

ВИКОРИСТАННЯ ПУЧКА ПРОТОНІВ ТАНДЕМНОГО ПРИСКОРЮВАЧА ЕПГ-10 ІЯД НАН УКРАЇНИ ДЛЯ ІМІТУВАННЯ РАДІАЦІЙНИХ ПОШКОДЖЕНЬ ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧІВ СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ (МЕТОДИКА, ПЕРШІ РЕЗУЛЬТАТИ)

**В. І. Сорока¹, М. В. Арцимович¹, А. П. Горбань², В. П. Костильов²,
А. В. Саченко², В. В. Черненко²**

¹ *Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

² *Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України, Київ*

Дослідження імітації радіаційних пошкоджень фотоперетворювачів (ФП) сонячних батарей космічних апаратів продиктовано практичною необхідністю, зумовленою розробкою в Інституті фізики напівпровідників (ІФН) НАН України нових технологій виготовлення кремнієвих ФП для космічних апаратів нового покоління класу "Мікросупутник". Розроблено методику імітаційних випробувань. Зразки опромінено протонами з енергією 4 МеВ. Доза опромінювання змінювалася в межах від 10^{11} до 10^{14} протонів/см². Неоднорідність опромінювання по поверхні зразків підтримувалася на рівні 1%. Досліджено вплив радіаційних пошкоджень на фотоенергетичні параметри ФП. Розглянуто можливі механізми впливу радіаційних пошкоджень на такі параметри, як струм короткого замикання, напруга розімкненого кола, коефіцієнт заповнення вольт-амперної характеристики, коефіцієнт корисної дії. Виявлено, що із зростанням дози опромінення має місце деградація фотоенергетичних параметрів. Планується продовження досліджень.

Імітація радіаційних пошкоджень матеріалів та виробів з них – це одна з багатьох можливостей використання пучків частинок, отриманих на електростатичних прискорювачах. В аналітичних оглядах [1, 2], підготовлених нами з метою пошуку найбільш раціонального використання прискорювальної техніки в нових швидкозмінних умовах, така можливість проте, не розглядалася. Дослідження, суть якого відображено в назві статті, продиктоване практичною необхідністю, зумовленою розробкою в ІФН НАН України нових технологій виготовлення фотоперетворювачів сонячних батарей космічних апаратів. [3].

Темі імітації впливу космічного випромінювання на матеріали присвячено огляд [4]. Питання методології імітації за допомогою прискорювачів протонів та електронів розглянуто в статтях [5, 6]. У цих роботах обґрунтовано доцільність лабораторних, прискорених, імітаційних випробувань, тобто випробувань, в яких комплексний характер впливу космічного простору (зокрема, одночасна дія різних типів немонохроматичного опромінювання)

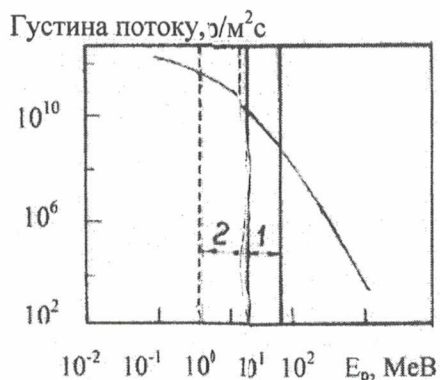


Рис. 1. Протони в радіаційному поясі Землі та енергетичні області, які перекривають електростатичні прискорювачі ІЯД НАН України: 1 – протони з прискорювача ЕПГ-10; 2 – протони з прискорювача "Каскад".

замінюється опромінюванням певного типу моноенергетичних частинок. У кожному випадку необхідно, перш за все, установити визначальний характер впливу. Наприклад, при пошкодженні напівпровідникових перетворювачів енергії домінуючим вважається опромінення протонами радіаційних поясів Землі.

На рис. 1 показано енергетичний спектр протонів у радіаційному поясі Землі [4] та енергетичні області, які можуть бути плавно перекриті електростатичними прискорювачами ІЯД НАН України. На тандемному прискорювачі ЕПГ-10 на даний час фактично можна мати протони з енергіями від 3 до 8 МеВ, а на тандемному прискорювачі "Каскад", який перебуває на стадії реконструкції, можна буде отримувати протони з енергіями приблизно від 0,6 до 2,3 МеВ.

На рис. 2 показано схему розробленої нами експериментальної установки "Імплантор", пристосованої для робіт з опромінювання. Моноенергетичний пучок протонів з прискорювача (з енергетичним розкидом на рівні 5 кеВ) проходить кватрупольні лінзи 1, коректор 2 положення пучка у вертикальній площині, роздавальний (у горизонтальній площині) магніт 3 і попадає в камеру зразків 4. Важливою вимогою є однорідність опромінення зразків. Щоб задовольнити цю вимогу пучок спочатку формувався лінзами 1. Його форму на екрані 5 можна було контролювати дистанційно (телекамера б). Положення пучка на екрані не було стабільним. При ширині пучка приблизно 5 мм межі його сканування по висоті становили 15 - 20 мм. На вході в камеру зразків центральна частина пучка вирізалася прямокутною вертикальною діафрагмою 7 розміром 10×4 мм. Ізольовані пробники 8, розміщені за діафрагмою 7, утворювали горизонтальну щілину шириною 5,2 мм. Заряд, перенесений протонами на пробники, стікав через вимірювальні прилади (ВП), розміщені на пульті прискорювача. Це давало можливість постійно контролювати положення пучка в процесі опромінювання зразків. З тією ж метою, досягнення однорідності опромінення, здійснювалося механічне сканування зразків у горизонтальній площині.

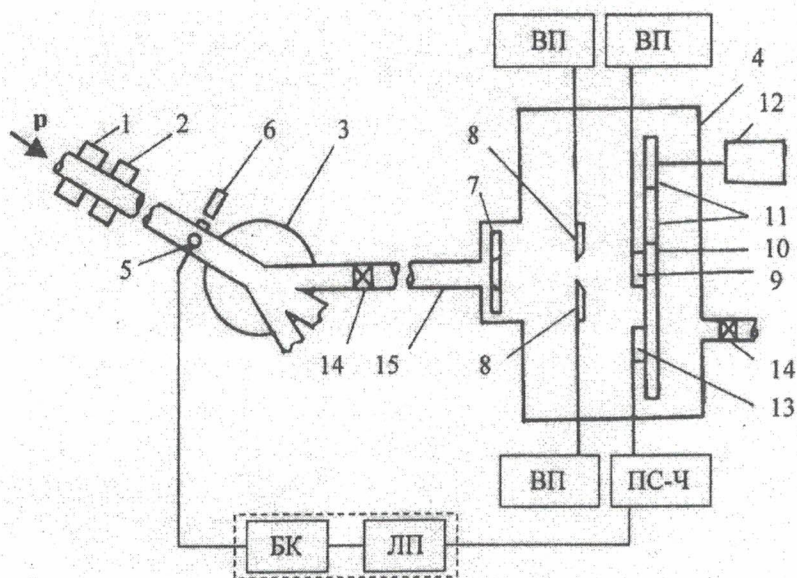


Рис. 2. Схема установки: 1 - кватрупольні лінзи, 2 - коректор, 3 - роздавальний магніт, 4 - камера зразків, 5 - екран, 6 - телекамера, 7 - прямокутна діафрагма, 8 - горизонтальні пробники, 9 - електрод, 10 - платформа, 11 - деталі механізму сканування, 12 - двигун, 13 - зразок, 14 - вакуумна засувка, 15 - іонопроовід.

Процедура опромінювання була такою. Спочатку пучок виводився на електрод 9, розміщений на платформі 10. Після отримання необхідних параметрів щодо положення та величини струму, пучок перекривався екраном 5. Далі включався механізм сканування 11 з приводом від двигуна 12. Досліджуваний зразок 13, як і електрод 9, розміщувався також на платформі 10. Механічне сканування відбувалося вздовж щілини, утвореної пробниками 8. (На рис. 2, для наочності зображення, механізм сканування повернуто на 90° .) Керування набором дози опромінення здійснювалося дистанційно, через блок керування (БК). При його запуску знімався екран 5 і одночасно вмикався лічильний прилад (ЛП). До лічильника надходили імпульси від перетворювача "струм - частота" (ПС-Ч), з'єданого із зразком 13. Для зняття заряду на поверхню зразка накладалася тонка ($0,37 \text{ мг/см}^2$) алюмінієва фольга. Опромінюючи першу серію зразків, користувалися приладом ПС-Ч, чутливість якого становила $1,5 \cdot 10^9$ протонів на відлік. По закінченні набору дози, розрахованої для даного зразка, з БК подавався сигнал на перекриття пучка екраном 5 і на зупинку відліків ЛП. Для кожного наступного зразка цикл опромінювання повторювався, починаючи з провідки пучка на електрод 9.

Перші результати отримано при дослідженні тестових зразків високоефективних фотоперетворювачів дифузійно-польового типу із структурою $n^+ - p - p^+$ [3]. Площа фотоприймальної поверхні зразка становила 25 мм^2 ($5 \times 5 \text{ мм}$), а товщина - $0,36 \text{ мм}$. Зразки виготовлялися на основі кремнію чохранського р-типу провідності з питомим опором $4,5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. На

поверхню зразків наносилось антивідбиваюче покриття TiO_2 товщиною 75 нм. Контакти до n^+ - і p^+ -областей утворювалися методом магнетронного розпилення алюмінію. Тиловий контакт був суцільним, а фронтальний мав вигляд довгих штрихів, що замикалися більш товстою шиною.

Пучок протонів з енергією 4 МеВ спрямовувався на фронтальну поверхню зразка, перпендикулярно до неї. При вказаній енергії довжина пробігу протонів у зразку ФП була ~ 150 мкм – це приблизно половина товщини зразка.

Фотоенергетичні параметри досліджуваних зразків вимірювалися на установці фототехнічних випробувань в умовах, еквівалентних атмосферній масі – нуль (АМ0). Така установка є в Центрі випробувань ФП та батарей фотоелектричних ІФН НАН України. Центр акредитовано органами Держспоживстандарту на проведення відповідних вимірювань.

Вимірювалися світлові вольт-амперні характеристики (ВАХ). З них визначалися такі фотоенергетичні параметри: струм короткого замикання $I_{кз}$ та його густина $J_{кз}$, напруга розімкненого кола $V_{рк}$, коефіцієнт заповнення ВАХ K , коефіцієнт корисної дії η . Умови опромінювання та результати дослідження впливу радіаційних пошкоджень на фотоенергетичні параметри ФП, викликані опромінюванням протонами, узагальнено в таблиці.

Фотоенергетичні параметри (умови АМ0) зразків ФП до та після опромінення протонами з $E_p = 4$ МеВ

Параметр	Зразок							
	78		82		102		106	
Доза, $см^{-2}$	0	$7,2 \cdot 10^{10}$	0	$7,4 \cdot 10^{11}$	0	$7,5 \cdot 10^{12}$	0	$7,5 \cdot 10^{13}$
$J_{кз}$, $мА/см^2$	34,5	20,9	35,5	15,3	36,5	6,11	36,3	1,15
$V_{рк}$, В	0,575	0,505	0,576	0,468	0,574	0,482	0,573	0,333
K	0,743	0,716	0,702	0,605	0,757	0,445	0,747	0,273
η , %	10,9	5,53	10,6	3,2	11,9	0,97	11,5	0,076

Величина невизначеності дози становила приблизно 10 % і залежала від чутливості ПС-Ч ($1,5 \cdot 10^9$ протонів на відлік) та, в основному, від невизначеності коефіцієнта вторинної електронної емісії (КВЕЕ). При розрахунках дози його величина бралася рівною $1,3 \pm 0,1$. Неоднорідність опромінення зразків по поверхні визначалася, головним чином, зміною швидкості руху зразка за одне проходження ним пучка протонів при механічному скануванні. Величина неоднорідності становила приблизно 1 %.

На рис. 3 наведено дозові залежності $I_{кз}$, $V_{рк}$, K , η . Можна бачити, що має місце сильна деградація струму короткого замикання. Уже після першої дози ($D = 7,2 \cdot 10^{10} см^{-2}$) його значення становить ~ 60 % від початкового, зменшуючись до величини $\sim 3,2$ % при найбільшій дозі ($7,5 \cdot 10^{13} см^{-2}$). У той же час деградація напруги розімкненого кола значно повільніша. До дози опромінення $7,5 \cdot 10^{12} см^{-2}$ спостерігається відносно невелике зменшення $V_{рк}$ (у межах ~ 20 %), збільшуючись до ~ 32 % при найбільшій дозі. Звертає на себе увагу досить значне зменшення коефіцієнта заповнення ВАХ, доходячи при максимальній дозі до значення ~ 40 % від початкового. Аналіз показав, що зменшення K зумовлено, в основному, збільшенням послідовного опору ФП з дозою опромінення. Дозова залежність коефіцієнта корисної дії η відображає характер дозових залежностей інших фотоенергетичних параметрів, оскільки

$$\eta = \frac{I_{кз} \cdot V_{рк} \cdot K}{P_{св} \cdot S},$$

де $P_{св}$ – рівень енергетичної освітленості фронтальної поверхні ФП при вимірюванні світлових ВАХ ($P_{св} = 1360$ Вт/м² для умов АМ0); S – площа поверхні зразка.

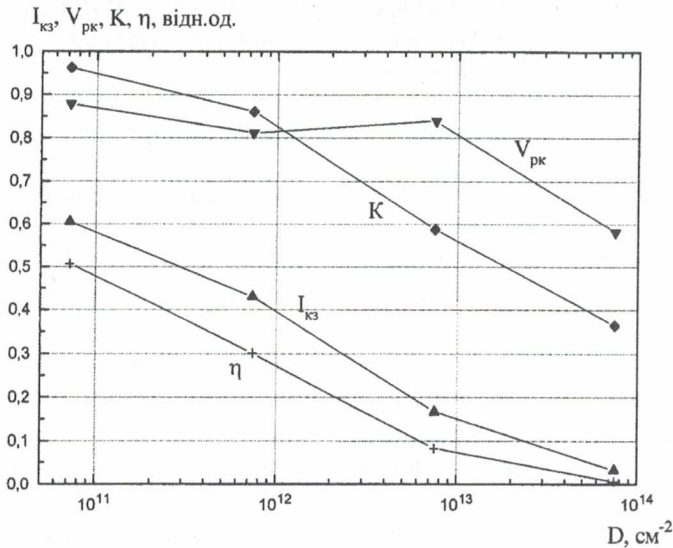


Рис. 3. Експериментальні залежності струму короткого замикання $I_{\text{кз}}$, напруги розімкненого кола $V_{\text{рк}}$, коефіцієнта заповнення вольт-амперної характеристики K та коефіцієнта корисної дії η ФП від дози опромінення протонами з енергією $E_p = 4 \text{ MeV}$ (нормування до початкових значень, до опромінення).

Для пояснення отриманих результатів використаємо запропоновані в роботі [7] модельні уявлення про механізм впливу радіаційного опромінення протонами на основні фотоенергетичні параметри ФП. У [7] запропоновано тришарову модель неоднорідної за глибиною рекомбінації, що враховує збільшення кількості рекомбінаційних дефектів, які створюються низькоенергетичними протонами в кінці пробігу. Там же отримано аналітичні вирази для $I_{\text{кз}}$ та $V_{\text{рк}}$ у випадку довільного співвідношення між глибиною порушеного шару та довжиною дифузії неосновних носіїв заряду до опромінення. Аналіз за формулами [7] експериментальних результатів даної роботи показав, що має місце задовільне кількісне узгодження теоретичних й експериментальних дозових залежностей $I_{\text{кз}}$ та $V_{\text{рк}}$. Швидкістю рекомбінації в області просторового заряду n^+ -р-переходу, порівняно з іншими механізмами рекомбінації, можна знехтувати.

Більш широкий набір експериментальних даних, які планується отримати найближчим часом, дасть змогу запропонувати певні зміни в технологію виробництва ФП, з метою покращення їх параметрів, а також удосконалення модельних уявлень про механізм впливу на ФП радіаційного опромінення протонами.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Сорока В. І. Можливості використання тандемних (електростатичних) прискорювачів для прикладних досліджень. - Київ, 1999. - 28 с. - (Препр. / НАН України. Ін-т ядерних досл.; КІЯД-99-1).
2. Сорока В. І. Можливості використання електростатичних прискорювачів для модифікування матеріалів. - Київ, 2002. - 24 с. - (Препр. / НАН України. Ін-т ядерних досл.; КІЯД-02-4).
3. Горбань А. П., Костылев В. П., Саченко А. В. и др. Разработка физико-технических основ создания высокоэффективных кремниевых фотопреобразователей и солнечных батарей космического и наземного применения // Авиационно-космическая техника и технология. - 1999. - Вып. 7. - С. 83 - 87.
4. Акишин А. И., Теплов И. Б. Имитация воздействия космических излучений на материалы // Физика и химия обработки материалов. - 1992. - Т. 3. - С. 47 - 57.
5. Неклюдов И. М., Борц Б. В., Ганн В. В., Толстоуцкая Г. Д. Методология имитации радиационных повреждений фотопреобразователей солнечных батарей с помощью ускорителей электронов и протонов // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. - 2003. - № 3. - С. 62.
6. Рыбалко В. Ф., Неклюдов И. М., Толстоуцкая Г. Д. и др. Ускорительный комплекс с совмещенными пучками протонов и электронов для имитатора факторов космического пространства // Там же. - 1999. - № 3. - С. 125 - 129.
7. Горбань А. П., Прима Н. А., Саченко А. В. та ін. Вплив радіації на кремнієві сонячні елементи. Теоретичне моделювання ефектів, пов'язаних з просторовою неоднорідністю розподілу радіаційних дефектів // Оптоелектроника и полупроводниковая техника. - 2001. - Вып. 36. - С. 57 - 64.

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПУЧКА ПРОТОНОВ ТАНДЕМНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭПГ-10
ИИЯИ НАН УКРАИНЫ ДЛЯ ИМИТИРОВАНИЯ РАДИАЦИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ
ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ
(МЕТОДИКА, ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ)**

В. И. Сорока, М. В. Арцимович, А. П. Горбань, В. П. Костылев, А. В. Саченко, В. В. Черненко

Исследование имитации радиационных повреждений фотопреобразователей (ФП) солнечных батарей космических аппаратов продиктовано практической необходимостью, обусловленной разработкой в Институте физики полупроводников НАН Украины новых технологий изготовления кремниевых ФП для космических аппаратов нового поколения класса «Микроспутник». Разработана методика имитационных испытаний. Образцы облучены протонами с энергией 4 МэВ. Доза облучения менялась в пределах от 10^{11} до 10^{14} протонов/см². Неоднородность облучения по поверхности образцов поддерживалась на уровне 1 %. Исследовано влияние радиационных повреждений на фотоэнергетические параметры ФП. Рассмотрены возможные механизмы влияния радиационных повреждений на такие параметры, как ток короткого замыкания, напряжение разомкнутой цепи, коэффициент заполнения вольтамперной характеристики, коэффициент полезного действия. Обнаружено, что фотоэнергетические параметры деградируют с увеличением дозы облучения. Планируется продолжение исследований.

**USE OF PROTON BEAM OF THE EPG-10 TANDEM ACCELERATOR
AT THE KYIV INSTITUTE FOR NUCLEAR RESEARCH FOR RADIATION IMITATION
OF SOLAR BATTERY PHOTOCONVERTERS OF SPACECRAFT EQUIPMENT
(TECHNIQUE AND FIRST RESULTS)**

V. I. Soroka, M. V. Artsymovych, A. P. Gorban, V. P. Kostylov, A. V. Sachenko, V. V. Chernenko

Studies of radiation damage imitation of spacecraft equipment solar battery photoconverters is called forth by design of new technologies of silicon photoconverters manufacture for new generation spacecraft equipments (Microsatellite class) at the Institute of Semiconductor Physics of the Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv). The technique of imitation testing has been designed. Protons of 4 MeV were used to irradiate samples. The radiation dose was between 10^{11} and 10^{14} protons/cm². The inhomogeneity of the dose to the samples surface was $\leq 1\%$. The effect of radiation damage on photoenergy parameters of photoconverters was studied. Feasible mechanisms of the radiation damage effect on such parameters as the short-circuit current, the open-circuit voltage, the fill factor of the volt-ampere characteristic and the efficiency were considered. The degradation of the photoenergy parameters with increased dose was revealed. The studies are planned to be continued.

Надійшла до редакції 28.02.05,
після доопрацювання – 16.05.05.