

ИСПЫТАНИЯ ПЗС-ЛИНЕЕК
НА ИСТОЧНИКАХ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ Co^{60}
РАЗЛИЧНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

С.В. Воронков, Т.Ю. Дроздова

Институт космических исследований
Российской академии наук, Москва

Приведены результаты исследования влияния гамма-излучения различной интенсивности на работоспособность ПЗС-линеек и оценку их стойкости.

Results of studying gamma-ray influence of various intensity on the CCD-line working ability and immunity are presented.

Введение

Электронные компоненты и микросхемы, входящие в состав приборов космического назначения, должны быть способны выдерживать воздействие радиационных факторов космического пространства на протяжении всего срока функционирования. В случае если данные о радиационной стойкости компонентов не предоставлены их производителями, перед разработчиками приборов встает задача проведения радиационных испытаний на моделирующих установках.

Моделирование воздействия ионизирующего излучения космического пространства при наземных испытаниях заключается в проведении облучения микросхем на гамма-установках с темпом внесения дозы 1...10 рад/с и последующего термического отжига. Однако параметры воздействия при этих испытаниях отличаются от реальных условий эксплуатации компонентов на борту космических аппаратов (КА) как по интенсивности, так и по спектральным характеристикам облучения. Такие испытания не всегда позволяют учесть возможность отжига радиационно-индуцированных дефектов в процессе внесения дозы. Поэтому оценка радиационной стойкости испытываемых компонентов может оказаться недостоверной.

Предположим, что существует зависимость радиационной стойкости электронных компонентов от интенсивности внесения дозы в процессе эксперимента. Выявить такую за-

висимость можно при проведении испытаний электронных компонентов на источниках гамма-излучения различной интенсивности. Это позволит в дальнейшем определять расчетным путем стойкость компонентов к воздействию низкоинтенсивного излучения по результатам испытаний на установках с высокой интенсивностью излучения.

Для решения указанной задачи в ИКИ РАН была создана моделирующая гамма-установка на базе источника Co^{60} и проведены испытания входящих в состав оптических солнечных датчиков (ОСД) ПЗС-линеек при различных интенсивностях излучения.

Испытания ПЗС-линеек при высокой интенсивности излучения

В приборах ОСД используются ПЗС-линейки Sony. Так как данные по их радиационной стойкости отсутствовали, несколько образцов ПЗС-линеек Sony ILX703A и Sony ILX751B прошли ряд испытаний на стойкость к гамма-излучению на источниках Co^{60} .

Цель испытаний состояла в определении пригодности ПЗС-линеек указанных типов к использованию в ОСД с точки зрения стойкости к воздействию ионизирующего излучения космического пространства, а также в нахождении зависимости уровня радиационной стойкости от интенсивности излучения.

Критерий стойкости исследуемых типов ПЗС-линеек в составе прибора ОСД к воздействию радиационных факторов выбирался исходя из следующих соображений.

При прохождении света через щелевую диафрагму, расположенную в ОСД перед ПЗС-линейкой, на изображении образуются девять откликов колоколообразной формы (кластеров), по числу щелей в диафрагме (рис. 1). Направление на Солнце вычисляется в ОСД на основе анализа положения кластеров на изображении ПЗС-линейки.

Воздействие ионизирующего излучения на ПЗС-линейки может стать причиной увеличения уровня темнового сигнала ПЗС, уменьшения уровня насыщения и изменения других характеристик. Это приведет к понижению максимального уровня сигнала ПЗС-линейки и соотношения сигнал/шум

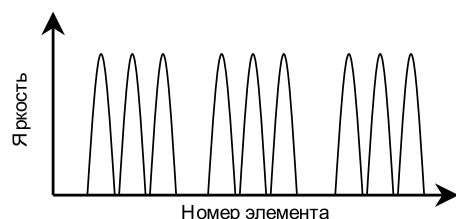


Рис. 1. Сигнал ПЗС-линейки

и, в конечном итоге, к снижению точности выполняемых прибором измерений или невозможности определения прибором направления на источник света.

Таким образом, при проведении экспериментов по облучению ПЗС-линеек контролировался уровень максимального сигнала ПЗС при подсветке источником света постоянной яркости, а также уровень темнового сигнала ПЗС. На основе анализа получаемых данных для каждой испытываемой ПЗС-линейки определялась критическая доза, т. е. доза, при поглощении которой указанные параметры выходят за допустимые границы, и процедура определения направления на источник света не может быть выполнена.

Испытания проводились в Российском научном центре рентгенорадиологии с использованием пучка излучения гамма-терапевтического аппарата РОКУС-АМ на базе Co^{60} .

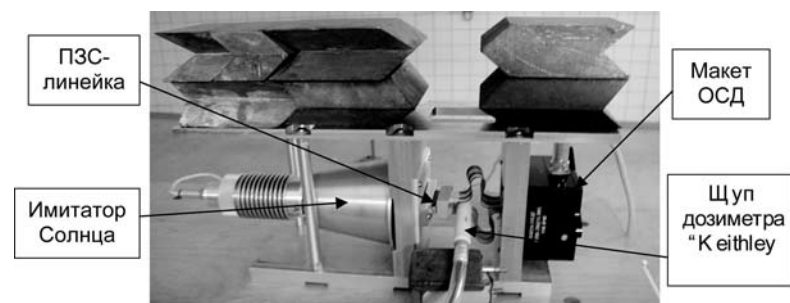


Рис. 2. Конструкция с закрепленными макетом ОСД и имитатором Солнца для испытаний ПЗС-линеек

Для проведения испытаний использовался лабораторный макет прибора ОСД, позволяющий менять образцы ПЗС-линеек в процессе эксперимента. В качестве источника света применялся имитатор Солнца (рис. 2).

Конструкция с закрепленными на ней прибором ОСД и имитатором Солнца располагалась под источником излучения, причем облучению подвергалась только ПЗС-линейка, остальная электроника прибора была закрыта свинцовыми блоками.

Перед началом облучения проводился замер экспозиционной дозы гамма-излучения на уровне ПЗС-линейки с использованием клинического дозиметра типа «Keithley 35040». При фиксированном расстоянии от прибора до источника излучения темп внесения дозы считался постоянным и составлял 1 рад/с.

Для проведения эксперимента использовались четыре ПЗС-линейки. Три образца ПЗС облучались во включенном (активном) состоянии, т. е. в течение всего эксперимента на образцы подавалось питание и происходило постоянное считывание информации. В промежутках между облучениями контролировался максимальный уровень сигнала образца ПЗС-линейки при работе с включенным имитатором Солнца. К сожалению, ряд особенностей электрических схем, используемых в макете ОСД при проведении эксперимента, не позволял контролировать изменение уровня темнового сигнала ПЗС. Один образец ПЗС облучался в выключенном (пассивном) состоянии, контроль его параметров проводился в промежутках между облучениями.

В ПЗС-линейках Sony ILX703A влияние радиационно-индуцированных дефектов приводит к уменьшению уровня смещения, что проявляется в виде уменьшения максимального уровня получаемого с ПЗС-линейки сигнала при определении направления на источник света имитатора Солнца.

На рис. 3 представлены графики изменения максимального сигнала ПЗС в зависимости от накопленной дозы для одного из образцов, облучавшегося во включенном состоянии, и для образца, облучавшегося в выключенном состоянии, на интервале внесения дозы от 9000 до 21500 рад. Интервал внесения дозы от 0 до 9000 рад отмечен монотон-

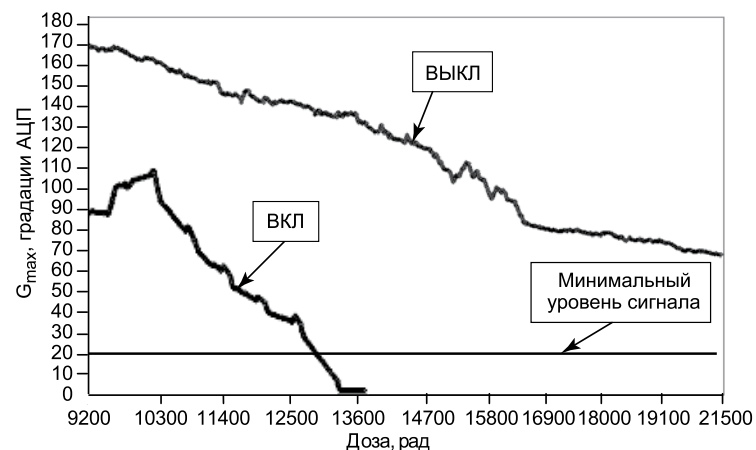


Рис. 3. Изменение максимальных значений сигналов образцов ПЗС-линейки Sony ILX703A

ным снижением максимального уровня сигнала для обоих образцов. Из графика видно, что снижение максимального уровня сигнала ПЗС-линеек Sony ILX703A с ростом суммарной поглощенной дозы происходит быстрее у образца, облучавшегося во включенном состоянии.

Горизонтальной линией на графике отмечено минимальное значение сигнала, при достижении уровня которого программно-алгоритмическое обеспечение прибора перестает вычислять направление на источник света. Суммарная накопленная доза, при которой максимальный уровень сигнала не превышает порогового значения, считается критической.

В табл. 1 приведены уровни поглощенных доз для облучаемых образцов ПЗС-линеек Sony ILX703A.

Таблица 1

№ образца	Режим работы	Суммарная поглощенная доза, крад
1	ВКЛ	9,2
2	ВЫКЛ	21,5
3	ВКЛ	13,2
4	ВКЛ	15,5

Образец № 1 облучался до внесения в него суммарной дозы, определяющей ожидаемый уровень воздействия на ПЗС-линейки, функционирующие в составе ОСД на КА. При испытаниях образцов № 2–4 ставилась задача определения уровня критической дозы, после внесения которой максимальное значение сигнала в кластерах ПЗС становилось меньше допустимого (см. рис. 3). Значения критических доз для указанных образцов приведены в табл. 1. Характеристики образца № 2, облучавшегося в выключенном состоянии, изменялись гораздо медленнее, чем характеристики остальных образцов. Облучение образца № 2 было остановлено после внесения в него суммарной дозы 21,5 крад, при этом образец был работоспособен и позволял прибору ОСД определять направление на источник света.

Принимая во внимание, что, в соответствии с существующими нормативными документами, решение о стойкости микросхемы к заданному уровню воздействия определяется по результатам облучения и последующего отжига, в течение нескольких месяцев проводилось наблюдение за процессом отжига радиационно-индуцированных дефектов в облученных образцах ПЗС. Значительную часть времени в процессе отжига ПЗС-линейки находились в выключенном состоянии при комнатной температуре. Каждые 7 дней осуществлялся контроль максимального уровня сигнала ПЗС-линеек при работе с имитатором Солнца, а также уровня их темнового сигнала. Два образца ПЗС были подвергнуты термическому отжигу при температуре 100 °С в течение 168 ч.

На рис. 4 представлен график зависимости максимального уровня сигнала образца № 3 ПЗС-линейки Sony ILX703A от времени. Данные были получены при работе ПЗС в составе макета ОСД с использованием имитатора Солнца. Видно, что в ходе отжига уровень максимального сигнала ПЗС начинает расти и в конечном итоге достигает значений, близких к наблюдаемым до начала облучения.

На остальных образцах ПЗС, подвергнутых отжигу, наблюдалась аналогичная картина. По результатам отжига, все образцы ПЗС-линеек Sony ILX703A признаны стойкими к суммарным поглощенным дозам ионизирующего излучения, значения которых приведены в табл. 1.

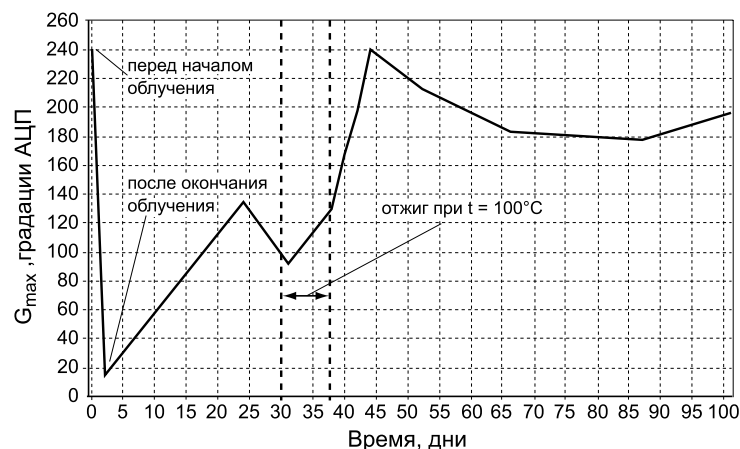


Рис. 4. График зависимости максимального уровня сигнала образца ПЗС-линейки Sony ILX703A, облученной во включенном состоянии, от дня наблюдения

В ходе испытаний ПЗС-линеек Sony ILX751B в каждый из четырех образцов, три из которых облучались во включенном состоянии, а один — в выключенном, была внесена поглощенная доза 15,5 крад. Влияние радиационно-индуцированных дефектов в ПЗС-линейках Sony ILX751B проявилось в росте темнового сигнала. В табл. 2 приведены значения темнового сигнала ПЗС-линеек, полученные при времени экспонирования 1 мс до облучения и после внесения в ПЗС поглощенной дозы.

При этом значительного изменения максимального уровня сигнала образцов ПЗС-линеек по мере внесения

Таблица 2

№ образца	Режим работы	Темновой сигнал до облучения, град. АЦП	Темновой сигнал после внесения в ПЗС 15,5 крад, град. АЦП
1	ВКЛ	1	37
2	ВЫКЛ	1	30
3	ВКЛ	1	39
4	ВКЛ	1	25

поглощенной дозы не было отмечено. После внесения в ПЗС-линейки 15,5 крад макет ОСД был способен определять направление на источник света при работе со всеми облученными ПЗС.

По окончании облучения в течение нескольких месяцев проводилось наблюдение за процессом отжига радиационно-индуцированных дефектов в ПЗС-линейках. В ходе отжига было отмечено снижение уровня темнового сигнала каждой из ПЗС-линеек. При использовании облученных ПЗС-линеек в макете ОСД направление на источник света определялось с заданной точностью. Все сказанное позволяет признать ПЗС-линейки Sony ILX751B стойкими к суммарной поглощенной дозе ионизирующего излучения 15,5 крад.

Испытания ПЗС-линеек при низкой интенсивности излучения

Как уже упоминалось, испытания электронных компонентов приборов при повышенных интенсивностях излучения позволяют быстро получить оценку радиационной стойкости, но достоверность такой оценки в случае компонентов космического назначения может быть низкой, в силу отличия условий испытаний от условий космического пространства. Речь здесь идет в первую очередь о скорости внесения дозы в испытуемый компонент. Исследование характера поведения критических параметров микросхем при накоплении дозы в условиях низкой интенсивности ионизирующих излучений требует экспериментов при темпах вноса дозы, близких к наблюдаемым в реальных условиях полета. Для проведения подобного рода экспериментов в ИКИ РАН создана «Гамма-установка низкоинтенсивного излучения», позволяющая проводить облучение электронных компонентов и микросхем при интенсивностях излучения от $2 \cdot 10^{-4}$ до $1 \cdot 10^{-2}$ рад/с.

Для проведения испытаний на установке низкоинтенсивного излучения были взяты по два образца каждого типа ПЗС-линеек Sony ILX 703A и ILX 751B. Образцы выбраны из тех же производственных партий, что и ПЗС-линейки, испытанные ранее в Российском научном центре рентгено-радиологии. Испытания ПЗС-линеек на установке проходили в составе макетной платы, осуществляющей управление

электрическими режимами работы ПЗС и контроль их параметров. При этом обеспечивалась максимальная близость электрических режимов работы ПЗС-линеек к штатным, используемым в ОСД.

Схема эксперимента для каждой модели ПЗС-линеек была одинаковой. Одна ПЗС находилась все время в активном состоянии (при поданном питании), вторая ПЗС-линейка — в пассивном (выключенном) состоянии, ее включение осуществлялось раз в сутки на несколько минут с целью контроля параметров. Контроль параметров ПЗС-линеек проводился в автоматическом режиме один раз в сутки. Интенсивность излучения составляла $1,2 \cdot 10^{-3}$ рад/с.

Сравнение данных, накопленных в процессе испытаний ПЗС-линеек Sony ILX703A на низкоинтенсивной установке, с данными, полученными в процессе облучения таких же ПЗС-линеек при мощности дозы 1 рад/с, позволило оценить степень влияния интенсивности излучения на радиационную стойкость этих ПЗС-линеек.

При проведении испытаний на гамма-установке в ИКИ РАН контролировались те же параметры ПЗС, что и в процессе эксперимента при мощностях дозы 1 рад/с. Воздействие ионизирующего излучения привело к росту темнового сигнала и снижению максимального уровня сигнала в каждом из образцов ПЗС, при этом у образца, находившегося в активном состоянии при облучении, изменение наблюдаемых параметров происходило интенсивнее, чем у пассивного образца.

На рис. 5 представлены три кривые, описывающие динамику изменения максимального сигнала ПЗС-линейки Sony ILX703A при накоплении дозы в зависимости от интенсивности излучения и электрического режима работы ПЗС.

Цифрами на рис. 5 обозначены кривые: 1 — нормированные значения максимального сигнала ПЗС-линейки, облучаемой при мощности дозы 1 рад/с во **включенном** состоянии; 2 — нормированные значения максимального сигнала ПЗС-линейки, облучаемой при мощности дозы $1,2 \cdot 10^{-3}$ рад/с во **включенном** состоянии; 3 — нормированные значения максимального сигнала ПЗС-линейки, облучаемой при мощности дозы $1,2 \cdot 10^{-3}$ рад/с во **выключенном** состоянии.

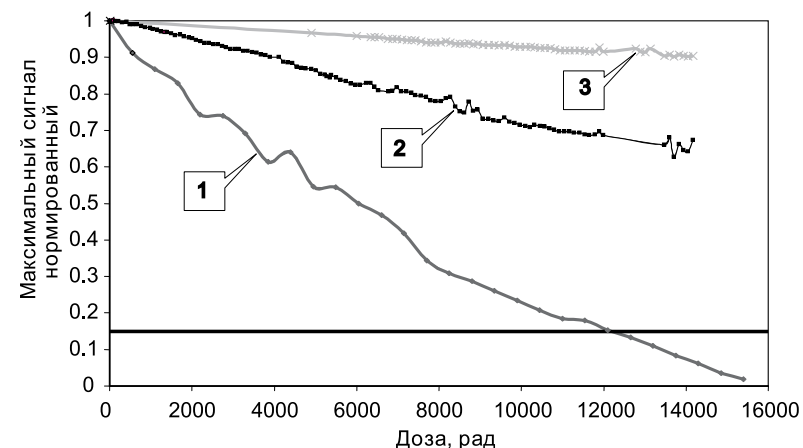


Рис. 5. Зависимость нормированного максимального уровня сигнала ПЗС-линейки Sony ILX703A от внесенной дозы

Горизонтальная линия на рис. 5 обозначает минимально допустимый уровень сигнала ПЗС-линейки, при котором она может считаться работоспособной с точки зрения использования в ОСД для определения параметров направления на источник светового сигнала.

Кривая 1 была получена во время испытаний ПЗС в составе ОСД в Российском научном центре рентгенорадиологии, кривые 2 и 3 — при испытаниях образцов ПЗС на «Гамма-установке низкоинтенсивного излучения» в ИКИ РАН.

Как видно из данных рис. 5, при воздействии низкоинтенсивного излучения характеристики ПЗС-линейки деградируют гораздо медленнее, чем в случае ускоренного вноса дозы. При этом существенную роль играет электрический режим ПЗС, в котором проходит ее облучение (см. кривые 2 и 3 на рис. 5).

Влияние электрического режима работы на изменение характеристик ПЗС-линеек при внесении дозы также иллюстрирует рис. 6, на котором показано, как изменялся средний уровень темнового сигнала активной ПЗС (см. 1 на рис. 6) и пассивной ПЗС (см. 2 на рис. 6).

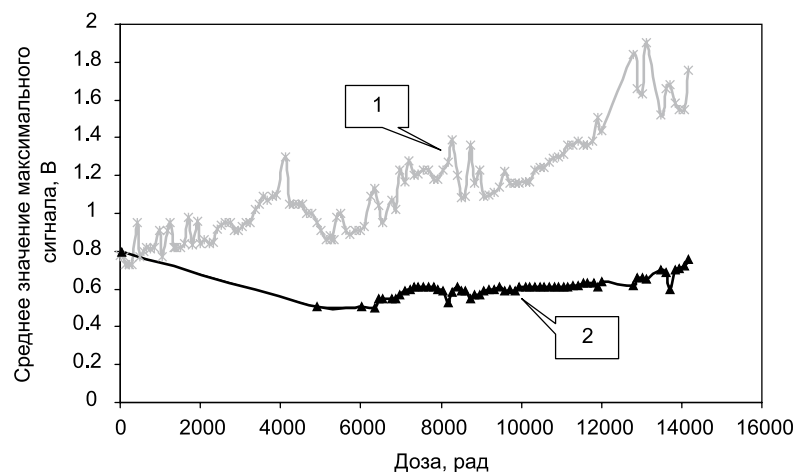


Рис. 6. Зависимость среднего уровня темного сигнала ПЗС-линейки Sony ILX703A от внесенной дозы

При испытаниях ПЗС-линеек Sony ILX751B на воздействие низкоинтенсивного излучения контролировались уровень темного сигнала, а также разность между максимальным уровнем сигнала в кластерах, образованных прохождением света через расположенную перед ПЗС светонепроницаемую маску с тремя щелями, и средним уровнем темного сигнала.

На рис. 7 представлены зависимости уровней темного сигнала активной (см. 1 на рис. 7) и пассивной (см. 2 на рис. 7) ПЗС Sony ILX751B от поглощенной дозы при интенсивности облучения $1,2 \cdot 10^{-3}$ рад/с.

При сравнении данных рис. 7 и значений, приведенных в табл. 2, видно, что при уменьшении интенсивности излучения наблюдается уменьшение темпа роста темного сигнала ПЗС-линеек Sony ILX751B.

На рис. 8 представлены графики, характеризующие изменение нормированного значения разности между максимальным уровнем сигнала в кластерах и средним уровнем темного сигнала по мере внесения дозы для испытаний на источниках различной интенсивности.

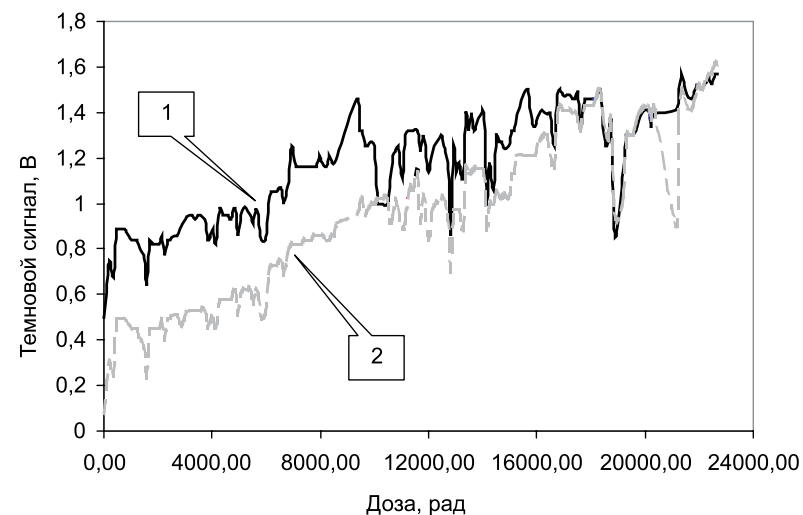


Рис. 7. Зависимость темного сигнала ПЗС-линеек Sony ILX751B от внесенной дозы

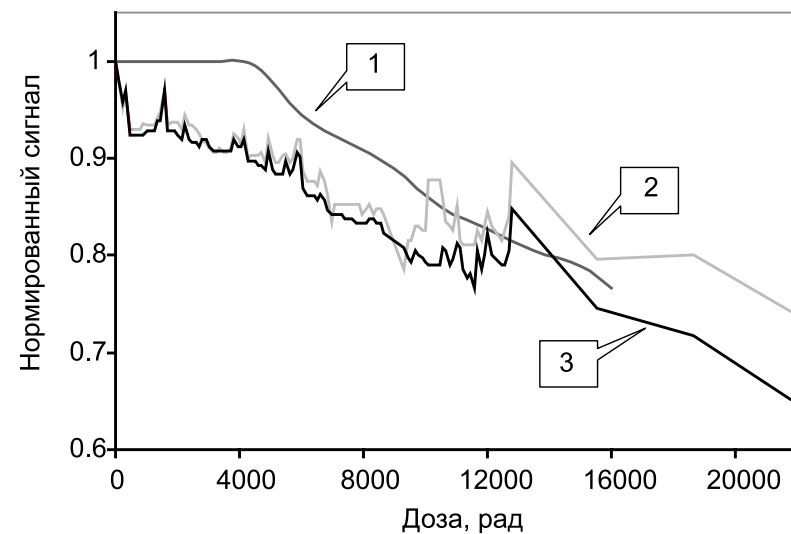


Рис. 8. Зависимость нормированного значения разности максимального сигнала и темного сигнала ПЗС Sony ILX751B от внесенной суммарной дозы

Цифрами на рис. 8 обозначены кривые: 1 — нормированные значения разности максимального уровня сигнала в кластерах и темнового сигнала ПЗС-линейки, облучаемой при мощности дозы 1 рад/с во **включенном** состоянии; 2 — нормированные значения разности максимального уровня сигнала в кластерах и темнового сигнала ПЗС-линейки, облучаемой при мощности дозы $1,2 \cdot 10^{-3}$ рад/с во **включенном** состоянии; 3 — нормированные значения разности максимального уровня сигнала в кластерах и темнового сигнала ПЗС-линейки, облучаемой при мощности дозы $1,2 \cdot 10^{-3}$ рад/с в **выключенном** состоянии.

Графики показывают, что значительных отличий в характере изменения наблюдаемых параметров при испытаниях образцов ПЗС Sony ILX751B на источниках различной интенсивности не отмечено, в отличие от ПЗС-линейки Sony ILX703A, радиационная стойкость которой повышалась при уменьшении интенсивности излучения.

Выводы

При проведении экспериментальных работ были получены следующие основные результаты.

1. Характеристики ПЗС-линеек подвержены деградации вследствие влияния радиационно-индуцированных дефектов.
2. На скорость изменения характеристик ПЗС может оказывать влияние как электрический режим их работы, так и интенсивность излучения.
3. Наибольшую радиационную стойкость показали образцы ПЗС-линеек, облучавшиеся при низком темпе вноса дозы в выключенном состоянии.
4. При испытаниях ПЗС-линеек Sony ILX703A наблюдалось существенное замедление деградации параметров при понижении интенсивности излучения, в случае ПЗС-линеек Sony ILX751B эффект понижения мощности дозы не оказывал значительного влияния на темп изменения контролируемых параметров.
5. Для использования в существующих проектах в составе ОСД пригодны как ПЗС-линейки Sony ILX703A, так и ПЗС-линейки Sony ILX751B.

ИСПЫТАНИЯ ОПТИЧЕСКОГО СОЛНЕЧНОГО ДАТЧИКА НА ПРОТОННОМ УСКОРИТЕЛЕ

С.В. Воронков, Т.Ю. Дроздова

Институт космических исследований
Российской академии наук, Москва

Представлен сравнительный анализ математического моделирования протонного воздействия на работу оптического солнечного датчика и результатов испытаний ОСД на протонном ускорителе.

A comparative analysis of mathematical modeling the proton influence on the optical solar sensor operation together with results of the optical solar sensor testing on the proton accelerator are presented.

При выполнении программы полета космические аппараты и бортовая аппаратура подвергаются воздействию заряженных частиц, в том числе протонов солнечных космических лучей (СКЛ) и галактических космических лучей (ГКЛ). Оптический солнечный датчик предназначен для работы в системах управления ориентацией космических аппаратов. Испытания оптического солнечного датчика (ОСД) на протонном ускорителе проводились с целью получения оценки стойкости электронных компонентов прибора к возникновению одиночных сбоев при воздействии протонов космического пространства.

Вызванные попаданием протонов в микросхемы ОСД одиночные сбои могут приводить к нарушениям штатного функционирования прибора или его отказу. Кроме того, воздействие протонов на оптический блок ОСД приводит к образованию помеховых объектов на изображениях ПЗС-линейки, что в свою очередь может стать причиной возникновения ошибок при определении ориентации.

Исследования влияния протонного излучения на работу оптического солнечного датчика проводились в два этапа:

1. Испытания фотоприемного элемента прибора — ПЗС-линейки — в составе макета ОСД на стойкость к протонному излучению и оценка работоспособности прибора при протонном воздействии с помощью математического моделирования.