

02;06;07

## Возникновение множественных сбоев под действием протонов в статических ОЗУ с технологической нормой 90 nm

© Н.А. Иванов<sup>1</sup>, О.В. Лобанов<sup>1</sup>, В.В. Пашук<sup>1</sup>, М.О. Прыгунов<sup>2</sup>, К.Г. Сизова<sup>3,¶</sup><sup>1</sup> Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова, Национальный исследовательский центр „Курчатовский институт“, Гатчина, Ленинградская обл., Россия<sup>2</sup> ООО „О2 Световые Системы“, Санкт-Петербург, Россия<sup>3</sup> ООО „НПЦ „Гранат“, Санкт-Петербург, Россия

¶ E-mail: ksizova@npcgranat.ru

Поступило в Редакцию 21 сентября 2018 г.

Исследовано возникновение сбоев в интегральных схемах памяти под действием протонов с энергией 1000 MeV. Проведены анализ и обработка экспериментальных данных. Получены результаты, предполагающие наличие множественных сбоев в микросхемах.

DOI: 10.21883/PJTF.2019.01.47150.17534

Уменьшение норм технологических процессов изготовления интегральных схем (ИС) приводит к тому, что в изделиях микроэлектроники наблюдаются радиационные эффекты от отдельных ядерных частиц, в результате которых возникают не только одиночные, но и множественные сбои (МС)[1,2]. В работах [3–5] было показано, что в CMOS- и CCD-матрицах, облученных протонами и нейтронами, под действием продуктов ядерных реакций образуются локальные скопления (кластеры) с линейными размерами до 20 μm, состоящие из соседних поврежденных пикселей (спайков). Эти результаты указывают на возможность возникновения МС под действием протонов в других типах ИС, имеющих близкие или меньшие размеры элементарной ячейки и/или чувствительной области, чем размер пикселя матрицы. Целью настоящей работы является изучение возможности возникновения МС в ИС памяти с нормой технологического процесса менее 100 nm под воздействием высокоэнергетических протонов.

Для исследований были выбраны ИС статического ОЗУ — память типа SRAM (производитель Cypress) с технологической нормой 90 nm. Два образца этих ИС были облучены на синхроциклотроне ПИЯФ протонами с энергией 1000 MeV до флюенса  $10^{11} \text{ cm}^{-2}$  при плотности потока  $10^8 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Методика исследования выбранных ИС позволяла разделять ошибки чтения и хранения, а также минимизировать возможность возникновения ошибок записи, происходящих в образцах памяти типа SRAM в процессе облучения. До начала воздействия производилась запись опорных значений данных в массив ячеек памяти образцов. После заполнения всего объема памяти заданным шаблоном ИС подвергались облучению, в процессе которого контролировалось состояние каждого байта памяти. При этом над каждой ячейкой выполнялось три операции, первые две из которых заключались в считывании данных и сравнении их с опорными значениями. Если только в одном из двух первых чтений фиксировалась ошибка, то в качестве третьей операции выбиралась

также операция „чтение“ и ошибка классифицировалась как сбой в процессе чтения. В случае фиксации ошибок сразу в двух последовательных чтениях производилась перезапись байта с классификацией ошибки как сбоя, произошедшего во время хранения.

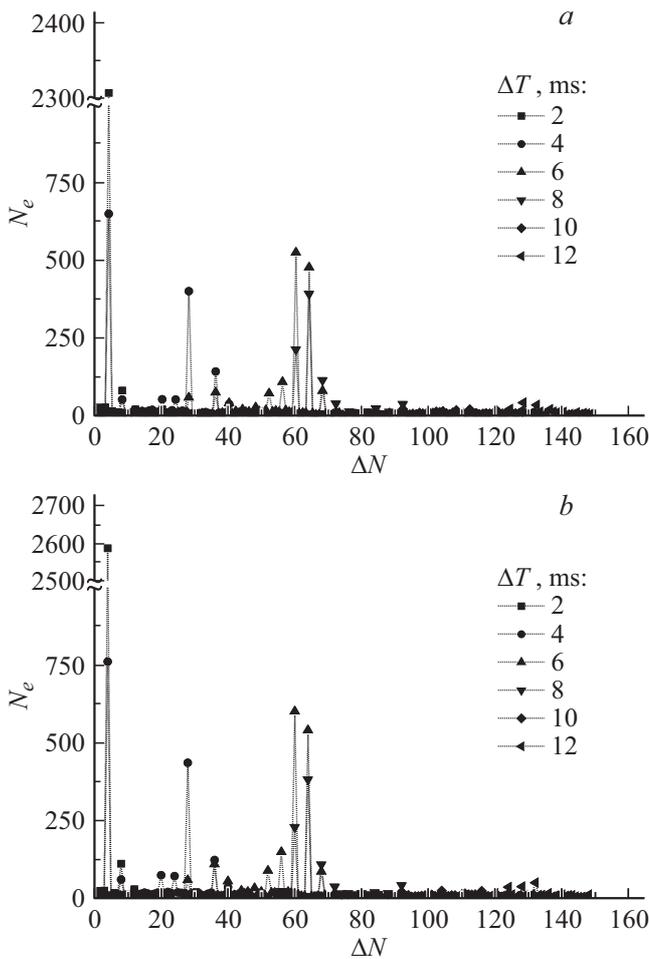
Обеспечение выполнения одинакового количества операций, производимого над каждой ячейкой памяти, позволило равномерно распределить время хранения данных в каждом байте. За счет предварительной инициализации образцов до облучения, а также выборочной перезаписи поврежденных ячеек была достигнута минимизация количества выполнений операций записи в процессе воздействия, что дало возможность снизить вероятность их появления и соответственно исключить их из рассмотрения при проведении анализа экспериментальных данных. Помимо фиксации ошибок чтения и хранения в процессе облучения ИС контролировалось возникновение эффектов типа функционального прерывания (single event function interrupt) и тиристорного эффекта (single event latch-up). Для парирования эффектов данных типов была реализована схемотехническая и программно-алгоритмическая защита. В процессе облучения регистрировались время и характер сбоя, а также адрес поврежденного байта.

В процессе облучения в образцах памяти SRAM были обнаружены одиночные сбои, характеризующиеся как ошибки хранения. При этом ошибки чтения зафиксированы не были. Обнаруженные одиночные сбои выражались в инверсии одного и того же бита в результате выполнения двукратного чтения выбранного байта информации. В результате исследования за весь сеанс облучения в образцах было обнаружено 16 169 и 17 414 ошибок хранения информации в различных байтах.

Соответственно среднее сечение одиночных сбоев, рассчитанное по формуле

$$\Sigma_e = n_e / (F_p N_{bit}) \quad (1)$$

(где  $n_e$  — количество сбоев,  $F_p$  — флюенс протонов,  $N_{bit}$  — количество бит в SRAM), составило



**Рис. 1.** Распределение числа пар последовательных сбоев  $N_e$  в зависимости от интервалов в их адресах  $\Delta N$  для различных временных интервалов  $\Delta T$  между ними для образца SRAM № 1 (a) и 2 (b).

$\sim 4 \cdot 10^{-14} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{bit}^{-1}$ , что хорошо согласуется с данными работы [6] для аналогичных по типу и технологическим нормам изделий.

В пределах каждого цикла чтения всего объема памяти были выявлены сбои, сгруппированные по определенным признакам („кластеры“ сбоев). Во-первых, эти „кластеры“ характеризовались одиночными сбоями, имеющими одинаковый характер: инвертирован один и тот же бит в рассматриваемых байтах. Во-вторых, одиночные сбои в кластерах зафиксированы последовательно с малой разницей во времени регистрации ( $\Delta T$ ), а также малой и характерно кратной разницей в адресе ( $\Delta N$ ) ячеек.

По аналогии с возникновением локальных скоплений спайков в CMOS- и CCD-матрицах был проведен анализ полученных экспериментальных данных относительно возможности возникновения МС из числа обнаруженных последовательных одиночных сбоев. На рис. 1 показано распределение количества последовательных сбоев  $N_e$  в двух образцах SRAM, идущих через определенные временные интервалы  $\Delta T$ , в зависимости от разницы в

адресах поврежденных ячеек  $\Delta N$ . Кратность временных интервалов величине 2 ms между сбоями обусловлена минимальным периодом обработки и выдачи информации опрашиваемого ИС устройства. Выбор конкретных значений  $\Delta T$  объясняется наибольшей статистикой сбоев в диапазоне  $\Delta T$  от 2 до 12 ms. Из рис. 1 видно, что в обоих образцах имеют место ярко выраженные максимумы при  $\Delta N = 4, 28, 60, 64$ , свидетельствующие о том, что сбои разнесены относительно друг друга преимущественно на определенные величины  $\Delta N$  и  $\Delta T$ .

По экспериментальным данным определены распределения количества кластеров  $N_c$  по количеству одиночных сбоев  $n_e$ , входящих в их состав. При этом в состав кластеров были включены сбои со значениями интервалов времени регистрации  $\Delta T \leq 8, 10$  и 12 ms и разницей в адресах  $\Delta N \leq 92, 128$  и 148 соответственно. В качестве примера в табл. 1 приведены данные по количеству кластеров  $N_c$ , включающих  $n_e$  сбоев, для образца SRAM № 1 при  $\Delta T \leq 8$  ms и  $\Delta N \leq 92$  байт. Из табл. 1 видно, что количество последовательных сбоев в кластерах может составлять свыше 10. По приблизительным оценкам около 20% всех сбоев содержатся в МС.

В предположении отсутствия эффекта образования МС временной интервал между возникновением отдельных сбоев является случайным событием, и вероятность того, что временной интервал между двумя последовательными сбоями лежит в интервале от  $t$  до  $t + \Delta T$ , равна [7]:

$$p(t) = n_0 e^{-n_0 t} \Delta T, \quad (2)$$

где  $n_0 e^{-n_0 t}$  — плотность распределения вероятностей интервалов  $t$  между сбоями,  $n_0 = n_e / T_{ir}$  — число сбоев в единицу времени,  $T_{ir}$  — продолжительность облучения.

Для образца SRAM № 1 величина  $n_0$  равна  $n_0 = n_e / T_{ir} = 16\,169 / 985.4 = 0.0164 \text{ ms}^{-1}$ . Соответственно теоретическая зависимость плотности распределения вероятности имеет вид  $p_{th}(t) = 0.0164 e^{-0.0164 t}$ . Экспериментальные данные по распределению времени между сбоями  $\Delta T$  для образца SRAM № 1 приведены в табл. 2.

**Таблица 1.** Количество кластеров  $N_c$  в зависимости от количества входящих в их состав сбоев  $n_e$  для образца SRAM № 1 при условии  $\Delta T \leq 8$  ms и  $\Delta N \leq 92$  байт

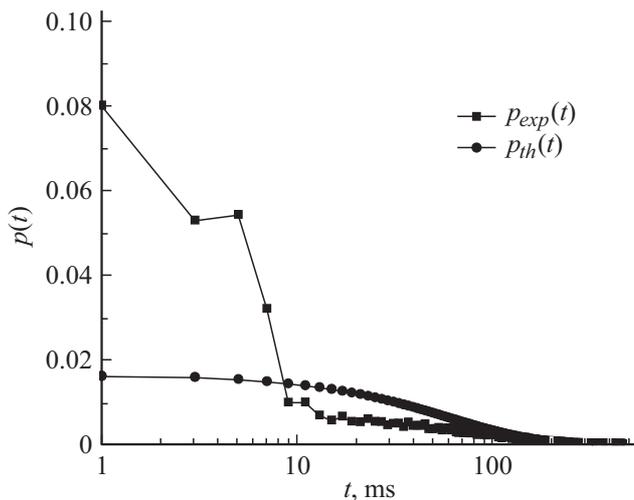
$n_e$	$N_c$
2	695
3	331
4	124
5	62
6	42
7	20
8	9
9	8
11	4
12	4

**Таблица 2.** Распределение сбоев по разнице во времени между сбоями  $\Delta T$  для образца SRAM № 1

$\Delta T$ , ms	$N$	$\Delta T$ , ms	$N$
2	2590	34	161
4	1712	36	134
6	1755	38	169
8	1037	40	142
10	321	42	144
12	322	44	143
14	223	46	156
16	184	48	118
18	214	50	118
20	175	52	119
22	171	54	127
24	195	56	108
26	174	58	119
28	173	60	124
30	147	62	107
32	160	64	126

**Список литературы**

- [1] Mavis D.G., Eaton P.H., Sibley M.D., Laco R.C., Smith E.J., Avery K.A. // IEEE Transact. Nucl. Sci. 2008. V. 55. N 6. P. 3288–3294.
- [2] Зебрев Г.И., Горбунов М.С., Усейнов Р.Г., Озеров А.И., Емельянов В.В., Анашин В.С., Козюков А.С., Земцов К.С., Шередко Г.С. // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). 2014. N 3. С. 167–176.
- [3] Иванов Н.А., Лобанов О.В., Митин Е.В., Пашук В.В., Тверской М.Г. // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. В. 17. С. 35–43.
- [4] Иванов Н.А., Лобанов О.В., Пашук В.В., Прыгунов М.О. // Вопр. атомной науки и техники. 2016. В. 3. С. 30–33.
- [5] Иванов Н.А., Лобанов О.В., Пашук В.В., Прыгунов М.О., Сизова К.Г. // Тез. докл. 20-й Всерос. науч.-техн. конф. „Радиационная стойкость электронных систем“ („Стойкость-2017“). Лыткарино, 2017. С. 64–65.
- [6] Cannon E.H., Cabanas-Holmen M., Wert J., Amort T., Brees R., Koehn J., Meaker B., Normand E. // IEEE Transact. Nucl. Sci. 2010. V. 57. N 6. P. 3493–3499.
- [7] Калашиников В.И., Козодаев М.С. Детекторы элементарных частиц. М.: Наука, 1966. С. 246–249.

**Рис. 2.** Сравнение теоретической  $p_{th}(t)$  и экспериментальной  $p_{exp}(t)$  зависимостей вероятностей интервалов времени между сбоями для образца SRAM № 1.

На рис. 2 представлены теоретическая зависимость плотности вероятности интервалов времени между случайными событиями  $p_{th}(t)$  и зависимость плотности вероятности  $p_{exp}(t)$ , полученная по экспериментальным данным. Превышение экспериментальной зависимости  $p_{exp}(t)$  над теоретическими значениями  $p_{th}(t)$  означает, что значительная часть сбоев при  $\Delta T \leq 10$  ms входит в состав МС, т.е. они не являются случайными независимыми событиями. Проведенный статистический анализ экспериментальных данных может быть полезен при оценках чувствительности ИС к возникновению МС при отсутствии данных о пространственном распределении адресов ячеек.