

Исследование катастрофических отказов в ПЗС при воздействии ТЗЧ

А.Н. Цирков^{1,2}, А.А. Новиков^{1,2}, В.П. Лукашин^{1,2}, А.Р. Грицаенко¹, А.А. Печенкин^{1,2}

¹ОАО «ЭНПО СПЭЛС»

²НИЯУ «МИФИ», antsir@spels.ru

Аннотация — Представлены результаты исследований ПЗС на стойкость к воздействию тяжелых заряженных частиц по одиночным радиационным эффектам (ОРЭ) отказов. Применение быстродействующей системы парирования сверхнормативных скачков тока позволило предотвратить развитие необратимого отказа и детально исследовать и классифицировать наблюдающийся ОРЭ.

Ключевые слова — одиночные эффекты отказов, лазерные методы испытаний, линейные потери энергии.

I. ВВЕДЕНИЕ

Многоэлементные фотоприёмные устройства широко применяются в изделиях космической техники для широкого ряда задач – от ориентации аппаратов по карте звездного неба до дистанционного зондирования земли. В настоящее время большую популярность получили фотоприёмные устройства с зарядовой связью (с переносом заряда) – ПЗС. Традиционно считается, что ПЗС обладает иммунитетом к одиночным тиристорным эффектам при воздействии тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ), т.к. благодаря применению в их конструкции транзисторов одного типа проводимости отсутствуют паразитные четырехслойные р-п-р-п структуры, характерные для КМОП фотоприёмных устройств.

Однако одиночный тиристорный эффект является не единственным ОРЭ отказов, которые могут возникать при воздействии ТЗЧ. Так же к отказу может приводить одиночный эффект вторичного пробоя в МДП транзисторах (Single Event Snapback), который проявляется весьма схожим с тиристорным эффектом образом – резкое возрастание тока потребления, парируемое кратковременным отключением питания.

Развитие катастрофического отказа в современных СБИС может происходить за весьма малые промежутки времени (несколько мили и даже микросекунд) [1-3], при этом определить вызван катастрофический отказ одиночным тиристорным эффектом, либо же вторичным пробоем практически невозможно. В обоих случаях отказу предшествует скачок тока потребления.

В данной работе проводились исследования чувствительности к воздействию ТЗЧ по ОРЭ отказов ПЗС фотоприёмного устройства с разрешением 2 мегапикселя, размером пикселя 5,5х5,5 мкм и чересстрочной разверткой.

II. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

При облучении на ускорителе ионов с ЛПЭ 68, 41, 16 и 6 МэВ·см²/мг при температуре окружающей среды +25°C наблюдались скачки тока потребления выше 35 мА по линии питания сброса. В каждом случае проводилось отключение питания за время не более 10мс на период не менее 10 мс и включение обратно. После нескольких десятков скачков тока и отключения питания скачки тока прекращались (рис. 1). После завершения воздействия на кристалле ПЗС наблюдались повреждения металлизации (рис. 2).

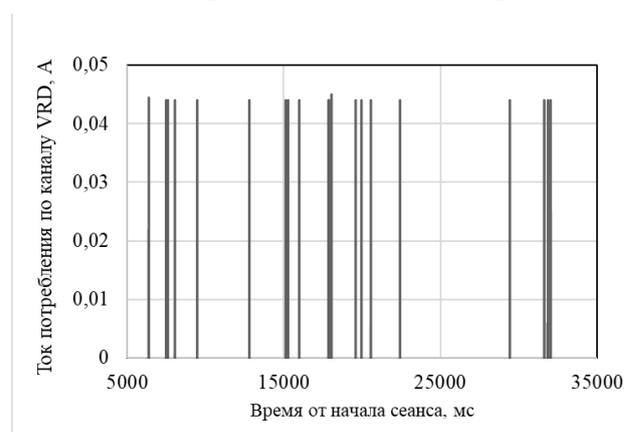


Рис. 1. Зависимость тока потребления по линии питания сброса от времени с момента начала облучения ионами с ЛПЭ≈41 МэВ·см²/мг

В ходе облучения ионами с ЛПЭ 68 МэВ·см²/мг наблюдался катастрофический отказ (КО), сопровождающийся потерей светочувствительности образца и необратимым падением тока потребления с 27 мА до 25 мА.

A. Первичное сканирование на лазерной установке

С помощью установки со сфокусированным лазерным излучением ПИКО-4 [4] были проведены детальные исследования по локализации областей кристалла, при воздействии на которые происходит катастрофический отказ. Воздействие проводилось сфокусированным в пятно 50 мкм лазерным излучением с длиной волны 1,0 мкм с длительностью импульса 25 пс со стороны приборного слоя на участки кристалла ПЗС, не затрагивающие фоточувствительную область.

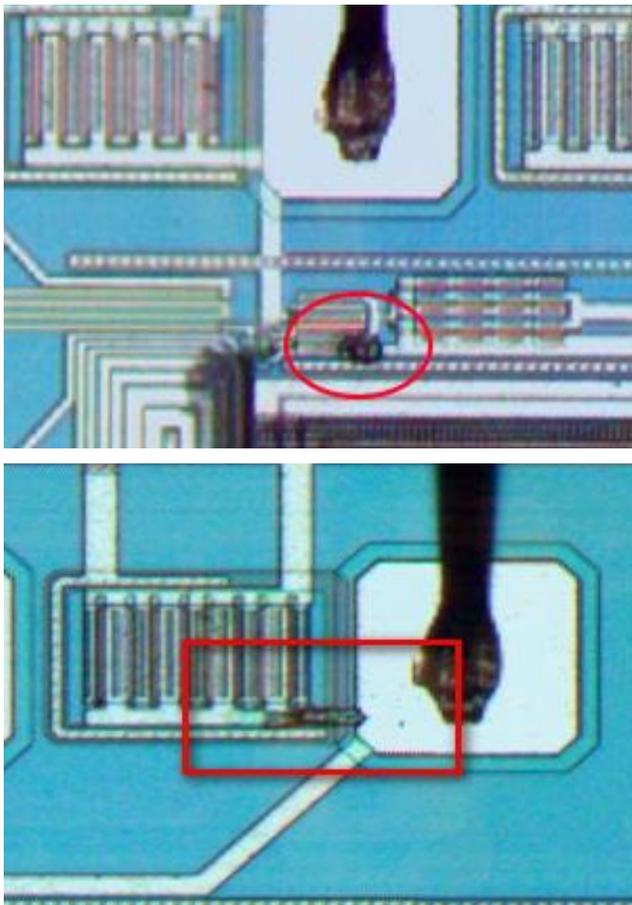


Рис. 2. Фотография области кристалла ПЗС с повреждениями после облучения ионами

Результаты сканирования поверхности кристалла микросхемы приведены в табл. 1. После регистрации двух эффектов скачкообразного повышения тока была проведена попытка повторного воздействия в те же области кристалла – эффекты воспроизвести не удалось, в соответствующих областях визуально наблюдались повреждения кристалла (рис. 3).

Таблица 1

Результаты сканирования поверхности кристалла ПЗС лазерным излучением с диаметром 50мкм.

Энергия, нДж	Количество наблюдавшихся эффектов
0,05	0
0,10	0
0,20	0
0,50	0
1,00	2

Сопоставление топологии кристалла с технической информацией о схемотехнике входных линий (рис.4), вблизи которых наблюдались повреждения, позволило

выдвинуть предположение о развитии отказов в защитных диодах линий сброса RD.

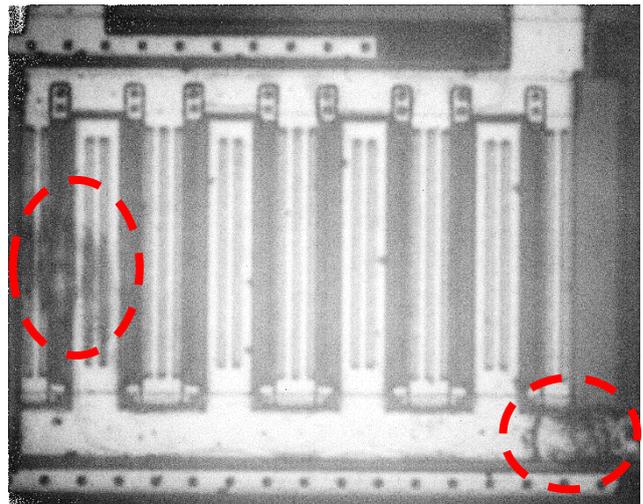


Рис. 3. Фотография области кристалла ПЗС с повреждениями после однократного возникновения эффекта

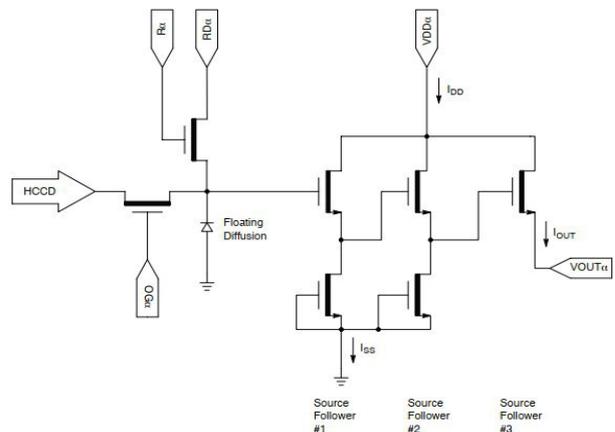


Рис. 4. Схема организации входных линий ПЗС

В. Сканирование с токоограничивающим резистором

Одним из методов предотвращения развития КО из-за теплового разрушения металлизация вследствие протекания большого тока является добавления резистора в защищаемую цепь [5].

Далее была предпринята попытка предотвращения развития катастрофического отказа путем включения токоограничивающего резистора номиналом 100 Ом в цепь питания линий RD. Это позволило несколько раз воспроизвести эффект при воздействии на топологически-идентичную структуру, однако после каждого возникновения эффекта визуально наблюдался рост масштабов повреждения кристалла (рис 5). Таким образом, введение токоограничивающего резистора не позволяло полностью перевести наблюдающийся одиночный эффект из катастрофического в обратимый.

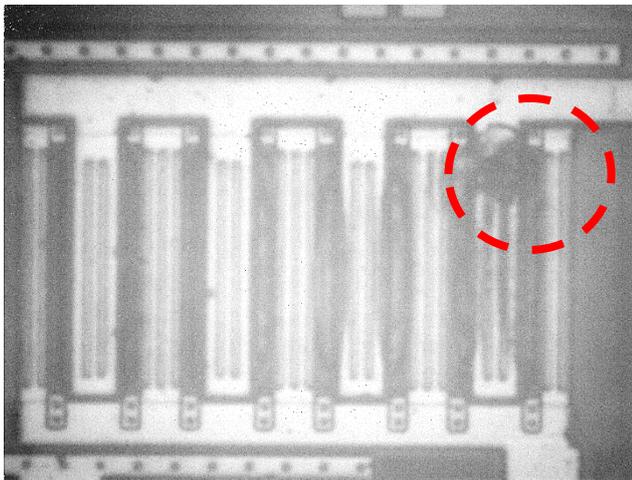


Рис. 5. Фотография области кристалла микросхемы с повреждениями после двукратного возникновении эффекта с резистором 100 Ом в цепи питания линий RD

С. Сканирование с системой парирования

С целью предотвращения катастрофического отказа следующим шагом была включена в цепи питания и линии RD система парирования ТЭ (СПТЭ), с быстродействием срабатывания около 10 мкс. [6] Разработанное в ОАО ЭНПО «СПЭЛС» устройство системы парирования ТЭ (СПТЭ) имеет расчетное время парирования менее 1 мкс с возможностью регулировки времени парирования от 1 мкс до нескольких минут и программное задание уровня срабатывания тока потребления, сигнал детектирования превышения тока потребления. Блок схема представлена на рис. 6.

Однако нужно учитывать, если ТЭ удастся парировать без последствий, остается открытым вопрос о скрытых повреждениях и их влиянии на надежность.

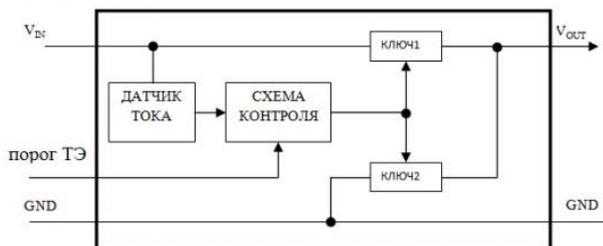


Рис. 6. Блок схема СПТЭ

При воздействии на ранее выявленные структуры около линий RD возникал эффект скачкообразного возрастания тока и стабильно воспроизводился после парирования за период времени 10мкс, визуальных повреждений топологии не наблюдалось.

Д. Поиск других эффектов

Чтобы проверить возможность возникновения подобных одиночных эффектов в других структурах была проведена серия сканирующих лазерных воздействий с уровнями энергии 2, 4, 6, 10 нДж, 20 нДж.

При сканирующем воздействии с уровнем энергии лазерного излучения 20 нДж произошел катастрофический отказ. Фотография области с необратимыми повреждениями, ассоциированными с возникновением катастрофического отказа приведена на рис. 7. Отказавшая структура предположительно является выходным видеосилителем.

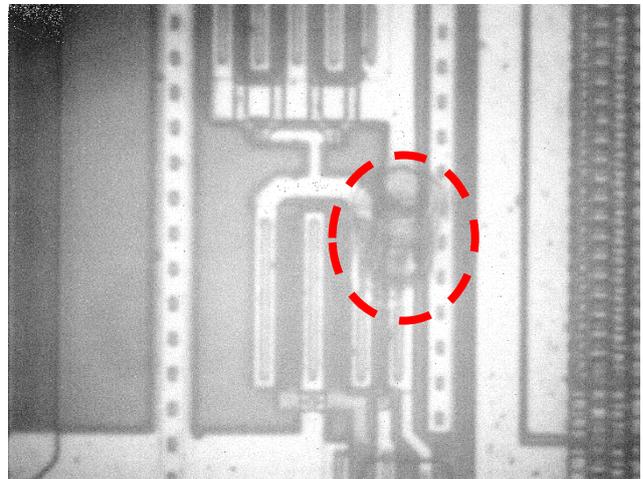


Рис. 7. Фотография области кристалла микросхемы с повреждениями, ассоциированными с катастрофическим отказом (предположительно, выходной видеосилитель)

Для типовых областей, (предположительно соответствующих защитным диодам линий RD), получены пороговые энергии возникновения эффектов повышения тока при различных температурах и напряжениях питания (табл. 2).

Таблица 2

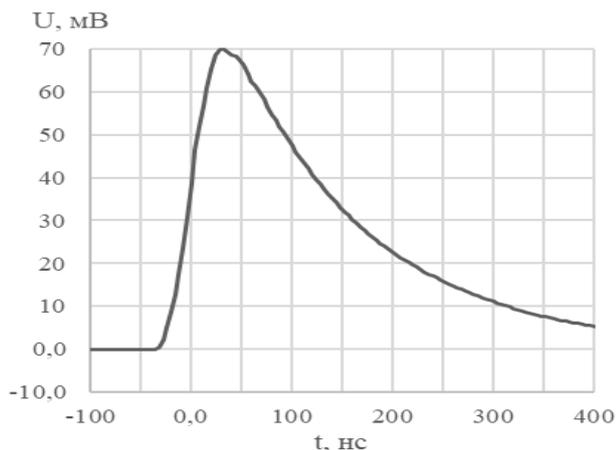
Пороговые энергии возникновения эффекта в наиболее чувствительных областях при воздействии сфокусированным лазерным излучением.

Номер и координаты области			Пороговая энергия, пДж		
№	X, МКМ	Y, МКМ	T=25°C		T=70°C
			RD=12,0В	RD=12,2В	
1	550	220	40,5	–	–
2	9920	220	40,5	–	–
3	440	7860	39,5	37,5	30,5
4	9900	7860	40,5	–	–

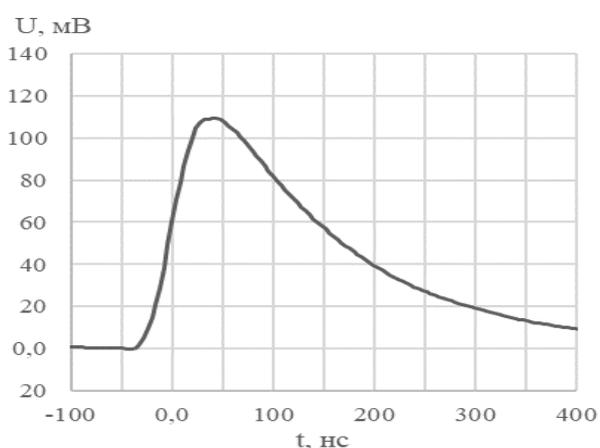
Е. Расчетно-экспериментальная оценка

Для определения эквивалентных значений ЛПЭ с учетом различной эффективности лазерного излучения при изменении температуры, согласно методике локального лазерного воздействия [7-8], были получены осциллограммы ионизационного отклика в цепи питания RD ПЗС (рис. 8). Из анализа осциллограмм видно, что при увеличении температуры

с +25°C до +70°C, эффективность лазерного излучения повышается примерно в 1.5 раза.



$R_t = 1000 \text{ Ом}; J_u = 0,50 \text{ нДж}; T = +25^\circ\text{C}$



$R_t = 1000 \text{ Ом}; J_u = 0,50 \text{ нДж}; T = +70^\circ\text{C}$

Рис. 8. Осциллограммы ионизационного отклика в цепи питания RD ПЗС при воздействии сфокусированного лазерного излучения

В результате расчетно-экспериментальной оценки с учетом изменения температурной эффективности лазерного излучения получено, что при увеличении температуры с +25°C до +70°C пороговые ЛПЭ для возникновения эффектов отказов, сопровождающихся повышением тока потребления, увеличились в 1,6 раза. При увеличении напряжения питания RD и неизменной температуре +70°C пороговые ЛПЭ уменьшаются в 1,2 раза.

III. ОБСУЖДЕНИЕ

Типичным поведением одиночного тиристорного эффекта является повышение чувствительности (снижение пороговых ЛПЭ) при росте температуры, а так же повышении напряжения, приложенного к паразитной тиристорной структуре [9]. В то же время, наблюдаемая в данном исследовании зависимость носит прямо-противоположный характер – с ростом температуры снижается чувствительность (пороговые

ЛПЭ увеличились в 1,6 раза). Данная зависимость характерна для одиночного эффекта вторичного пробоя в МДП транзисторах и мощных диодах [10]. Проведенная локализация областей катастрофических отказов с помощью сфокусированного лазерного воздействия и анализ топологии и схемотехники позволили убедиться, что эффекты возникают в защитных диодах по входам ПЗС фотоприемника. Характерная температурная зависимость с учетом локализации мест отказов позволяет уверенно утверждать, что наблюдаемые одиночные эффекты отказов являются вторичным пробоем и не связаны с одиночными тиристорными эффектами.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что в ПЗС фотоприёмных устройствах могут наблюдаться одиночные эффекты отказов, несмотря на отсутствие в них паразитных тиристорных структур. Данные отказы связаны с эффектом вторичного пробоя, который так же, как и тиристорный эффект, может быть парирован быстрым отключением питания. Для успешного подавления развития катастрофического отказа быстрое действие системы защиты должно быть на уровне нескольких микросекунд. Классифицировать одиночные радиационные эффекты отказов и отделить тиристорный эффект от вторичного пробоя возможно путем анализа температурной зависимости параметров чувствительности (пороговых ЛПЭ и сечения насыщения) к воздействию ТЗЧ.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Особенности катастрофического тиристорного эффекта в ПЛИС XC95144 / Р.Р.Нигматуллин, Д.В.Савченков, Д.В.Бобровский, А.В.Гославский // Сб. трудов «Радиационная стойкость электронных систем – «СТОЙКОСТЬ-2012». 2012. С. 135-136.
- [2] Предотвращение катастрофического тиристорного эффекта в интегральных схемах семейства ADuM1xxx / Р.Р.Нигматуллин, Д.В.Савченков, А.С. Тарараксин, А.В.Яненко // Сб. трудов «Радиационная стойкость электронных систем – СТОЙКОСТЬ-2012». 2012 С. 121-122.
- [3] Влияние времени пребывания в состоянии защёлки на радиационную стойкость БИС./ О.Б. Маврицкий, А.Н. Петровский, А.Н. Егоров, А.А. Печёнкин, К.В. Аржановский // Сб. трудов «Фотоника и информационная оптика – 2011». 2011, с. 78-79.
- [4] Технические средства проведения лазерных испытаний полупроводниковых элементов на стойкость к воздействию тяжелых заряженных частиц (обзор) / О.Б. Маврицкий, А.А. Чумаков, А.Н. Егоров, А.А. Печенкин, А.Ю. Никифоров // Приборы и техника эксперимента. 2016. № 5. С. 5-29.
- [5] Метод предотвращения катастрофических отказов ИС введением в цепь питания токоограничивающих резисторов / Д.В. Савченков, Д.Е. Протасов, А.А. Печенкин, А.С. Тарараксин // В сб.: Радиационная стойкость электронных систем «Стойкость-2011». М.: МИФИ, 2011, №.14. С.71-72.
- [6] Разработка универсальной быстродействующей системы парирования тиристорного эффекта в КМОП ИС / А.Н. Цирков, А.А. Печенкин, Д.В. Савченков // Сб. трудов

- «Радиационная стойкость электронных систем – Стойкость-2017». 2017.
- [7] Оценка параметров чувствительности СБИС к радиационным эффектам с помощью методики локального лазерного облучения / А.А. Чумаков, А.А. Печенкин, А.Н. Егоров, О.Б. Маврицкий, С.В. Баранов, А.Л. Васильев, А.В. Крицкий. // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС). 2008. № 1. С. 276–279.
- [8] Чумаков А.И. Взаимосвязь эквивалентных значений линейных потерь энергии тяжелых заряженных частиц и энергии сфокусированного лазерного излучения. // Микроэлектроника. 2011. Т. 40. № 3. С. 163–169.
- [9] Fred W. Sexton. Destructive Single-Event Effects in Semiconductor Devices and ICs // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2003. V. 50. № 3.
- [10] Temperature Dependence of Single-Event Burnout for Super Junction MOSFET / Shunsuke Katoh, Eiji Shimada, Takayuki Yoshihira, Akihiro Oyama, Syotaro Ono, Hideyuki Ura, Gentaro Ookura, Wataru Saito and Yusuke Kawaguchi // IEEE 27th International Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's. 2015. P. 93-96.

Research of Catastrophic Failures in the CCD under the Impact of Heavy-Charged Particles

A.N. Tsirkov^{1,2}, A.A. Novikov^{1,2}, V.P. Lukashin^{1,2}, A.R. Gritsaenko¹, A.A. Pechenkin^{1,2}

¹Jsc «ENGOs Spels», Moscow

²NRNU «MEPHI», Moscow, antsir@spels.ru

Abstract — The results of CCD studies on resistance to single event effects (SEE) of failures are presented. The tests were carried out at normal and elevated supply voltages, also at normal and elevated body temperatures. We tried to suppress the effect by adding a resistor to the circuit. The use of a high-speed system of parrying excess current surges in the consumption current allowed to prevent the development of irreversible failure and to study and classify the observed SEE in detail. The parry system was developed by us earlier and has program control. The characteristic temperature dependence allowed us to state that the observed single failure effects are secondary breakdown or single event snapback (SES).

Keywords — Single event effect, linear energy transfer, focused laser testing

REFERENCES

- [1] Osobennosti katastroficheskogo tiristornogo effekta v PLIS XC95144 (Features of the catastrophic thyristor effect in FPGAs XC95144) / R.R.Nigmatullin, D.V.Savchenkov, D.V.Bobrovskiy, A.V.Goslavskiy // Sb. trudov «Radiatsionnaya stoykost' elektronnykh sistem – «STOYKOST'-2012». 2012. P. 135-136. (In Russian)
- [2] Predotvrashcheniye katastroficheskogo tiristornogo effekta v integral'nykh skhemakh semeystva ADuM1xxx (Prevention of the catastrophic thyristor effect in integrated circuits of the ADuM1xxx family) / R.R.Nigmatullin, D.V.Savchenkov, A.S. Tararaksin, A.V.Yanenko // Sb. trudov «Radiatsionnaya stoykost' elektronnykh sistem – STOYKOST'-2012». 2012 P. 121-122. (In Russian)
- [3] Vliyaniye vremeni prebyvaniya v sostoyanii zashcholki na radiatsionnyuyu stoykost' BIS (Influence of the time spent in the latch state on the radiation resistance of the LIS) / O.B. Mavritskiy, A.N. Petrovskiy, A.N. Yegorov, A.A. Pechonkin, K.V. Arzhanovskiy // Sb. trudov «Fotonika i informatsionnaya optika – 2011». 2011, p. 78-79. (In Russian)
- [4] Tekhnicheskiye sredstva provedeniya lazernykh ispytaniy poluprovodnikovyykh elementov na stoykost' k vozdeystviyu tyazhelykh zaryazhennykh chastits (Technical means of laser testing of semiconductor elements for resistance to the effects of heavy charged particles) / O.B. Mavritskiy, A.A. Chumakov, A.N. Yegorov, A.A. Pechenkin, A.YU.Nikiforov // Pribory i tekhnika eksperimenta. 2016. № 5. P. 5-29. (In Russian)
- [5] Metod predotvrashcheniya katastroficheskikh otkazov IS vvedeniyem v tsep' pitaniya tokoogranichivayushchikh rezistorov (A method for preventing catastrophic IS failures by introducing current-limiting resistors into the power circuit) / D.V. Savchenkov, D.Ye. Protasov, A.A. Pechenkin, A.S. Tararaksin // V sb.: Radiatsionnaya stoykost' elektronnykh sistem «Stoykost'-2011». M.: MIFI, 2011, № 14. P.71-72. (In Russian)
- [6] Razrabotka universal'noy bystrodeystvuyushchey sistemy parirovaniya tiristornogo effekta v KMOP IS (Development of a universal high-speed system for parrying the thyristor effect in CMOS IC) / A.N. Tsirkov, A.A. Pechenkin, D.V. Savchenkov // Sb. trudov «Radiatsionnaya stoykost' elektronnykh sistem – Stoykost'-2017». 2017. (In Russian)
- [7] Otsenka parametrov chuvstvitel'nosti SBIS k radiatsionnym effektam s pomoshch'yu metodiki lokal'nogo lazernogo oblucheniya (Evaluation of VLSI sensitivity parameters to radiation effects using the local laser irradiation technique) / A.A. Chumakov, A.A. Pechenkin, A.N. Yegorov, O.B. Mavritskiy, S.V. Baranov, A.L. Vasil'yev, A.V. Krintitskiy. // Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem. 2008. № 1. P. 276–279. (In Russian)
- [8] Chumakov A.I. Vzaimosvyaz' ekvivalentnykh znacheniy lineynykh poter' energii tyazhelykh zaryazhennykh chastits i energii sfokusirovannogo lazernogo izlucheniya. (Correlation of equivalent values of linear energy transfers of heavy charged particles and energy of focused laser radiatio) // Mikroelektronika. 2011. Vol. 40. № 3. P. 163–169. (In Russian)
- [9] Fred W. Sexton. Destructive Single-Event Effects in Semiconductor Devices and ICs // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2003. V. 50. № 3.
- [10] Temperature Dependence of Single-Event Burnout for Super Junction MOSFET / Shunsuke Katoh, Eiji Shimada, Takayuki Yoshihira, Akihiro Oyama, Syotaro Ono, Hideyuki Ura, Gentaro Ookura, Wataru Saito and Yusuke Kawaguchi // IEEE 27th International Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's. 2015. P. 93-96.