

УДК 621.315

А.В. Гетьман, М.Г. Душейко, А.В. Іващук, М.С. Фадєєв, Ю.І. Якименко, д.-р.техн.наук
 Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,
 вул. Політехнічна, 16, каб.419, Київ, 03056, Україна.

Радіаційна стійкість кремнієвого фотоперетворювача

В даній роботі представлені результати розробки та проведення дослідження кремнієвих сонячних елементів космічного застосування. У сфері розробки енергосистем для космічних апаратів зараз активно розвиваються сонячні елементи на основі A^3B^5 багатопшарових структур, проте для невисоких орбіт 700 – 800 км, доцільним залишається застосування кремнієвих сонячних елементів.

Дослідження на радіаційну стійкість проводились на сонячних елементах із структурою $n^+ - p - p^+$. Кремнієві сонячні елементи піддавались опроміненню електронами з енергією 7MeV. Щільність потоку прискорених електронів складала $3,0E+8 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ в атмосфері. Накопичена доза радіації складала 100 крад (Si). Отримані результати порівнювались із попередніми експериментами проведеними в лабораторії. Бібл. 5, рис. 1, табл. 1.

Ключові слова: сонячний елемент; радіаційна стійкість; час життя носіїв заряду; кремнієва пластина.

Вступ

Один з найважливіших чинників розробки сонячних елементів космічного призначення полягає у покращенні їх радіаційної стійкості. Пошук нових матеріалів на основі структур A^3B^5 показав гарний результат у збільшенні ефективності та радіаційної стійкості сонячних елементів. Як показує практика досліджень (Росія, США, Франція) по деградації космічних сонячних батарей під дією радіаційного опромінення, ступінь деградації суттєво залежить від орбіти космічного апарату (КА).

Для низькоорбітальних КА (700 – 800км) деградація сонячних батарей на основі кремнію та гетероструктур A^3B^5 складає відповідно 15% та 5% протягом 5 років перебування КА на орбіті. Зростання попиту на малі КА для низьких орбіт з обмеженим терміном експлуатації, викликало зацікавленість до кремнієвих сонячних батарей (СБ), оскільки вони можуть забезпечити живлення таких КА.

Основними вимогами для сонячних елементів космічного призначення є висока ефективність та надійність. В роботі проведені дослідження впливу часу життя носіїв заряду на радіаційну стійкість. Основною причиною деградації фотоелектричних характеристик опроміненого ФЭП є зменшення часу життя неосновних носіїв (параметра τ), найбільш чутливого до дії радіації. Тому параметр часу життя неосновних носіїв заряду виражається, як інтегральна характеристика досконалості структури.[1-2]

Експеримент

Для дослідження були виготовлені структури кремнієвих фотоелектричних перетворювачів розміром $32 \times 32 \text{ мм}^2$, схематичний вигляд поперечного перетину яких зображено на рис. 1. Структури виготовлялись на пластинах кремнію р-типу провідності з опором 3-10 Ом·см і товщиною 200 мкм, поділених на три групи за часом життя: 2-5 мкс, 10-20 мкс та 30-40 мкс.

Вимірювання часу життя носіїв заряду кремнієвої пластини проводились на спеціалізованій установці WT-2000/2M.

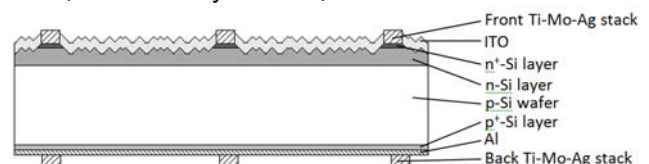


Рис. 1. Схематичне зображення перерізу фотоелектричної структури

Для формування тильного тягнучого поля була проведена дифузія бору з твердого джерела. Для покращення провідності струмомоз'ємної системи було сформовано суцільний високолегований шар n^+ методом дифузії фосфору з рідкого джерела. Наступним кроком було текстурування лицевої поверхні кремнію хімічним методом, при цьому повністю витравлювався високолегований шар, окрім областей під струмомоз'ємною мережею. Після цього проводилась дифузія фосфору для формування $p-n$ переходу. Дифузійні процеси проводились на дифузійній печі Centrotherm.

Наступним кроком було формування контактної металізації. На лицевій стороні металізація представляла собою стек Ti-Mo-Ag, нанесений методом вакуумного магнетронного розпилення та шар гальванічно дорощеного Ag до товщини 7-8 мкм. З тильної сторони металізація складалась з суцільного шару Al та стеку Ti-Mo-Ag з гальванічно дорощеним Ag, аналогічно до структури лицеві металізації. Така структура значно покращує стійкість контактної системи при термічній деградації елемента.

Після формування металізації для покращення оптичних характеристик було нанесено шар просвітлення ITO методом магнетронного розпилення.

Методика проведення випробовування на радіаційну стійкість

Для моделювання впливу факторів космічного середовища використовувалась установка прискорювання часток Microtron M-30.

Порядок калібрування, визначення похибок та дозиметрії визначались у відповідності до вимог міжнародних стандартів для випробування сонячних елементів космічного призначення.

Для забезпечення щільності потоку прискорених електронів $3,0E+8 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ в атмосфері вибиралося положення метрологічної лави на відстані 3м. Для врахування втрат енергії

внаслідок проходження прискореними електронами повітря нами використовувалася формула:

$$\ln\left(\frac{dE}{dx}\right) = 0,0156z^3 + 0,0948z^2 - 0,0324z - 6,1232, \quad (1)$$

де dE/dx – масова гальмівна здатність в одиницях MeB/cm, $z = \ln \epsilon$.

Оскільки для штатних режимів роботи M-30 прямі методи контролю значення та енергетичного спектру є непридатні, був використаний стандартний метод визначення найбільш ймовірної енергії пучка електронів $E_{p,e}$ шляхом поглинання в речовині (алюмінії Al). В цьому разі $E_{p,e}$ знаходиться із рівняння:

$$E_{p,e}(\text{MeV}) = 0,22 + 1,98R_p + 0,0025 R_p^2 \quad (2)$$

де R_p – екстрапольований пробіг електрона в Al в г/см^2 . Результати таких вимірювань, що встановлюють ймовірну енергію прискорених електронів 7 MeV.

Для забезпечення набору дози опромінювання спочатку було проведено опромінювання зразків до дози 50 крад (Si), після чого встановлено деградацію параметрів з першого етапу R1.

На другому етапі R2 проведено опромінювання зразків до дози 50 крад (Si). Необхідні потоки прискорених електронів склали $1,67 E12 \text{ ел./см}^2 + 1,67 E12 \text{ ел./см}^2$.

Для забезпечення однорідності поля опромінювання проводилося його сканування за допомогою циліндра Фарадея. Крок сканування вибирався $20 \times 20 \text{ мм}^2$.

Таблиця 1. Відносна деградація параметрів сонячних елементів з кремнію з різним часом життя. Зразки опромінювались потоком електронів з енергією 7MeV та щільністю потоку опромінення $3,34 \cdot 10^{12} \text{ ел./см}^2$, що рівнозначно перебуванню на орбіті 600-800 км протягом 3 років

Номер зразка	Час життя носіїв заряду, мкс	Параметри до опромінення		Параметри після опромінення		Відносна деградація параметрів	
		Ikz, mA	Uxx, mV	Ikz, mA	Uxx, mV	Ikz, %	Uxx, %
75	3 - 5	388	577	358	551	-7,82	-4,44
1 - 15	10 - 20	415	580	387	566	-6,71	-2,35
24-2	30 - 40	443	589	417	575	-5,95	-2,42

Результати дослідження

Вольт-амперна характеристика сонячного елемента вимірювалась до та після опромінення при кімнатній температурі використовуючи симулятор сонячного світла із спектром AM1,5.

В табл. 1 наведені результати опромінення кремнієвих ФЕП, відповідно до яких деградація параметрів для кремнію з часом життя 30 – 40 мкс складала менше 6%.

Основною причиною погіршення фотоелектричних характеристик опромінених ФЕП є зменшення часу життя неосновних носіїв заряду τ -параметра, найбільш чутливого до радіації. При опроміненні кремнієвих ФЕП у першу чергу змінюється τ у базовій області, вихідний розмір котрого звичайно перевищує кілька мікросекунд. Лише при високих потоках опромінення падає τ у легованому шарі, що складає ≤ 10 -9 с.

У сучасних кремнієвих ФЕП основна частка фотоструму обумовлена збиранням із базової області, тому що велика частина світла поглинається за р-п-переходом. Чи зможе неосновний носій заряду подолати відстань від точки утворення до р-п-переходу визначається дифузійною довжиною L . Відстань L характеризує ефективну товщину базового шару, із якого згенеровані світлом носії заряду збираються р-п-переходом. Якщо коефіцієнт дифузії D не змінюється при низькій концентрації дефектів, зберігається однозначний зв'язок між L і τ : $\tau=L^2/D$.

Зниження τ при впливі жорсткої радіації є наслідком зростання швидкості об'ємної рекомбінації через радіаційні дефекти, що мають глибокі енергетичні рівні в забороненій зоні. Імовірність рекомбінації неосновних носіїв заряду в опромінену напівпровіднику $1/\tau$ складається з імовірності рекомбінації через центри, що існували до опромінення, $1/\tau_0$, і центри, генеровані радіацією $1/\tau_{r0}$:

$$1/\tau = 1/\tau_0 + 1/\tau_{r0} \quad (3)$$

Співвідношення справедливо, коли рівень інжекції малий, рекомбінація йде незалежно через обидва канали і положення рівня Фермі не змінюється в результаті опромінення.

Якщо радіацією вводяться точкові дефекти, що утворюють один рекомбінаційний рівень E_r , то можна записати:

$$1/\tau_{r0} = \sigma \cdot v \cdot f(E_f - E_r) \cdot N_r, \quad (4)$$

де N_r - концентрація рекомбінаційних центрів, введених опроміненням; σ - перетин захоплення неосновних носіїв заряду; E_f - положення рівня Фермі; $f(E_f - E_r)$ - ступінь заповнення центрів основними носіями заряду.

Вважаючи, що $N_r = \eta \Phi$, де η - ефективність введення центрів, Φ - інтеграл по часу від щільності потоку часток. Праву частину рівняння (4) представляють у такому виді [2]:

$$\sigma v f(E_f - E_r) = K \tau \Phi \quad (5)$$

$K \tau$ - так званий коефіцієнт ушкодження, що характеризує можливість рекомбінації неосновних носіїв заряду на дефектах, введених одиничним потоком. Отже рівняння (3) можна переписати:

$$1/\tau = 1/\tau_0 + K \tau \Phi \quad (6)$$

Коли опромінення створює кілька рівнів, рекомбінація через які йде незалежно,

$$K^I = \sum_i \sigma N f_i(E_f - E_{ri}) \eta_i \quad (7)$$

В експериментах по опроміненню ФЕП частіше усього вимірюється дифузійна довжина L , тому вираз (5) з урахуванням зв'язку між L і τ зручно представити в такій формі:

$$1/L^2 = 1/L_0^2 + K L \Phi \quad (8)$$

Константа $K L = K \tau D$ також називається коефіцієнтом ушкодження. Він залежить від ряду факторів: виду й енергії опромінення, властивостей матеріалу й умов опромінення.

Дифузійна довжина неосновних носіїв заряду у кремнії п-типу змінюється при опроміненні швидше, чим у р-кремнії. Слідством цього є більш висока радіаційна стійкість ФЕП, виготовлених на основі р-кремнію (п/р-типу), у порівнянні із ФЕП з базою з п-кремнію (п/р-типу). З цієї причини в даний час усі СБ космічного призначення збираються на ФЕП, виготовлених із р-типу кремнію.

Висновки

Оскільки одним з основних обмежень продуктивності сонячних елементів є деградація їх електричних і оптичних характеристик в умовах підвищеної температури та радіаційного опромінення, підвищення часу життя носіїв заряду та використання спеціальної технологічної обробки дуже важливі для поліпшення характеристик сонячних елементів. У першій частині статті було описано структуру досліджуваних сонячних елементів. Розроблена технологія кремнієвих сонячних елементів збільшує радіаційну і термічну стабільність. Сонячні батареї, вироблені за обраною технологією, забезпечують роботу супутників на низьких орбітах. [4]

Продуктивність сонячних елементів у значній мірі залежить від часу життя носіїв заряду, що пояснює значну деградацію електричних параметрів елементів після опромінення фотоелемента. Збільшення часу життя носіїв заряду забезпечує зростання радіаційної стійкості фотоелектричних параметрів сонячних елементів. Деградація параметрів представлених в роботі кремнієвих сонячних елементів з часом життя 30 - 40 мкс склала менше 6 %. Так, у цьому дослідженні було встановлено поліпшення радіаційної стійкості кремнієвих сонячних елементів

Список використаних джерел

1. Antonio Luque, Steven Hegedus, *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. England: John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, 2003.
2. Tom Markvart, Luis Castaner, *Photovoltaics Fundamentals and Applications*, Oxford: Elsevier, 2003.
3. Masafumi Yamaguchi, Radiation resistance of compound semiconductor solar cells, *Journal of Applied Physics* 78, pp.1476-1480, 1995.

4. Datasheet Silicon Solar Space Cell S32, Heilbronn: Azur Space Solar Power GmbH, 2006.
5. ESAPSS01609 The radiation design handbook. —Noordwijk, the Netherlands, ESA, ESTEC, 1993.

Поступила в редакцию 20 сентября 2014 г.

УДК 621.315

А.В. Гетман, М.Г. Душейко, А.В. Иващук, М.С. Фадеев, Ю.И. Якименко д.-р.техн.наук

Кафедра микроэлектроники, НТУУ «Киевский политехнический институт»,
ул. Политехническая, 16, г. Киев, 03056, Украина.

Радиационная устойчивость кремниевого фотопреобразователя

В данной работе представлены результаты разработки и проведения исследования кремниевых солнечных элементов космического применения. В сфере разработки энергосистем для космических аппаратов сейчас активно развиваются солнечные элементы на основе АЗВ5 многослойных структур, однако для невысоких орбит 700 - 800 км, целесообразным остается применение кремниевых солнечных элементов.

Исследования на радиационную стойкость проводились на солнечных элементах со структурой $n+ - p - p+$. Кремниевые солнечные элементы подвергались облучению электронами с энергией 7MeV. Плотность потока ускоренных электронов составляла $3.0E + 8 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ в атмосфере. Накопленная доза радиации составляла 100 крад (Si). Полученные результаты сравнивались с предыдущими экспериментами проведенными в лаборатории. Бібл. 5, рис. 1, табл. 1.

Ключевые слова: *солнечный элемент; радиационная стойкость; время жизни носителей заряда; кремниевая пластина.*

UDC 621.315

A.V. Getman, M.G. Dushejko, A.V. Ivashuk, M.S. Fadieiev, Yu.I. Yakimenko, Dr.Sc.

Microelectronics Department of NTUU «Kyiv Polytechnic Institute»,
str. Polytechnique, 16, Kyiv, 03056, Ukraine.

Radiation resistance of silicon solar cell

In that paper were presented results of the development and research of the silicon space solar cells. Nowadays the AZB5 multilayer solar cells is actively developed in the sphere of constructing of the spacecraft power supply systems, as well as for the low-orbit applications the silicon solar cells usage is still expedient.

Research was performed on the solar cells with the $n+ - p - p+$ structure. Silicon solar cells were exposed to the electron flux with energy 7 MeV. The accelerated electron flux density was $3 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ in the atmosphere. Absorbed radiation dose was up to 100 krad (Si). Reference 5, figures 1, tables 1.

Keywords: *solar cell; photo-voltaic converter; radiation hardness; carrier lifetime; silicon wafer.*

Reference

1. A. Luque, Steven Hegedus. (2003), Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. England. John Wiley & Sons Ltd, The Atrium.
2. Tom Markvart, Luis Castaner. (2003), Photovoltaics Fundamentals and Applications. Oxford: Elsevir.
3. M. Yamaguchi. (1995), Radiation resistance of compound semiconductor solar cells. Journal of Applied Physics 78, Pp.1476-1480.
4. (2006), Datasheet Silicon Solar Space Cell S32, Heilbronn: Azur Space Solar Power GmbH.
5. (1993), European Space Agency. The radiation design handbook. European Space Agency. Noordwijk, the Netherlands, ESA, ESTEC.