

А.В. ГЕТЬМАН, аспирант,  
Т.О. КОВАЛЕНКО, студент

### РАДИАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ КОНТАКТНОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ ДАТЧИКА КООРДИНАТ СОЛНЦА

*В этой работе представлены результаты разработки и исследования радиационной стойкости металлизации сенсора угловых координат Солнца, который разработан на основе обычных фотоэлектрических преобразователей - солнечных батарей. В наши дни многослойные солнечные батареи на основе АЗВ5 активно развиваются в сфере конструирования систем электропитания космических аппаратов, но еще целесообразно использование кремниевых солнечных батарей и сенсоров на основе кремния в низкоорбитальных космических аппаратах и других космических приложениях. Исследования на радиационную стойкость проводили на солнечных элементах с  $n + -p - p +$  структурой. Сенсор угловых координат Солнца подвергали воздействию потока электронов с энергией 7 МэВ. Плотность ускоренного потока электронов составляла  $3 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$  в атмосфере. Значение поглощенной дозы облучения достигали 100 крад (Si).*

**Ключевые слова:** солнечные батареи (ячейки, элементы), фотоэлектрические преобразователи, радиационная стойкость, время жизни носителей заряда, кремниевая пластина.

УДК 621.383.51 А.В.

А.В. ГЕТЬМАН, аспирант,  
Д.В. ОЛЕФИРЕНКО, студент

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

### ВЛИЯНИЕ ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ НА КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТАХ

*В этой работе были представлены результаты разработки и исследования кремниевых космических солнечных батарей. В наши дни  $A^3B^5$  многослойные солнечные батареи активно развиваются в сфере конструирования систем электропитания космических аппаратов, но для низкоорбитальных космических аппаратов использование солнечных батарей из кремния еще целесообразно. Исследования проводили на солнечных элементах с  $n^+ - p - p^+$  структурой. Кремниевые солнечные элементы подвергали воздействию потока электронов с энергией 7 МэВ. Плотность потока ускоренных электронов была  $3 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$  в атмосфере. Поглощенная доза облучения была до 100 крад (Si).*

**Ключевые слова:** солнечный элемент, фотоэлектрический преобразователь, радиационная стойкость, время жизни носителей.

#### Введение

Альтернативные источники энергии, таких как энергия солнца, привлекают все большее внимание во всем мире. Постоянно увеличивающийся объем космических исследований ставит каждый раз новые технические задачи, требующие быстрого и эффективного решения. Одной из основных проблем является энергоснабжение космических аппаратов. В настоящее время солнечные батареи являются практически единственным источником электроэнергии, используемым на спутниках и космических аппаратах со сроком службы более двух-трех месяцев. Часто они применяются и на относительно короткоживущих объектах. Стойкость солнечных элементов к радиационному облучению определяет срок службы солнечных батарей и, соответственно, самих космических аппаратов.

Как показали многолетние исследования (СССР, США, Франция) по деградации космических СБ под действием радиационного облучения, степень деградации существенно зависит от параметров орбиты космического аппарата (КА). Для низкоорбитальных КА (770 км) деградация СБ на основе кремния и гетероструктур GaAs-GaAlAs составляет соответственно 15% и 5% в течение 5 лет пребывания КА на орбите. Для КА на геостационарных орбитах деградация составляет 31% (Si) и 16% (GaAs) в течение 15 лет пребывания на орбите. Для радиационно-опасных орбит (7400 км при угле наклона  $50^\circ$ ), деградация оставляет 49% (Si) и 22% (GaAs) в течение 5 лет пребывания на орбите [1]. То есть для низкоорбитальных космических аппаратов использование кремниевых солнечных батарей является еще целесообразно из-за существенной разницы в стоимости.

Опыт эксплуатации солнечных батарей на спутниках показал, что существующие в околоземном космическом пространстве потоки корпускулярной радиации оказывают сильное разрушающее влияние

на фотоэлементы. Корпускулярная радиация состоит из: 1) космических лучей, имеющие галактическое происхождение, состоящие в основном из протонов, а также легких ядер (имеют низкую интенсивность и поэтому не опасны для солнечных батарей); 2) космических лучей, появляющихся в результате вспышек на Солнце. Длится такое излучение от нескольких часов до суток и состоит, в основном, из протонов. Наблюдается через 2-3 года после максимума 11-летнего цикла солнечной активности; 3) частицы, захваченные магнитным полем земли. Они представляют наибольшую опасность для солнечных батарей, так как они действуют непрерывно [2].

Основной причиной ухудшения фотоэлектрических характеристик облучаемого фотоэлектрического преобразователя энергии является уменьшение времени жизни неосновных носителей ( $\tau$ -параметра), наиболее чувствительного к воздействию радиации. Причины, влияющие на время жизни неравновесных носителей заряда:

- во-первых, время жизни зависит от концентрации ловушек;
- во-вторых, время жизни зависит от концентрации примесей;
- в-третьих, время жизни зависит от температуры.

Чем больше дефектов в кристаллической структуре полупроводника, тем меньше время жизни. Основным негативным воздействием космической радиации является создание дополнительных центров рекомбинации путём смещения атомов полупроводникового материала преобразователя в междоузлии.

#### **Цель работы**

Целью работы является исследование влияния времени жизни носителей заряда солнечных элементов на радиационную стойкость в качестве основного параметра, определяющего период эксплуатации солнечного элемента и космического аппарата в целом.

#### **Принципы радиационной деградации фотоэлектрических преобразователей космического назначения**

Совокупное действие космической радиации на ФП приводит, главным образом, к снижению тока короткого замыкания, связанному с уменьшением времени жизни и диффузной длины носителей заряда. Это обусловлено возникновением под действием радиации дефектов кристаллической решётки базы ФП, являющихся центрами рекомбинации. Предполагают, что их концентрация линейно зависит от дозы излучения:

$$N_{\text{рад}} = K_0 \Phi_0, \quad (1)$$

где  $K_0$  – число центров, создаваемых каждой частицей на одном сантиметре пробега,  $\Phi_0$ -суммарный по времени поток.

Уменьшение тока короткого замыкания при радиационном воздействии приводит к смещению рабочей точки ВАХ фотопреобразователя в сторону меньшего значения максимальной мощности, что соответствует снижению КПД и выходной мощности.

Конкретное воздействие облучения заряженными частицами на характеристики ФП зависит от вида частиц и их энергии. Например, частицы высоких энергий значительно уменьшают величину фототока в красной области спектра. Поскольку длина их пробега достаточно велика, это явление можно объяснить уменьшением диффузной длины носителей в базе. Частицы малых энергий, поглощаются, в основном в легированном слое фотопреобразователя, определяющем спектральную чувствительность в коротковолновой области, больше снижают фотоэффект в голубой области спектра.

Воздействие протонов на характеристики фотопреобразователя принципиально не отличаются от электронного воздействия, за исключением протонов с малой длиной пробега. Если этот параметр оказывается меньше толщины легированного слоя, то в нем появляются радиационные дефекты, уменьшающие фоточувствительность в коротковолновой области спектра. В противном случае происходит радиационное повреждение базы. При этом собирание носителей зарядов создающих фототок, заметно измеряется только при соизмеримости диффузной длины в нарушенном слое и его толщиной.

При повышении плотности потоков таких протонов возрастает фоточувствительность в широкой области спектра. Это связано с образованием в базе вблизи р-п-перехода слоя с повышенным удельным сопротивлением, обусловленным захватом радиационными дефектами основных носителей. Это приводит к увеличению ширины области объемного заряда, захватывающий и нарушенный слой базы.

#### **Структура экспериментального образца**

Для исследования кремниевые фотоэлектрические преобразователи были произведены со структурами, схематически изображёнными в поперечном сечении на рис. 1, на которой показана конструкция с текстурированной поверхностью, просветляющий слой, пассивация, и задняя поверхность покрыта отражающим слоем алюминия. Размер ячеек составлял 32x32 мм<sup>2</sup>. Структуры были получены из р-Si пластин с объемным сопротивлением 3 – 10 Ом·см и толщиной 200 мкм. Ячейки были разбиты на три группы с временем жизни носителей 3 – 5 мкс, 10 – 20 мкс и 30 – 40 мкс (рис. 2). Измерения времени

жизни носителей проводились на тестере WT-2000/2m предназначенного для исследования полупроводниковых пластин.

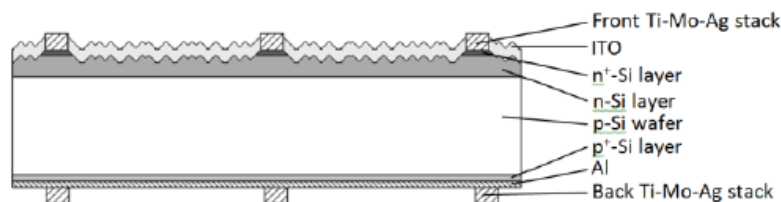


Рисунок 1 – Схематическое изображение поперечного сечения фотоэлектрического преобразователя

Для улучшения проводимости непрерывный сильно легированный n+ слой был сформирован с помощью диффузии из жидкого источника Фосфора. Следующим шагом было химическое текстурирование поверхности кремния и одновременное травление высоколегированного n+ слоя за исключением областей под контактную сетку. После этого было проведена диффузия Фосфора с целью создания p-n перехода. Процесс диффузии был проведен в диффузионной печи Centrotherm.

Следующим шагом было формирование сетки контактной металлизации. На лицевой стороне металлизацию Ti-Mo-Ag выращивали методом вакуумного магнетронного напыления и покрыли гальваническим серебром. На задней стороне для контакта и, как отражающее покрытие, наносился сплошной слой Al с последующим образованием металлической сетки, подобно лицевой стороне (Ti-Mo-Ag с гальваническим покрытием). Такая структура также улучшает стабильность контактной системы при условии термической деструкции ячейки. После металлизации просветляющий ITO слой наносили на передней стороне ячейки методом магнетронного распыления, чтобы улучшить оптические характеристики, а также для пассивации поверхности кремния.

Ячейки были разбиты на три группы с временем жизни носителей 3 – 5 мкс, 10 – 20 мкс и 30 – 40 мкс (рис. 2). Измерения времени жизни носителей проводились на тестере WT-2000/2m предназначенного для исследования полупроводниковых пластин.

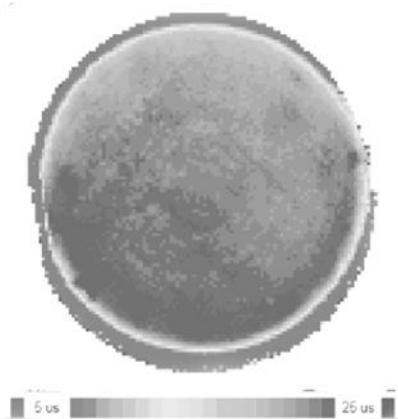


Рисунок 2 – Результаты измерения времени жизни носителей заряда на тестере WT-2000/2m

**Методика испытаний радиационной стойкости**

Порядок калибровки, дозиметрии и определения погрешностей определяются в соответствии с международными стандартами для тестирования космических солнечных батарей и электроники для спутников.

Облучение было осуществлено на электронном ускорителе Mikrotron M30.

Для обеспечения ускоренного электронного потока плотностью  $3 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$  в атмосфере было выбрано положение устройства на расстоянии 3-х метров. Для того чтобы учесть потери энергии ускоренных электронов при прохождении, мы использовали формулу:

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

где  $dE/dx$  – возможность торможения в единицах измерения MeV/см,  $z = \ln E$ .

Как и для обычных моделей M-30 прямые методы контроля значений и энергетического спектра не подходят, мы использовали стандартный метод для определения наиболее вероятной энергии

электронного пучка  $E_{p,e}$  поглощенного в материале (алюминия, Al). В этом случае,  $E_{p,e}$  определяется из уравнения:

$$E_{p,e} (MeV) = 0,22 + 1,98R_p + 0,0025R_p^2, \quad (3)$$

где  $R_p$  – экстраполированный путь электронов в Al в г/см<sup>2</sup>.

Mikrotron M-30 был настроен, чтобы получить энергетическое поле 7 МэВ [3].

Для обеспечения однородности поля было проведено его сканирование с использованием цилиндра Фарадея. Шаг сканирования был выбран 20x20 мм<sup>2</sup>. Для обеспечения первой дозы радиации образцы облучали дозирровкой 50 крад (Si) а затем устанавливались параметры деградации первого этапа R1.

На втором этапе R2 образцы облучали в дозе 50 крад (Si). Требуемая плотность потока ускоренных электронов была  $1,67 \cdot 10^{12}$  electron/cm<sup>2</sup> +  $1,67 \cdot 10^{12}$  electron/cm<sup>2</sup>.

**Анализ радиационной стойкости космических солнечных батарей**

Образцы облучали электронами с энергией 7MeV и плотностью потока  $3,34 \cdot 10^{12}$  electron/cm<sup>2</sup>. Эквивалент пребывания на орбите 600-800 км на протяжении 3-х лет.

Провелись измерения ВАХ солнечных элементов до и после облучения при комнатной температуре на солнечном симуляторе с AM1.5 спектра. Результаты были сведены в табл.1, и мы видим, что в процентном выражении деградация для элементов с временем жизни 30 – 40 мкс составила чуть менее 6%.

Основной причиной ухудшения фотоэлектрических характеристик облучаемого ФЭП является уменьшение времени жизни неосновных носителей  $\tau$ -параметра, наиболее чувствительного к воздействию радиации. При облучении кремниевых ФЭП в первую очередь меняется  $\tau$  в базовой области, исходная величина которого обычно превышает несколько мкс. Лишь при высоких потоках облучения падает  $\tau$  в легированном слое, составляющее  $\leq 10^{-9}$  с.

Таблица 1

Относительная деградация параметров солнечных элементов с различным качеством кремниевого материала

№	Время жизни	Параметры до облучения		Параметры после облучения		Деградация	
		I <sub>кз</sub> , мА	U <sub>хх</sub> , мВ	I <sub>кз</sub> , мА	U <sub>хх</sub> , мВ	I <sub>кз</sub> , %	U <sub>хх</sub> , %
1	3 - 5	388	577	358	551	-7,82	-4,44
2	10 - 20	415	580	387	566	-6,71	-2,35
3	30 - 40	443	589	417	575	-5,95	-2,42

В современных кремниевых солнечных элементах наибольшая часть фототока генерируется за счет сбора в базовой области, потому что большая часть света поглощается в области базы. Способность неосновных носителей преодолеть расстояние от места генерации к р-п переходу определяется диффузионной длиной L. Расстояние L характеризует эффективную толщину базового слоя. Если коэффициент диффузии D остается неизменной при низкой концентрации дефектов соотношение между L и  $\tau$  остается однозначным  $\tau = L^2/D$ .

Снижение  $\tau$  при воздействии радиации является следствием возрастания скорости объемной рекомбинации из-за радиационных дефектов, имеющих глубокие энергетические уровни в запрещенной зоне. Вероятность рекомбинации неосновных носителей заряда в облученном полупроводнике, равная  $1/\tau$ , складывается из вероятности рекомбинации через центры, существовавшие до облучения,  $1/\tau_0$ , и центры, генерированные радиацией  $1/\tau_{r0}$ :

$$1/\tau = 1/\tau_0 + 1/\tau_{r0}. \quad (4)$$

Соотношение справедливо, когда уровень инжекции мал, рекомбинация идет независимо через оба канала и положение уровня Ферми не меняется в результате облучения. Если излучение, генерирует точечные дефекты, которые формируют скорость рекомбинации  $E_r$ , мы можем написать:

$$1/\tau_{r0} = \sigma v_f (E_f - E_r) N_r, \quad (5)$$

где  $N_r$  – концентрация центров рекомбинации, генерируемых облучением;

$\sigma$  - сечение захвата неосновных носителей;

$E_f$  - положение уровня Ферми;

$f(E_f - E_r)$  - степень заполнения основных центров носителей заряда.

Если предположить, что  $N_r = \eta\Phi$ , правая часть уравнения (5) сводится к этому виду [2]:

$$\sigma v f(E_f - E_r) N_r = K_r \Phi. \quad (6)$$

$K_r$  – так называемый коэффициент повреждений, который характеризует возможность рекомбинации неосновных носителей на дефектах. Таким образом, уравнение (4) можно переписать:

$$1/\tau = 1/\tau_0 + K_r \Phi. \quad (7)$$

Когда облучение создает несколько уровней, через которые рекомбинация независима:

$$K' = \sum \sigma_i v f_i(E_f - E_r) \eta_i. \quad (8)$$

С учетом взаимосвязи между  $L$  и  $\tau$  (7) удобно представить в виде:

$$1/L^2 = 1/L_0^2 + K_L \Phi. \quad (9)$$

Постоянная  $K_L = K_r D$  также называется коэффициентом повреждений. Он зависит от нескольких факторов: тип и энергия излучения, свойства материала и условий облучения [3].

Под воздействием облучения диффузионная длина неосновных носителей в n-типа кремнии изменяется быстрее, чем в p-кремнии. Результатом этого является более высокая радиационная стойкость солнечных батарей, изготовленных из p-Si по сравнению с солнечными элементами с базой n-Si. По этой причине, в настоящий момент все солнечные батареи для космического назначения изготавливаются из кремния p-типа.

Методом повышения радиационной стойкости может быть легирование исходного материала литием, атомы которого обладают большой подвижностью. Литий дрейфует в область радиационных нарушений и нейтрализует электрическую активность образовавшихся дефектов.

Уровень легирования материала может двояко сказываться на его радиационной стойкости. С одной стороны, вид и концентрация стабильных рекомбинационных центров определяется количеством примеси, участвующей в формировании этих центров. С другой стороны, роль тех или иных центров в процессе рекомбинации обусловлена их положением относительно уровня Ферми, от чего зависит зарядовое состояние и степень заполнения рекомбинационных центров. Следовательно, с концентрацией основных носителей, определяющей положение уровня Ферми, связана скорость рекомбинации на радиационных дефектах, имеющих уровни, расположенные не слишком глубоко в запрещенной зоне. В этом состоит наиболее существенный аспект влияния уровня легирования на радиационную стойкость кремния. Данное утверждение особенно справедливо применительно к p-кремнию [4].

Экспериментальные исследования показали, что устойчивость ФЭП к облучению растет с увеличением удельного сопротивления исходного кремния. Однако уровень легирования исходного кремния определяется не только радиационной стойкостью, но и величиной КПД ФЭП. Поэтому оптимальным для изготовления ФЭП будет кремний с удельным сопротивлением на уровне 5 – 10 Ом·см.

### Выводы

Поскольку одним из основных ограничений космических солнечных элементов является деградация их электрических и оптических характеристик в условиях повышенной температуры и в радиационной обстановке, повышение жизни носителей заряда очень важно для улучшения стойкости параметров. В первой части статьи было описано строение исследуемых солнечных батарей. Эта структура кремниевых преобразователей увеличивает радиационную и термическую стабильность. Параметры для наших кремниевых солнечных элементов с временем жизни 30 – 40 мкс снизились менее чем на 6%. Солнечные батареи, произведенные на описанной технологии, подходят для спутников на низких орбитах. Таким образом было исследовано улучшение радиационной стойкости для кремниевых солнечных элементов.

### Список литературы

- Antonio Luque, Steven Hegedus, Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. England: John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, 2003.  
 Tom Markvart, Luis Castaner, Photovoltaics Fundamentals and Applications, Oxford: Elsevir, 2003.  
 Masafumi Yamaguchi, Radiation resistance of compound semiconductor solar cells, Journal of Applied Physics 78, pp.1476-1480, 1995.  
 Datasheet Silicon Solar Space Cell S32, Heilbronn: Azur Space Solar Power GmbH, 2006.

A. GETMAN, postgraduate student

D. OLEFIRENKO, student

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»

**INFLUENCE CARRIER LIFETIME ON CHARACTERISTICS OF SOLAR ENERGY CONVERTERS FOR SPACE APPART**

*In that paper were presented results of the development and research of the silicon space solar cells. Nowadays the  $A^3B^5$  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).*

**Key words:** solar cell, photo-voltaic converter, radiation hardness, carrier lifetime.

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: Elsevir, 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.

УДК 621.383.51

А.В. ГЕТЬМАН, аспірант

Д.В. ОЛЕФІРЕНКО, студент

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

**ВПЛИВ ЧАСУ ЖИТТЯ НОСІЇВ ЗАРЯДУ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГІЇ НА КОСМІЧНИХ АПАРАТАХ**

*У цій роботі були представлені результати розробки і дослідження кремнієвих космічних сонячних батарей. У наші дні  $A^3B^5$  багатосарові сонячні батареї активно розвиваються в сфері конструювання систем електроживлення космічних апаратів, але для низькоорбітальних космічних апаратів використання сонячних батарей з кремнію ще доцільно. Дослідження проводили на сонячних елементах з  $n^+ - p - p^+$  структури. Кремнієві сонячні елементи піддавали дії потоку електронів з енергією 7 MeV. Щільність потоку прискорених електронів була  $3 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  в атмосфері. Поглинена доза опромінення була до 100 крад (Si).*

**Ключові слова:** сонячний елемент, фотоелектричний перетворювач, радіаційна стійкість, час життя носіїв.

УДК 535.015

Д.С. САЛИМОН, студент, А.В. ГЕТЬМАН, аспірант

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

**ЗАЩИТНЫЕ ПРОСВЕТЛЯЮЩИЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ФЭП КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

*В данной статье описан принцип, положенный в основу получения двухслойного покрытия, обладающего высокими просветляющими и теплорегулирующими свойствами, использующийся для универсальной системы покрытий. Экспериментально было показано, что просветляющее покрытие, состоящее из двух слоев, позволяет расширить область низкого отражения и снизить последовательное сопротивление элементов благодаря высокой электропроводности пленки. В результате исследования оптических свойств различных антисоляризаторов, выбран оптимальный вариант, позволяющий улучшить в защитном покрытии срез УФ-излучения и увеличить концентрацию ионов. Рассмотрен механизм протекторного действия, который предотвращает образование центров окрашивания в видимой области спектра. Также представлено сравнение различных одно-, двух- и трехслойных просветляющих покрытий на кремниевой подложке с последующим определением оптимальной толщины и показателя преломления каждого слоя.*

**Ключевые слова:** солнечная батарея, антиотражающее покрытие, защитное покрытие, коэффициент преломления, антисоляризатор, просветляющее покрытие.