

Влияние предварительного облучения на одиночные радиационные эффекты

А.А. Новиков^{1,3}, А.А. Печенкин^{1,3}, Н.В. Рясной², А.И. Чумаков^{1,3}

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

²ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс»

³ОАО «ЭНПО Специализированные электронные системы», aanov@spels.ru

Аннотация — Представлены результаты расчетно-экспериментальных исследований изменений параметров чувствительности интегральных схем по одиночным радиационным эффектам после предварительного дозового облучения.

Ключевые слова — радиационная стойкость, одиночные радиационные эффекты, лазерные методы.

I. ВВЕДЕНИЕ

Проблема влияния дозовых эффектов на параметры чувствительности интегральных схем (ИС) по одиночным радиационным эффектам (ОРЭ) обсуждается достаточно долго [1-2]. Однако до настоящего времени отсутствует достоверная информация по изменению параметров чувствительности ИС по ОРЭ при воздействии отдельных ядерных частиц (ОЯЧ). На наш взгляд, это связано, в первую очередь, с методическими погрешностями при проведении подобных работ. Действительно, в силу стохастической природы возникновения ОРЭ очень проблематично отследить закономерности в изменении тех или иных характеристик, определяющих чувствительность ИС к эффектам воздействия ОЯЧ. Выходом из подобной ситуации является применение лазерных методов при проведении подобных исследований, которые позволяют проводить детерминированные оценки изменения параметров в выбранных областях ИС [3].

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований по оценке изменений пороговых значений энергии возникновения одиночных эффектов сбоев, тиристорных эффектов (ТЭ) и эффектов «иголок». В качестве объектов исследований выбраны ОЗУ (для эффектов одиночных сбоев и ТЭ) и операционный усилитель (ОУ) (при исследовании эффектов «иголок»).

В качестве объектов выбраны кристаллы КМОП ОЗУ емкостью 4 Кбит, изготовленные по 2 мкм проектным нормам. В исследуемом ОЗУ имеют место эффекты одиночных сбоев и ТЭ. Выбор данного ОЗУ связан с тем, что дозовые отказы в нем определяются эффектами накопления радиационно-индуцированного

заряда в подзатворном окисле активных МОП транзисторов [4]. Другой тип ОЗУ изготовлен по субмикронным проектным нормам. Дозовые отказы в субмикронном ОЗУ определяются утечками токов в паразитных и активных МОП структурах [5].

Объектом исследований эффектов «иголок» был выбран быстродействующий малощумящий ОУ видеосигналов AD829 фирмы AnalogDevices, выполненный по биполярной технологии. ОУ функционировал в неинвертирующем включении с низким коэффициентом усиления (глубокой обратной связью) при питающем напряжении ± 10 В. На вход ОУ подавался постоянный сигнал с напряжением 2.5 В. Выбор данного типа ОУ был обусловлен тем, что проведенные ранее исследования с использованием лазерных методов и при облучении на ускорителях ионов показали хорошую сходимость результатов и подтвердили возможность использования лазерных методов для проведения дальнейших исследований [6].

II. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальные исследования проводились в НОЦ «Стойкость» («ЭНПО СПЭЛС»/НИЯУ «МИФИ»). Предварительное дозовое облучение проводилось на рентгеновской установке «РЕИМ-М» со средней энергией квантов около 10 КэВ при максимальном напряжении на аноде 45 кВ [7]. Режимы функционирования объектов экспериментальных исследований как при воздействии рентгеновского излучения, так и лазерного, были одни и те же. Суммарная доза ионизирующего излучения существенно превышала уровни параметрических и функциональных отказов при исследовании ТЭ и составляла 1Мрад (Si). Эффекты сбоев в ОЗУ контролировались до тех пор, пока ИС функционировали. Критерием функционального отказа ОЗУ был принят отказ 20...40% ячеек памяти. По эффектам «иголок» облучение было остановлено после значительного искажения формы импульса выходного сигнала.

Оценка чувствительности по одиночным эффектам проводилась с использованием лазерных установок «ПИКО-3» при облучении лазерным излучением с

длиной волны 1.064 мкм и длительностью 70 пс и «ПИКО-4» при облучении лазерным излучением с длиной волны 900 мкм и длительностью 25пс. Минимальный диаметр пятна сфокусированного лазерного излучения составлял 2.5 мкм [8].

В процессе экспериментальных исследований проводился периодический (в паузах между облучениями на рентгеновской установке) контроль температуры образцов с помощью тепловизора FLIR T620 с точностью около 2°C. Необходимость проведения этой процедуры связана с тем, что за счет увеличения тока потребления ИС при облучении возможно повышение температуры кристалла, которое косвенно может повлиять на изменение параметров чувствительности ИС по ОРЭ.

В процессе исследований проводилось облучение образцов на установке «РЕИМ-М» до выбранного уровня дозового воздействия, затем облучение прерывалось, и для исследуемого образца оценивались параметры чувствительности по одиночным эффектам на лазерных установках. Время между облучением и затрачиваемое на сам процесс оценки чувствительности по одиночным эффектам минимизировалось с целью уменьшения влияния процессов отжига.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рис. 1 представлены результаты измерения тока потребления кристалла 4 К КМОП ОЗУ в зависимости от накопленной дозы облучения. Здесь же показан график изменения температуры кристалла ИС, который был построен по измеренным значениям температуры кристалла ИС. Температура кристалла ИС изменялась в процессе облучения за счет собственного разогрева кристалла при увеличении тока потребления. Максимальная температура кристалла была 48°C. Отличительной особенностью данного типа ОЗУ является относительно быстрое восстановление характеристик за счет отжига накопленного заряда в подзатворном окисле [4]. Уровень первых функциональных отказов ОЗУ, которые проявлялись в потери работоспособности отдельных ячеек, составил около 10 крад (Si). Полный функциональный отказ ОЗУ (при котором ни одна ячейка не сохранила свою работоспособность) произошел при уровнях воздействия 100 крад (Si), однако ТЭ продолжали иметь место даже при уровнях воздействия более 1 Мрад (Si).

На рис. 2 представлены зависимости сечения ТЭ в ОЗУ от энергии лазерного излучения до облучения и после облучения при уровне воздействия, соответствующему уровню функционального отказа.

На рис. 3 представлены зависимости сечения эффектов одиночных сбоя в ОЗУ от энергии лазерного излучения до облучения и после облучения до уровня накопленной дозы, близкой к функциональному отказу. Аналогичные результаты были получены и для субмикронного КМОП ОЗУ.

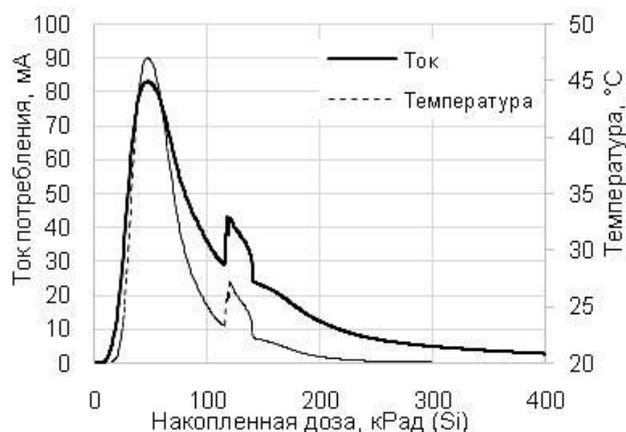


Рис. 1. Зависимость тока потребления и температуры ОЗУ от накопленной дозы облучения

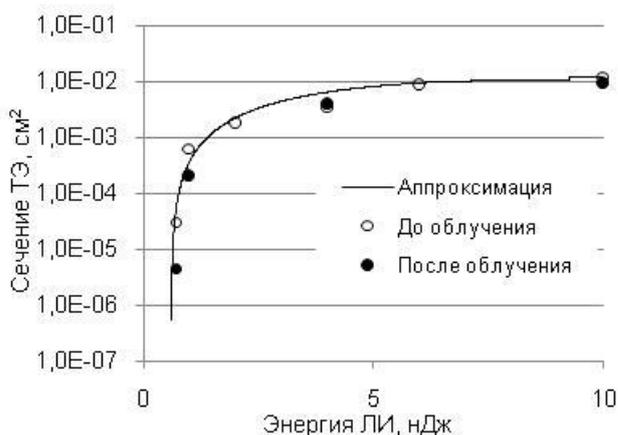


Рис. 2. Зависимости сечения ТЭ в ОЗУ от энергии лазерного излучения до и после облучения до функционального отказа

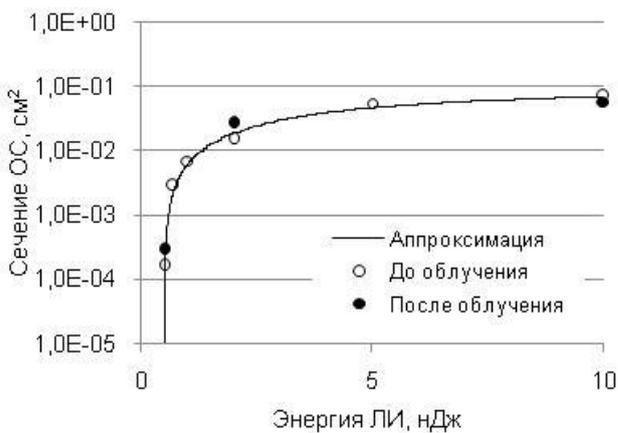


Рис. 3. Зависимости сечения эффектов одиночных сбоя в ОЗУ от энергии лазерного излучения до и после облучения до уровней воздействия, близких к функциональному отказу

Анализ полученных результатов показал, что облучение до уровня функционального отказа не оказывает значительного влияния на параметры чувствительности ни по эффектам сбоя, ни по ТЭ. С

целью более подробного исследования влияния облучения на параметры чувствительности по одиночным эффектам с использованием лазерной установки ПИКО-3 был произведен поиск наиболее чувствительной к ТЭ области и определена пороговая энергия лазерного излучения для его возникновения. В дальнейшем проводилось последовательное облучение на рентгеновской установке с последующим измерением пороговой энергии лазерного излучения для возникновения ТЭ на лазерной установке. Перерыв между сеансами облучения на рентгеновской установке составлял не более 15 мин.

На рис. 4 представлены изменения пороговых энергий лазерного излучения для возникновения ТЭ от уровня поглощенной дозы. Интересно отметить, что на первом этапе имеет место даже уменьшение пороговой энергии. Однако несложно отметить, что эти изменения коррелируют с изменениями температуры кристалла.

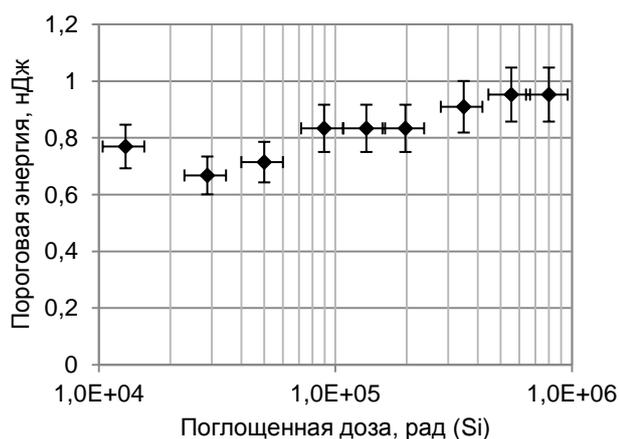


Рис. 4. Зависимость пороговой энергии лазерного излучения для возникновения ТЭ в ОЗУ от накопленной дозы облучения

Исследования эффектов «иголок» проводилось в следующей последовательности:

- на лазерной установке ПИКО-4 были определены несколько областей на кристалле ОУ, при воздействии в которые лазерным излучением наблюдалась наибольшая чувствительность по эффектам «иголок», и регистрировались осциллограммы выходного напряжения ОУ при воздействии в данные области.
- Затем проводилось облучение ОУ на рентгеновской установке до определенного уровня поглощенной дозы, и вновь проводилась регистрация осциллограмм выходного напряжения ОУ.

Полученные осциллограммы «иголок» в операционном усилителе AD829 представлены на рис. 5. Уровень дозы 20 крад (Si) соответствовал уровню функционального отказа в ОУ, наблюдающегося при подаче на вход сигнала типа меандр с частотой 100кГц. При данном уровне воздействия наблюдается изменение формы импульса «иголки» – сокращается длительность импульса и появляется искажение формы. При дальнейшем увеличении уровня поглощенной дозы продолжается увеличение степени искаженности формы импульса «иголки», увеличиваются амплитуда и длительность.

Следует отметить, что тенденция к увеличению чувствительности ОУ по эффектам «иголок» с ростом величины поглощенной дозы не является общей для всего кристалла ОУ. Так при воздействии на некоторые из выбранных областей наблюдалось незначительное снижение амплитуды импульса «иголки» при увеличении уровня поглощенной дозы.

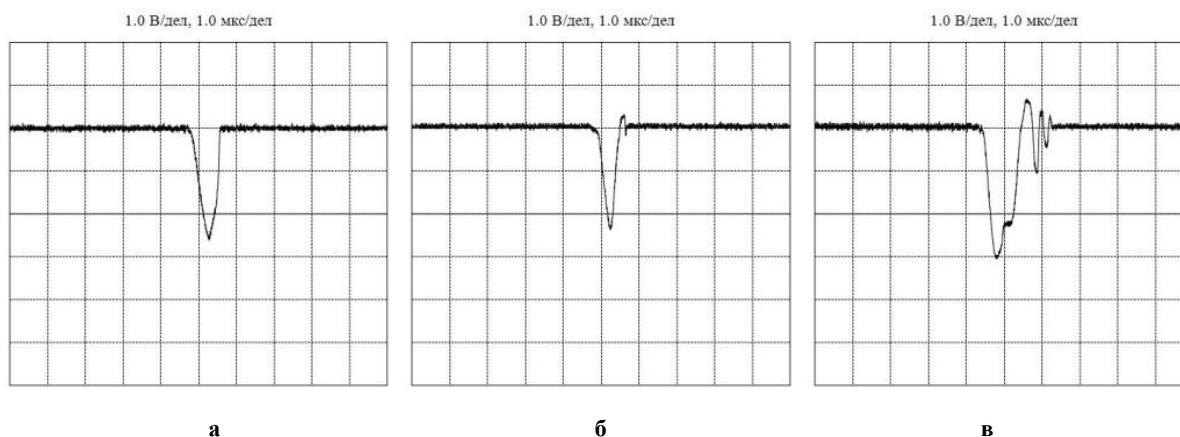


Рис. 5. Осциллограммы «иголок» в операционном усилителе AD829 для трёх различных значений поглощенной дозы облучения: а – до облучения, б – 20·крад (Si), в – 60·крад (Si).

IV. ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты экспериментальных исследований свидетельствуют об относительно слабой зависимости влияния эффектов накопленной дозы на изменения пороговых значений ЛПЭ для одиночных эффектов. Данный результат вполне прогнозируем. Действительно, пороговое значение ЛПЭ для возникновения ОРЭ можно оценить из следующего соотношения:

$$L_o = \frac{\Delta U_{SEE} \cdot C_e}{q} \cdot \varepsilon_i l_e \cdot \rho,$$

где ΔU_{SEE} – пороговое напряжение возникновения ОРЭ (помехоустойчивость); C_e – эквивалентная емкость элемента; ε_i – энергия образования одной электронно-дырочной пары; l_e – эффективная длина собирания заряда с трека ядерной частицы; q – заряд электрона; ρ – плотность вещества.

Анализ представленного соотношения позволяет выделить радиационно-чувствительные параметры, к которым относятся ΔU_{SEE} , C_e , l_e .

Изменение порогового напряжения ΔU_{SEE} может происходить из-за сдвига напряжения отпирания транзисторов. Проведенное схемотехническое моделирование изменения напряжения отпирания транзисторов показало, что вплоть до практически полного их отпирания изменения условий переключения ячейки памяти незначительны (рис. 6). Отказ ячейки происходит при напряжении отпирания около 0,5отн. ед. (1 отн. ед. соответствует напряжению питания, критический заряд равен $\Delta U_{SEE} C_e$).

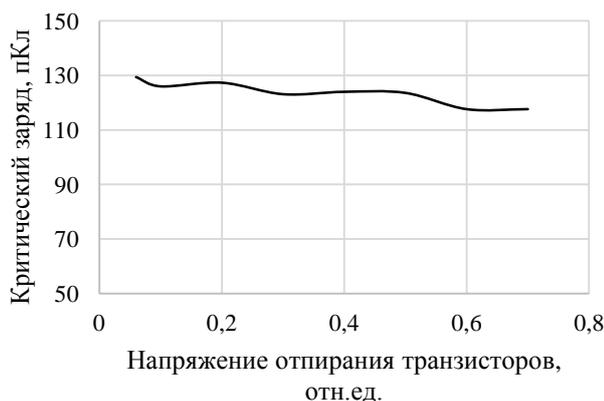


Рис. 6. Зависимость критического заряда переключения ячейки ОЗУ от напряжения отпирания транзисторов

Результаты аналогичного моделирования изменений порогов переключения для ТЭ показывают слабое влияние. При изменении коэффициентов передач токов базы биполярных транзисторов в несколько раз порог возникновения ТЭ практически не изменился.

Вместе с тем обращает на себя внимание несколько нестандартное изменение пороговых значений энергии лазерного излучения для возникновения ТЭ. Подобное

поведение мы связываем с увеличением температуры кристалла из-за роста тока потребления ИС по мере увеличения накопленной дозы. При увеличении температуры имеют место два эффекта, приводящие к повышению чувствительности ИС: увеличение чувствительности к ТЭ и коэффициента поглощения лазерного излучения при росте температуры [9]. Поэтому эти факторы доминируют на первом этапе. В дальнейшем из-за деградации усилительных характеристик паразитных биполярных транзисторов чувствительность к ТЭ начинает падать.

В операционном усилителе имеет место более высокая чувствительность. Данное обстоятельство связано с тем, что собственно ионизационная реакция формируется во входных каскадах и передается на выход через тракт промежуточного усиления, который деградирует по мере увеличения суммарной дозы [10].

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Sanderson T.K. The effects of total dose on the SEU sensitivity of CMOS static RAMs / Sanderson T.K., Mapper D., Stephen J.H., Farren J. – UK: UKAEA Atomic Energy Research Establishment Instrumentation and Applied Physics Division. 1987. 44 p.
- [2] Synergistic Effects of Total Ionizing Dose on SEU Sensitive SRAMs / Koga R. [et al.] // Radiation Effects Data Workshop. 2009 IEEE. 2009. P. 127-132.
- [3] Local Laser Irradiation Technique for SEE Testing of ICs / A. I. Chumakov [et al.] // Proceedings of RADEC-2011. pp. 449-453.
- [4] Chumakov A.I. Radiation and postirradiation functional upsets in CMOS SRAM / Chumakov A.I., Yanenko A.V. // IEEE Transactions on Nuclear Science. 1996. Vol. 43. №6. pp. 3109-3114.
- [5] Методы прогнозирования эффектов полной дозы в элементах современной микроэлектроники / Беляков В.В. [и др.] // Микроэлектроника, 2003. Т. 32. № 1. С. 31-46.
- [6] Compendium of SEE comparative results under ion and laser irradiation / Chumakov A.I. [et.al.] // Proceedings of the European Conference on Radiation and its Effects on Components and Systems. RADECS-2013.
- [7] 'REIS-IE' X-ray tester: description, qualification technique and results, dosimetry procedure / Artamonov A.S. [et. al.] // IEEE Radiation Effects Data Workshop. 1998. pp. 164-169.
- [8] PICO-4 single event effects evaluation and testing facility based on wavelength tunable picosecond laser / Egorov A.N. [et.al.] // IEEE Radiation Effects Data Workshop. 2012. pp. 1-4.
- [9] Influence of temperature on pulsed laser SEE testing / Skorobogatov P.K. [et. al.] // Proceedings of the 7th European Conference on Radiation and its Effects on Components and Systems. RADECS-2003. ESA. Noordwijk, 2004. pp. 153-155.
- [10] Boychenko, D.V., Kessarinskiy, L.N., Pechenkina, D.V. / The influence of the electrical conditions on total dose behavior of the analog switches // Proceedings of the European Conference on Radiation and its Effects on Components and Systems. RADECS-2011. article number 6131340. pp. 822-824.