладженим перегином. При цьому форма ВАХ, що отримана при побудові за КЛА враховує розподілені омичні втрати – шарові і контактні опори СЕ, які було знайдено експіричними методами.

Аналізуючи отримані дані бачимо, що U_{xx} освітленого прилада з омичними втратами співпадає зі значеннями U_{xx} СЕ, що був розрахований за методом КЛА. Однак не співпадає з напругою на р-п переході при пропущенні крізь нього прямого струму, що дорівнює по величині фотоструму ($I_n = I_{ph}$). Отже, побудова ВАХ р-п переходу реального СЕ включає похибки пов'язані з омичними втратами. Та на моделі кусочно-лінійної апроксимації і експериментальних даних встановлені відхилення форми

ВАХ приладів, що характеризуються підвищенням значень послідовного опору R_s .

Вплив внутрішніх опорів на ККД СЕ. Так як однією з причин, що відрізняють ККД реального СЕ від значень, які розраховуються теоретично є внутрішні омичні втрати. При цьому слід зазначити, що тильний контакт і втрати на ньому не розглядалися. Таким чином, можливо розрахувати їх виходячи зі значень ККД. І проаналізувати їх значення в які входить опір тильного контакту, а також опір розтікання струму тильного контакту.

Тому виходячи зі змін значень максимумів напруги і струму були знайдені ККД СЕ, що враховують вплив внутрішніх омичних втрат на форму ВАХ СЕ в табл. 6.

В ході роботи досліджено вплив тильного контактного опору (ІТО шару) на значення ККД. Який для СЕ з основним і додатковим наноструктурованим контактним шаром з Al на АВП з ПК становить 0,5 %, з Cu – 2,21 %. Структури з основним контактом на АВП з Al мали зміни тильного контактного опору на 8,81 %, з Cu – 3,19 %. Стандартні СЕ без АВП з Al контактами мали вплив у розмірі 15,02 %, з Cu – 13,42 %.

Таблиця 6 – Коригування значень ККД СЕ

№	Тип структури	I_{ϕ}	U_{m1}	I_{m1}	ККД ₁	U_{m2}	I_{m2}	ККД ₂	Δ ККД	% ККД	$\Delta\%$ ККД
1	Al/n ⁺ -Si/p-Si/p ⁺ -Si/Al	0,120085	0,450	0,105	9,265	0,466921	0,119085	10,90257	-1,6376	0,8498	0,1502
2	Al/por-Si/n-Si/p-Si/p ⁺ -Si/ITO	0,145082	0,470	0,130	11,9	0,461887	0,144082	13,04897	-1,1489	0,912	0,0881
3	Al/PcAl/por-Si/n-Si/p-Si/p ⁺ -Si/ITO	0,175074	0,510	0,158	15,8	0,46316	0,174074	15,80861	-0,0086	0,9995	0,0005
4	Cu/n ⁺ -Si/p-Si/p ⁺ -Si/Al	0,095037	0,350	0,075	5,15	0,322604	0,094037	5,948341	-0,7983	0,866	0,1342
5	Cu/por-Si/n-Si/p-Si/p ⁺ -Si/ITO	0,110043	0,390	0,085	6,5	0,294603	0,109043	6,298919	0,20108	1,032	-0,0319
6	Cu/PcCu/por-Si/n-Si/p-Si/p ⁺ -Si/ITO	0,169047	0,520	0,157	16,01	0,496864	0,168047	16,37191	-0,3619	0,9778	0,0221

Таким чином виявлено, що послідовний опір R_{s1} розрахований за методом малого параметра в 2 рази перевищує значення, отримані за аналітичними виразами для структури Al/PcAl/por-Si/n-Si/p-Si/p⁺-Si/ITO. Для структур Al/n⁺-Si/p-Si/p⁺-Si/Al і Cu/n⁺-Si/p-Si/p⁺-Si/Al R_{s1} відрізняється в 3 рази, що пов'язано з неврахованими оптичними і рекомбінаційними втратами.

ВИСНОВКИ.

1. Удосконалено технологію виготовлення СЕ шляхом впровадження способу виготовлення контактного шару на антивідбиттевому покритті СЕ, що включає електрохімічне травлення на лицьовій стороні кремнієвої підкладки для утворення АВП і нанесення контактної мережі. Який полягає в тому, що після електрохімічного травлення підкладку просушують і наносять PcCu або PcAl, після цього сушать протягом не більше 2 годин, відпалюють при температурах 250 – 300°C на повітрі впродовж 5 – 10 хвилин. Слід зауважити, що PcCu використовується, як розчинник 1 г очищеного PcCu у C₃H₆O : H₂O = 20:30 ваг. ч., а PcAl – як розчин 1 г очищеного PcAl у C₂H₅OH:H₂O = 30:20 ваг. ч.

2. Вперше розроблені СЕ з АВП на основі ПК з додатковим контактним шаром з органічного напівпровідника PcCu і PcAl - бар'єрні структури Cu/PcCu/ПК/ n-Si/p-Si/p⁺-Si/ITO і Al/PcAl/ПК/n-Si/p-Si/p⁺-Si/ITO з ККД 16,01 % і 15,8 %, фактором заповнення 0,79 і 0,74 відповідно та затіненням контактної мережею, що не перевищує 1 %.

3. Уточнено наукові дані про порядок величин послідовного опору СЕ, які підтверджують перевищення опору ПК і n-шару над опором бази в 600 і 200 разів.

4. Вперше на структурах Cu/PcCu/por-Si/n-Si/p-Si/p⁺-Si/ITO встановлено, що завдяки додатковому контактному шару з PcCu знижені значення послідовного опору на 25 %.

5. Вперше на моделі кусочно-лінійної апроксимації і експериментальних даних встановлені відхилення форми ВАХ приладів, що характеризуються підвищенням значень послідовного опору R_s , внаслідок дії внутрішніх омичних опорів – шарових опорів і опорів металізації фронтального струмом'ємного електрода.

6. Доповнені наукові дані про вплив тильної контактної металізації з ІТО-шару на ККД приладів, які: для СЕ з основним і додатковим наноструктурованим контактним шаром з АІ на АВП з ПК становили 0,5 %, з Сu – 2,21 %; для структур з основним контактом на АВП з АІ – 8,81 %, з Сu – 3,19 %; для стандартних СЕ без АВП з АІ контактами мали вплив у розмірі 15,02 %, з Сu – 13,42 %.

Автори роботи щиро вдячні за надані кошти гранту Президента України для обдарованої молоді на 2008 р. за проектом "Створення тонких плівко для сонячних батарей на основі дешевих органічних напівпровідників з високим рівнем коефіцієнта корисної дії".

ЛІТЕРАТУРА

1. Алферов Ж.И., Андреев В.М., Румянцев В.Д. Тенденции и перспективы развития солнечной фотоэнергетики // Физика и техника полупроводников. – Санкт – Петербург: Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН, 2004. – Т. 38. – Вып. 8. – С. 937–948.
2. Єрохов В.Ю., Селемонавічус А.А. Макропористі структури в кремнієвих фотоперетворювачах сонячної енергії // Науковий вісник КУЕІТУ: Нові технології. – Кременчук: КУЕІТУ, 2008. – № 2(20). – С. 238–242.
3. Cheng C.L., Liu C.W., Jeng J.T. Fabrication and characterizations of black hybrid silicon nanomaterials as light-trapping textures for silicon solar cells // Journal of the Electrochemical Society. – 2009. – V. 156 (5). – P. H356 – H360.
4. Оксанич А.П., Притчин С.Э. Усовершенствование технологии отжига слитков и подложек арсенида галлия для изделий микро, наноэлектроники и фотовольтаики // Вісник Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського. – 2013. – Вип. 2/2013 (79). – С. 14–20.
5. Андреев В.М., Грилихес В.А., Румянцев В.Д. Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения. – Л.: Наука, 1989. – 310 с.
6. Зубко Є.І., Швець Є.Я. Сучасний стан розвитку технологій багатокомпонентних композицій на основі пористого кремнію // Металургія: наукові праці ЗДІА. – Запоріжжя: ЗДІА, 2014. – Вип. 1(29). – С. 155–165.
7. Швець Є.Я., Хрипко С.Л., Зубко Е.И. Исследование методов в расчетах параметров солнечных элементов // Радиоэлектроника. Известия вузов. – Киев: КПИ, 2009. – Т. 52. – № 1–2. – С. 26–36.
8. Ефимов В.П. Фотопреобразователи энергии солнечного излучения нового поколения // Физика и техника полупроводников. – Санкт – Петербург: Физико – технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН, 2010. – Т. 8. – Вып. 2. – С. 110–115.
9. Зубко Є.І. Вплив фотоанодування на морфологію та електрофізичні властивості шарів пористого кремнію, модифікованих НСІ і НВг // Металургія: наукові праці ЗДІА. – Запоріжжя: ЗДІА, 2012. – Вип.1(26). – С. 117–120.
10. Каганович Э.Б., Манойлов Э.Г., Свечников С.В. Фотоэлектрические свойства структур на основе нанокристаллического кремния: препринт. – Киев: Институт физики полупроводников НАН Украины, 1999. – 57 с.
11. Simon J., Andre J. Molecular semiconductors. Under edition Lehn J.M., Rees C.W. - Berlin: Springer-Verlag, 1985 – 344 p.

DEVELOPMENT OF FORMATION TECHNOLOGY OF PHOTO-ELECTRIC CONVERTERS CU/PCCU/POR-SI/N-SI/P-SI/P⁺-SI/ITO AND AL/PCAL/POR-SI/N-SI/P-SI/P⁺-SI/ITO AND RESEARCH OF THEIR PARAMETERS

E. Zubko, E. Shvets

Zaporozhye state engineering academy

vul. Dobrolyubova, 22, Zaporozhye, 69000, Ukraine. E-mail: evgeniya-zubko@mail.ru

O. Chorniy

Kremenchug Mykhailo Ostrohradskyi National University

vul. Pervomayskaya, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: evgeniya-zubko@mail.ru

Purpose. To develop the technological bases of manufacturing and research of electric parameters of single-crystal solar elements structures Cu/PcCu/por-Si/n-Si/p-Si/p⁺-Si/ITO and Al/PcAl/por-Si/n-Si/p-Si/p⁺-Si/ITO. **Methodology.** We have applied methods of calculation of small parameter of consecutive resistance of experimental results and partially - linear approximation for definition of influence of internal ohmic losses on the form of volt-ampere characteristic. We correlated modelled result with the experimental data received by means of measurement volt-ampere characteristic of structures of the solar elements. **Results.** Production technology of single-crystal solar elements was improved by introduction of a contact layer on antireflective coating and were created barrier structures of Cu/PcCu/por-Si/n-Si/p-Si/p⁺-Si/ITO and Al/PcAl/por-Si/n-Si/p-Si/p⁺-Si/ITO with efficiency of 16,01 % and 15,8 % (the factor of filling 0,79 and 0,74). Introduction of an additional PcCu contact layer in structure of Cu/PcCu/por-Si/n-Si/p-Si/p⁺-Si/ITO reduces value of consecutive resistance to 25 %. The contribution of values of the consecutive resistance of SE is measured, which confirms excess of resistance of the porous silicon and the n-layer over resistance of base in 600 and 200 times. Deviations of the form of volt-ampere characteristics of devices are determined with model of partial-linear approximation. **Originality.** For the first time, we have carried out the integrated research of the single-crystal solar elements improved by introduction of a contact layer on antireflective coating and it were created barrier structures of Cu/PcCu/por-Si/n-Si/p-Si/p⁺-Si/ITO and Al/PcAl/por-Si/n-Si/p-Si/p⁺-Si/ITO. **Practical value.** We have a

way of manufacturing of a contact layer on the antireflective layer on the basis of porous silicon of a solar element. The given solar elements are introduced on manufacture. References 11, tables 6, figures 7.

Key words: single-crystal solar cell, electric parametres, consecutive resistance, antireflective coating, phtalocianin copper, phtalocianin aluminium.

REFERENCES

1. Alferov, Zh.I., Andreev, V.M., Rumjancev, V. D. (2004), "Tendencies and prospects of development of solar photopower", *Physics and technics of semiconductors*, vol. 38, no. 8, pp. 937–948.
2. Yerokhov, V.Yu., Selemonavicus, A.A. (2008), "Macroporous structures in silicon solar cells solar energy", *Scientific Bulletin of the Kremenchug University of Economics and information technologies: New technologies.*, vol. 2(20), pp. 238–242.
3. Cheng, C.L., Liu, C.W., Jeng, J.T. (2009), "Fabrication and characterizations of black hybrid silicon nanomaterials as light-trapping textures for silicon solar cells", *Journal of the Electrochemical Society*, vol. 156 (5), pp. H356–H360.
4. Oksanych, A. P., Pritchyn, S. E. (2013), "Improvement of the technology of annealing of ingots and wafers of gallium arsenide to the products of micro, nanoelectronics and photovoltaics", *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, vol. 2(79), pp. 14–20.
5. Andreev, V.M., Grilihes, V.A., Rumjantsev, V.D. (1989), *Fotoelektricheskoe preobrazovanie koncentrirovannogo solnechnogo izluchenia* [Photoelectric transformation of the concentrated sunlight], Science, Leningrad, Russia.
6. Zubko, E.I., Shvets, E. Ja (2014), "Modern a condition of development of technologies many compo-
mental compositions on the basis of porous silicon", *Metallurgy: proceedings Zaporozhye state engineering academy*, vol. 1 (29), pp. 155–165.
7. Shvets, E.Ja., Hripko, S.L., Zubko, E.I. (2009), "Research of methods in calculations of parametres of solar elements", *Radio electronics. News of high schools*, vol. 52, no. 1–2, pp. 26–36.
8. Yefimov, V.P. (2010), "Fotopreobrazovateli of energy of a sunlight of new generation", *Physics and technics of semiconductors*, vol. 8, no. 2, pp. 110–115.
9. Zubko, E.I. (2012), "Effect of photoanodizing on morphology and physical properties of layers of the porous silicon modified HCl and HBr", *Metallurgy: proceedings Zaporozhye state engineering academy*, vol. 1 (26), pp.117–120.
10. Kaganovich, Je. B., Manojlov, Je.G., Svechnikov, S.V. (1999), *Fotoelektricheskie svojstva struktur na osnove nanokristallicheskogo kremnija: preprint* [Photo-electric properties of structures on a basis of nanocrystal silicon: a preprint], Institute of physics of semiconductors NAN of Ukraine, Kiev, Ukraine.
11. Simon J., Andre J.J. (1985) *Molecular semiconductors*, Springer-Verlag, Berlin, Germany.

Стаття надійшла 3.08.2015.