

УДК 621.3.049.774 EDN YLUF4I

## **Исследование технологических режимов радиационно-термической обработки на основе облучения высокоэнергетическими электронами для повышения радиационной стойкости субмикронных микросхем**

**П. Б. Лагов**, *д.т.н., профессор, hard@spacecorp.ru*

*АО «Российские космические системы», г. Москва, Российская Федерация  
Институт физической химии и электрохимии РАН, г. Москва, Российская Федерация  
Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»,  
г. Москва, Российская Федерация*

**А. А. Мещеряков**, *mescheryakov.aa@spacecorp.ru*

*АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация*

**А. С. Дренин**, *к.т.н., drenin.as@spacecorp.ru*

*АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация*

**Ю. С. Павлов**, *д.т.н., Rad05@bk.ru*

*Институт физической химии и электрохимии РАН, г. Москва, Российская Федерация*

**Е. П. Романтеева**, *аспирант, elenaromanteeva27@gmail.com*

*Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»,  
г. Москва, Российская Федерация*

**Аннотация.** Исследовано влияние радиационно-термической обработки на характеристики цифроаналогового преобразователя, изготовленного по технологическому процессу на основе комплементарных кремниевых структур металл–оксид–полупроводник с топологической нормой 0,35 мкм. Показано, что после проведения радиационно-термической обработки, включающей облучение электронами с энергией 6 МэВ дозой до 1000 кГр и термический отжиг облученных образцов при температуре 180 °С в течение 2 ч, комплекс электрических параметров цифроаналогового преобразователя сохраняется в рамках технических условий. Реализация режимов радиационно-термической обработки при дозах облучения от 1000 до 3000 кГр приводит к постепенному уменьшению амплитуды напряжения выходного сигнала, увеличению тока утечки и потере работоспособности образцов. Полученные результаты могут быть использованы при разработке технологических процессов создания субмикронных сверхбольших интегральных схем на объемном кремнии с повышенной стойкостью к одиночным радиационным эффектам.

**Ключевые слова:** радиационная стойкость, высокоэнергетичные протоны, тяжелые заряженные частицы, одиночные радиационные эффекты, интегральная микросхема, технология, центр рекомбинации, радиационно-термическая обработка, цифроаналоговый преобразователь

# Study of Technological Modes of Radiation-Thermal Treatment Based on Irradiation with High-Energy Electrons to Increase the Radiation Resistance of Submicron Microcircuits

**P. B. Lagov**, *Dr. Sci. (Engineering), Prof.*, [hard@spacecorp.ru](mailto:hard@spacecorp.ru)

*Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation  
Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry of RAS, Moscow, Russian Federation  
National Research Technological University "MISIS", Moscow, Russian Federation*

**A. A. Meshcheryakov**, [mescheryakov.aa@spacecorp.ru](mailto:mescheryakov.aa@spacecorp.ru)

*Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation*

**A. S. Drenin**, *Cand. Sci. (Engineering)*, [drenin.as@spacecorp.ru](mailto:drenin.as@spacecorp.ru)

*Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation*

**Yu. S. Pavlov**, *Dr. Sci. (Engineering)*, [Rad05@bk.ru](mailto:Rad05@bk.ru)

*Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry of RAS, Moscow, Russian Federation*

**E. P. Romanteeva**, *graduate student*, [elenaromanteeva27@gmail.com](mailto:elenaromanteeva27@gmail.com)

*National Research Technological University "MISIS", Moscow, Russian Federation*

**Abstract.** The influence of radiation-thermal treatment on the characteristics of a digital-to-analog converter manufactured using a technological process based on complementary silicon metal–oxide–semiconductor structures with a topological norm of  $0.35\ \mu\text{m}$  has been studied. It is shown that after radiation-thermal treatment, including irradiation with electrons with an energy of 6 MeV with a dose of up to 1000 kGy and thermal annealing of irradiated samples at a temperature of  $180^\circ\ \text{C}$  for 2 hours, the set of electrical parameters of the digital-to-analog converter is maintained within the technical specifications. The implementation of radiation-thermal treatment modes at radiation doses from 1000 to 3000 kGy leads to a gradual decrease in the voltage amplitude of the output signal, an increase in the leakage current and loss of functionality of the samples. The results obtained can be used in the development of technological processes for creating submicron ultra-large-scale integrated circuits on bulk silicon with increased resistance to single radiation effects.

**Keywords:** radiation resistance, high-energy protons, heavy charged particles, single radiation effects, integrated circuit, technology, recombination center, radiation-thermal treatment, digital-to-analog converter

## Введение

Совершенствование современной бортовой радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) при обеспечении заданных массово-габаритных характеристик влечет необходимость применения интегральных микросхем (ИМС) высокой степени интеграции, изготавливаемых с малыми топологическими нормами. Уменьшение топологических норм базовых ячеек, в свою очередь, влечет увеличение их чувствительности к одиночным радиационным эффектам (ОРЭ) [1] в силу уменьшения значения суммарного критического неравновесного заряда носителей, способного спровоцировать тот или иной ОРЭ, к которому предрасположена конкретная полупроводниковая микроэлектронная структура.

В настоящее время можно выделить несколько основных подходов, обеспечивающих подавление или парирование ОРЭ в ИМС: схемотехнический, программно-математический, конструктивно-технологический.

Схемотехнический подход реализуется посредством ограничения тока через критичную ИМС при включении в ней паразитного тиристора или прерывания электрического питания. Это может быть достигнуто использованием как токоограничивающего резистора, так и специально разработанных схем защиты [2, 3], в том числе на уровне платы или прибора.

Программно-математический подход может быть реализован посредством программного мажоритарного резервирования или применения математического алгоритма для коррекции ошибок [4].

Конструктивно-технологический подход подразумевает использование защитных колец, «трэнч» изоляции элементов, специальных конструкций транзисторной ячейки с оптимизированными профилями легирования, дополнительных эпитаксиальных слоев, исходных подложек типа «кремний–на–диэлектрике». [5, 6]

Также отдельно можно выделить радиационно-технологический подход (РТП), основанный на применении радиационной обработки готовых микроэлектронных структур ИМС с использованием протонного, ионного или нейтронного облучения [7–11]. В основе радиационно-технологических

методов главным образом лежит контролируемое изменение электрофизических свойств полупроводника, а именно снижение времени жизни неосновных носителей заряда (ВЖННЗ), генерируемых тяжелой заряженной частицей в активных областях ИМС и ответственных за проявление ОРЭ. Снижение ВЖННЗ и соответствующее увеличение темпа рекомбинации неравновесных носителей заряда в полупроводнике обеспечивается формированием в результате технологического облучения радиационных центров (РЦ), представляющих собой центры рекомбинации с глубокими уровнями в запрещенной зоне полупроводника в результате смещения атомов из узлов кристаллической решетки [6].

Применение технологического облучения протонами, ионами и нейтронами имеет ряд физических и технических ограничений, наиболее важным из которых, особенно в случае ионного и нейтронного облучения, можно считать формирование областей разупорядочения, наряду с изолированными радиационными центрами, которые гораздо менее эффективно снижают ВЖННЗ, а также могут приводить к необратимому повреждению отдельных элементов ИМС [12]. Кроме того, затруднена групповая обработка пластин, что важно при серийном производстве.

С учетом теоретического обоснования, приведенного ранее [6], целью настоящей работы является разработка режимов технологического облучения высокоэнергетичными электронами и последующего стабилизирующего отжига, обеспечивающего формирование максимальных концентраций ЦР в кристаллах субмикронных ИМС при сохранении комплекса электрических и функциональных характеристик.

## Экспериментальная часть

В качестве объекта исследований был выбран 14-разрядный цифроаналоговый преобразователь (ЦАП), изготовленный по КМОП-технологии с топологической нормой 0,35 мкм. ЦАП содержит по крайней мере один компаратор, что обуславливает его чувствительность к тиристорному эффекту [13]. «ЦАП используются для преобразования цифрового кода в аналоговый сигнал, например

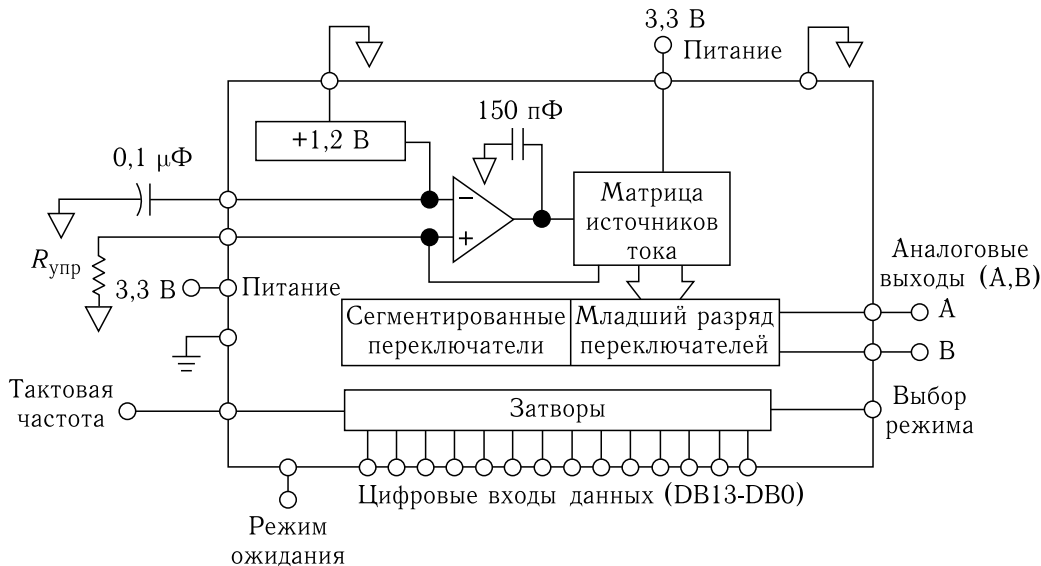


Рис. 1. Функциональная схема исследуемой ЦАП

для управления в автоматических системах исполнительными органами (электродвигателями, электромагнитами и т. п.)» [14], также в информационных системах приборов КА (рис. 1).

Радиационная обработка образцов ЦАП в пластиковом корпусе проводилась на линейном ускорителе электронов УЭЛВ-10-10-70 с энергией 6 МэВ в лаборатории радиационных технологий ИФХЭ РАН.

Плотность потока электронов составляла  $4 \times 10^{12} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  (мощность дозы около 1 кГр/с), разогрев образцов контролировался термпарой и при облучении не превышал  $70^\circ \text{C}$ , суммарный флюенс составил от  $4,0 \cdot 10^{14}$  до  $1,2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ . Измерение поглощенной дозы облучения осуществлялось с помощью стандартного образца ГСО 7903-2001 поглощенной дозы фотонного и электронного излучений СО ПД(Ф)Р-30/200 (сополимер с феназиновым красителем) с относительной погрешностью не более 15%. Облучение проводилось «напролет», поскольку длина пробега электронов в кремнии при начальной энергии 6 МэВ составляет около 12–15 мм. Уже после первого этапа облучения дозой 500 кГр (около 5 Мрад) до проведения отжига образцы утратили работоспособность.

Облученные образцы подвергались стабилизирующему низкотемпературному термическому отжигу при температуре  $180 \pm 5^\circ \text{C}$  в течение 2 ч в воздушной среде. Температурный отжиг выбран

из условия отжига нестабильных радиационных центров в кремнии и зарядовых эффектов в структуре кремний–диоксид кремния, также максимальной температуры хранения ЦАП  $150^\circ \text{C}$  (с небольшим превышением). После отжига проверялась работоспособность ЦАП по схеме, приведенной на рис. 2.

Схема контроля работоспособности ЦАП функционирует следующим образом. «С двоичного счетчика, реализованного на ПЛИС, на вход ЦАП поступает цифровой код, который с каждым тактом (импульсом) увеличивается на один младший разряд. На выходе ЦАП появляется ступенчато изменяющееся напряжение, высота каждой последующей ступени превышает высоту предыдущей ступени на величину младшего разряда ЦАП. При этом чем выше разрешающая способность ЦАП, тем большее напряжение соответствует его старшему разряду. Разница напряжений между каждыми следующими друг за другом столбцами определяет линейность ЦАП. Для 14-разрядного ЦАП с 14-разрядным счетчиком конечное число ступенек на восходящей части напряжения составляет  $2^{14} = 16384$ . Период повторения пилообразного напряжения задается входной частотой тактовых импульсов» [15]. Более подробно схема контроля функционирования ЦАП показана на рис. 3.

В результате экспериментальных исследований влияния режимов РТП на работоспособность

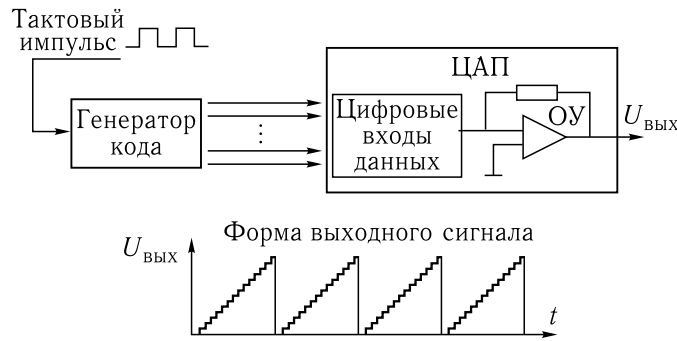


Рис. 2. Структурная схема контроля работоспособности ЦАП

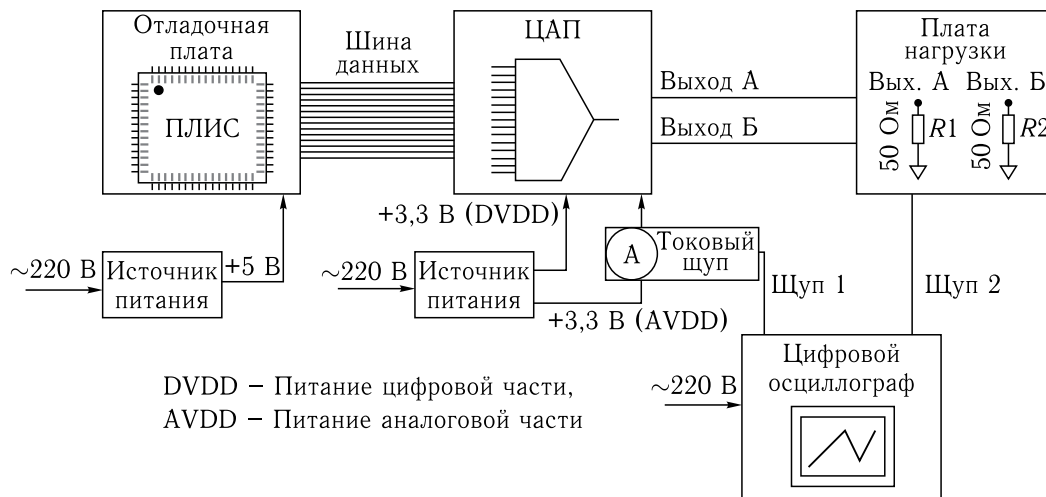


Рис. 3. Структурная схема при измерениях микросхемы ЦАП

ЦАП установлено, что в диапазоне экспозиционных доз облучения от 1000 до 3000 кГр происходит постепенное уменьшению амплитуды напряжения выходного сигнала  $U_{\text{вых}}$  с 1,84 В до 0,44 В, увеличение тока утечки и потеря работоспособности образцов (рис. 4). При использовании доз облучения до 1000 кГр в сочетании с термическим отжигом указанные параметры не изменяются (рис. 5, б, рис. 6, б). Изменение  $U_{\text{вых}}$  с дозой электронного облучения показано на рис. 4. Результаты, представленные на рис. 4–6, соответствуют облученным образцам уже после проведения термического отжига. Непосредственно после облучения измерения не проводились.

Соответствующие осциллограммы напряжения выходного сигнала ЦАП длительностью 5 мс и тока потребления, полученные после проведения РТП в различных режимах, приведены на рис. 5. На приведенных осциллограммах можно видеть

деградацию амплитуды напряжения выходного сигнала с ЦАП при увеличении дозы облучения.

Более подробно осциллограммы исходного образца и после РТП, проведенного в оптимальных режимах, представлены на рис. 6, из которых видна полная идентичность характеристик исследуемых образцов.

## Обсуждение результатов

При прохождении ускоренных электронов через кремниевые интегральные структуры в них реализуются следующие механизмы передачи энергии:

- ионизация атомов кремния и оксида кремния, обусловленная «смещением электронов и разрывом валентных связей, т. е. генерация неравновесных носителей заряда;

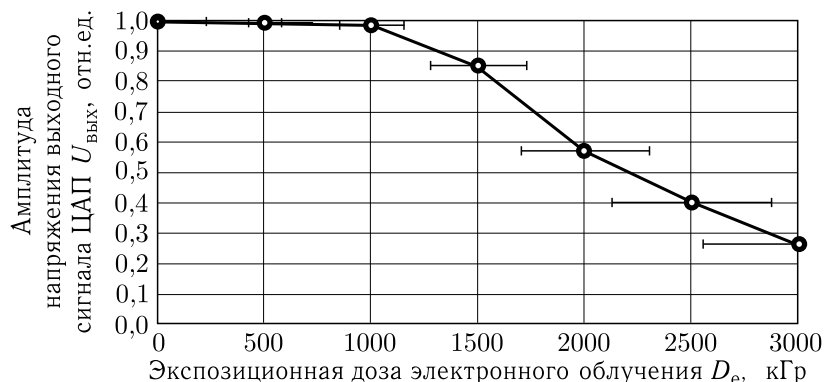


Рис. 4. Изменение амплитуды напряжения выходного сигнала ЦАП после облучения электронами с энергией 6 МэВ и термического отжига

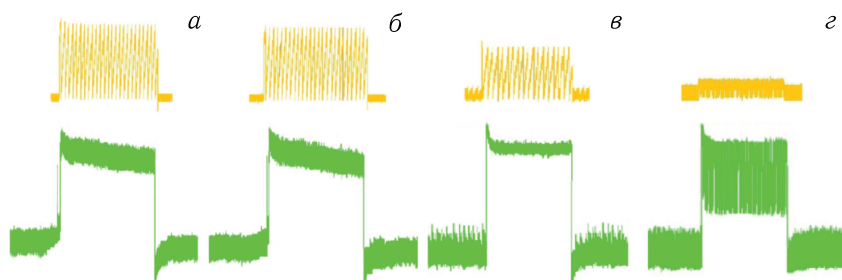


Рис. 5. Влияние режимов РТП на выходные характеристики ЦАП а) исходный образец; б) после РТП: 1000 кГр, отжиг; в) после РТП: 2000 кГр, отжиг; г) после РТП: 3000 кГр, отжиг (амплитуда напряжения выходного сигнала — сверху, ток потребления — внизу)

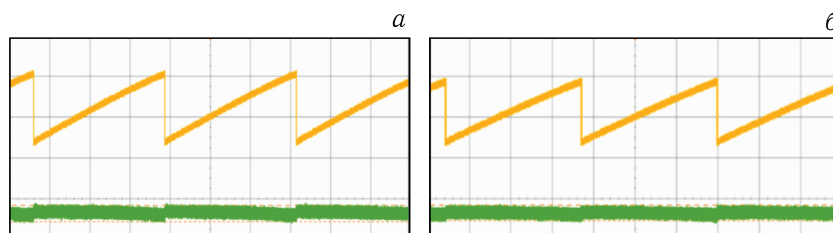


Рис. 6. Оциллограммы выходных параметров ЦАП: а) исходный образец; б) после РТП: 1000 кГр, отжиг (180°C; 2 ч) (амплитуда напряжения выходного сигнала — сверху, ток потребления — внизу); длительность импульса выходного сигнала с ЦАП — 330 мкс, амплитуда выходного сигнала 0,130–1,84 В, ток выходного сигнала 8 мА

- смещение атомов из узлов кристаллической решетки, т.е. образование простейших радиационно-структурных дефектов типа «вакансия–межузельный атом», дивакансий;
- возбуждение атомов и электронов без смещения, т.е. разогрев кристалла» [16];
- генерация вторичного гамма- и рентгеновского излучений, что также приводит к дополнительной генерации неравновесных носителей заряда.

Ядерные превращения при таких уровнях энергий первичных электронов в кристаллах и корпусах кремниевых микросхем не происходят. Исключение могут составлять материалы, содержащие бериллий, имеющего низкий порог ядерных реакций с выходом вторичных альфа-частиц и нейтронов.

Генерация неравновесных носителей заряда в оксиде кремния приводит главным образом к накоплению в нем положительного заряда [17]

и существенному изменению вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик структур типа «металл–оксид–полупроводник» (МОП) даже при малых для радиационных технологий дозах облучения до 1 Гр (до 100 крад) и наблюдаемых при исследованиях и испытаниях на радиационную стойкость. Полное восстановление оксида кремния после облучения происходит при проведении термического отжига при температурах до 300°С. Однако при температурах 180–200°С степень отжига радиационных изменений может быть также значительной и достигать примерно 90–95% [12] в зависимости от технологии получения оксидной пленки. Кроме того, при проведении операций облучения и отжига происходит релаксация упругих напряжений в оксиде кремния и на его границе с кремнием, что способствует уменьшению концентрации поверхностных состояний, негативно влияющих на электрические параметры МОП-структур и срок их эксплуатации.

Смещение атомов из узлов кристаллической решетки приводит к формированию комплексов с глубокими уровнями или радиационных центров (РЦ) в запрещенной зоне полупроводника и, соответственно, к снижению рекомбинационного времени жизни неосновных носителей заряда. При значительных концентрациях РЦ происходит рост удельного сопротивления слаболегированных областей, в частности области канала МОП-транзисторов, а также рост обратных токов  $p-n$ -переходов. При очень высоких концентрациях РЦ происходит снижение подвижности носителей заряда. Полный отжиг РЦ происходит при температурах свыше 500°С [12]. Однако проведение операции низкотемпературного отжига при температурах 180–200°С позволяет отжечь РЦ типа «вакансия–легирующая примесь» (Е-центр), оказывающих негативное влияние на характеристики большинства кремниевых устройств, но сохранить более термостабильные РЦ других типов (А-центр — «вакансия–кислород», J-центр — дивакансия и др.) и обеспечить необходимое и стабильное во времени снижение времени жизни носителей в диапазоне рабочих температур кремниевых устройств.

Рассмотренные процессы объясняют изменения характеристик ЦАП, полученные в ходе экс-

периментальных исследований. Так, потеря работоспособности ЦАП после облучения обусловлена накоплением значительного заряда в подзатворном диэлектрике МОП-структур, а также возрастанием обратных токов  $p-n$ -переходов стока и истока. Проведение термической обработки позволило отжечь заряд в оксиде и Е-центры в каналах транзисторов и прилегающих областях, в результате чего работоспособность облученных ЦАП восстановилась. С увеличением дозы облучения концентрация А- и J-центров возрастает, что не позволяет восстановить в полном объеме работоспособность образцов, облученных дозами более 1000 кГр (100 Мрад) при использованных режимах отжига. Как показало экспресс-тестирование для образцов, облученных дозами 1500 кГр и более, «наблюдается увеличение токов потребления, максимального времени задержки распространения сигнала, уровня напряжения логического нуля, а также уменьшение уровня напряжения логических единиц и коэффициента разветвления по выходу, определяющего нагрузочную способность ЦАП в целом» [15].

Кроме того, присутствие высоких концентраций РЦ после высокодозного облучения и последующего отжига может оказывать негативное влияние на аналоговые элементы: операционные усилители (ОУ), компараторы напряжения (КН), аналоговые переключатели, которые присутствуют в ЦАП и определяют его точностные свойства. Их чувствительность к значительной концентрации РЦ проявляется в ухудшении таких параметров, как коэффициент усиления, входной ток, напряжение смещения нуля, ухудшение шумовых характеристик, что можно видеть на рис. 5. Аналоговые узлы ЦАП более чувствительны к высоким концентрациям РЦ, чем цифровые, поскольку входящие в их состав транзисторы работают в активном режиме, а не в режиме переключения. Коэффициент усиления  $K_u$  операционного усилителя (ОУ) связан с коэффициентом усиления транзистора  $\beta$  линейной или степенной зависимостью. Например, при изменении  $\beta$  в 2–3 раза  $K_u$  может уменьшаться в 2–10 раз. Под воздействием ИИ резко возникают уровни собственных шумов ОУ, которые снижают чувствительность ЦАП к его выходному сигналу, что сказывается на разрешающей способности преобразователя [15].

## Выводы

Показано, что в результате радиационно-термической обработки ЦАП, включающей облучение электронами с энергией 6 МэВ дозой до 1000 кГр и термический отжиг при температуре 180°С в течение 2 ч, не приводит к изменению комплекса электрических параметров ЦАП при значительном снижении времени жизни неосновных носителей заряда в объеме кристалла микросхемы, что позволяет рассматривать РТП в качестве перспективного технологического инструмента повышения радиационной стойкости изделий электронной техники на основе МОП- и КМОП-структур к одиночным и дозовым эффектам. Полученные результаты могут быть распространены на другие типы ИМС, в том числе и биполярные, после корректировки режимов РТП по результатам экспериментальных исследований на пластинах со структурами.

## Список литературы

1. *Holmes-Siedle A., Adams L.* Handbook of Radiation Effects, Second Edition. Oxford University Press, 2007, 614 p. (p. 108).
2. *Петух Н.Н., Голованов С.В., Благодырев В.А., Лагов П.Б., Яковлев С.А., Кляйн А.А., Дорошевич П.В.* Схемотехническое решение защиты бортовой аппаратуры от воздействия тиристорного эффекта. Научно-технический сборник: Тезисы докладов 25-й Всероссийской научно-технической конференции «Радиационная стойкость электронных систем» «СТОЙКОСТЬ-2022». С. 262–264. Лыткарино, 2022.
3. *Коняхин В., Федоров Р.* Микросхема защиты от тиристорного эффекта // Наноиндустрия, №7 (69), С. 32–41. 2016.
4. *Bagatin M.* Ionizing Radiation Effects in Electronics. CRC Press, 394 p.
5. *Colinge J.-P.* Silicon-on-Insulator Technology: Materials to VLSI. Springer Science & Business Media, 3rd Edition, 2004 г. 366 p.
6. *Лагов П.Б., Дренин А.С., Мещеряков А.А., Юданов Н.А., Голованов С.В.* Применение радиационно-термической обработки для подавления чувствительности кремниевых микросхем к одиночным радиационным эффектам // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2021. Т. 8. № 3. С. 99–103.
7. *Adams J.R. and Sokel R.J.* Neutron irradiation for prevention of latch-up in MOS integrated circuits // IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. NS-26, No. 6, December 1979.
8. *Eddy J.K.* The prevention of latchup in microcircuits using proton beams // IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. NS-28, No. 2, April 1981.
9. *Barnes C.E., Rollins J.G. and Hachey D.* Neutron-induced latch-up immunity in metal gate CMOS integrated circuits // IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. NS-34, No. 6, December 1987.
10. *Lacoe R. et al.* Neutron and proton irradiation for latchup suppression in a radiation tolerant commercial submicron CMOS process, in Proc. RADECS'99, Fontevraud, France, Sept. 1999, P. 340–345. 3368, Dec. 2004.
11. *Xiao-Yu Pan et al.* Impact of neutron-induced displacement damage on the single event latchup sensitivity of bulk CMOS SRAM // Chin. Phys. B. Vol. 26, No. 1 (2017), 018501.
12. *Ладыгин Е.А.* Радиационная технология твердотельных электронных приборов. М.: ЦНИИ «Электроника», 1976. 345 с.
13. Single Event Effects Mitigation Tech Report DOT/FAA/TC-15/62 U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration. 2016. С. 69.
14. Методические указания для лабораторно-практических занятий по дисциплине ОП.03 Прикладная электроника для специальности 09.02.01. Компьютерные системы и комплексы [https://infourok.ru/metodicheskie-ukazaniya-dlya-laboratorno-prakticheskikh-zanyatiy-po-discipline-op-prikladnaya-elektronika-dlya-specialnosti-kompyu-2571873.html](https://infourok.ru/metodicheskie-ukazaniya-dlya-laboratorno-prakticheskikh-zanyatiy-po-discipline-op-prikladnaya-elektronika-dlya-specialnosti-09-02-01-kompyuternye-sistemy-i-komplekсы-https://infourok.ru/metodicheskie-ukazaniya-dlya-laboratorno-prakticheskikh-zanyatiy-po-discipline-op-prikladnaya-elektronika-dlya-specialnosti-kompyu-2571873.html)
15. *Федорков Б.Г., Телец В.А.* Микросхемы ЦАП и АЦП: функционирование, параметры, применение. М.: Энергоатомиздат, 1990. 320 с.
16. *Коновалов М.П.* Применение высокоэнергетичных электронов в технологии силовых кремниевых приборов для улучшения их динамических и статических параметров: Дисс. ... кандидата технических наук: 05.27.01. Москва. 2005. 154 с.
17. *Larin F.* Radiation Effects in Semiconductor Devices, Wiley, 1968, 287 с.

Дата поступления рукописи  
в редакцию 15.12.2023  
Дата принятия рукописи  
в печать 21.02.2024