

УДК 539.385.669.7215

Ху Чженьюй¹, В. В. Абраимов^{1,2}, Хэ Ши Юй¹,
Ян Де Чжуан¹, Б. М. Рассемакин³

¹Центр космічного матеріалознавства та імітації факторів космічного простору
Харбінського політехнічного інституту, Харбін (КНР)

²Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна, Харків,

³Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ

Деградация параметров солнечных батарей под воздействием факторов космического пространства

Надійшла до редакції 26.07.01

Представляются результаты экспериментального исследования воздействия потоков протонов (P^+) и электронов (e^-) радиационных поясов Земли, а также ионов азота верхней атмосферы Земли N^+ , (имитируемых лабораторно в комплексных имитаторах факторов космоса КИФК и УПИ), с энергией частиц $E = 60—200$ кэВ на основные параметры солнечных батарей КА: ток короткого замыкания $I_{КЗ}$ и напряжение холостого хода $U_{ХХ}$. Получена большая серия вольт-амперных характеристик $I(U)$ открытых и защищенных стеклом К-208 фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) в широком интервале поглощенных доз: $\Phi = 10^{10}—10^{16}$ част/см², соответствующих временам эксплуатации КА $\Delta t = 1—20$ лет для орбит в интервале высот $H = 300—36000$ км. Показано, что для открытых ФЭП при дозах, превышающих $\Phi = 5 \cdot 10^{14}$ част/см², происходит существенная деградация основных параметров солнечных батарей; при этом $I_{КЗ}$ и $U_{ХХ}$ уменьшаются в 2 и более раз. Совместное облучение протонами и электронами защищенных ФЭП при дозах $\Phi = 10^{16}$ част/см² (соответствующих 20 годам эксплуатации КА на ГЕО-орбите) уменьшает $I_{КЗ}$ и $U_{ХХ}$ на 25%. Облучение открытых ФЭП ионами азота N^+ при дозах облучения $\Phi = 10^{16}$ см² приводит к практически полной деградации основных параметров солнечных батарей ($I_{КЗ} \rightarrow 0$). Полученные результаты трактуются в рамках современных теорий генерации радиационных дефектов в полупроводниках в поле космической радиации и их влияния на время жизни τ неосновных носителей. Наблюдается хорошее согласие экспериментальных деградационных характеристик для тока $I_{КЗ}$ с предсказаниями теории деградации солнечных батарей Г. Раушенбаха.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что в настоящее время полупроводниковые фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) являются одним из основных источников электрической энергии на космических аппаратах (КА) [2—8]. Эксперименты показали, что под воздействием экстремальных факторов космического пространства — потоков протонов (P^+) и электронов (e^-) радиационных поясов Земли, ионов верхней атмосферы Земли (N^+ , O^+ , He^+ , Ar^+) — происходит весьма существенная деградация полупроводниковых фотопреобразователей, проявляющаяся в уменьшении их фоточувствительности и тока. В

ряде работ экспериментально показано, что облучение протонами вызывает более значительные повреждения солнечных батарей (СБ), чем электронами. При облучении ионизирующими излучениями в кристаллах ФЭП возникают радиационные дефекты, концентрация которых зависит от дозы (интенсивности) излучения, т. е. от времени эксплуатации КА на разных высотах H в радиационных поясах Земли. Возникновение радиационных дефектов в кристаллах полупроводников сопровождается изменением равновесной концентрации носителей тока (электронов и дырок) вследствие захвата их дефектами, уровни которых лежат в запрещенной зоне полупроводника. При освещении

облученных протонами и электронами солнечных батарей КА заатмосферным Солнцем, это проявляется в уменьшении их основных параметров: тока короткого замыкания $I_{кз}$ и напряжения холостого хода $U_{хх}$.

В большинстве работ [2, 3, 6—8] по исследованию деградации $I_{кз}$ и $U_{хх}$ облучение протонами и электронами, доводилось до эквивалентных доз ($D_{ЭК}$), соответствующих времени эксплуатации КА в течение 3–4 лет на разных орбитах в интервале высот $H = 300...36000$ км.

Весьма актуальной в настоящее время является задача комплексного исследования процессов деградации основных параметров солнечных батарей космических аппаратов при больших временах их активного существования ($\Delta t \approx 10—20$ лет), т. е. в условиях ускоренной наземной имитации факторов космического пространства и их воздействия на основные параметры фотоэлектрических преобразователей.

Именно это являлось целью и задачей настоящей работы.

В данной работе исследовано воздействие имитируемых лабораторно потоков протонов и электронов радиационных поясов Земли, а также ионов азота верхней атмосферы Земли с энергией частиц $E = 60...200$ кэВ в широком интервале флюенсов $\Phi = 10^{10}—10^{16}$ част/см², соответствующих временам эксплуатации КА $\Delta t = 1...20$ лет для орбит в интервале высот $H = 300—36000$ км, на основные параметры солнечных батарей КА: ток короткого замыкания $I_{кз}$ и напряжение холостого хода $U_{хх}$.

Исследования были проведены на солнечных батареях двух типов: I тип фотопреобразователей изготавливался в КНР (Китайская академия космических технологий, г. Пекин), II тип фотопреобразователей производился в Украине (в Киевском политехническом институте).

МЕТОДИКА НАЗЕМНОЙ УСКОРЕННОЙ ИМИТАЦИИ ФАКТОРОВ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА, ИЗМЕРЕНИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ

Объектами исследования I типа солнечных батарей являлись четыре серии открытых кремниевых фотоэлектрических преобразователей п-р-типа, по 10 образцов в каждой серии с размерами $S = 20 \times 20$ мм². Толщина кристалла кремния составляла $d = 150$ мкм (с базовой областью р-типа), глубина залегания п-р-перехода равна $\delta \approx 0.4$ мкм. На нижнюю поверхность образцов ФЭП был нане-

сен проводящий слой серебра толщиной $\delta_1 \approx 100$ мкм. Все исследованные в работе солнечные батареи КА, изготовленные в КНР, являлись экспериментальными и были предназначены для космических миссий нового поколения.

Объектами исследования II типа солнечных батарей были четыре серии фотоэлектрических преобразователей по четыре образца в каждой серии. В данных сериях три образца были защищены кварцевым стеклом К-208, толщиной $\delta = 200$ мкм. Один образец ФЭП в каждой серии оставался открытым. Фрагменты фотоэлектрических преобразователей были приклеены к панели сотовой конструкции солнечной батареи, изготовленной из углепластиковых пластин с алюминиевым «сотовым» наполнителем. На углепластиковую пластину была приклеена для диэлектрической изоляции ФЭП полиимидная пленка типа ПММ (американское название КАРТОН), толщиной $\delta = 25$ мкм. На поверхность пленки из полиимида были приклеены кремниевые фотоэлектрические преобразователи размером $S = 10 \times 10$ мм² с глубиной залегания п-р-перехода $\delta = 0.35$ мкм.

Облучение фрагментов солнечных батарей производили в ускорителе протонов и электронов с совмещенными пучками частиц на комплексных имитаторах факторов космического пространства КИФК и УПИ с энергией частиц $E = 30...200$ кэВ. Методика облучения материалов, а также фрагментов солнечных батарей КА была описана ранее в работах [1, 9].

Для облучения фрагментов солнечных батарей потоками протонов и электронов в вакуумной камере имитатора КИФК были созданы ряд приспособлений для крепления образцов ФЭП на специальном поворотном устройстве. Неравномерность распределения плотности протонов и электронов на облучаемой поверхности ФЭП в режиме сканирования имела величину менее 3%. Для устранения вторичных электронов перед образцами ФЭП устанавливали диафрагму, на которую подводилось задерживающее напряжение $U = -250$ В. Количество частиц, падающих на облучаемую поверхность, измерялось при помощи электронного пересчетного прибора типа ПСТ-100.

Постоянный ток с облучаемого фрагмента солнечной батареи подводился к импульсному преобразователю тока БИТ-1. Импульсы считывались при помощи декадной системы. Измерение общего потока протонов и электронов производилось по току пучка $\sum I_{p,e}$ и времени облучения t .

Поскольку число протонов (электронов), падающих на образец за одну секунду при токе пучка $J = 1$ мкА/см² составляет $N = 6.25 \cdot 10^{12}$ част/см², то

время облучения солнечных батарей при фиксированной дозе D и площади образца S будет равно

$$t = DS/6.25 \cdot 10^{12} J \quad (1)$$

Методика измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) солнечных батарей космических аппаратов. Измерение вольт-амперных характеристик $I(U)$ исходных и облученных фрагментов ФЭП производили в вакуумной камере имитатора КИФК, используя источник заатмосферного Солнца типа ИС-160.

Световой поток на облучаемые ФЭП составлял величину $I_0 = 0.14$ Дж/см²с, что соответствовало единичной солнечной освещенности. Интервал длин волн имитатора ИС-160 составлял $\lambda\lambda = 200...2500$ нм, и был максимально приближен к спектру Солнца.

Контроль интенсивности излучения производили с помощью фотометра типа ТЕС-0693, а также радиометра энергетической освещенности РАТ-2ПКВАРЦ-41, который измерял полный энергетический поток падающего солнечного излучения. Измерение вольт-амперных характеристик (ВАХ) исследуемых ФЭП производили в поле излучения заатмосферного Солнца при равновесной (установившейся) температуре элементов СБ $T = 50$ °С. Электрическая схема измерения вольт-амперных характеристик приведена на рис. 1.

Расчет эквивалентных доз при облучении ФЭП протонами и электронами на высотах $H = 300...36000$ км. Полные флюенсы частиц рассчитывали, исходя из следующих условий.

Глубина проникновения в веществе (в кристаллах кремния) частиц с энергией $E = 60...200$ кэВ составляет: $\xi_P = 0.6...3$ мкм для протонов и $\xi_E = 30...200$ мкм для электронов.

Следует подчеркнуть, что для случая облучения открытых фотоэлектрических преобразователей (который был реализован в настоящих исследованиях) протоны и электроны проходили область п-р-перехода, ширина которого составляла $d \approx 0.4$ мкм, и поглощались в базовой области кри-

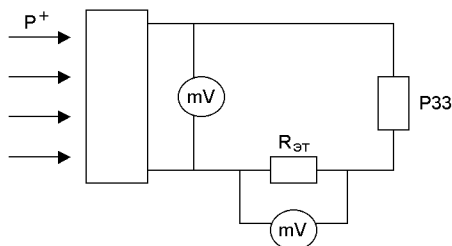


Рис. 1. Электрическая схема измерения вольт-амперных характеристик солнечных батарей

сталлов кремния на глубинах, указанных выше.

Особенно отметим, что для протонов и электронов с энергией $E = 60...200$ кэВ все падающие на образец частицы поглощались материалом солнечной батареи. В этом случае реализовывалась ситуация, когда поглощенная образцами доза ионизирующего излучения ΣD_{Π} была равна величине полного флюенса частиц, падающих на ФЭП:

$$\Sigma D_{\Pi} = \Sigma \Phi_0.$$

Энергетические спектры протонов и электронов средних энергий радиационных поясов Земли согласно [2] хорошо аппроксимируются функцией

$$N(E) = N_0 \exp(-E/E_0), \quad (2)$$

где N_0 — средняя плотность потока частиц на данной высоте, $E_0 = 100...150$ кэВ для протонов и $E_0 \approx 200$ кэВ для электронов.

Полный флюенс частиц Φ_0 , падающих на образец ФЭП, для фиксированной высоты H и времени t полета КА в радиационных поясах Земли определяли из выражений

$$\Phi = \Sigma D = N_K t_K = N_{\Pi} t_{\Pi}, \quad (3)$$

где N_K — средняя плотность потока частиц протонов и электронов в космосе (в радиационных поясах Земли) на данной высоте H полета КА, t_K — время жизни КА в радиационных поясах ($t_K = 1—20$ лет), N_{Π} — средняя плотность потока частиц (протонов, электронов, ионов) в наземном имитаторе, t_{Π} — время облучения образцов ФЭП в имитаторе КИФК.

Величину, соответствующую средней плотности потока протонов и электронов N_K для каждой из высот в интервале $H = 300...36000$ км, брали из экспериментальных данных по измерениям плотности потока частиц в радиационных поясах с помощью искусственных спутников Земли, приведенных в [2] для соответствующих энергий частиц в интервале $E = 60...200$ кэВ.

При облучении образцов ФЭП протонами, электронами, а также ионами азота в имитаторах КИФК и УПИ плотность тока J_P и J_E имела значение $J_P = J_E \leq 0.1$ мкА/см².

Отметим, что перед облучением элементов солнечных батарей в криогенные экраны вакуумных камер имитаторов КИФК и УПИ заливали жидкий азот (N_2), при этом равновесная (исходная) температура на поверхности солнечных батарей имела значение $T_0 = -80$ °С.

При включении пучков температура образцов ФЭП увеличивалась не более чем на $\Delta T = 5...6$ °С.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Проведенные эксперименты можно разбить на четыре серии.

Первая серия образцов ФЭП (I тип, КНР) подвергалась последовательному облучению отдельно протонами с энергиями $E = 60...200$ кэВ и флюенсами $\Phi_1 = 10^{14} - 10^{16}$ част/см², соответствующих эквивалентным поглощенным дозам материалами КА на геостационарной орбите в течение времени $\Delta t_k = 1...20$ лет.

Вторая серия ФЭП подвергалась облучению отдельно электронами с энергиями $E = 60...200$ кэВ и дозами $\Phi_1 = 10^{14} - 10^{16}$ част/см².

Третья серия образцов ФЭП облучалась отдельно ионами азота с энергиями частиц $E = 175$ кэВ и дозами облучения в интервале $\Phi_1 = 10^{15} - 10^{16}$ част/см².

Четвертая серия образцов ФЭП (II тип, КПИ) подвергалась совместному облучению протонами и электронами с энергией частиц $E = 175$ кэВ и флюенсами $\Phi_1 = 10^{10} - 10^{16}$ част/см², соответствующих эквивалентным поглощенным дозам материалами КА на высотах $H = 670...36000$ км в течение времени $\Delta t = 1...20$ лет эксплуатации космических аппаратов в радиационных поясах Земли.

На рис. 2 представлены результаты экспериментов первой серии образцов ФЭП. Приведены типичные зависимости вольт-амперных характеристик $I(U)$ открытых фотопреобразователей, соответствующих исходным образцам (кривая 1) и облученным фотопреобразователям (кривые 2—4) потоками протонов с энергией $E = 60, 120, 175$ кэВ при интегральных флюенсах облучения $\Phi_1 = 10^{14} - 10^{16}$ част/см². Каждая кривая построена по данным измерений и усреднений на трех образцах ФЭП. Максимальная доза облучения $\Phi_1 = 10^{16}$ част/см² соответствовала эквивалентной поглощенной дозе материалами КА на геостационарной орбите ($H = 36000$ км) в течение 20 лет. При всех трех энергиях протонов в исследованном интервале флюенсов происходит существенная деградация тока короткого замыкания и напряжения холостого хода с увеличением полного флюенса падающих на ФЭП частиц. Кривые 4 демонстрируют, например, уменьшение $I_{кз}$ и $U_{хх}$ практически в два раза при дозе облучения протонами $\Phi_1 = 10^{16}$ част/см².

Вторая серия экспериментов. В данной серии экспериментов облучение открытых фотопреобразователей первого типа (КНР) потоками электронов с энергией частиц $E = 60...200$ кэВ и флюенсами $\Phi_1 = 10^{14} - 10^{16}$ част/см² не приводило к изменениям хода вольт-амперных характеристик исследо-

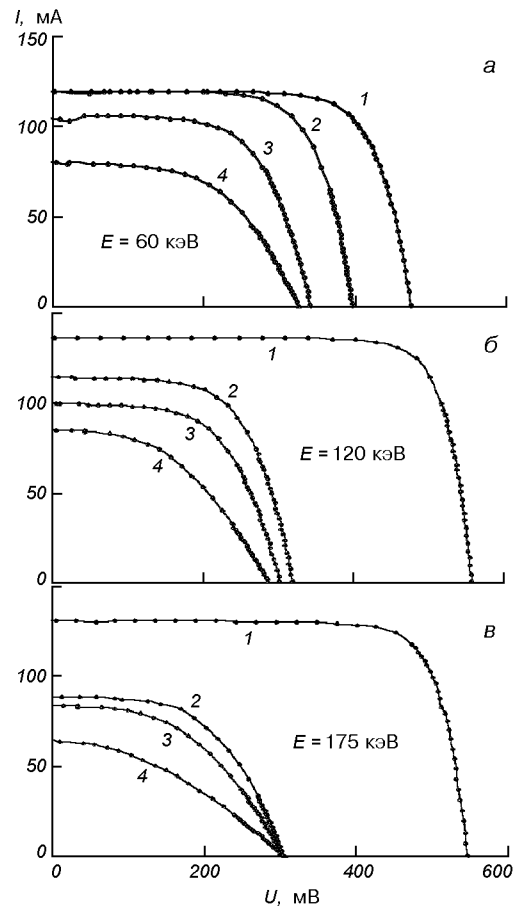


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики $I(U)$ открытых исходных и облученных протонами фотопреобразователей при различных энергиях частиц: 1 — до облучения; 2, 3, 4 — при дозах облучения протонами: $\Phi = (0.5; 1; 10) \cdot 10^{15}$ част/см²

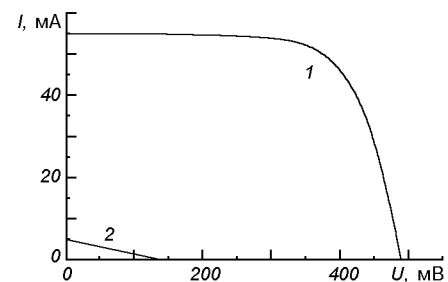


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики $I(U)$ открытых исходных и облученных ионами азота N^+ фотопреобразователей при энергиях частиц $E = 175$ кэВ: 1 — до облучения; 2 — при дозе облучения ионами N^+ : $\Phi = 1.4 \cdot 10^{16}$ част/см²

ванных солнечных батарей. Основные параметры фотопреобразователей оставались в этом практически без изменений.

Эксперименты третьей серии. На рис. 3 представлены типичные вольт-амперные характеристики

ки исходных открытых фотопреобразователей первого типа (кривая 1), а также облученных ФЭП ионами азота с энергией частиц $E = 175$ кэВ интегральной дозой $\Phi = 1.4 \cdot 10^{16}$ част/см². Видно, что в случае облучения солнечных батарей ионами азота дозами, эквивалентными 20 годам полета КА на высоте $H = 300$ км, происходит практически полная деградация $I_{кз}$ и $U_{хх}$; ток короткого замыкания в этом случае стремится к нулю.

Эксперименты четвертой серии. На рис. 4, а приведены типичные зависимости вольт-амперных характеристик $I(U)$ открытых фотопреобразователей II типа (КПИ) исходных образцов (кривая 1) и облученных ФЭП (кривые 2—4) совместными потоками протонов и электронов с энергией $E = 175$ кэВ при интегральных флюенсах облучения $\Phi_i = 10^{10} - 10^{14}$ част/см², соответствующих эквивалентным дозам, поглощенным в течение 1—5 лет на высоте $H = 670$ км. Даже при малых поглощенных дозах $\Phi = 2 \cdot 10^{13}$ част/см² (пять лет эксплуатации КА) происходит существенная деградация тока короткого замыкания и напряжения холостого хода. На рис. 4, б приведены типичные вольт-амперные

характеристики защищенных ФЭП (стеклом К-208 с толщиной 200 мкм) исходных образцов и облученных дозами $\Phi = 1.8 \cdot 10^{13}$ част/см², соответствующих пяти эквивалентным годам полета КА на высоте $H = 670$ км. Видно, что деградация защищенных ФЭП существенно меньше, чем незащищенных. В этом случае имеет место уменьшение тока короткого замыкания, тогда как напряжение холостого хода не изменяет своей величины при воздействии протонов и электронов.

На рис. 5, а представлены зависимости вольт-амперных характеристик открытых фотопреобразователей, облученных протонами и электронами при интегральных флюенсах $\Phi \leq 6 \cdot 10^{15}$ част/см², эквивалентных 1—5 годам эксплуатации солнечных батарей на высоте $H_2 = 8000$ км. Как и для случая открытых ФЭП, соответствующих высоте $H_1 = 670$ км (рис. 4, а), в данном случае происходит существенная деградация параметров солнечных батарей. Величина $U_{хх}$, например, уменьшается почти в два раза.

Аналогичные вольт-амперные характеристики облученных протонами и электронами открытых и

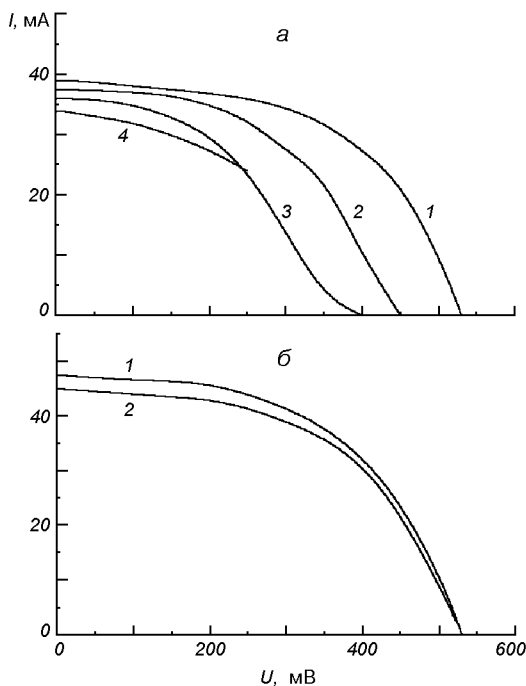


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики $I(U)$ открытых (а) и защищенных (б) фотопреобразователей. Кривые 1 — исходные образцы. Кривые 2, 3, 4 (а) после совместного облучения протонами и электронами с энергией $E = 175$ кэВ дозами, эквивалентными: 1, 3, и 5 годам полета КА на высоте $H = 670$ км. Кривая 2 (б) соответствует пяти годам полета

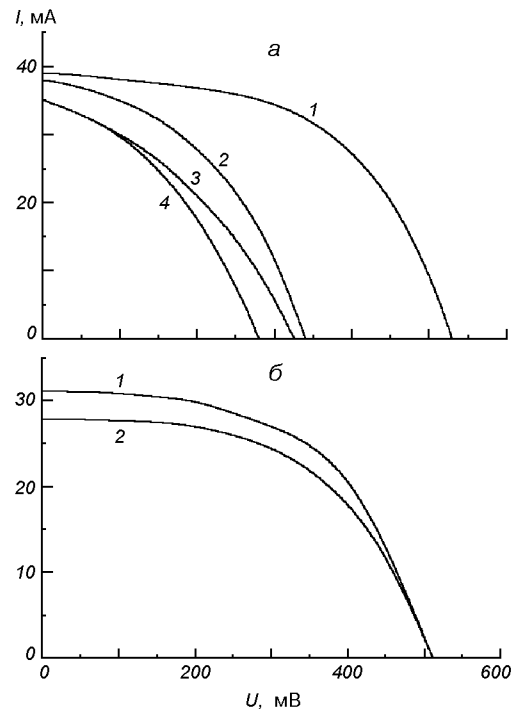


Рис. 5. Вольт-амперные характеристики $I(U)$ открытых (а) и защищенных (б) фотопреобразователей. Кривые 1 — исходные образцы. Кривые 2, 3, 4 (а) — после совместного облучения протонами и электронами с энергией $E = 175$ кэВ дозами, эквивалентными: 1, 3, и 5 годам полета КА на высоте $H = 8000$ км. Кривая 2 (б) соответствует пяти годам полета

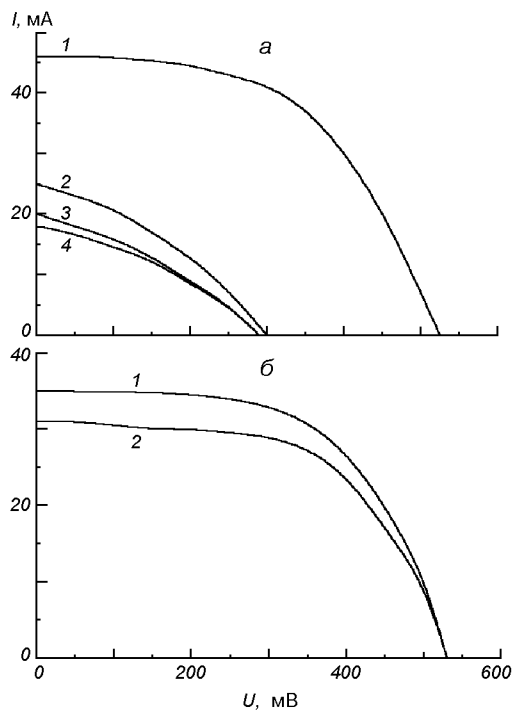


Рис. 6. Вольт-амперные характеристики открытых (а) и защищенных (б) фотопреобразователей. Кривые 1 — исходные образцы. Кривые 2, 3, 4 (а) — после совместного облучения протонами и электронами энергией $E = 175$ кэВ дозами, эквивалентными: 5, 10, и 15 годам полета КА на геостационарной орбите ($H = 36000$ км). Кривая 2 (б) соответствует 15 годам

защищенных ФЭП, представлены на рис. 6 для геостационарной орбиты (GEO, высота $H_3 = 36000$ км). На рис. 6, а приведены характеристики для открытых ФЭП, соответствующих исходным образцам (кривая 1), а также облученным ФЭП совместно протонами и электронами при флюенсах $\Phi_1 = 3 \cdot 10^{15} - 10^{16}$ част./см², соответствующих дозам на высотах $H_3 = 36000$ км в течение времени $\Delta t = 1 \dots 20$ лет. Видно, что в этом случае ток короткого замыкания и напряжение холостого хода уменьшаются в два раза.

Отметим, что экспериментальные результаты по деградации параметров солнечных батарей I типа (КНР) при их облучении протонами с энергией $E = 175$ кэВ и флюенсами $\Phi_1 = 10^{14} - 10^{16}$ част./см² (рис. 2, в), аналогичны экспериментальным данным по деградации солнечных батарей II типа (КПИ) при совместном облучении протонами и электронами с энергией $E = 175$ кэВ в интервале флюенсов $\Phi_1 = 10^{14} - 10^{16}$ част./см² (ср. рис. 2, в и б а).

ОБСУЖДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Обсудим теперь полученные экспериментальные результаты с точки зрения современных представлений о взаимодействии ионизирующих излучений с полупроводниковыми материалами в рамках теорий деградации фотоэлектрических преобразователей [2, 3, 6—8].

Оценим вначале поглощенные дозы исследованных ФЭП для флюенсов протонов и электронов в интервале величин $\Phi_1 = 10^{14} \dots 2 \cdot 10^{16}$ част./см² и их энергий $E = 60 \dots 200$ кэВ, а также соответствующий указанным флюенсам число эквивалентный срок пребывания космического аппарата в радиационных поясах Земли на геостационарной орбите.

Величина поглощенной дозы исследованных образцов ФЭП определяется известным соотношением

$$D = \Phi E / \rho \xi, \quad (4)$$

где Φ — полный флюенс частиц ρ — плотность полупроводника, ξ — глубина проникновения частиц в вещество, которая зависит от типа материала и энергии падающих частиц. В нашем случае для протонов $E = 60 \dots 200$ кэВ, $\Phi_1 = 10^{10} - 10^{16}$ част./см², $\rho = 2.33$ г/см³ (кремний), $\xi_p = 0.6 \dots 2$ мкм. Расчет поглощенной дозы для энергии протонов $E_1 = 60$ кэВ и флюенса $\Phi_1 = 10^{16}$ част./см² дал значение $D_1 = 5 \cdot 10^{10}$ рад, а для энергии $E_2 = 175$ кэВ и флюенса $\Phi_2 = 10^{16}$ част./см² — значение $D_2 = 10^{11}$ рад, т. е. в два раза больше.

Для геостационарной орбиты GEO ($H = 36000$ км) согласно [2] средняя плотность потока протонов для энергии $E = 175$ кэВ, имеет значение: $J_p = 1.6 \cdot 10^7$ част./см². Соответственно этой величине эквивалентная поглощенная доза материалами КА в течение одного года будет иметь значение $D_1 = J_p t = 5 \cdot 10^{14}$ част./см². Полный флюенс протонов $\Phi_1 = 10^{16}$ част./см² будет соответствовать в нашем случае 20 эквивалентным годам полета КА на геостационарной орбите. Таким образом, здесь при ускоренном облучении протонами был реализован случай наземной имитации воздействия факторов космоса на деградацию фотопреобразователей в течение интервала времени $\Delta t_k = 1 \dots 20$ эквивалентных лет на геостационарной орбите.

Последующее сравнение эксперимента с теоретическими моделями деградации солнечных батарей будем проводить для случая геостационарной орбиты, имеющей важное значение для полетов КА в радиационных поясах Земли.

Результаты по измерению вольт-амперных характеристик исходных и облученных протонами открытых ФЭП (рис. 2) позволили получить экспе-

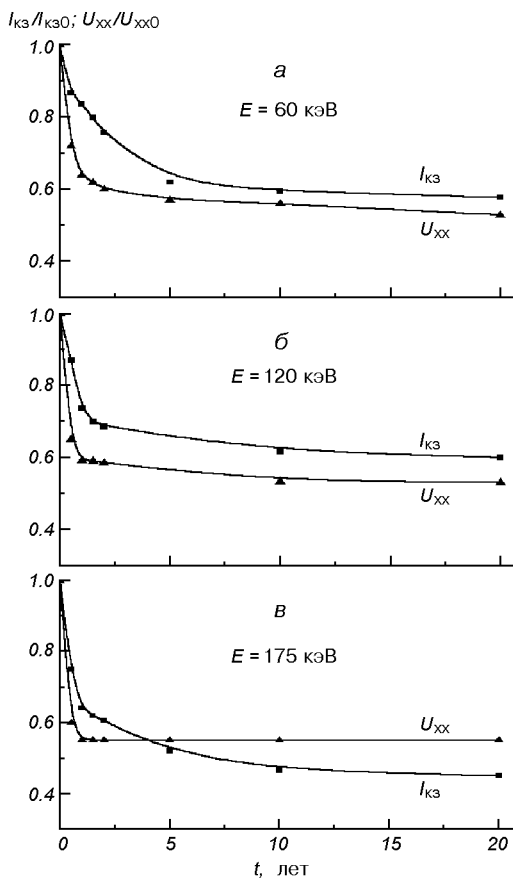


Рис. 7. Деградационная зависимость тока короткого замыкания $I_{кз}(D)/I_{кз}(0)$ и напряжения холостого хода $U_{xx}(D)/U_{xx}(0)$ солнечных батарей от их времени эксплуатации на GEO-орбите ($0 = 36000$ км) при различных энергиях протонов $E = 60...175$ кэВ. а, б, в — экспериментальные значения в сравнении с расчетными кривыми I для тока $I_{кз}(D)/I_{кз}(0)$ по формуле (8) теории [6], соответственно для параметров φ и θ : $\varphi_1 = 0.625$, $\theta_1 = 2.91$ г.; $\varphi_2 = 0.6$; $\theta_2 = 1.44$ г.; $\varphi_3 = 0.45$, $\theta_3 = 1.265$ г.

риментальные деградационные характеристики исследованных солнечных батарей, т. е. зависимости нормированной величины тока короткого замыкания $I_{кз}(D)/I_{кз}(0)$ и нормированной величины напряжения холостого хода $U_{xx}(D)/U_{xx}(0)$ от времени эксплуатации материалов КА на GEO-орбите в условиях наземной ускоренной имитации факторов космического пространства. На рис. 7 представлены экспериментальные зависимости нормированной величины тока короткого замыкания $I_{кз}(D)/I_{кз}(0)$ и нормированной величины напряжения холостого хода $U_{xx}(D)/U_{xx}(0)$ от времени полета КА на геостационарной орбите в течение $\Delta t_k = 1...20$ лет для трех энергий протонов: $E = 60, 120$ и 175 кэВ. Анализ деградационных кривых показывает, что

снижение тока короткого замыкания и напряжения холостого хода происходит по-разному для трех энергий протонов. В работах [1—8] принято считать, что критической величиной деградации солнечных батарей является уменьшение их тока короткого замыкания, и напряжения холостого хода на 25 % от исходной величины $I_{кз}(0)$ и $U_{xx}(0)$ при некоторой критической дозе облучения $D_{кр}$, соответствующей «времени жизни» фотопреобразователей в космическом пространстве.

Из рис. 7 видно, что для тока $I_{кз}(D)/I_{кз}(0)$ «время жизни» открытых ФЭП (I типа) на уровне деградации 25 % при облучении их протонами с энергией $E = 60, 120, 175$ кэВ составляет $\Delta t^* = 3.2, 1.3, 0.8$ г. При энергии протонов $E = 175$ кэВ наблюдается самое сильное уменьшение (более чем в два раза) тока короткого замыкания и напряжения холостого хода, а также имеет место максимальная скорость уменьшения основных параметров. Для энергии протонов $E = 175$ кэВ практически в два раза уменьшается «время жизни» солнечных батарей на уровне 25 % их деградации в сравнении с «временем жизни» для энергии $E = 60$ кэВ.

Обсудим теперь вопрос, связанный с существенной деградацией основных параметров открытых ФЭП двух типов (кривые рис. 2 и рис. 4—7), т. е. проанализируем полученные экспериментальные данные в рамках микроскопических [2, 7, 8] и феноменологической [6] теорий деградации солнечных батарей в поле космической радиации.

В настоящее время в качестве солнечных батарей космических аппаратов наибольшее распространение получили кремниевые фотоэлектрические преобразователи, изготовленные из кремния p-типа проводимости для базовой области (т. е. батареи n-p-типа). Эксперименты показали, что батареи с базовой областью кремния n-типа обладают существенно меньшей радиационной стойкостью, чем батареи из кремния p-типа проводимости. На поверхности кремния p-типа проводимости толщиной от 100 до 500 мкм формируют тонкий (порядка $\delta \approx 0.1—2$ мкм) высоколегированный слой с проводимостью обратного типа (n-типа). В нашем случае для исследованных батарей двух классов n-p-переходы имели толщину $\delta_1 = 0.4$ мкм, и $\delta_2 = 0.35$ мкм. При попадании солнечного света сквозь поверхность ФЭП в объем солнечной батареи неосновные носители, рожденные светом в легированном слое, устремляются к n-p-переходу за счет диффузии и дрейфа в электрическом поле. Носители, образованные светом в базовой области ФЭП, — в основном за счет диффузии. Электронно-дырочные пары разделяются n-p-переходом под действием контак-

тного электрического поля E_K . Разность потенциалов, возникающая на омических контактах к n -области и p -области фотопреобразователя обуславливает при этом ток во внешней цепи солнечной батареи.

Известно, что ширина запрещенной зоны для кристаллов кремния имеет значение $E_g = 1.107$ эВ. При поглощении света с длинами волн $\lambda < 115$ нм (т. е. при $h\nu > E_g$) происходит процесс эффективно образования электронно-дырочных пар. При этом, на границе раздела между n - p -переходом и базовой областью ФЭП формируется повышенная концентрация неосновных носителей тока величиной N_{S0} .

В теориях деградации солнечных батарей [2, 7, 8], вводится ряд параметров, описывающих кинетику миграции электронно-дырочных пар в необлученных и облученных ФЭП. Одним из параметров теории является диффузионная длина L неосновного носителя, которая равна среднему расстоянию от места образования неосновного носителя (в базовой области) до n - p -перехода. Величина L определяет тот эффективный объем, из которого рожденные светом носители собираются n - p -переходом. С диффузионной длиной L однозначно связано время жизни τ неосновных носителей: $\tau = L^2/D$, где D — коэффициент диффузии носителей тока.

Согласно теории деградации [2], основной причиной ухудшения фотоэлектрических характеристик облучаемых солнечных батарей является уменьшение времени жизни τ неосновных носителей тока. При облучении кремниевых фотопреобразователей в первую очередь меняется τ в базовой области, исходная величина которого обычно превышает несколько микросекунд. В легированном слое время жизни, составляющее $\tau \approx 1$ нс, падает лишь при высоких флюенсах облучения. Снижение времени жизни τ носителей обусловлено возрастанием скорости их объемной рекомбинации вследствие возникновения радиационных дефектов, имеющих глубокие энергетические уровни в запрещенной зоне полупроводника.

Время жизни τ связано с вероятностью рекомбинации W неосновных носителей тока соотношением: $W = 1/\tau$. Тогда согласно теории деградации солнечных батарей [2] для вероятности рекомбинации W^* неосновных носителей в облученных полупроводниках можно записать выражение

$$W^* = W_0 + W_1 \quad (5)$$

где W_0 — вероятность рекомбинации неосновных носителей на центрах, существовавших до облучения; W_1 — вероятность рекомбинации носителей на

центрах, генерированных радиацией. Соотношение (5) с учетом связи: $W = 1/\tau$ можно записать в виде

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

где τ_0 и τ^* — время жизни носителей до и после облучения флюенсом Φ , K^1 — коэффициент повреждения ФЭП, характеризующий эффективность введения дефектов единичным потоком частиц и вероятность рекомбинации на них. В теории деградации ФЭП [2] представляются выражения для коэффициентов повреждения K^1 солнечных батарей в случае одиночных точечных дефектов, которые образуют один рекомбинационный уровень в запрещенной зоне, а также для случая, когда облучение создает несколько уровней рекомбинации неосновных носителей в запрещенной зоне.

Эксперименты показали, что при облучении кремниевых фотопреобразователей электронами нижний порог их электронного повреждения лежит при $E_E = 145$ кэВ. Данная энергия соответствует пороговой энергии смещения атома из узла кристаллической решетки ($E_{CM} = 12.9$ эВ). Это значение было установлено в опытах по облучению электронами n -кремния [2]. Для p -кремния при электронном облучении приводится значение пороговой энергии дефектообразования $E_{DP} = 220$ кэВ [2], что соответствует минимальной энергии смещения двух атомов, т. е. образованию в кремнии дивакансии.

С этих позиций становятся понятными эксперименты II серии образцов, в которых облучение открытых ФЭП производили потоками электронов с энергиями $E = 60, 120, 175$ кэВ. Для указанных ФЭП (I группы) с базовой областью p -типа уровень энергии падающих на ФЭП электронов ($E \leq 175$ кэВ) был ниже пороговой энергии дефектообразования ($E_{DP} = 220$ кэВ), характерного для p -кремния. В макроскопических экспериментах при освещении ФЭП имитатором заатмосферного Солнца это не приводило к заметному изменению хода вольт-амперных характеристик солнечных батарей. Можно сказать, что даже незащищенные ФЭП являются радиационно стойкими по отношению к электронному облучению в области энергий электронов, не превышающих пороговое значение энергии дефектообразования $E_{DP} = 220$ кэВ.

В сравнении с электронами, тяжелые заряженные частицы (в нашем случае протоны и ионы азота) обладают значительно более высокой дефектообразующей способностью. Поэтому потоки тяжелых частиц, главным образом протонов радиационных поясов Земли на высотах $H = 600 \dots 36000$ км, в значительной степени будут опреде-

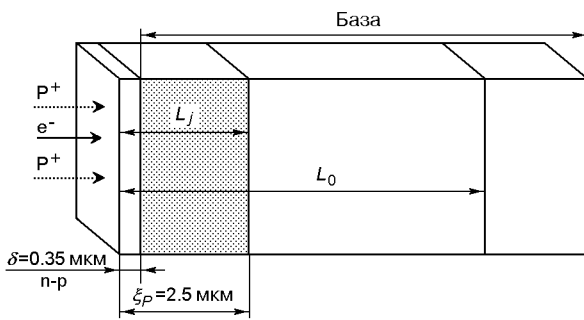


Рис. 8. Схема облучения элементов солнечных батарей совместными пучками протонов и электронов с энергией $E = 175$ кэВ

лять радиационные повреждения солнечных батарей КА. На малых высотах КА $H = 300...600$ км к этим воздействиям добавляется также влияние ионов верхней атмосферы Земли: (N^+ , O^+ , He^+ , Ar^+).

Экспериментальные результаты настоящей работы (рис. 2, 6) показывают существенное влияние потоков протонов и ионов азота на деградацию открытых ФЭП. Это находится в хорошем согласии с полученными ранее данными по деградации солнечных батарей в области энергий протонов $E = 0.4...10$ МэВ [2]. Однако отметим, что исследование по деградации ФЭП с интервале энергий протонов $E = 60...200$ кэВ практически нет. С другой стороны, концентрация протонов и электронов данных энергий имеет максимальное значение $\rho \approx 10^7...6 \cdot 10^8$ част/см²с в радиационных поясах Земли на всех высотах $H = 300...36000$ км.

Как отмечалось выше, в нашем случае глубина проникновения протонов с энергией $E = 60...200$ кэВ равна $\xi_p = 0.6...2.5$ мкм, а электронов — $\xi_e = 200...250$ мкм. Область p - r -перехода исследованных ФЭП равна $\delta = 0.35...0.4$ мкм (рис. 8). Здесь L_0 — диффузионная длина неосновных носителей тока в необлученных кристаллах кремния; L_J — диффузионная длина после облучения протонами.

Как в случае с электронами, в целом ряде работ [2, 3, 7, 8] при облучении кристаллов Si протонами были определены зависимости коэффициента повреждения кремния от энергии падающих протонов, а также построены теоретические модели для объяснения экспериментальных данных. Экспериментально установлено, что в широком интервале энергий протонов $E = 0.3...10$ МэВ, коэффициент повреждения кремния обратно пропорционален энергии протонов: $K_p(E) \propto 1/E$. Для интервала энергий протонов $E = 60...300$ кэВ теории предсказывали увеличение коэффициента повреждения K_p ,

т. е. зависимость $K_p = f(E_p)$ имела максимум в области энергий $E = 200...300$ кэВ. Результаты настоящих экспериментов хорошо качественно согласуются с моделями деградации ФЭП [2, 3, 7, 8] для области энергий протонов $E = 60...200$ кэВ, в которой повреждения увеличиваются с увеличением энергии протонов. Теоретические модели, которые позволили удовлетворительно объяснить экспериментальные данные, базировались на том, что в процессах рекомбинации носителей, наряду с точечными дефектами в кристаллах кремния, существенную роль играют также области разупорядочения. Было показано, что суммарный коэффициент повреждения кремния ΣK определяется выражением $\Sigma K = K_{ТД} + K_{ОР}$, где $K_{ТД}$ и $K_{ОР}$ — коэффициенты повреждения, обусловленные точечными дефектами и областям разупорядочения. В работах [2, 3, 7, 8] было показано, что вклад областей разупорядочения при протонном облучении является определяющим в процессе рекомбинации носителей тока. Пороговая энергия образования областей разупорядочения в кремнии составляет $E = 20...40$ кэВ, что значительно меньше энергии протонов в наших экспериментах $E = 175$ кэВ, т. е. по нашему мнению, данный механизм будет преобладающим.

В нашей работе при облучении ФЭП протонами энергией $E = 175$ кэВ реализуется весьма интересный случай, когда пробег протонов ξ_p практически в 10 раз превышает глубину залегания p - r -перехода, но меньше диффузионной длины L_0 неосновных носителей в необлученном образце. При этом рабочая область базы ФЭП (т. е. объем, из которого собираются носители, рожденные светом), оказывается поврежденной неоднородно. При больших флюенсах ($\Phi = 10^{16}$ част/см², что соответствует поглощенной дозе $D \approx 10^{11}$ рад) на глубине поглощения протонов $\xi_p = 2...2.5$ мкм образуется слой с повышенной концентрацией радиационных дефектов, препятствующий свободному дрейфу неосновных носителей в базе фотопреобразователя. Именно с этих позиций можно объяснить полученные в настоящей работе данные о существенном влиянии протонного облучения (рис. 2—7) на деградацию основных параметров солнечных батарей.

Сравним теперь экспериментальные результаты — ход нормированных величин тока короткого замыкания $I_{кз}(D)/I_{кз}(0)$ и напряжения холостого хода $U_{хх}(D)/U_{хх}(0)$ от времени эксплуатации материалов КА на GEO-орбите — с предсказаниями феноменологической теории деградации солнечных батарей Раушенбаха [6]. Согласно модели [6] возникновение радиационных дефектов в кристаллах полупроводников приводит к изменению равновес-

ной концентрации носителей тока вследствие захвата их уровнями дефектов. В теории [6] модель ФЭП представляется в виде «черного ящика», в который поступает солнечный свет, а выходит ток. Внутри кристалла электроны и дырки свободно передвигаются по всему объему. Изменение во времени стационарной концентрации неосновных носителей заряда в полупроводнике, возникающей при заданных условиях облучения, определяется в теории [6] уравнением

$$dN^*/dt = -(N^* - \varphi)/\theta, \quad (7)$$

где: $N^* = N/N_0$; N_0 — концентрация носителей в начальный момент времени t_0 , t — время облучения фотопреобразователей, θ — постоянная времени процесса деградации солнечных батарей, которая зависит от интегрального флюенса при облучении частицами и типа материала ФЭП, $\varphi = N_\infty/N_0$; N_∞ — предельная концентрация носителей (при $t \rightarrow \infty$).

Очевидно, что нормированная концентрация носителей тока $N^* = N/N_0$ будет пропорциональна полному току $I^* = I/I_0$, (где I_0 — начальное значение тока), а также пропорциональна напряжению на солнечной батарее $U^* = U/U_0$. Решение уравнения (7) будет иметь вид

$$I^* = U^* = \varphi + (1 - \varphi)\exp(-t/\theta). \quad (8)$$

Формула (8) дает аналитическое выражение деградационной характеристики, т. е. зависимость тока фотопреобразователя от времени его пребывания в поле космической радиации. Параметры φ и θ можно найти из условий эксперимента. Видно, что параметр φ определяет предельную величину тока солнечной батареи при $t \rightarrow \infty$, (т. е. предельный уровень деградации тока в поле космической радиации). Параметр θ определяет скорость спада деградационной характеристики фотопреобразователя от времени облучения.

Обработка экспериментальных деградационных кривых для тока $I_{кз}(D)/I_{кз}(0)$ и напряжения $U_{хх}(D)/U_{хх}(0)$ (рис. 7) показала, что наилучшее согласие экспериментальных данных для энергий протонов $E_1 = 60$ кэВ, $E_2 = 120$ кэВ, $E_3 = 175$ кэВ, с расчетными кривыми по формуле (8) имеет место при следующих значениях параметров φ и θ соответственно: $\varphi_1 = 0.625$, $\theta_1 = 2.91$ г.; $\varphi_2 = 0.6$, $\theta_2 = 1.44$ г.; $\varphi_3 = 0.45$, $\theta_3 = 1.265$ г. На рис. 7 показаны (сплошными линиями) теоретические зависимости нормированного тока $I_{кз}(D)/I_{кз}(0)$, рассчитанные согласно выражению (8) для указанных выше параметров φ и θ для энергий протонов $E = 60, 120,$

и 175 кэВ. Видно, что при данных параметрах наблюдается хорошее качественное и количественное согласие экспериментальных результатов с теоретической моделью [6]. Анализ деградационных характеристик для тока показывает (рис. 7), что максимальное влияние на деградацию исследованных ФЭП оказывают протоны с энергией $E = 175$ кэВ. В этом случае уровень деградации тока короткого замыкания и напряжения холостого хода является максимальным. Для тока, например, $\varphi_3 = I_{кз}(D)/I_{кз}(0) = 0.45$; т. е. уменьшение тока происходит более чем в два раза.

Особенно отметим, что для создания солнечных батарей нового поколения с большими временами жизни ($\tau \approx 10...20$ лет) в радиационных поясах Земли требуется разработка и создание как новых полупроводниковых материалов для фотопреобразователей (например из углеродных нанотрубок), так и новых эффективных радиационно стойких защитных покрытий, изготовленных из стекла и других прозрачных материалов.

В заключение отметим, что для понимания механизмов деградации солнечных батарей на базе новых полупроводниковых материалов, а также фотопреобразователей с перспективными защитными покрытиями требуется постановка новых экспериментальных и теоретических работ.

Авторы выражают глубокую благодарность ректору Харбинского политехнического университета профессору Ван Шугуо за обсуждение результатов работы, а также за большую поддержку исследований в области космического материаловедения.

1. Абраимов В. В., Еременко В. В., Верховцева Э. Т., и др. Комплексная система наземной имитации факторов космического пространства // Вестник Харьков. ун-та. Сер. физ. Ядра, частицы, поля.—2001.—№ 541, вып. 4.—С. 28—34.
2. Вернов С. Н., Акишин А. И. Влияние космических излучений на полупроводниковые фотопреобразователи // Модель космического пространства. — М.: НИИЯФ МГУ, 1983.— Т. 2.—С. 513—550; Заряженные частицы в магнитосфере Земли и других планет.—Т. 1.—С. 365—414.
3. Колтун М. М. Солнечные элементы. — М.: Наука, 1987.— 92 с.
4. Летин В. А., Заявлин В. Р. Анализ работы солнечных батарей низкоорбитальных космических аппаратов // Космич. исследования.—1994.—32, вып. 4—5.—С. 216—218.
5. Летин В. А., Заявлин В. Р., Губанова И. А. Солнечные батареи. Вопросы деградации // Электротехническая промышленность. Сер. 22. Источники тока.—1988.— Вып. 13.—С. 1—44.
6. Раушенбах Г. Справочник по проектированию солнечных батарей. — М.: Энергоатомиздат, 1983.—360 с.
7. Фаренбрух А., Бьюб Р. Солнечные элементы: Теория и эксперимент. — М.: Энергоатомиздат, 1987.—280 с.
8. Эллотт Дж. Фотоэлектрические преобразователи энергии // Прямое преобразование энергии. — М.: Мир, 1969.— 360 с.

9. Abraimov V. V., He Shiyu, Hu Zhenyu, Yang Dezhuang, et al. Space-induced degradation of parameters of solar batteries under the influence of the space environment factors // The Fifth Sino—Russian—Ukrainian Symposium on Space and Technology. — Harbin, 2000.—P. 724—734.

DEGRADATION OF PARAMETERS OF SOLAR CELLS UNDER THE INFLUENCE OF OPEN SPACE FACTORS

Hu Zhenyu, V. V. Abraimov, He Shiyu,
Yang Dezhuang, B. M. Rassamakin

We investigate effects of protons, electrons, and residual nitrogen ions in the Earth's atmosphere on the electrical properties of space-used solar cells, namely, the short-circuit current I_{sc} and the idle running voltage U_{ir} . The KIFK and UPI space environment simulators were used as irradiation equipments. The energy and

fluence ranges for these particles were $E = 60...200$ keV and $F = 10^{10}...10^{16}$ part/cm², respectively. In order to simulate changes of the curve $I - U$ at altitudes $H = 300...36000$ km for orbit lives $\Delta t = 1...20$ years, the irradiation results of the uncovered K-208 solar cells and the covered K-208 solar cells were compared in the fluence range between 10^{10} and 10^{16} part/cm². For the uncovered solar cells, the short-circuit current I_{sc} and the idle running voltage U_{ir} degraded by 50 percent and more when the fluence is $F = 5 \cdot 10^{14}$ part/cm². In the case of the covered solar cells, the short-circuit current I_{sc} and the idle running voltage U_{ir} decreased by nearly 25 percent when the combined fluence of electrons and protons is $F = 10^{16}$ part/cm² (such a fluence corresponds to a 20-year geostationary Earth orbit). However, the nitrogen ion irradiation (N^+) under the same condition caused the short-circuit current to decrease nearly to zero. The experimental results are analysed within the framework of irradiation-induced damage theories of the solar cells. The ratio of the current after the irradiation to the current before the irradiation I_D/I_0 is in good agreement with the solar cell irradiation-induced damage theory given by G. Rauschenbah.