

# РАДИАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ В КРЕМНИЕВЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

Пригара Ю.А.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь

В работе рассматриваются вопросы, связанные с радиационными эффектами в кремниевых солнечных элементах.

Солнечные батареи (СБ) относятся к категории приборов, весьма чувствительных к облучению, а использование их на космических объектах предъявляет весьма серьезные требования к радиационной стойкости. Поэтому проблема создания радиационно стойких солнечных батарей стоит достаточно остро. Она решается следующим образом. Во-первых, на космических объектах используют только батареи *n*+-*p*-типа, так как радиационные эффекты для *p* - кремния существенно меньше, чем для *n* - кремния по следующим причинам [1]:

1. Сечение захвата дырок радиационными дефектами в кремнии, как правило, больше, чем сечение захвата электронов.

2. Коэффициент диффузии электронов в кремнии больше, чем коэффициент диффузии дырок.

Для реального спектра излучения в космическом пространстве (табл. 1) [2], в котором присутствуют как высокоэнергетичные, так и низкоэнергетичные частицы, деградация коэффициента токосъема (спектральный отклик) будет происходить во всем диапазоне длин волн, что приводит к уменьшению выделяемой в нагрузку мощности. Считается, что солнечная батарея сохраняет работоспособность, если мощность в нагрузке уменьшается не более чем на 25%. При замене диффузионных процессов на дрейфовые можно ослабить влияние диффузионной длины на величину токосъема при облучении фотопреобразователя. Степень деградации СБ под воздействием облучения существенно зависит от параметров орбиты космического аппарата [3].

Гетероструктурные фотоэлектрические преобразователи наряду с повышением эффективности обеспечивают также улучшение радиационной стойкости, что приблизительно в 2 раза увеличивает ресурс работы космических СБ. Поэтому применение для энергоснабжения космических аппаратов (КА) СБ на основе GaAs-гетероструктур дает значительный экономический эффект по сравнению с кремниевыми, несмотря на более высокую их стоимость. Это позволяет снизить расход GaAs полупроводниковых материалов пропорционально степени концентрирования и, следовательно, существенно снизить стоимость солнечной электроэнергии. Их максимальная рабочая температура +150°C в отличие от +70°C – у кремниевых батарей, что увеличивает возможности концентрирования света на гетерофотопреобразователе (ГФП) GaAs. ГФП на основе GaAs в значительно меньшей степени, чем кремниевые фотоэлектрических преобразователей (ФЭП), подвержены разрушению потоками протонов и электронов высоких энергий вследствие высокого уровня поглощения света в GaAs, а также малых требуемых значений времени жизни и диффузионной длины основных носителей [3].

Таблица 1 – Годовые дозы облучения, получаемые поверхностью космического объекта, (Gy) [2]

Тип излучения	Высота орбиты, нм						Энергия частиц	Макс. поток частиц, м <sup>-2</sup> ·с <sup>-1</sup>
	Полярная орбита				Наклон орбиты 30°			
	370	925	1850	3700	370	925		
Протоны галактические	3,5·10 <sup>-2</sup>	3,5·10 <sup>-2</sup>	4,5·10 <sup>-2</sup>	6·10 <sup>-2</sup>	0	0	>10 <sup>13</sup> МэВ	~ 2,5
Протоны радиационного пояса	2,6·10 <sup>-1</sup>	26	13	4,3·10 <sup>2</sup>	4,3·10 <sup>-1</sup>	70	0,1 – 5 МэВ >30 МэВ	2,8·10 <sup>8</sup> 8·10 <sup>4</sup>
Электроны радиационного пояса	1,3·10 <sup>3</sup>	1,3·10 <sup>5</sup>	1,3·10 <sup>6</sup>	7·10 <sup>5</sup>	1,7·10 <sup>3</sup>	3·10 <sup>5</sup>	≤ 1 МэВ	2·10 <sup>8</sup>

Продолжение таблицы 1

Протоны (полярное сияние)	2,6	2,6	2,6	2,6	0	0	~ 650 кэВ	10 <sup>5</sup>
Электроны (полярное сияние)	4,3·10 <sup>4</sup>	4,3·10 <sup>4</sup>	4,3·10 <sup>4</sup>	4,3·10 <sup>4</sup>	0	0	< 50 кэВ	10 <sup>11</sup>
Протоны (солнечные вспышки)	26	26	26	26	0	0	МэВ - ГэВ	10 <sup>5</sup> - 10 <sup>6</sup>
Суммарное излучение	4,3·10 <sup>4</sup>	1,7·10 <sup>5</sup>	1,3·10 <sup>6</sup>	7,8·10 <sup>5</sup>	1,7·10 <sup>3</sup>	3·10 <sup>5</sup>	-	-

Более того, эксперименты показали [4], что значительная часть радиационных дефектов в ГФП на основе GaAs исчезает после их термообработки (отжига) при температуре как раз порядка 150°C – 180°C. Если ГФП из GaAs будут постоянно работать при температуре ~150°C, то степень радиационной деградации их будет относительно небольшой на протяжении всего срока активного функционирования станций (особенно это касается космических солнечных энергоустановок, для которых важен малый вес, размер ФЭП и высокий КПД). В целом можно заключить, что энергетические, массовые и эксплуатационные характеристики ГФП на основе GaAs в большей степени соответствуют требованиям для космических условий, чем характеристики кремниевых ФЭП. Но в космических системах до 80% используются в основном кремниевые фотопреобразователи [3].

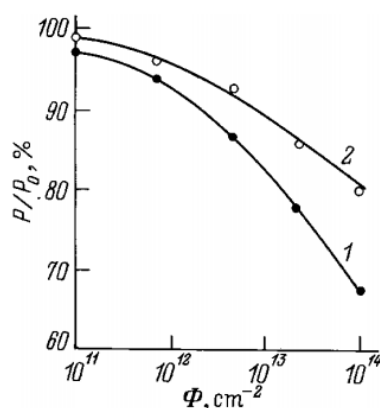


Рисунок 1 – Дозовая зависимость мощности в кремниевых солнечных элементах, облученных при различных режимах: 1 – в темноте,  $t = 25^\circ\text{C}$ , 2 – при освещении ( $W = 1 \text{ Вт/см}^2$ ,  $t = 80^\circ\text{C}$ ) [5]

Изучалось влияние высокой освещенности и температуры на скорости деградации и восстановления мощности элементов. Облучение образцов производилось ускоренными электронами с энергией 5 МэВ в двух режимах: при комнатной температуре в темноте и под концентрированным светом с мощностью 1 Вт. При этом образец нагревался до температуры 80°C. Результаты измерений показали, что во всем диапазоне изменения плотности интегральных потоков электронов в освещенных и нагретых образцах степень деградации мощности значительно меньше, чем в образцах, облученных при комнатной температуры в темноте (рис. 1), что наблюдалось в фотопреобразователях на основе гетероструктур GaAs – GaAlAs, облученных электронами и протонами [5].

**Список использованных источников:**

1. Вологдин, Э.Н. Радиационные эффекты в некоторых классах полупроводниковых приборов: учеб. пособие по дисциплине "Радиационная стойкость полупроводниковых приборов и радиоэлектронных устройств" / Э.Н. Вологдин, А.П. Лысенко. – М.: Научно-образовательный центр Московского региона в области фундаментальных проблем радиационной физики твердого тела и радиационного материаловедения. Московский государственный институт электроники и математики, 2001. - 70 с.
2. Mahlis F.A. Radiation Physics and Chemistry of Polimers. – М.: Atomizdat, 1972. – 326 p.
3. Ефимов, В.П. Фотопреобразователи энергии солнечного излучения нового поколения / В.П. Ефимов // Физика и техника полупроводников. - 2010. - Т. 8. - № 2. - С. 100-115.
4. Николаенко Ю.Е., Вакиев Н.М., Круковский С.И., Ерохов В.Ю., Мельник И.И., Завербный И.Р. Состояние и тенденции развития твердотельных фотопреобразователей солнечной энергии // Энергетическая микроэлектроника НПП "Карат", НУ "Львовская политехника". Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2001. – № 3. – С. 21-30.
5. Бакиров М.Я. Фотозлектрические и радиационные характеристики кремниевых солнечных элементов при повышенных освещенностях и температурах // Физика и техника полупроводников. – 1997. – Т. 31, № 5. – С. 520-522.