

## **Применение радиационно-термической обработки для подавления чувствительности кремниевых микросхем к одиночным радиационным эффектам**

**П. Б. Лагов**, *д. т. н., доцент, lagov.pb@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*

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

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

**Н. А. Юданов**, *к. т. н., yudanov.na@spacecorp.ru*

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

**С. В. Голованов**, *golovanov.sv@spacecorp.ru*

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

**Аннотация.** Проанализирована возможность снижения чувствительности кремниевых интегральных микросхем к одиночным радиационным эффектам с помощью радиационно-термической обработки, включающей облучение на ускорителях заряженных частиц и последующую низкотемпературную термообработку. Показано, что снижение чувствительности к одиночным радиационным эффектам обеспечивается за счет формирования термостабильных центров рекомбинации в полупроводниковой структуре интегральных микросхем в необходимых концентрациях. При этом может быть обеспечено снижение первичного фототока, генерируемого тяжелыми заряженными частицами или высокоэнергетичными протонами, снижение коэффициентов передачи паразитных биполярных транзисторов, образующих тиристорные структуры, снижение коэффициентов лавинного размножения носителей при высоких напряжениях электрического поля. Радиационно-термическая обработка может быть введена в технологический процесс изготовления интегральных микросхем различных классов в конце технологического цикла изготовления и не требует корректировки базовой технологии. Возможный нежелательный рост обратных токов и сохранение значений других электрических параметров в рамках допустимых значений при использовании радиационно-термической обработки обеспечивается выбором оптимальных режимов облучения и отжига, которые устанавливаются в ходе экспериментальных проб. Проведенная расчетная оценка показала, что применение радиационно-термической обработки в технологии интегральных микросхем может обеспечить снижение эффективной длины сбора неравновесных носителей заряда, генерируемых при одиночных радиационных эффектах, не менее чем в 10 раз, что позволяет рассматривать радиационно-термическую обработку как эффективный технологический инструмент подавления чувствительности к одиночным радиационным эффектам.

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

## Application of Radiation-Thermal Treatment to Suppress Sensitivity of Silicon Microcircuits to Single Radiation Effects

**P. B. Lagov**, *Dr. Sci. (Engineering), Assoc. Prof., lagov.pb@spacecorp.ru*  
*Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation*

**A. S. Drenin**, *Cand. Sci. (Engineering), drenin.as@spacecorp.ru*  
*Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation*

**A. A. Meshcheryakov**, *mescheryakov.aa@spacecorp.ru*  
*Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation*

**N. A. Yudanov**, *Cand. Sci. (Engineering), yudanov.na@spacecorp.ru*  
*Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation*

**S. V. Golovanov**, *golovanov.sv@spacecorp.ru*  
*Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation*

**Abstract.** The paper analyses the possibility to reduce the sensitivity of silicon integrated circuits (ICs) to single radiation effects by means of radiation-thermal treatment including irradiation in charged particle accelerators and subsequent low-temperature heat treatment. It is shown that reduction in sensitivity to single radiation effects is provided by formation of thermostable recombination centers in semiconductor IC structure in necessary concentrations. At the same time a decrease in primary photocurrent generated by heavy charged particles or high-energy protons, reduction in transfer coefficients of parasitic bipolar transistors forming thyristor structures, reduction in carrier avalanche multiplication coefficients at high electric field strengths can be provided. Radiation-thermal treatment can be introduced in the manufacturing process of ICs of various classes at the end of the manufacturing cycle and does not require correction of the basic technology. A possible undesirable growth of inverse currents and preservation of values of other electrical parameters within acceptable values when using radiation-thermal treatment is provided by choosing optimal modes of irradiation and annealing which are established in the course of experimental tests. The calculated evaluation has shown that using radiation-thermal treatment in the technology of IC fabrication can provide a decrease in the effective collection length of non-equilibrium charge carriers generated under the influence of single radiation effects by at least 10 times which allows considering radiation-thermal treatment as an effective technological tool to suppress the sensitivity to single radiation effects.

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

## Введение

Важным фактором космического пространства, определяющим радиационную стойкость аппаратуры, является воздействие отдельных ядерных частиц — высокоэнергетичных протонов (ВЭП), тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) — ионов, а также вторичных нейтронов и атомов отдачи, которое может проявляться в виде одиночных радиационных эффектов (ОРЭ).

К настоящему времени определены классы наиболее чувствительных к ОРЭ интегральных микросхем (ИМС), к которым в первую очередь относятся ИМС, выполненные по КМОП и БиКМОП-технологии с топологическими нормами менее 0,35 мкм, а также некоторые биполярные ИМС, например стабилизаторы напряжения при работе в режиме понижения напряжения и другие. Известна классификация ОРЭ, включающая различные обратимые и необратимые эффекты, характерные для определенных функциональных и конструктивно-технологических классов ИМС [1].

ОРЭ различных типов обусловлены генерацией неравновесных носителей заряда вдоль трека частиц в приборной структуре и характеризуются суммарным неравновесным зарядом. Кремниевые микросхемы изготавливаются на подложках высокого качества и характеризуются относительно высоким временем жизни носителей заряда ( $10^{-6}$ – $10^{-5}$  с), что является одной из причин их повышенной чувствительности к одиночным радиационным эффектам [2].

Для подавления ОРЭ применяется ряд конструктивно-технологических и схемотехнических мер (использование защитных колец, «тrench»-изоляции, дополнительных эпитаксиальных слоев, подложек «кремний-на-изоляторе» (КНИ); оптимизация профилей легирования и конструкции транзисторной ячейки; двойное или тройное резервирование, коррекция ошибок и др.) [3, 4]. Применение указанных мер приводит к увеличению площади кристалла, усложняет технологический процесс, снижает выход годных изделий, снижает технические характеристики и серьезно сказывается на их стоимости, в частности при использовании КНИ-процесса; использование схемных решений для парирования ОРЭ усложняет аппаратуру и не всегда возможно.

Целью работы является расчетно-аналитическая оценка эффективности применения радиационно-термической обработки (РТО) в технологии изготовления кремниевых ИМС для снижения чувствительности к ОРЭ.

## Обоснование и выбор направления исследований

Процессы рассасывания и аннигиляции неравновесного заряда в кремниевых устройствах всех классов могут быть значительно ускорены путем формирования необходимой концентрации термостабильных центров рекомбинации [5] в кристалле ИМС посредством радиационной и последующей низкотемпературной термической обработки [6–8]. Следовательно, подавление ОРЭ может быть эффективно реализовано с помощью РТО в конце технологического цикла изготовления ИМС без вмешательства в базовый технологический процесс и даже после его завершения на готовых корпусированных изделиях [9–11]. В отличие от термомодиффузионных способов легирования примесями с глубокими уровнями (Au, Pt и др.) РТО позволяет обеспечить заданную концентрацию центров рекомбинации (ЦР) в кристалле ИМС [5, 12, 13] для снижения чувствительности к ОРЭ при одновременном сохранении комплекса электрических параметров в рамках норм технических условий.

РТО подразумевает две основных операции:

1) облучение «напролет» высокоэнергетичными электронами полупроводниковых пластин с готовыми структурами с целью контролируемого формирования в объеме кремния (эпитаксиальных слоях) наноразмерных ЦР;

2) стабилизирующий низкотемпературный отжиг для устранения малостабильных ЦР, заряда в оксиде, сглаживания рельефа упругих напряжений на границе «кремний–оксид» и уменьшения плотности поверхностных состояний (ПС).

Операция технологического облучения также может быть реализована с использованием ускорителей протонов или ионов с малым атомным номером. При этом на определенной глубине полупроводниковой структуры может быть сформирован заданный профиль центров рекомбинации.

Введение в структуру ИМС дополнительных ЦР при РТО позволит:

1) снизить амплитуду и длительность импульса первичного фототока, генерируемого при прохождении ВЭП или ТЗЧ за счет рекомбинации неравновесных носителей заряда в непосредственной близости от места их генерации;

2) снизить коэффициенты усиления биполярных транзисторов [6–10], образующих паразитную тиристорную структуру в КМОП ИМС на объемном кремнии, а следовательно, подавить возможность нежелательного включения тиристорной структуры.

3) повысить значения порогового заряда, провоцирующего формирование лавинного пробоя в биполярных и  $n$ -МОП структурах при воздействии ВЭП и ТЗЧ.

## Расчетные оценки и обоснование эффективности РТО

Снижение чувствительности к ОРЭ при использовании РТО объясняется уменьшением эффективной длины собирания носителей заряда, которые генерирует ТЗЧ или ВЭП. Именно этот принцип используется при создании КНИ или эпитаксиальных структур. Отличие в случае применения РТО состоит в том, что уменьшение длины собирания носителей обеспечивается не конструктивным ограничением чувствительных областей, а за счет управляемого усиления процессов рекомбинации в чувствительных областях кристалла, уменьшения времени жизни неосновных носителей заряда [14] и, соответственно, диффузионной длины  $L$ .

При времени жизни неосновных носителей заряда  $\tau \approx 10^{-6}$ – $10^{-5}$  с значение  $L$  составит для электронов  $L_n$  и дырок  $L_p$ :

$$L_n = (D_n \cdot \tau_n)^{1/2} = ((kT/q) \cdot \mu_n \cdot \tau_n)^{1/2} \approx \\ \approx 6,0 \cdot (\tau_n)^{1/2} \approx 60\text{--}190 \text{ мкм};$$

$$L_p = (D_p \cdot \tau_p)^{1/2} = ((kT/q) \cdot \mu_p \cdot \tau_p)^{1/2} \approx \\ \approx 3,5 \cdot (\tau_p)^{1/2} \approx 35\text{--}110 \text{ мкм},$$

в то время как снижение до уровня  $\tau \approx 10^{-9}$ – $10^{-8}$  с

$$L_n \approx 1,9\text{--}6 \text{ мкм}; \quad L_p \approx 1,1\text{--}3,5 \text{ мкм}.$$

Значение  $\tau$  согласно статистике рекомбинации Шокли–Рида–Холла обратно пропорционально концентрации центров с глубокими уровнями ( $N_t$ ) и, соответственно, флюенсу воздействующих частиц ( $\Phi$ ), что в сочетании со стабилизирующим отжигом позволяет прецизионно регулировать режимы технологического обучения для достижения требуемых значений  $\tau$  без ущерба для остальных эксплуатационных параметров  $\tau \sim (1/N_t) \sim (1/\Phi)$ . Ограничивающим фактором при использовании РТО является рост обратных токов в структурах с  $p$ – $n$ -переходом, замедление спада  $\tau$  с увеличением флюенса частиц и снижение подвижности носителей заряда  $\mu$  при слишком больших концентрациях ЦР. В связи с этим при разработке оптимальных режимов РТО для конкретных классов и типов микросхем требуется проведение соответствующих экспериментальных проб.

## Заключение

Проведенные расчетно-аналитические оценки показали, что радиационно-термическая обработка кремниевых ИМС может эффективно использоваться для снижения их чувствительности к однократным радиационным эффектам. Предложенный подход является универсальным, технологичным и может быть реализован для различных классов кремниевых микросхем на завершающей стадии кристалльного производства до операций резки и корпусирования. Предварительные экспериментальные исследования могут выполнены на корпусированных изделиях.

## Список литературы

1. *Petersen E.* Single Event Effects in Aerospace // IEEE Press. Wiley, NJ, 2011. 502 p.
2. *Holmes-Siedle A., Adams L.* Handbook of Radiation Effects. Second Ed. Oxford University Press, 2007. 614 p.
3. *Ionizing Radiation Effects in Electronics.* Ed. by M. Bagatin, S. Garardin. CRC Press. Taylor & Francis Group LLC, 2016. 391 p.
4. *Мурашев В.Н., Приходько П.С., Ладыгин Е.А., Лагов П.Б., Удалов В.А.* Перспективные приборы

- микроэлектроники на КНИ структурах // Материалы Международной научно-технической конференции «Моделирование электронных приборов и технологий, обеспечение качества, надежности и радиационной стойкости приборов и аппаратуры», Севастополь, 6–14 сентября 2003.
5. Лагов П.Б., Ладыгин Е.А. Кинетика накопления глубоких радиационных центров в неоднородных кремниевых структурах // Известия вузов. Материалы электронной техники. 1999. № 1. С. 53–55.
  6. Ладыгин Е.А., Лагов П.Б., Осипов Г.А. Улучшение усилительных, импульсных и температурных характеристик кремниевых маломощных транзисторов при обработке быстрыми электронами и отжиге // ВАНТ. Серия: Физика радиационного воздействия на РЭА. 1996. Вып. 1–3. С. 95–100.
  7. Лагов П.Б., Ладыгин Е.А. Повышение радиационной стойкости кремниевых биполярных  $n-p-n$  и  $p-n-p$ -транзисторов к импульсному и статическому излучению при радиационно-термической обработке // ВАНТ. Серия: Физика радиационного воздействия на РЭА. 1999. Вып. 1–2. С. 114–117.
  8. Ладыгин Е.А., Лагов П.Б. Экспериментальные результаты и расчетные оценки повышения радиационной стойкости и улучшения комплекса параметров транзисторных структур, подверженных «глубокому» облучению быстрыми электронами // ВАНТ. Серия: Физика радиационного воздействия на РЭА. 2000. Вып. 1–2. С. 70–73.
  9. Ладыгин Е.А., Коновалов М.П., Лагов П.Б., Прокоров К.В., Сопов О.В., Делян В.И., Будишевский Ю.Д. Эффективность радиационной обработки для улучшения статических и динамических параметров транзисторов Дарлингтона // ВАНТ. Серия: Физика радиационного воздействия на РЭА. 2002. Вып. 4.
  10. Ладыгин Е.А., Паничкин А.В., Осипов Г.А., Таперо К.И., Коновалов М.П., Лагов П.Б. Физико-технические основы радиационных методов обработки полупроводниковых приборов и микросхем испытательного, отбраковочного и технологического характера // ВАНТ. Серия: Физика радиационного воздействия на РЭА. 2004. Вып. 3–4. С. 7–17.
  11. Ладыгин Е.А., Коновалов М.П., Орлова М.Н., Ручкин М.В., Лагов П.Б., Сурма А.М. Повышение быстродействия и радиационной стойкости силовых кремниевых диодов с применением радиационного технологического процесса // ВАНТ. Серия: Физика радиационного воздействия на РЭА. 2006. Вып. 1–2. С. 29–37.
  12. Pavlov Y.S., Surma A.M., Lagov P.B., Fomenko Y.L. and Geifman E.M. Accelerator-based electron beam technologies for modification of bipolar semiconductor devices // Journal of Physics: Conference Series. 2016. Vol. 747(1). 012085.
  13. Lagov P., Drenin A. and Zinovjev M. Proton-irradiation technology for high-frequency high-current silicon welding diode manufacturing // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 830(1). 012152.
  14. Кобелева С.П., Лагов П.Б., Щемеров И.В. О возможности разработки ГСО времени жизни неравновесных носителей заряда монокристаллического кремния // Стандартные образцы. 2013. №3. С. 10–15.