

МЕТОДОЛОГИЯ ИМИТАЦИИ РАДИАЦИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ С ПОМОЩЬЮ УСКОРИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОНОВ И ПРОТОНОВ

И.М. Неклюдов, Б.В. Борц, В.В. Ганн, Г.Д. Толстолицкая

Национальный научный центр

«Харьковский физико-технический институт», г. Харьков, Украина

Предложена методология имитации радиационных повреждений фотопреобразователей солнечных батарей под воздействием потоков протонов и электронов космического происхождения с помощью ускорителей заряженных частиц.

ВВЕДЕНИЕ

В околоземном и межпланетном пространстве материалы и элементы оборудования космических аппаратов (КА) подвергаются воздействию разнообразных факторов космической среды, в частности, корпускулярных потоков различного происхождения. Радиационные условия на борту КА зависят от расположения его орбиты относительно радиационных поясов Земли. Максимальная поглощенная доза излучения приходится на внешнюю поверхность КА. Наиболее подвержены радиационному воздействию полупроводниковые и диэлектрические материалы, в частности, фотопреобразователи солнечных батарей. Солнечная батарея - полупроводниковый фотоэлектрический генератор, непосредственно преобразующий энергию солнечной радиации в электрическую, - в настоящее время является основным источником автономного энергопитания в космических аппаратах. В качестве материала фотоэлементов используют высокочистый кремний в виде монокристаллических пластин толщиной 0,05...0,4 мм и кварцевое стекло толщиной 0,05...0,15 мм в качестве прозрачного защитного покрытия. Солнечные батареи подвержены деградации (снижению вырабатываемой мощности) при воздействии космической радиации, включающей комбинированное УФ - и рентгеновское излучение, электроны, солнечный ветер, солнечные космические лучи.

При исследованиях влияния корпускулярного излучения на физико-химические свойства материалов выделяют два типа основных воздействий [1]. Первый определяется ионизационными процессами, второй - структурными нарушениями материалов. Ионизационные явления зависят от мощности дозы излучения и исчезают с различным временем релаксации при выходе КА из радиационного пояса Земли. Нарушения структуры материала определяются дозой и энергетическим спектром излучения. Понимание роли ионизационных процессов и радиационных повреждений структуры, определение главенствующей роли одного из них, позволяет значительно упростить методику испытаний и выбор необходимого комплекта имитационного оборудования.

Исследование влияния космической радиации на характеристики фотопреобразователей проводят как

в космосе на орбите, так и в лабораторных условиях, создавая для этих целей имитаторы космического пространства [2,3]. Применение имитаторов требует:

- разработки научно-обоснованных принципов ускоренных испытаний;
- обоснования замены воздействия космического излучения с широким спектром энергий на имитационные испытания с моноэнергетическим спектром распределения частиц;
- определения энергий и доз имитационного облучения, адекватных космическим излучениям.

МЕТОДОЛОГИЯ ИМИТАЦИИ

Протоны. Интегральный энергетический спектр протонов в окрестности Земли приведен на рис.1. Излучение имеет широкий энергетический спектр. Интенсивности излучения для каждого энергетического интервала различаются, поэтому следует ожидать неравномерного распределения дозы излучения по толщине материала.

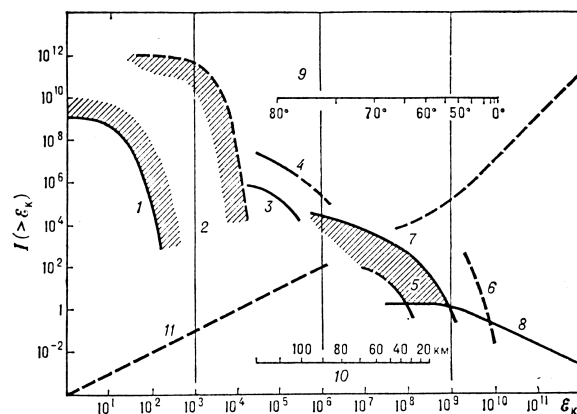


Рис. 1. Интегральный энергетический спектр протонов в окрестности Земли, состоящий из спокойного (1) и возмущенного (2) солнечного ветра, частиц полярных сияний (3,4); солнечных космических лучей (5-7); галактических космических лучей (8); 9 – геомагнитная широта, 10 – шкала высот, на которые могут проникать сверху протоны с энергией выше заданной. Левая шкала – поток протонов в $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$; нижняя шкала – кинетическая энергия протонов в эВ [4]

В радиационных поясах Земли энергия протонов изменяется от $\sim 0,1$ до ~ 100 МэВ. Интенсивность потока протонов в этом энергетическом интервале падает на пять порядков, составляя общую дозу излучения за 10 лет работы аппарата в космосе $\sim 10^{16}$ см $^{-2}$ для энергий $E_p \sim 0,1 \dots 0,5$ МэВ, 10^{15} см $^{-2}$ для $E_p \sim 1$ МэВ и 10^{11} см $^{-2}$ для $E_p \geq 10$ МэВ. Если судить по дозе излучения, то наибольшую повреждаемость должны создавать протоны в энергетическом интервале от $\sim 0,1$ до $1 \dots 2$ МэВ. Однако кроме дозы излучения необходимо оценить влияние на радиационную повреждаемость энергетического спектра протонов. Влетающий в материал протон теряет свою энергию в ядерных и электронных столкновениях. В таблице приведены данные по потерям энергии протона в кремнии.

E_p , МэВ	dE/dX , ядерные, эВ/Å	dE/dX , электронные, эВ/Å	R_p , мкм
0.1	$2,23 \cdot 10^{-2}$	13	0,83
1,0	$3,89 \cdot 10^{-3}$	5	14,3
10	$4,54 \cdot 10^{-4}$	1	623
100	$5,69 \cdot 10^{-5}$	0,1	36600

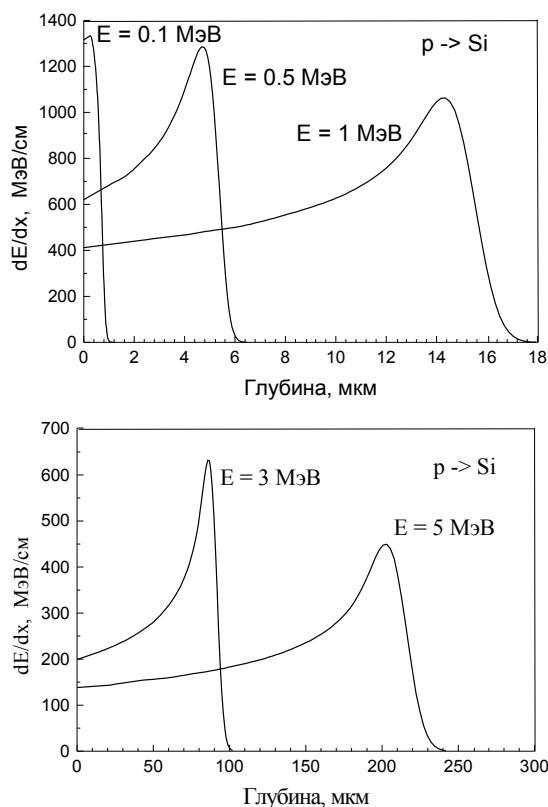


Рис.2. Расчетные профили энерговыделения в кремнии протонов с энергией 0,1; 0,5; 1; 3 и 5 МэВ

Как видно из таблицы, для протона в кремнии ядерные потери энергии на несколько порядков меньше электронных потерь. Следовательно, при незначительной генерации точечных дефектов энергия излучения, в основном, расходуется на ионизацию и возбуждение электронов регулярных атомов решетки, а также на увеличение тепловой энергии электронов проводимости. При этом происходит

сложная перестройка электронной подсистемы кристалла, в результате которой в действие вступают дополнительные механизмы образования точечных дефектов.

Для постановки работ по имитации воздействия протонов на ионные кристаллы и полупроводники необходима информация относительно профилей потери энергии. На рис.2 приведены расчетные профили электронных потерь энергии в кремнии для протонов с энергией 0,1...5 МэВ.

Из рис.2 видно, что при энергии протона 0,1 МэВ энерговыделение происходит в толщине ~ 1 мкм. С увеличением энергии протона глубина растет и при $E=5$ МэВ составляет ~ 200 мкм, причем область практически равномерного выделения энергии составляет около 150 мкм. Значение потерь энергии при этом изменяется незначительно. Для создания радиационных повреждений в максимально возможной толщине материала (0,7 мм) необходима энергия протона 10 МэВ. Исследования с применением пучков частиц с энергиями 5...10 МэВ требуют использования дорогостоящего оборудования. Однако в случае, когда исследования материала фотоэлементов и защитных покрытий производится в отдельности с целью изучения физики процессов, с достаточной степенью достоверности имитацию воздействия протонов космического пространства на фотопреобразователи солнечных батарей можно проводить на ускорителях протонов с энергиями частиц 0,2...2 МэВ. Мегаэлектронвольтовый диапазон энергий позволяет выполнять облучения широким энергетическим спектром близким к космическому, используя пластины с определенным профилем или изменяя углы падения пучка по заданной программе [1,5].

Электроны являются одной из составляющих солнечного ветра, солнечных космических и галактических лучей. Энергетический спектр электронов, рассчитанный для высокой относительно радиационных поясов Земли орбиты искусственного спутника, приведен на рис.3.

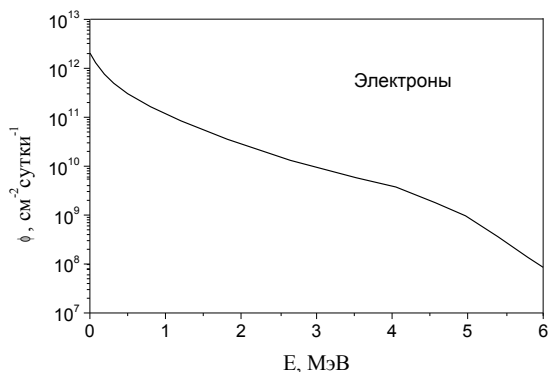


Рис.3. Энергетический спектр электронов

При имитации воздействия электронов на материалы важным является определение профиля поглощенной энергии и пробега электрона. Профили энерговыделения в мишенях, облучаемых электронами мегаэлектронвольтовых энергий, изучаются в течение многих лет. Энергетические потери, обу-

словленные процессами ионизации и возбуждения атомов, в тонких мишенях хорошо описываются формулой Бете-Блоха [6]. При расчетах профилей потерь энергии в толстых мишенях основную трудность представляет учет многократного рассеяния электронов, а в расчетах профилей энерговыделения – учет вклада δ -электронов в переносе энергии.

Проективный пробег электрона в веществе не имеет определенного значения вследствие сильного многократного рассеяния. Экспериментально измеряется так называемый экстраполированный пробег $R(E)$, который соответствует глубине, на которой количество прошедших электронов стремится к нулю. Теоретически вычислить экстраполированный пробег весьма затруднительно, однако существует ряд эмпирических формул для оценки экстраполированного пробега, например, формула Каца для алюминия, $R(E) = 0,4E^{1,265-0,0954 \ln E}$, где $R(E)$ -пробег в г/см², E -энергия в МэВ [6].

Профили энерговыделения обладают ярко выраженным максимумом, который обусловлен конкуренцией двух тенденций: с ростом глубины величина потери энергии электрона увеличивается, а число электронов, оставшихся в пучке, уменьшается. Экспериментальные данные [7] свидетельствуют о том, что для электронов мегаэлектронвольтовых энергий все профили энерговыделения, изображенные в логарифмической шкале глубин, имеют одну и ту же форму, которая лишь сдвигается вглубь с ростом энергии пучка. Форму этого профиля можно аппроксимировать функцией $P(\xi)$, где ξ - глубина, отнесенная к экстраполированному пробегу: $\xi = x / R(E)$. Функция $P(\xi)$ изображена на рис.4, она нормирована следующим образом: $\int P(\xi) d\xi = 1$. Функция $P(\xi)$ для электронов в диапазоне энергий 0.1...3 МэВ является универсальной и не зависит от энергии.

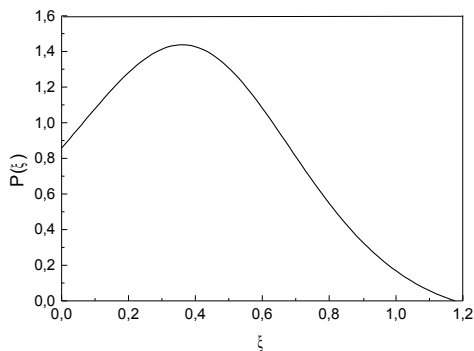


Рис.4. Универсальный профиль энерговыделения

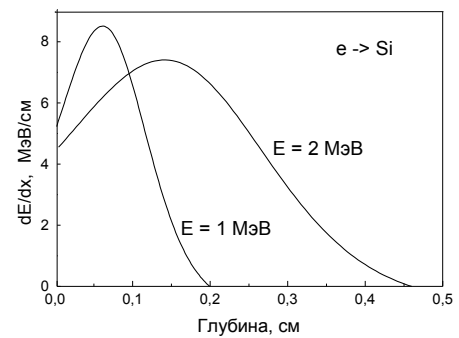


Рис.5. Расчетный профиль энерговыделения в кремнии для электронов с $E=1 \dots 2$ МэВ

Профиль энерговыделения $Q(x)$ выражается функцией: $Q(x) = E \cdot P\{x/R(E)\} / R(E)$. В случае кремния расчетные профили энерговыделения $Q(x)$ для электронов с энергией 1 и 2 МэВ показаны на рис.5. Зависимости среднего энерговыделения от толщины образца, а также минимальное и максимальное значения энерговыделения в образце приведены на рис. 6.

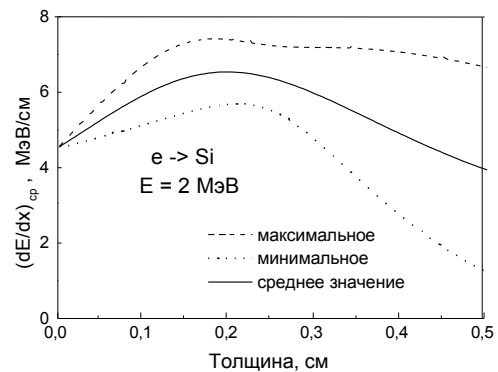


Рис.6. Зависимость минимального, максимального и среднего значения энерговыделения от толщины образца

Представляет интерес проследить за энерговыделением в кремнии на глубине, соответствующей реальным размерам объектов 0,1...0,7 мм. На рис.7 изображены профили энерговыделения для объектов, имеющих сложную структуру: пластина кремния сверху покрыта кварцевым стеклом.

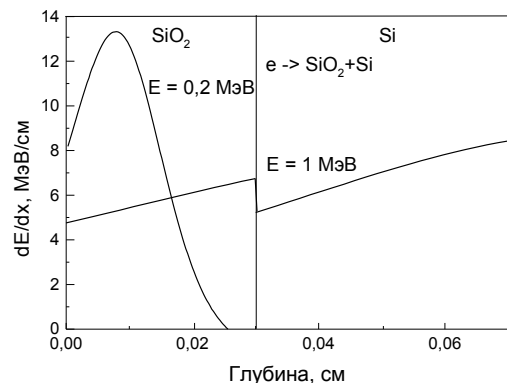


Рис.7. Профили энерговыделения в пластине кремния со стеклянным покрытием для электронов с $E=0,2$ и 1 МэВ

Сравнение кривых на рис.7 показывает, что электроны с энергией 0,2 МэВ полностью останавливаются в защитном покрытии, тогда как энерговыделение электронов с $E=1$ МэВ происходит практически по всей толщине защитного покрытия и фотоэлемента. Таким образом, более представительной является имитация воздействия космического излучения на ускорителях электронов с энергией ~ 1 МэВ. Этот вывод подтверждается данными натуральных экспериментов, полученных с 18 искусственных спутников Земли, функционирующих на орбитах, близких к геостационарной. Анализ этих данных показывает [8], что максимум дефектов вносят электроны в интервале энергий 0,6...0,8 МэВ, с плотностью потока $(1...2) \cdot 10^{14}$ эл/см².

Вывод. Достоверные результаты по имитации воздействия факторов космического пространства на элементы солнечных батарей и созданию радиационных повреждений по всей толщине исследуемого материала могут быть получены при облучении протонами и электронами с энергиями 1...2 МэВ.

ЛИТЕРАТУРА

1.А.И. Акишин, И.Б. Теплов. Имитация воздействия космических излучений на материалы // *Физика и химия обработки материалов*. 1992, № 6, с. 47–57.

2.А.И. Акишин, Л.С. Новиков. *Методика и оборудование имитационных испытаний материалов космических аппаратов*. Ч.IV. М.: «Изд-во Моск. унта», 1989, 90 с.

3.В.Ф. Рыбалко, И.М. Неклюдов, Г.Д. Толстолицкая, Б.В. Борц, А.Н. Морозов, В.В. Ружицкий, С.А. Карпов, В.В. Абраимов, Л.К. Колыбаев, Ян Де-Джуан, Хе-Ши-Юй. Ускорительный комплекс с совмещенными пучками протонов и электронов для имитатора факторов космического пространства // *Вопросы атомной науки и техники. Серия: «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 1999, вып. 3(75), с. 125–129.

4.Физика космоса: Маленькая энциклопедия. М.: «Сов. энциклопедия», 1986, с.783.

5.В.В. Ганн, И.М. Неклюдов, Л.И. Пивовар и др. Влияние способа имплантации гелия на блистеринг нержавеющей стали // *Атомная энергия*. 1980, т. 48, вып.4, с. 266–267.

6.L. Katz, A.S. Penfold // *Rev. Mod. Phys.* 1952, v. 24, p 28–35.

7.*Handbuch der Physic*. Springer Verlag, Berlin, 1958, b. 34.

8.W. Picciano, R.A. Reitman, R.J. Grant // 8-th IEEE Photovoltaic Specialists Conf., August 4-7, 1970.

МЕТОДОЛОГІЯ ІМІТАЦІЇ РАДІАЦІЙНИХ ПОШКОДЖЕНЬ ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧІВ СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ ЗА ДОПОМОГОЮ ПРИСКОРЮВАЧІВ ЕЛЕКТРОНІВ І ПРОТОНІВ

І.М. Неклюдов, Б.В. Борц, В.В. Ганн, Г.Д. Толстолицка

Запропонована методологія імітації радіаційних пошкоджень фотоперетворювачів сонячних батарей під впливом протонів та електронів космічного простору за допомогою прискорювачів заряджених часток.

METHODOLOGY OF THE RADIATION DAMAGE SIMULATION OF THE SOLAR BATTERY CONVERTERS BY ELECTRON AND PROTON ACCELERATORS

I.M. Nekluydov, B.V. Borts, V.V. G.D. Tolstolutskey

Methodology of the radiation damage simulation of the photo-converter of the solar battery under the outer space protons and electron influence by charged particles accelerators use is proposed.