

УДК 621.383.8: 537.531

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА СВОЙСТВА ФЧПЗС-МАТРИЦ

**Ю.В. Брашеван, В.Г. Горячев, П.Б. Константинов,
А.С. Скрялёв, В.В. Чернокожин**

АО «НПП «Пульсар», 105187, г. Москва, Окружной пр., 27

Представлены результаты исследования влияния электронного ионизирующего излучения на свойства матричных фоточувствительных приборов с переносом заряда. Энергия заряженных частиц составляла 1,0 МэВ, мощность дозы 40 рад/с, температура воздействия – комнатная. Приборы облучались в пассивном режиме.

Ключевые слова: *электронное ионизирующее излучение, фоточувствительные ПЗС матрицы с межстрочным переносом, мощность дозы облучения*

Сведения об авторах: *Брашеван Юрий Васильевич, brashevan_uv@pulsarnpp.ru; Горячев Владимир Глебович; Константинов Пётр Борисович, д.т.н., профессор, administrator@pulsarnpp.ru; Скрялёв Александр Сергеевич, к.т.н., лауреат Государственной премии РФ, askrylev@pulsarnpp.ru; Чернокожин Владимир Викторович, к.т.н., vch@pulsarnpp.ru*

STUDY OF THE EFFECT OF ELECTRONIC IONIZING RADIATION ON THE PROPERTIES OF PHOTSENSITIVE CHARGE-COUPLED DEVICE MATRICES

Yu.V. Brashevan, V.G. Goryachev, P.B. Konstantinov, A.S. Skrylev, V.V. Chernokozhin
S&PE Pulsar JSC, 105187, Moscow, Okrzhnoy Pr., 27

The results of the study of the effect of electronic ionizing radiation on the properties of matrix photosensitive charge-coupled devices are given in this paper. Charged particles energy was 1.0 MeV, dose rate 40 rad/s, exposure temperature – ambient. Devices were exposed to radiation in a passive mode.

Keywords: *electron ionizing radiation, photosensitive CCD-matrices with interline transfer, radiation dose rate*

Authors: *Brashevan Yury Vasilyevich, brashevan_uv@pulsarnpp.ru; Goryachev Vladimir Glebovich; Konstantinov Petr Borisovich, Sc.D., Professor, administrator@pulsarnpp.ru; Skrylev Aleksandr Sergeevich, Ph.D., laureate of Russian Federation State prize, askrylev@pulsarnpp.ru; Chernokozhin Vladimir Viktorovich, Ph.D., vch@pulsarnpp.ru*

Введение

МДП-структуры, на основе которых изготовлены фоточувствительные приборы с зарядовой связью, достаточно хорошо изучены с точки зрения влияния радиационного воздействия [1]. Особенностью ФЧПЗС является существенное влияние компоненты радиационного воздействия космического излучения, вызывающей ионизацию в структурах прибора, при уровнях воздействия значительно более низких по сравнению с обычными МДП-приборами и схемами [2]. Оказалось также, что для этих приборов важную роль играют структурные нарушения в объёме полупроводника при реальных уровнях воздействия космического излучения.

Как известно, действие ионизации вызывает образование фиксированного заряда в диэлектриках МДП-структур из-за захвата генерированных излучением электронов и дырок соответственно на исходные электронные и дырочные ловушки. В частности, в двуокиси кремния при воздействии ионизации образуется в основном положительный фиксированный заряд, в плёнках нитрида кремния – отрицательный фиксированный заряд [1]. Кроме фиксированных зарядов ионизация может привести к образованию поверхностных состояний на границах раздела внутри многослойных диэлектриков и на границе с полупроводником. В связи с образованием фиксированных зарядов и поверхностных состояний при воздействии радиации могут измениться такие параметры МДП-структур, как пороговые напряжения, напряжения плоских зон, токи утечки и т. д. В свою очередь структурные нарушения в полупроводнике могут вызвать

деградацию фотоприёмной части ФЧПЗС из-за введения космической радиацией (протонами) и нейтронами дефектов, создающих в запрещённой зоне глубокие уровни [3, 4]. В свою очередь введение глубоких уровней приводит к изменению вольтовой чувствительности и возрастанию темновых токов [5, 6]. В работе [7] отмечалось появление в ПЗС-матрицах спаек – светящихся точек различного размера, связанных с пространственными радиационными дефектами, созданными высокоэнергичными протонами и нейтронами.

Одной из компонент космического излучения являются электроны. Благодаря достаточно большой плотности потока электронов на некоторых орбитах нахождения космического аппарата в течение 10-летнего пребывания в космическом пространстве поглощённая доза электронного облучения может составить примерно 10^3 - 10^6 рад за толщиной 0.1 г/см^2 [8]. При исследованиях влияния электронного излучения космического пространства на ФЧПЗС, как правило, используются электроны с энергией не выше 1-3 МэВ, при которых роль структурных нарушений в полупроводниках ничтожна. В большинстве работ указывалось, что наиболее чувствительными параметрами в этом случае являются темновые токи, неэффективность переноса заряда, сдвиг нижних уровней напряжения управления в регистрах переноса. И для коммерческих ФЧПЗС допустимые дозы ограничивались несколькими десятками килорад, например [4, 5, 6].

Объект исследования

В работе исследовались матричные фоточувствительные приборы с зарядовой

связью (ФЧПЗС). Приборы представляют собой кремниевые ПЗС-матрицы с межстрочным переносом [9] форматом 768×576 элементов с размером пикселя 17×17 мкм². Геометрические размеры фоточувствительной области 13.05×9.79 мм². Матрица смонтирована в многовыводном прецизионном металлокерамическом корпусе [10]. Структура матрицы с объёмным *n*-каналом, выполненной на эпитаксиальной плёнке *p-p*⁺ типа проводимости, содержит:

1) полевой окисел – термически выращенная плёнка двуокиси кремния толщиной 1 мкм, используемая для формирования стоп-каналов и изоляции активных областей;

2) подзатворный диэлектрик на поверхности активных областей – термический оксид кремния толщиной ~ 0.1 мкм и пиролитически осаждённый нитрид кремния толщиной ~ 0.07 мкм;

3) многоуровневую систему затворов из поликристаллического кремния с межслойным оксидом толщиной 0.2-0.25 мкм;

4) диэлектрическую изоляцию электродной структуры с контактными окнами под металлизацию от пересекающей её металлизации пиролитическим SiO₂ с высоким содержанием P₂O₅, имеющим толщину около 1 мкм;

5) фотодиоды *n-p* типа в области накопления;

6) выходное устройство – двухкаскадный эмиттерный повторитель с расположенным между каскадами *n*-канальным МОП-транзистором выборки-хранения;

7) систему двухслойной алюминиевой металлизации для разводки и оптического экранирования.

Таким образом, видно, что ФЧПЗС-матрица является весьма сложным объектом исследования, содержащим ряд разнородных узлов, подверженных влиянию ионизирующего излучения, что должно чрезвычайно затруднять интерпретацию экспериментальных результатов влияния ионизирующего излучения на свойства матриц.

Эксперимент

Исследуемые матрицы (всего было исследовано семь образцов) подвергались электронному облучению на установке «УОП-Бетта» со средней энергией 1,0 МэВ в пассивном режиме с перерывами для измерений. Температура воздействия – комнатная. Мощность дозы $P_e = 40$ рад/с.

Отдельные матрицы после достижения определённого уровня воздействия подвергались отжигу в вакууме при температуре $T = 300$ °С в течение 60 мин. После отжига и измерений проводилось повторное облучение.

До облучения (рис. 1 и 4) и после каждого шага облучения (рис. 2) и отжигов (рис. 3 и 5) контролировалось телевизионное изображение тест-таблицы. При этом контролировались дефекты, контрастность изображения, разрешение, динамический диапазон.

Было установлено, что в процессе облучения появляются два типа дефектов:

а) многочисленные чёрные точки – т. н. «сыпь»;

б) белые вертикальные линии.

Кроме того, при более высоких уровнях воздействия происходит полный выход из строя прибора – потеря чувствительности.

На пяти из семи обследованных образцов появлялись дефекты в виде «сыпи».

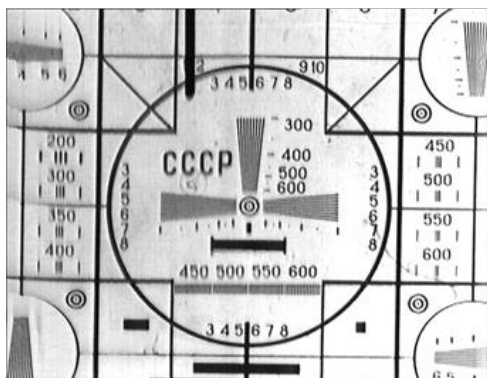


Рис. 1

Телевизионное изображение тест-таблицы до облучения матрицы

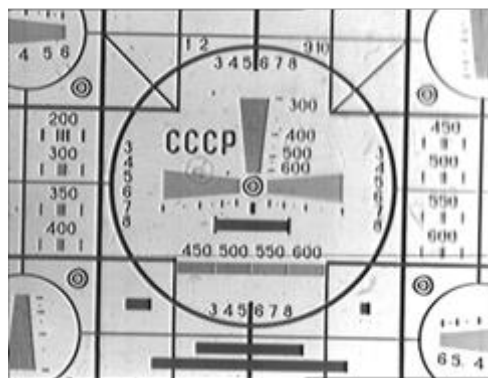


Рис. 4

Телевизионное изображение тест-таблицы прибора № 22-б до облучения матрицы



Рис. 2

Телевизионное изображение тест-таблицы после облучения матрицы. Видна чёрная «сыпь»

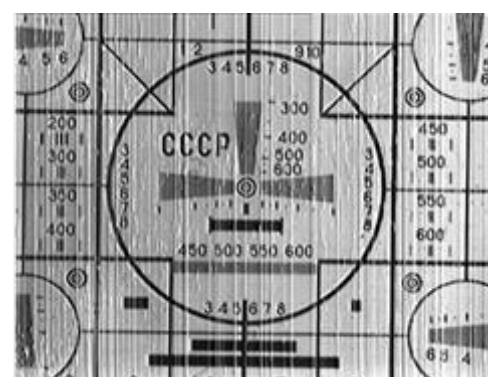


Рис. 5

Телевизионное изображение тест-таблицы прибора № 22-б после облучения и отжига. Видны дефекты в виде вертикальных белых линий

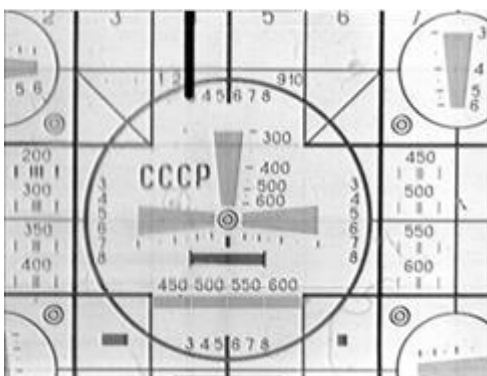


Рис. 3

Телевизионное изображение тест-таблицы после облучения и отжига матрицы. «Сыпь» исчезла

Дефекты в виде «сыпи» появились у приборов № 21-8 при уровне $1,5 \cdot 10^4$ рад, у приборов № 22-7 и № 15-11 при уровне $2 \cdot 10^4$ рад, а у приборов № 21-12 и № 24-3 при $8 \cdot 10^4$ рад.

Последующее увеличение облучения на приборы №№ 15-11, 21-12, 24-3 с шагом $2 \cdot 10^4$ рад не изменяло картины дефектности вплоть до уровней:

а) у прибора № 15-11 при уровне $1,3 \cdot 10^5$ рад произошла полная потеря чувствительности. Последующая выдержка

прибора в течение суток привела к полному восстановлению чувствительности с сохранением «сыпи». Дополнительное облучение до $1,5 \cdot 10^5$ рад вновь привело к временной потере чувствительности. Последующий отжиг прибора при $300\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 60 мин привел к устранению «сыпи»;

б) у прибора № 21-12 при уровне $1,5 \cdot 10^5$ рад произошла полная потеря чувствительности. Отжиг прибора при $300\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 60 мин привёл к восстановлению чувствительности при сохранении «сыпи»;

в) у прибора № 21-8 после дозы $4 \cdot 10^4$ рад и отжиге при $300\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 60 мин «сыпь» исчезла. При последующем облучении с шагом $2 \cdot 10^4$ рад вплоть до $1,2 \cdot 10^5$ рад «сыпь» не появлялась. Но при $1,2 \cdot 10^5$ рад прибор вышел из строя из-за потери чувствительности. Повторный отжиг при $300\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 60 мин полностью восстановил работоспособность прибора.

Дефекты в виде белых вертикальных линий появились только у одного прибора № 22-6 при облучении с уровнем воздействия $2 \cdot 10^4$ рад. После отжига прибора при $300\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 60 мин изображение не изменялось.

У прибора № 19-16 дефекты в виде вертикальных белых линий наблюдались до облучения. Облучение вплоть до дозы $1,9 \cdot 10^5$ рад не привело к изменению его характеристик.

Рассмотрим подробнее результаты исследования прибора № 21-8. Прибор последовательно облучался с суммарной дозой $4 \cdot 10^2$ рад, $4 \cdot 10^3$ рад, $8 \cdot 10^3$ рад, $1,2 \cdot 10^4$ рад, при этом изменений телевизионного изображения тест-таблицы не наблюдалось. При дозе $1,6 \cdot 10^4$ рад начала проявляться «чёрная сыпь», при дозе

$2,4 \cdot 10^4$ рад она усилилась, при дозе $4 \cdot 10^4$ рад «сыпь» стабилизировалась. После этого прибор отожгли в вакууме при температуре $300\text{ }^\circ\text{C}$ в течение часа. Телевизионное изображение тест-таблицы полностью восстановилось – «сыпь» исчезла. После отжига прибор вновь подвергли облучению с суммарной дозой $1,6 \cdot 10^4$ рад, $3,2 \cdot 10^4$ рад, $4,8 \cdot 10^4$ рад, $6,4 \cdot 10^4$ рад, $8,4 \cdot 10^4$ рад, $1 \cdot 10^5$ рад – «сыпь» не появлялась. При дозе $1,2 \cdot 10^5$ рад прибор вышел из строя – изображение таблицы исчезло. Видно, что пятикратное увеличение дозы после отжига ($8,4 \cdot 10^4$ рад) по сравнению с дозой до отжига, при которой появилась «сыпь» ($1,6 \cdot 10^4$ рад), не привело к повторному появлению «сыпи». И только при дозе $1,2 \cdot 10^5$ рад прибор вышел из строя. Прибор вновь отожгли в вакууме в режиме $300\text{ }^\circ\text{C}$ в течение часа – и изображение тест-таблицы полностью восстановилось.

Естественно, возникает вопрос о возможной природе наблюдаемых дефектов в виде «сыпи». Их геометрическое распределение по фоточувствительной области и размеры отдельных точек говорят о том, что каждая такая точка – это дефектный пиксель или несколько пикселей. Можно ли представить себе, что подобный дефект – результат выхода из строя фотодиода данной ячейки? Вряд ли. И ухудшение ВАХ фотодиода – увеличение обратного тока и выход из строя схемы «опроса» фотодиода – обе эти причины должны были бы дать белую точку на изображении тест-таблицы. К тому же электроны, являясь частицами с массой на несколько порядков меньшей массы атома кремния, малоэффективны в создании дефектов смещения атомов в твёрдых телах, а их результирующе-

щего флюенса в космическом пространстве за время активного существования космического объекта недостаточно для заметного изменения параметров элементов матрицы, зависящих от дефектообразования в объёме кремния; энергия электронов недостаточна для образования дефектов в объёме полупроводника.

Вторая возможная причина – локальное нарушение управлением фазы вертикального регистра – привела бы к появлению отрезка чёрной вертикальной линии, так как через эту ячейку не проходили бы и заряды от ячеек, предшествующих дефектной.

Остаётся участок ячейки между фотодиодом и вертикальным регистром. Локальное накопление диэлектриком большого отрицательного заряда на этом участке должно перекрыть путь передачи заряда из фотодиода в регистр, что приведёт к появлению дефекта «чёрная точка». Отжиг, по видимому, приводит к нейтрализации накопленного заряда, причём сам «центр» возможного накопления отрицательного заряда перестаёт быть активным и при последующем после отжига облучении вновь избыточный отрицательный заряд не накапливается. Подобные дефектные участки в диэлектрике могут быть, например, на наш взгляд, связаны со структурными нарушениями, вызванными точечными дефектами в исходной эпитаксиальной плёнке. Появление при облучении отрицательного заряда возможно, так как в подзатворном диэлектрике находится слой нитрида, содержащий ловушки электронов.

Выводы

Проведённые впервые исследования влияния электронного ионизирующего

излучения на свойства ФЧПЗС-матриц отечественного производства позволили установить характер изменения характеристик исследованных приборов, определить приблизительно диапазон рабочих доз ионизирующего излучения и получить предварительные результаты по влиянию отжига в вакууме на параметры облучённых приборов. Ясно, что для получения более обоснованных выводов о влиянии ионизирующего излучения на свойства столь сложного в этом плане объекта исследования, каким является ФЧПЗС-матрица, работы в этом направлении необходимо продолжить, расширив номенклатуру исследуемых образцов и совершенствуя методику исследования.

Литература

1. Таперо, К.И. Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах космического применения / К.И. Таперо, В.Н. Улимов, А.М. Членов. – М.: Бином. – 2012. – 246 с.
2. Lumb D.H., Holland A.D. X-ray imaging spectroscopy with EEV CCDs. – Proceedings SPIE. – 1988. – v. 982. – p. 116.
3. Hopkinson G.R. Cobalt-60 and Proton Radiation Effects on Large Format, 2-D, CCD Arrays for an Earth Imaging Application. – IEEE Transactions on Nuclear Science. – 1992. – v. 39. – no. 6. – pp. 2018-2020.
4. Hopkinson G.R., Dale C.J., Marshall P.W. Proton effects in CCDs. – IEEE Transactions on Nuclear Science. – 1996. – v. 43. – no. 2. – pp. 614-627.
5. Горячев, В.Г. Влияние гамма-излучения на параметры ЛФПЗС / В.Г. Горячев // Сборник «Радиационная

- стойкость электронных систем – СТОЙКОСТЬ-2007». – М., 2007. – Вып. 10. – С. 113-114.
6. Костюков, Е.В. Влияние ионизирующего излучения на параметры ЛФППЗ с объёмным каналом переноса заряда / Е.В. Костюков, В.Г. Горячев, Н.В. Федуква // Сборник «Радиационная стойкость электронных систем – СТОЙКОСТЬ-2004». – М., 2004. – Вып. 7. – С. 111-112.
 7. Воробьёв, А.С. Исследование темновых токов в CCD-матрицах, облучённых протонами и нейтронами / А.С. Воробьёв, У.М. Иванов, Н.А. Иванов и др. // Вопросы Атомной Науки и Техники. Серия «Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру». – 2011. – Вып. 1. – С. 31-34.
 8. Перминов, С.В. Волоконно-оптические элементы системы передачи информации космического базирования: автореферат диссертации канд. тех. наук: 05.13.05: защищена 14.06.2011 / Перминов С.В. – М., 2011. – 25 с.
 9. Воронов, В.В. Фоточувствительные приборы с зарядовой связью – современная элементная база фотонных систем / В.В. Воронов, М.И. Какоулин, Е.В. Костюков и др. // Электронная промышленность. – 2003. – № 2. – С. 155-168.
 10. Константинов, П.Б. Многовыводной прецизионный металлокерамический корпус для фото- и электронно-чувствительных приборов / П.Б. Константинов, В.В. Чернокожин, В.А. Жамалетдинов // Материалы XI научно-технической конференции «Пульсар-2012. Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА», 17-19 октября 2012, Дубна. – М.: ФГУП «НПП «Пульсар», 2012. – С. 143.
- ### References
1. Tapero K.I., Ulimov V.N., Chlenov A.M. Radiatsionniye efekty v kremnievykh integral'nykh skhemakh kosmicheskogo primeneniya [Radiation effects in silicon integrated circuits for space applications] Moscow, Binom, 2012, 246 p.
 2. Lumb D.H., Holland A.D. X-ray imaging spectroscopy with EEV CCDs. *Proceedings SPIE*, 1988, vol. 982, 116 p.
 3. Hopkinson G.R. Cobalt-60 and Proton Radiation Effects on Large Format, 2-D, CCD Arrays for an Earth Imaging Application. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1992, vol. 39, no. 6, pp. 2018-2020.
 4. Hopkinson G.R., Dale C.J., Marshall P.W. Proton effects in CCDs. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1996, vol. 43, no. 2, pp. 614-627.
 5. Goryachev V.G. Vliyaniye gamma-izlucheniya na parametry LFPZS [Gamma-radiation effect on LPCCD parameters]. *Sbornik Radiatsionnaya stoikost` elektronnykh system STOYKOST-2007*, Moscow, 2007, vol.10, pp.113-114.
 6. Kostyukov E.V., Goryachev V.G., Fedukova N.V., Vliyaniye ioniziruyshchego izlucheniya na parametry LFPPZ s ob'jomnym kanalom perenosa zaryada [Ionizing radiation effect on bulk charge-transfer channel LPCCD. *Sbornik Radiatsionnaya stoikost` elektronnykh system STOYKOST-2004*, Moscow, 2004, vol.7, pp.111-112.

7. Vorobyev A.S., Ivanov U.M., Ivanov N.A. et al. Issledovaniye temnovykh tokov v PZS-matritsah, obluchennykh protonami i neitronami [Study of the dark current in CCD-matrices irradiated by protons and neutrons]. *Voprosy Atomnoy Nauki i Tekhniki. Seriya Fizika radiatsionnogo vozdeistviya na radioelektronnuyu apparaturu*, 2011, vol.1, pp.31-34.
8. Perminov S.V., Volokonno-opticheskie elementy sistemy peradachi informatsii kosmicheskogo bazirovaniya [Fiber-optic elements of a space-based information transmission system]. Abstract of Ph.D. thesis. Moscow, 2011, 25 p.
9. Voronov V.V., Kakoulin M.I., Kostyukov E.V. et al. Fotochuvstvitel'niye pribory s zaryadovoy svyaz'yu – sovremennaya elementnaya baza fotonnykh sistem [Photosensitive charge-coupled devices - the modern component base of photonic systems]. *Elektronnaya promyshlennost'*, 2003, no.2, pp.155-168.
10. Konstantinov P.B., Chernokozhin V.V., Zhamaletdinov V.A., Mnogovyvodnoy pretsizionnyi metallokeramicheskiy korpus dlya foto- i elektronno-chuvstvitel'nykh priborov [Multilead precision ceramic-metal case for photo- and electron-sensitive devices]. *Materialy XI nauchno-tekhnicheskoy konferentsii Pulsar-2012. Tverdotel'naya elektronika. Slozhniye funktsional'nye bloki REA*. Moscow, FGUP NPP Pulsar, 2012, 143 p.