

## КЕРУВАННЯ ЯКІСТЮ КОНТАКТІВ КОМПОНЕНТІВ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РЕЗО

*Розглянуто застосування методики керування параметрами кремнієвих фотоелектричних перетворювачів на підставі аналізу комплексного параметра якості і надійності для випадку вибору раціональних режимів формування контактної металізації мультикремнієвих фотоперетворювачів. Отриманні результати можуть бути використані при розробці чи удосконаленні технології виробництва моно- та мультикремнієвих фотоперетворювачів, що входять до складу фотоелектричних систем живлення радіоелектронних засобів озброєння, для підвищення їх надійності.*

**Ключові слова:** радіоелектронні засоби озброєння, фотоелектричні перетворювачі, контактна металізація, комплексний параметр якості і надійності

*Application of a technique of management in parameters of silicon photo-electric converters on the basis of the analysis of complex parametre of quality and reliability for a case of a choice of rational modes of formation of contact metallization of multi silicon photoconverters is considered. Reception results can be used by working out or improvement mono- and multi silicon photoconverters which are a part of photo-electric power supply systems of radio-electronic means of arms, for increase of their reliability.*

**Keywords:** radio-electronic means of arms, photo-electric converters, contact metallization, complex parametre of quality and reliability.

**Вступ.** Функціонування елементної бази сучасних та перспективних радіоелектронних засобів озброєння (РЕЗО) потребує використання надійних та довговічних джерел енергозабезпечення. Можливо виділити такі найбільш важливі напрямки застосування систем енергозабезпечення РЕЗО: основне та резервне енергозабезпечення навігаційних, радіо- та телекомунікаційних систем воєнного призначення; резервне живлення електрообладнання військової техніки та мобільної радіоелектронної апаратури; енергозабезпечення об'єктів та апаратури, що працюють в автономному режимі; енергозабезпечення космічних апаратів та перспективних засобів озброєння. Але для деяких спеціальних задач традиційні рішення є малоефективними, тому для їх вирішення все частіше використовуються альтернативні системи енергозабезпечення. При необхідності забезпечення безперервної боєздатності на протязі 25-30 років одними з найбільш доступних та довговічних джерел живлення є фотоелектричні батареї (ФБ) [1].

Фотоелектрична батарея є сукупністю зєднаних за попередньо розрахованою електричною схемою фотоелектричних перетворювачів (ФЕП), що герметично встановлені в механічно стійкий корпус з прозорою робочою поверхнею. Принцип дії ФБ полягає у безпосередньому перетворенні енергії падаючого сонячного випромінення в електричну енергію завдяки ефекту генерації носіїв заряду під впливом фотонів світла. Не-

обхідні вихідні параметри такі як робоча напруга та струм отримуються завдяки відповідній комутації ФЕП, що входять до складу батареї. Серед факторів, що обумовлюють якість фотоелектричних батарей одне з найважливіших місць посідає надійність зєднання фотоелектричних перетворювачів і відповідно – надійність їх контактної металізації.

Аналіз науково-технічної інформації показав, що на сьогодні немає відповідних методик, які б дозволили оперативно та достовірно прогнозувати надійність контактів ФЕП, що використовуються у складі фотоелектричних джерел живлення РЕЗО. Саме тому було запропоновано розглянути можливість застосування методики оцінки рівня якості і надійності фотоелектричних перетворювачів та керування параметрами ФЕП [2] для отримання заданих параметрів контактної металізації у процесі їх виготовлення. У роботі [2] було запропоновано використання комплексного параметру Q, що дозволяє обґрунтовано керувати параметрами кремнієвих фотоелектричних перетворювачів на кожному з етапів їх виробництва. При цьому діагностика рівня і характеру дефектності ФЕП заснована на аналізі інформативних параметрів якості і надійності та виконується за допомогою сукупності методів, класифікація яких наведена на рис. 1.



Рис. 1. Класифікація методів діагностики якості і надійності ФЕП

Розглянемо основні підходи до діагностики якості контактів ФЕП. Для отримання високої якості контактної металізації найбільш критичним є технологічний процес термічної обробки нанесених провідних паст [1]. Але теоретичний розрахунок його режимів ускладнюється необхідністю керувати двома незалежними процесами формування лицьового та тильного контактів. Тому при виборі параметрів технологічного процесу враховуються наступні фактори:

1. Перехідний опір  $R_k$  ФЕП залежить від глибини емітерного  $n^+p$ -переходу, концентрації домішок в  $n^+$ - та  $p$ -областях, а також від конструкції лицьового омичного контакту [4].

2. Для досягнення мінімального значення перехідного опору фронт срібла має пропалити антивідбиваюче покриття (АВП), шар фосфорно-силікатного скла (ФСС), вирощеного під час формування мілкового  $n^+p$ -переходу, та проникнути в емітерну область (рис. 2.). В той же час при досягненні сріблом збідненого шару рекомбінація в останньому різко зростає [5]. Таким чином, для отримання якісного лицьового контакту ФЕП необхідно, щоб при вжиганні паст виповнювалося наступне співвідношення:

$$d_{\text{АВП}} + d_{\text{ФСС}} < L_{\text{Ag}} < d_{\text{АВП}} + d_{\text{ФСС}} + (x_j - W_n), \quad (1)$$

де  $d_{\text{АВП}}$  – товщина антивідбиваючого покриття;  $d_{\text{ФСС}}$  – товщина шару фосфорно-силікатного скла;  $L_{\text{Ag}}$  – глибина проникнення срібла;  $x_j$  – глибина емітерного  $n^+p$ -переходу;  $W_n$  – ширина збідненого шару в  $n^+$ -області.

3. В силу текстурування поверхні кремнієвих пластин товщина АВП та товщина ФСС не є сталими. Також не є постійною глибина залягання  $n+p$ -переходу в силу анізотропного характеру дифузії домішок в кремнії з текстурованою поверхнею [6]. Тому припуски на значення  $L_{\text{Ag}}$  різко зменшуються у порівнянні з плоскою на мікроскопічному рівні поверхнею, що в свою чергу звужує допустимий діапазон температур вжигання. Таким чином, через складний характер поверхні неможливо провести розрахунок параметрів вжигання паст при заданих значеннях  $x_j$ ,  $d_{\text{ФСС}}$  та  $d_{\text{АВП}}$ .

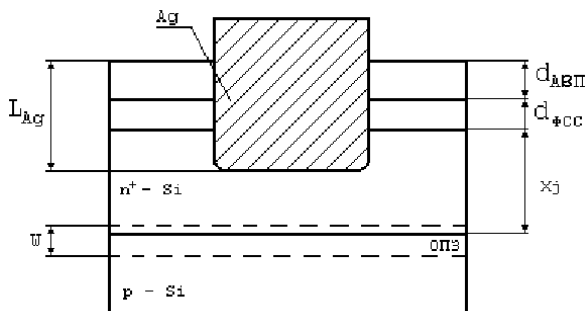


Рис. 2. Фрагмент конструкції ФЕП в області лицьового контакту

4. Через те, що під час дифузії фосфору пластини можуть розміщуватися по дві в пазах кварцової касети, то на тильній стороні будуть спостерігатися ділянки ФСС по краям пластин. Для формування ізотипного  $p+p$ -переходу за термін вжигання алюміній має проникти крізь ФСС на тильній стороні та перекомпенсувати  $n^+$ -шар (рис. 3.).

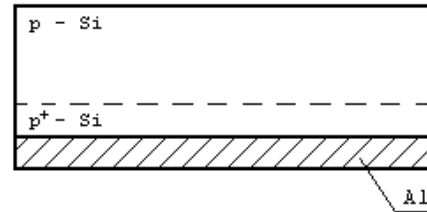


Рис. 3. Фрагмент конструкції ФЕП в області тильного контакту

Проведені дослідження показали, що найбільш інформативним параметром, що дозволяє оперативно оцінити раціональність вибраного режиму вжигання тильної металізації, є фото-е.р.с., виміряна за допомогою методики "світлового зонду". Принципова схема вимірів наведена на рис. 4 та полягає у скануванні фото-е.р.с. по поверхні ФЕП за допомогою вольфрамового щупу з одночасним освітленням малої ділянки поверхні направленим пучком світла (НПС) заданої інтенсивності. Розміри освітленої ділянки поверхні на практиці не перевищують 2-3 мм.

Розглянемо випадок, коли дифузія фосфору проводилася з розташуванням кремнієвих пластин по дві в пазах кварцових касет. При цьому на тильній стороні пластин формується нерівномірний по глибині  $p-n$  перехід, що вкритий тонким шаром збагаченого фосфором окису. У випадку недостатнього термічного впливу алюміній на тильній стороні ФЕП під час вжигання не встигає пройти крізь цей окис та компенсувати  $n$ -шар по всій поверхні фотоперетворювача. При цьому еквівалентна електрична схема фотоперетворювача в таких областях являє собою два зустрічних діоди (рис. 5) і фото-е.р.с. дорівнює нулю. Але якщо термічний вплив достатній для пропалювання окису, то з'являється можливість виміру фото-е.р.с., значення якої відрізняється від нуля і зростає при збільшенні глибини тильного  $p^+p$ -переходу.

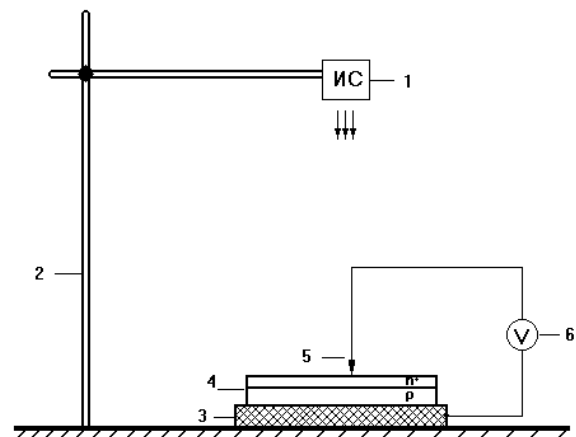
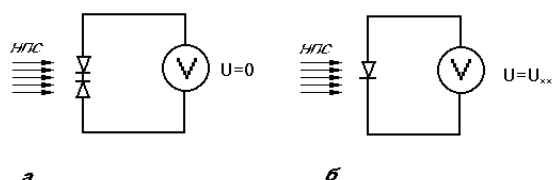


Рис. 4. Схема вимірювання фото-е.р.с. за допомогою "світлового зонду":

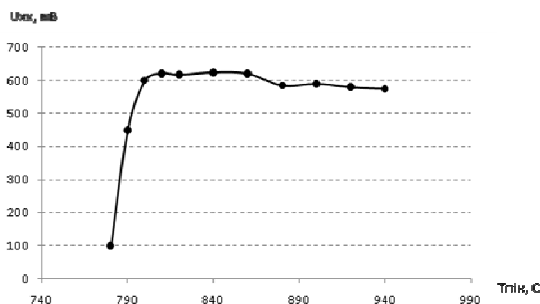
1 – джерело випромінювання; 2 – опора; 3 – провідний столик; 4 – досліджуваний фотоелектричний перетворювач; 5 – вольфрамовий щуп; 6 – прилад для вимірювання напруги



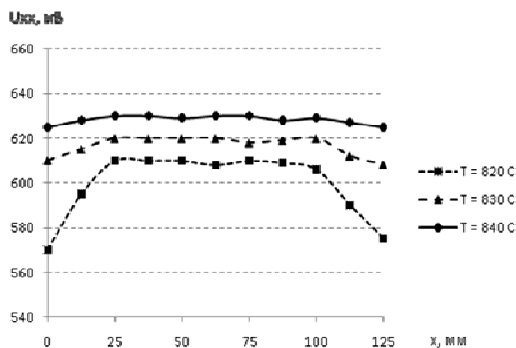
**Рис. 5.** Еквівалентні схеми ФЕП при наявності  $n$ -шару на тильній стороні (а) і при сформованому тильному  $p^+r$ -переході (б); НПС – направлений потік світла

Дослідження залежності напруги холостого ходу від режимів вжигання показало, що при  $T_{пик} < +780$  °С напруга холостого ходу падає до значень менше 100 мВ (див. рис. 6). Це означає, що за термін термообробки при таких температурах алюміній не встигає пропалити залишки ФСС на тильній стороні та перекомпенсувати  $n^+$ -шар. При підвищенні температури від +810 до +860 °С спостерігається швидке зростання  $U_{ХХ}$  до значень 615...625 мВ. В цьому діапазоні починається появлення локальних ділянок, на яких відбувається перекомпенсація донорної домішки та формування тильного контакту. При пікових температурах +860...940 °С напруга холостого ходу досягає насичення, що свідчить про завершення процесу формування тильного контакту. Повторення експерименту при різному терміні вжигання показало, що залежність незначно зміщується в діапазоні температур  $\pm 10$  °С.

Досліджувався також геометричний розподіл  $U_{ХХ}$  по поверхні кремнієвих пластин в залежності від пікової температури вжигання (рис. 7). Аналіз експериментальних даних показав, що для отримання ізотипного  $p^+r$ -переходу по всій поверхні пластини оптимальними є пікові температури вжигання не менше +840 °С. При більш низьких температурах алюміній не встигає перекомпенсувати  $n^+$ -область на тильній поверхні, що приводить до зниження напруги холостого ходу по периметру пластини і негативно впливає на ефективність фотоперетворювання.



**Рис. 6.** Залежність напруги холостого ходу від пікової температури (термін вжигання при  $T > +600$  °С складає 10 с)



**Рис. 7.** Розподіл  $U_{ХХ}$  по одній з координат поверхні пластини при різних температурах вжигання

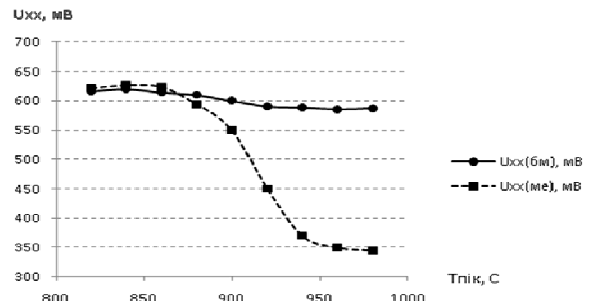
Остаточний вибір режимів вжигання проводився не тільки за допомогою вимірювання напруги холостого ходу, а також по електрофізичним характеристикам ФЕП (найбільш ефективному режиму вжигання відповідають максимальні значення струму короткого зами-

кання, коефіцієнта заповнення вольтамперної характеристики, а також ефективності ФЕП).

Розглянемо ще один випадок застосування цієї методики для керування режимами формування контактної металізації ФЕП. При використанні згаданого вище методу "світлового зонду" попередня оцінка режиму вжигання ґрунтується на порівнянні значень  $U_{ХХ}$ , виміряних при розташуванні щупу на фронтальному контакті, зі значеннями  $U_{ХХ}$ , виміряними при розташуванні щупу поза фронтальним контактом безпосередньо на поверхні кремнію. З підвищенням температури термообробки напруга холостого ходу, виміряна на фронтальному контакті, починає зменшуватися. Це пов'язано з тим, що фронт срібла досягає збідненого шару внаслідок чого  $U_{ХХ}$  різко зменшується. В той же час напруга холостого ходу, виміряна поза фронтальним контактом, залишається постійною.

Таким чином, оцінюючи різницю між значеннями  $U_{ХХ}$ , виміряних при розташуванні щупу на фронтальному контакті, зі значеннями  $U_{ХХ}$ , виміряними при розташуванні щупу поза фронтальним контактом, можна оцінити вибраний режим вжигання контактної металізації. У випадку, якщо вжигання фронтальної металізації здійснюється одночасно з тильною, то для попередньої оцінки технологічного процесу проводиться також аналіз параметра  $\delta U_{ХХ}$ .

Результати вимірів  $U_{ХХ}$  приведені на рис. 8. Як видно, при  $T_{пик} > +890$  °С значення напруги холостого ходу, виміряне на лицьовій металізації, починає знижуватися від 625 мВ до 350 мВ. В той же час напруга холостого ходу, виміряна між лицьовими контактами, залишається майже на сталому рівні. Це свідчить про те, що фронт срібла при таких температурах досягає збідненого шару та коротить електричний ланцюг.



**Рис. 8.** Залежність напруги холостого ходу від пікової температури вжигання:

- а)  $U_{ХХ(БМ)}$ , виміряне з зондом між лицьовими контактами;
- б)  $U_{ХХ(Ме)}$ , виміряне з зондом на лицьовому контакті

Запропонована автором комплексна методика в загальному випадку враховує не тільки  $U_{ХХ}$ , а базується на аналізі комплексного параметра якості і надійності ФЕП [2]:

$$Q = \frac{1}{5} \cdot (1 + 0,1 \cdot m + 5 \cdot 10^{-3} \cdot J'_{ЗВ} - 1,29 \cdot 10^{-3} \cdot U_{ХХ} + \delta J'_{ЗВ} + \delta U_{ХХ}), \quad (2)$$

де  $m$  – безрозмірний  $m$ -параметр, що враховує відхилення ВАХ від ідеалізованої кривої;  $J_{ЗВ}$  – щільність зворотного струму при сталому значенні зворотного напруги  $U_{ЗВ} = 5$  В;  $U_{ХХ}$  – напруга холостого ходу;  $\delta J_{ЗВ}$  та  $\delta U_{ХХ}$  – відносні відхилення між значеннями інформативних параметрів  $J_{ЗВ}$  та  $U_{ХХ}$ , що вимірюються у центрі напівпровідникової пластини, та значеннями, що вимірюються на її периферії.

За допомогою запропонованої методики керування параметрами фотоелектричних перетворювачів було проведено вдосконалення існуючого промислового технологічного процесу виготовлення мультикремнієвих ФЕП. По вдосконаленій технології виготовлені фотоперетворювачі з коефіцієнтом корисної дії в діапазоні від 15,8 до 16,3% (в умовах освітленості  $1 \text{ кВт/м}^2$ , повітряної маси  $\text{AM1,5}$  і температури  $+25^\circ\text{C}$ ). Комплексний параметр  $Q$  для партії виготовлених ФЕП склав  $0,02 \dots 0,05$ , що відповідає зменшенню потужності ФБ не більше ніж на 10% протягом 30 років експлуатації.

Отриманні результати можуть бути використані при розробці чи удосконаленні технології виробництва моно- та мультикремнієвих фотоперетворювачів, що входять до складу фотоелектричних систем живлення РЕЗО, для підвищення їх якості і надійності. Запропоновану методику можливо використовувати на всіх технологічних операціях виготовлення ФЕП.

УДК 621.315.59

М.М.Охрамович, ад'юнк

## АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ОПРОМІНЕННЯ ПОТОКОМ ШВИДКИХ ЕЛЕКТРОНІВ ТВЕРДОТІЛЬНИХ КРЕМНІЄВИХ ФЕП ДЛЯ ФЕСБ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

*У статті запропоновано методику опромінення швидкими електронами фотоелектричних перетворювачів для фотоелектричних сонячних батарей спеціального призначення. Вибрана доза і енергія опромінення, описані отримані результати дослідження.*

**Ключові слова:** фотоелектричний перетворювач, опромінення, швидкі електрони, фотоелектрична сонячна батарея, кремній.

*In the article the irradiation technique of fast electrons of photo-electric converters for photo-electric solar batteries of special purpose is offered. The dose and energy of the irradiation is chosen, the described results of research are received.*

**Keywords:** the photo-electric converter, an irradiation, fast electrons, the photo-electric solar battery, silicon

**Аналіз останніх досліджень та постановка проблеми.** Незважаючи на глобальний розвиток, який сьогодні переживає сонячна енергетика у всьому світі, багато питань досі залишаються нерозв'язаними або потребують більш глибокого вивчення. Одним із питань, що необхідно вирішити при впровадженні фотоелектричних сонячних батарей для енергозабезпечення радіоелектронних засобів озброєння (РЕЗО) при проведенні спеціальних операцій, є проблема підвищення якості і надійності кремнієвих фотоелектричних перетворювачів (ФЕП).

Важливим моментом є вирішення питання щодо зменшення впливу початкових дефектів напівпровідникового матеріалу та дефектів, що утворюються під час проведення технологічних операцій, на характеристики ФЕП.

До основних дефектів ФЕП відносяться агломерати точкових дефектів, дислокації та особливо їхні скупчення, планарні дефекти типу двійників, дефекти упакування, границі зерен, а також преципітати і мікрodefekти, що розташовані усередині зерен, також макроdefekти матеріалу тощо [1, 2]. Структурні дефекти істотно впливають на час життя носіїв заряду і питомий опір напівпровідникових матеріалів та приводять до зміни вольт-амперних характеристик ФЕП. Приведені дефекти викликають збільшення шунтуючих струмів, призводять до появи локального пробою  $p$ - $n$  переходу, стають причиною неоднорідності фронту дифузії домішок, обривів металізації та проколів окислу, що, в свою чергу, приводить до деградації ФЕП, а також до зниження відсотка виходу придатних виробів [4].

В даній статті описаний реальний експеримент впливу потоку швидких електронів на твердотільні кре-

1. Clean electricity from photovoltaics / by Mary D. Archer and Robert Hill. – Imperial College Press, London, 2001, 868 p. 2. Ленков С.В., Лукомський Д.В. Комплексний параметр якості та надійності кремнієвих фотоелектричних перетворювачів // Збірник наукових праць ВІП НТУУ "КПІ". – К. – 2005. – №1. – С. 81–89. 3. Ленков С.В., Лукомський Д.В., Монаков С.В., Зубарев В.В. Конструктивно-технологічні особливості високоефективних сонячних елементів космічного призначення // Національна Академія Оборони України. Труды Академії. – К.: – 2002. – №35. – С. 94–96. 4. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. – М.: Мир, 1984, т. 2. – 453 с. 5. Гаркавенко А.С., Зубарев В.В., Ленков С.В., Лукомський Д.В., Мокрицкий В.А. Новые лазерные методы, средства и технологии. – Одесса: Астропринт, 2002. – 280 с. 6. Spitzer M.B., Keavnay C.I., Geofray I.M. Theoretical and experimental consideration for high silicon solar cell performance // Solar Cells. –1986. – 17, №1. – pp. 135–149. 7. Лукомський Д.В. Вибір оптимального режиму вжигання металічних паст компанії ESL // Збірник наукових праць Одеського ордену Леніна інституту Сухопутних військ. – Одеса. – 2004. – №9. – С. 97–101.

Надійшла до редколегії 13.06.09р

мнієві пластини фотоелектричних сонячних батарей (ТП ФЕСБ).

**Видкал основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів.** Руйнівні фізико-технічні дослідження проведено з метою аналізу особливостей кристалевих кремнієвих структур, оцінки рівня дефектності, та впливу опромінення потоку швидких електронів високої енергії на ці характеристики [3,4].

Опромінення швидкими електронами ТПФЕСБ було проведено на лінійному прискорювачі "Електроніка" типу ЕЛУ-4 з наступними параметрами:

Енергія опромінення	$E=2,3 \div 2,7 \text{ MeV}$ ;
Доза	$\Phi=5 \cdot 10^{13} \div 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ ;
Потік опромінення	$D \approx 2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$
Тривалість опромінення	$t=83 \text{ хв}$ .

На рис. 1 представлена принципова схема лінійного прискорювача. Електромагнітні коливання НВЧ діапазону створюються генератором, до виходу якого приєднаний високочастотний тракт, що передає потужність у діафрагмований хвилевід. Генератор працює в імпульсному режимі, тому що для створення потрібної напруженості прискорюючого поля, його потужність повинна бути значною. Генератором імпульсів у ЕЛУ-4 є потужний імпульсний магнетрон.

Анодна напруга на генератор подається короткими імпульсами тривалістю до 3 мкс із заданою частотою посилок. Одночасна напруга подається і на інжектор, що вводить електрони в діафрагмований прискорюючий хвилевід. В результаті взаємодії пучка електронів, створеного трьохелектродною гарматою Пірса-інжектором, з електромагнітною хвилею НВЧ діапазону, що прискорює, на виході хвилеводу