Сравнение эффектов структурных повреждений в матрицах КМОП и ПЗС, применяемых в звёздных датчиках, на примере CMV4000 и ФППЗ «Лев-4»

Е. В. Белинская¹, А. А. Кобелева¹, П. С. Сметанин¹,
Я. Д. Эльяшев¹, М. Е. Черняк²

¹ *Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail: akobeleva.ikiran@gmail.com*

² *Экспериментальное научно-производственное объединение
«Специализированные электронные системы», Москва, 115409, Россия
E-mail: mecher@spels.ru*

Работа посвящена исследованию и сравнению стойкости матриц КМОП и ПЗС, применяемых в звёздных датчиках, к воздействию отдельных частиц по эффектам структурных повреждений на примере CMV4000 и ФППЗ «Лев-4». Описываются эффекты, наблюдаемые при воздействии потока нейтронов с флюенсом $5 \cdot 10^{10}$ нейтрон/см², который соответствует дозе структурных повреждений 1,55 рад. Для каждой матрицы приводятся: зависимости среднего значения темнового сигнала и среднеквадратичное отклонение темнового сигнала по кадру от времени экспозиции до и после воздействия нейтронов; гистограммы распределения яркости пикселей до и после облучения для двух значений времени экспонирования; количество ошибочно локализованных объектов в обеих матрицах при заданных порогах локализации. Наглядно представлено изменение яркости RTS-пикселя от кадра к кадру. Рассмотрен эффект снижения эффективности переноса заряда в ПЗС-матрице. Изучено влияние «отжига» при комнатной температуре на фотометрические характеристики матриц. Описан алгоритм выделения звёзд на фоне шума матрицы. Проведено исследование зависимости фотометрических параметров матриц от температуры кристалла. Предложены меры по снижению влияния структурных повреждений на фотометрические характеристики матриц.

Ключевые слова: КМОП, ПЗС, испытания, стойкость, нейтроны, эффекты структурных повреждений, ионизирующее излучение космического пространства

Одобрена к печати: 26.11.2018
DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-119-130

Введение

Основой приборов звёздной ориентации является фоточувствительная матрица. Современные приборы звёздной ориентации серии БОКЗ разработки ИКИ РАН, обладающие длительной лётной эксплуатацией, применяют отечественные ПЗС-матрицы (приборы с зарядовой связью) типа «Лев» и «Сфера» фирмы ЗАО «Элар». Эти ПЗС-матрицы разработаны специально для применения в приборах БОКЗ и имеют металлокерамические корпуса с встроенным модулем охлаждения. В перспективных приборах БОКЗ используются промышленные быстродействующие, малошумящие КМОП-матрицы (комплементарная структура металл-оксид-полупроводник) CMV4000, в которых реализована первичная оцифровка и обработка сигнала, но нет встроенного модуля охлаждения.

Оба типа фотоприёмных устройств являются чувствительными к воздействию ионизирующих излучений космического пространства (ИИ КП) по эффектам структурных повреждений.

Эффекты структурных повреждений обусловлены образованием дефектов в структуре кремния при попадании отдельных ядерных частиц (ОЯЧ), таких как протоны естественных радиационных поясов Земли (ЕРПЗ) и солнечных космических лучей (СКЛ) и тяжёлые заряженные частицы (ТЗЧ) СКЛ и галактических космических лучей (ГКЛ) (Чумаков, 2004).

Требования по стойкости к воздействию ОЯЧ по эффектам структурных повреждений, как правило, задаются в виде зависимости эквивалентного флюенса протонов с энергией 10 МэВ

от массовой толщины защиты. В соответствии с ОСТ 134-1034 эффекты структурных повреждений от воздействия ИИ КП моделируются потоком нейтронов или протонов.

ИКИ РАН совместно с АО «ЭНПО «СПЭЛС» были проведены испытания CMV4000 и ФППЗ «Лев-4» на стойкость к воздействию ОЯЧ по эффектам структурных повреждений.

Испытания обоих образцов проводились на моделирующей установке № 40 (ФГУП НИИП) до уровня флюенса $5 \cdot 10^{10}$ нейтрон/см², который соответствует:

- дозе структурных повреждений — 1,55 рад;
- эквивалентному флюенсу протонов с энергией 10 МэВ — $2,5 \cdot 10^9$ протон/см²;
- структурным повреждениям, полученным ФППЗ в составе БОКЗ-М60 за 10 лет на круговой орбите 800 км.

Поток нейтронов воздействует на кристаллическую решётку кремния, что может вызвать образование первичных выбитых атомов, структурные повреждения и появление в запрещённой зоне новых энергетических уровней. Это приводит к деградации фотометрических параметров и проявляется в виде:

- увеличения среднего значения темнового сигнала;
- увеличения неравномерности темнового сигнала (рост среднеквадратического отклонения);
- образования пикселей с очень большим значением темнового тока («горячих» пикселей);
- уменьшения эффективности переноса заряда в ПЗС-матрицах;
- появления нестабильности темнового тока отдельных пикселей (RTS-пиксели, real-time strategy) (Тараксин, Яненко, 2010).

В звёздных датчиках деградация фотометрических характеристик фоточувствительных устройств может приводить к ошибкам определения ориентации. «Горячие» и RTS-пиксели могут быть ошибочно распознаны как звёзды и вызвать ошибки в работе приборов и потере точности.

Увеличение среднего значения темнового сигнала

Структурные повреждения от воздействия потока нейтронов приводят к увеличению среднего значения темнового сигнала при больших временах экспозиции как в КМОП, так и в ПЗС-матрицах.

На *рис. 1* приведена зависимость среднего значения темнового сигнала в относительных единицах (отношение измеренного значения в единицах младшего разряда АЦП к предельному значению) от времени экспозиции до и после облучения CMV4000 потоком нейтронов.

Рис. 1. Зависимость среднего значения темнового сигнала от времени экспозиции для CMV4000

Рис. 2. Зависимость среднего значения темнового сигнала от времени экспозиции для ФППЗ «Лев-4»

Измерения среднего значения темнового сигнала для CMV4000 проводились по полному кадру при комнатной температуре окружающей среды и температуре кристалла близкой к комнатной.

На рис. 2 так же приведена зависимость среднего значения темнового сигнала в относительных единицах от времени экспозиции до и после облучения потоком нейтронов ФППЗ «Лев-4».

Измерения среднего значения темнового сигнала для ФППЗ «Лев-4» проводились по полному кадру при комнатной температуре окружающей среды, температуре кристалла -18°C и разрядности АЦП 8 бит.

Фотометрические характеристики матриц изначально неодинаковы ввиду различий в технологии, количестве и размере пикселей, глубине потенциальной ямы и т.д. Кроме того, различаются режимы работы в зависимости от конкретного прибора. Поэтому оценка роста среднего значения темнового сигнала является качественной, а не количественной.

Рост среднего значения темнового сигнала в обоих случаях проявляется в виде увеличения угла наклона кривой (зависимости среднего значения темнового сигнала от времени экспозиции) и связан с появлением большого количества «горячих» и RTS-пикселей, яркость и количество которых зависит от времени экспозиции. Распределение яркостей пикселей на CMV4000 для времени экспозиции 100 и 1100 мс до и после облучения нейтронами приведено на рис. 3. Распределение яркостей пикселей на ФППЗ «Лев-4» за время экспозиции 250 и 1000 мс до и после облучения нейтронами показано на рис. 4 (см. с. 122).

Рис. 3. Гистограмма распределения яркости пикселей на CMV4000 до и после облучения нейтронами

Рис. 4. Гистограмма распределения яркости пикселей на ФППЗ «Лев-4» до и после облучения нейтронами

Рис. 5. Зависимость СКО от времени экспозиции для CMV4000 до и после облучения

Рис. 6. Зависимость СКО от времени экспозиции для ФППЗ «Лев-4»

Увеличение неравномерности темнового сигнала

Кроме возрастания среднего значения темнового сигнала в обоих типах фоточувствительных устройств возрастает среднеквадратичное отклонение темнового сигнала по кадру (СКО).

В *табл. 1* приведены СКО темнового сигнала, нормированные на предельные значения чувствительности до и после облучения нейтронами, а также после отжига в течение 16 мес для двух типов фоточувствительных устройств.

Таблица 1. СКО темнового сигнала

Матрица	До облучения, ед.	После облучения, ед.	После отжига, ед.
CMV4000	0,0015	0,022	0,018
ФППЗ «Лев-4»	0,0016	0,007	0,005

Измерения СКО для CMV4000 проводились по полному кадру при комнатной температуре окружающей среды, температуре кристалла близкой к комнатной, времени экспозиции 100 мс. Измерения СКО для ФППЗ «Лев-4» выполнялись по полному кадру при комнатной температуре окружающей среды, температуре кристалла -18°C , времени экспозиции 250 мс.

Из *табл. 1* видно, что при облучении существенно возрастает СКО: в CMV4000 — в 14,7 раз, а в ФППЗ «Лев-4» — в 4,4 раза. Разница обусловлена тем, что в ФППЗ «Лев-4», в отличие от CMV4000, имеется встроенное охлаждение. При этом длительный отжиг при комнатной температуре хоть и снижает уровень шума, но не позволяет вернуться к нормальным значениям фотометрических параметров.

Как и для среднего значения темнового сигнала по кадру, после облучения наблюдается зависимость СКО от времени экспозиции. На *рис. 5* и *6* представлены графики этой зависимости для CMV4000 и ФППЗ «Лев-4» соответственно.

«Горячие» и RTS-пиксели

Нейтроны, сталкиваясь с атомами кремния, вытесняют их из узлов кристаллической решётки. В результате образуется большое количество дефектов по Шоттки (вакансия в кристаллической решётке) и по Френкелю (точечный дефект кристалла, представляющий собой пару, состоящую из вакансии и междоузельного атома, которые перемещаются внутри решётки за счёт тепловой энергии), большинство из которых рекомбинируют. Оставшиеся дефекты мигрируют в решётке и образуют стабильные дефекты, такие как комплекс вакансия-фосфор (Е-центр), вакансионно-кислородный комплекс (А-центр), дивакансии и т.д. Эти дефекты ухудшают характеристики матриц, увеличивая неравномерность темнового тока ввиду появления отдельных пикселей с очень высокими темновыми токами («горячих» пикселей) и пикселей со случайным телеграфным темновым сигналом (RTS-пикселей) (Marshall, Marshall, 2010).

На *рис. 7* представлены значения темнового сигнала в отдельных пикселях CMV4000 после облучения потоком нейтронов для 15 последовательных кадров, полученных при комнатной температуре за время экспозиции 100 мс. Показаны изменения темнового сигнала четырёх пикселей: двух — со случайным телеграфным сигналом, одного — «горячего» и одного — нормального пикселя.

На *рис. 8* представлены значения темнового сигнала в отдельных пикселях ФППЗ «Лев-4» после облучения потоком нейтронов для 10 последовательных кадров, полученных при комнатной температуре окружающей среды, температуре кристалла, равной -18°C , и разрядности АЦП 8 бит. Показаны изменения темнового сигнала четырёх пикселей: двух — со случайным телеграфным сигналом, одного — «горячего» и одного — нормального пикселя.

Рис. 7. Зависимость темнового сигнала в пикселе CMV4000 от номера кадра

Рис. 8. Зависимость темнового сигнала в пикселе ФППЗ «Лев-4» от номера кадра

Под RTS-пикселем понимается пиксель, в котором имеется два (и более) уровня темного тока, которые могут изменяться от кадра к кадру.

Уменьшение эффективности переноса заряда

В ПЗС-матрицах кроме вышеописанных эффектов из-за структурных повреждений может уменьшаться эффективность переноса заряда.

На средних частотах эффективность переноса заряда определяется процессом захвата «сигнальных» электронов на поверхностные ловушки, которые образуются в результате воздействия ИИ КП. Когда «сигнальный» заряд входит в контакт с пустыми поверхностными ловушками, все они практически мгновенно заполняются электронами. После того как этот сигнальный пакет уходит под соседний затвор, захваченные электроны начинают генерироваться с ловушек в зону проводимости. Электроны, захваченные на сравнительно мелкие ловушки, освобождаются достаточно быстро и успевают догнать «свой» сигнальный пакет, в то время как электроны с более глубоких ловушек поступают уже в «чужой» пакет, следующий за первым.

На кадре это выглядит как столбец с повышенным уровнем темнового сигнала (рис. 9, см. с. 125).

Рис. 9. Столбец с пониженной эффективностью переноса и «горячим» пикселем

Влияние поверхностных ловушек на эффективность переноса можно существенно уменьшить, постоянно пропуская через ПЗС-регистр некоторое количество опорного заряда. При этом поверхностные ловушки оказываются постоянно заполненными электронами, что значительно снижает степень их взаимодействия с сигнальным зарядом. Характерная величина заряда на практике составляет 10–25 % полной ёмкости потенциальной ямы. Главный недостаток такого способа увеличения эффективности переноса заключается в соответствующем уменьшении динамического диапазона прибора.

Порог локализации и количество дефектных объектов

Штатные алгоритмы приборов звёздной ориентации используют пороговую локализацию для выделения звёзд на фоне шума. Порог (пороговое значение темнового сигнала в пикселе, при котором происходит локализация объекта) в них рассчитывается исходя из предположения о нормальном распределении шума.

При повышении порога ухудшается точность определения ориентации. При значительном повышении порога ориентация не может быть получена из-за недостатка числа локализованных звёзд.

При понижении порога появляется множество пикселей, не относящихся к звезде, которые создают шум. Это приводит к ложному определению ориентации. При значительном понижении порога число ложных локализованных объектов превышает максимально допустимое значение, и ориентация не может быть определена.

Таким образом, порог необходимо выбирать так, чтобы минимизировать число шумовых пикселей, но при этом оставлять как можно больше полезной информации о звезде.

При нормальном распределении шума порог в три СКО хорошо удовлетворяет вышеуказанным условиям, однако в облучённой матрице при любом значении порога остаются повреждённые пиксели, в том числе соединяющиеся в кластеры по два и более пикселя.

В приборах БОКЗ-М и БОКЗ-М60 в качестве фотоприёмного устройства используется ПЗС-матрица. Для её проверки реализована функция тестирования на наличие дефектных пикселей.

Тестирование матрицы проводится по полному темновому кадру разрядностью 8 бит. В табл. 2–4 приведены результаты работы функции тестирования матрицы для кадров со временем экспозиции 250, 450 и 1000 мс соответственно, а также количество дефектных объектов на полном темновом кадре для заданных порогов до облучения, после облучения и после отжига матрицы.

Таблица 2. Результат работы теста дефектов для облучённой матрицы за время экспозиции 250 мс (ЕМР — единица младшего разряда аналого-цифрового преобразователя)

		Количество дефектных объектов											
		До облучения				После облучения				После отжига 16 мес			
Порог, ЕМР		2	3	4	5	2	3	4	5	2	3	4	5
Дефектный объект	1-пиксельный	3	1	1	1	4719	3043	2170	1682	2585	1656	1208	954
	2-пиксельный	0	0	0	0	910	317	145	65	406	157	66	30
	3-пиксельный	0	0	0	0	132	34	8	2	29	13	3	0
	4-пиксельный и более	0	0	0	0	34	1	0	0	6	0	0	0

Таблица 3. Результат работы теста дефектов для облучённой матрицы за время экспозиции 450 мс

		Количество дефектных объектов											
		До облучения				После облучения				После отжига 16 мес			
Порог, ЕМР		2	3	4	5	2	3	4	5	2	3	4	5
Дефектный объект	1-пиксельный	19	5	3	2	7615	5492	4239	3428	5227	3624	2723	2164
	2-пиксельный	0	0	0	0	1685	811	432	258	1117	508	256	134
	3-пиксельный	0	0	0	0	345	120	51	23	180	44	23	9
	4-пиксельный и более	0	0	0	0	121	23	4	1	53	10	0	0

Таблица 4. Результат работы теста дефектов для облучённой матрицы за время экспозиции 1000 мс

		Количество дефектных объектов											
		До облучения				После облучения				После отжига 16 мес			
Порог, ЕМР		2	3	4	5	2	3	4	5	2	3	4	5
Дефектный объект	1-пиксельный	166	35	11	7	13 173	11 380	9553	8139	10 607	8349	6722	5561
	2-пиксельный	1	0	0	0	3498	2418	1569	1110	2783	1599	964	573
	3-пиксельный	0	0	0	0	1311	693	355	185	799	324	134	79
	4-пиксельный и более	0	0	0	0	891	259	87	34	438	122	49	16

После облучения при заданных порогах наблюдается существенное увеличение количества локализованных дефектных объектов. Помимо 1- и 2-пиксельных объектов появляются 4-пиксельные и более, которые могут быть ошибочно распознаны как изображения звёзд. Из табл. 2–4 видно, что с ростом времени экспозиции увеличивается и количество дефектных пикселей. Для времени экспозиции 1000 мс при более чем двукратном увеличении порога всё ещё остаётся большое количество дефектных пикселей, часть которых не будет отсеяна на этапе локализации. Кроме того, при таком количестве одиночных дефектных пикселей

велика вероятность попадания дефекта на изображение звезды, что приведёт к значительной ошибке при определении ориентации.

КМОП-матрицы CMV4000 используются в звёздных датчиках нового поколения: БОКЗ-МР и МБОКЗ-2Р. Работа данных приборов осуществляется при времени экспозиции 100 мс и разрядности АЦП 12 бит. При отсутствии модуля охлаждения после облучения наблюдается нагрев матрицы и рост шума во время работы. В *табл. 5* приведено количество локализованных дефектных объектов за время экспозиции 100 мс до и после облучения (сразу после включения и спустя 30 мин работы).

Таблица 5. Число локализованных дефектных объектов в CMV4000 за время экспозиции 100 мс

		Количество дефектных объектов											
		До облучения				После облучения сразу за включением				После облучения спустя 30 мин			
Порог, ЕМР		32	48	64	80	32	48	64	80	32	48	64	80
Дефектный объект	1-пиксельный	1449	212	82	46	155 449	123 584	102 104	86 542	204 094	177 444	156 805	139 851
	2-пиксельный	2	0	0	0	12 718	7805	5267	3768	22747	16786	12736	10088
	3-пиксельный	0	0	0	0	1508	727	388	223	3941	2432	1568	1069
	4-пиксельный и более	0	0	0	0	225	76	31	16	846	438	234	130

Количество наблюдаемых дефектов в CMV4000 существенно выше, чем в ФППЗ «Лев-4», так как CMV4000 не имеет охлаждения, а в ФППЗ «Лев-4» встроен термоэлектрический модуль охлаждения, позволяющий обеспечить температуру кристалла -18°C .

Охлаждение матриц

Для снижения влияния структурных повреждений на точность работы прибора и повышения его радиационной стойкости проведено исследование зависимости количества дефектов от температуры кристалла.

В *табл. 6* приведено количество дефектных объектов на темновом кадре CMV4000 за время экспозиции 100 мс для заданных порогов и температуры.

Таблица 6. Зависимость количества дефектов от порога и температуры

		Количество дефектных объектов											
$T_{\text{кристалла}}, ^{\circ}\text{C}$		10				0				-10			
Порог, ЕМР		32	48	64	80	32	48	64	80	32	48	64	80
Дефектный объект	1-пиксельный	112 448	81 887	63 335	49 956	52 257	28 919	18 074	11 659	11 945	3553	1597	847
	2-пиксельный	6351	3288	1957	1195	1272	389	149	75	94	8	2	1
	3-пиксельный	520	189	93	42	47	8	4	2	0	0	0	0
	4-пиксельный и более	43	14	4	1	2	0	0	0	0	0	0	0

При условии, что звезда определяется как 3-пиксельный и более объект, снижение температуры кристалла CMV4000 до -10°C позволяет работать при пороге локализации 32 ЕМР. В случае если звездой считается 4-пиксельный и более объект, достаточно охлаждения до 0°C и увеличения порога локализации до 48 ЕМР.

Для ФППЗ «Лев-4» также было проведено исследование зависимости количества дефектных объектов на темновом кадре от температуры кристалла. В табл. 7 приведены результаты обработки темновых 8-битных кадров, полученных ФППЗ «Лев-4» после облучения пучком нейтронов при температуре -20 , -30 и -35 °С. Для каждого кадра был вычислен порог как среднее значение темнового сигнала плюс N , умноженное на СКО, где N меняется от 2 до 5. После применения порога над кадрами производилась процедура локализации. Эта же операция была проведена при использовании фиксированного порога в 15 ЕМР.

Таблица 7. Зависимость количества дефектов от температуры кристалла ($T_{\text{кристалла}}$) ФППЗ «Лев-4»

		Количество дефектных объектов														
$T_{\text{кристалла}}, ^\circ\text{C}$		-20					-30					-35				
N		2	3	4	5	—	2	3	4	5	0	2	3	4	5	—
Порог		11,3	13,1	14,8	16,5	15	8,5	9,3	10,1	10,9	15	8,0	8,6	9,2	9,7	15
Дефектный объект	4-пиксельный	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3-пиксельный	4	0	0	0	0	3	1	0	0	0	1	1	0	0	0
	2-пиксельный	92	28	16	9	16	46	17	8	8	1	9	9	4	4	0
	1-пиксельный	1363	930	801	591	801	647	464	345	345	145	302	302	190	190	50

Видно, что при фиксированном пороге и снижении температуры до -30 °С общее число дефектных объектов сокращается почти в 6 раз, а при дальнейшем охлаждении до -35 °С — ещё в 3 раза.

Прибор БОКЗ-М60 позволяет охладить ФППЗ «Лев-4» до температуры кристалла $-30...-35$ °С при комнатной температуре 25 °С.

Охлаждение ФППЗ «Лев-4» способствует снижению погрешности измерений параметров ориентации при попадании дефекта на изображение звезды: чем меньше яркость дефекта, тем меньше величина искажения координат звезды. Таким образом, для увеличения помехозащищённости прибора в условиях радиационного воздействия целесообразно снизить температуру кристалла ФППЗ «Лев-4» до -30 °С и выбрать в качестве порога среднее значение темнового сигнала плюс 4 СКО сигнала, плюс 5 ЕМР.

Выводы

Как в КМОП-, так и ПЗС-матрицах в результате воздействия ИИ КП возникают эффекты структурных повреждений, которые приводят к ухудшению фотометрических характеристик.

Эффекты структурных повреждений от ИИ КП при моделирующем воздействии потоком нейтронов с флюенсом $5 \cdot 10^{10}$ нейтрон/см² соответствуют десяти годам эксплуатации приборов звёздной ориентации на круговой орбите 800 км.

В КМОП- и ПЗС-матрицах после облучения нейтронами наблюдается большое количество «горячих» и RTS-пикселей, которые приводят к росту среднего значения и СКО темнового сигнала. При этом наблюдается сильная зависимость среднего значения и СКО темнового сигнала от времени экспозиции.

В CMV4000 количество дефектных пикселей больше, чем в ФППЗ «Лев-4», за счёт того, что формат CMV4000 — это 2048×2048 пикселей, в то время как ФППЗ «Лев-4» — 512×512 . Кроме того, в отличие от ФППЗ «Лев-4», в CMV4000 отсутствует встроенный модуль охлаждения.

Отжиг при комнатной температуре в течение 16 мес является несущественным, из чего делается вывод о том, что при лётной эксплуатации отжигом можно пренебречь.

Отличительной особенностью ПЗС-матрицы является эффект снижения эффективности переноса, приводящий к появлению столбцов с повышенным значением темнового сигнала.

В качестве мер снижения влияния структурных эффектов предлагается:

- 1) увеличение массовой толщины защиты;
- 2) охлаждение CMV4000 внешними элементами Пельтье до температуры -10°C , а ФППЗ «Лев-4» — встроенным модулем охлаждения до температуры $-30\ldots-35^{\circ}\text{C}$;
- 3) подбор порога локализации:
  - а) при условии, что звезда определяется как 3-пиксельный и более объект, снижение температуры кристалла CMV4000 до -10°C позволяет работать при пороге локализации 32 EMP; в случае если звездой считается 4-пиксельный и более объект, достаточно охлаждения до 0°C и увеличение порога локализации до 48 EMP;
  - б) для ФППЗ «Лев-4» предлагается выбрать в качестве порога среднее значение темного сигнала плюс 4 СКО сигнала, плюс 5 EMP.

Литература

1. Тарараксин А. С., Яненко А. В. Исследование радиационных эффектов в фоточувствительных приборах с зарядовой связью // 13-я Всерос. научно-техн. конф. «Радиационная стойкость электронных систем (Стойкость-2010)»: сб. ст. конф. 2010. С. 85–86.
2. Чумаков А. И. Действие космической радиации на интегральные схемы. М.: Радио и связь, 2004. 320 с.
3. Marshall C. J., Marshall P. W. CCD Radiation Effects and Test Issues for Satellite Designers. Review Draft 1.0. 2003. 43 p. URL: https://radhome.gsfc.nasa.gov/radhome/papers/CCD_Lessons_Learned.pdf.

Comparison of the structural damage effects in CMOS and CCD used in star trackers by the example of CMV4000 and LEV-4 CCD

E. V. Belinskaya¹, A. A. Kobeleva¹, P. S. Smetanin¹,
Ya. D. Elyashev¹, M. E. Chernyak²

¹ Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: akobeleva.ikiran@gmail.com

² Experimental Scientific and Production Association
“Specialized Electron Systems”, Moscow 115409, Russia
E-mail: mecher@spels.ru

The work is devoted to the study and comparison of the CMOS and CCD resistance to the impact of individual particles by the effects of structural damage on the example of CMV4000 and Lev-4 CCD used in star trackers. The effects observed when exposed to the neutron flux with the fluence of $5 \cdot 10^{10}$ neutrons/cm², which corresponds to a dose of structural damage of 1.55 rad are discussed. For each sensor, we give the dependences of the mean value of the dark signal and the standard deviation of the dark signal over the frame on the exposure time before and after neutron exposure, as well as histograms of pixel brightness distribution before and after irradiation for the two values of the exposure time, and number of incorrectly localized objects in both sensors with given localization thresholds. The change in the brightness of the RTS-pixel from frame to frame is clearly presented. The effect of reducing the charge transfer efficiency in the CCD array and the influence of “annealing» at room temperature on the sensors photometric characteristics are considered. An algorithm for the selection of stars on the background noise of the array is described. The dependence of the sensors’ photometric parameters on the crystal temperature was studied. Measures to reduce the effect of structural damage on the sensors’ photometric parameter are proposed.

Keywords: CMOS, CCD, tests, resistance, neutrons, structural effects, ionizing radiation of outer space

Accepted: 26.11.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-119-130

References

1. Tararaksin A. S., Yanenko A. V., *Issledovanie radiatsionnykh effektov v fotochuvstvitel'nykh priborakh s zaryadovoy svyaz'yu* (Investigation of radiation effects in charge-coupled photosensitive devices), *13-ya Vserossiiskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Radiatsionnaya stoikost' elektronnykh sistem (Stoikost'-2010)"* (13th All-Russia Scientific and Technical Conf. "Radiation Resistance of Electronic Systems"), Proc., 2010, pp. 85–86.
2. Chumakov A. I., *Deistvie kosmicheskoi radiatsii na integral'nye skhemy* (The effect of cosmic radiation on integrated circuits), Moscow: Radio I Svyaz, 2004, 320 p.
3. Marshall C. J., Marshall P. W., *CCD Radiation Effects and Test Issues for Satellite Designers*, Review Draft 1.0, 2003, 43 p., URL: https://radhome.gsfc.nasa.gov/radhome/papers/CCD_Lessons_Learned.pdf.