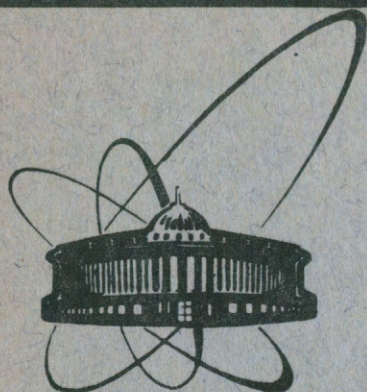


91-201



сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

P13-91-201

Н.Г.Големинов*, Д.В.Акиншин, А.Ю.Дидык,
В.А.Скуратов

ИССЛЕДОВАНИЕ СБОЕВ В БИС ОЗУ
ПОД ДЕЙСТВИЕМ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ

*Московский инженерно-физический институт

1991

Големинов Н.Н. и др.

P13-91-201

Исследование сбоев в БИС ОЗУ под действием тяжелых ионов

Представлены данные о вкладе электромагнитных и ядерных взаимодействий галактических космических лучей с конструкционными материалами СБИС. Приведены результаты экспериментальных исследований отклика БИС ОЗУ на воздействие тяжелых ионов с энергиями порядка 1 МэВ/а.е.м. В частности, приведены энергетическая зависимость чувствительности ячеек памяти и временная зависимость накопления сбоев во время облучения.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1991

Перевод авторов

Goleminov N.G. et al.

P13-91-201

Investigation of Soft Errors in MOS RAM under Influence of Heavy Ions

The data about deposition of electromagnetic and nuclear processes of galactic cosmic ray interaction with CMOS constructive materials are presented. The experimental results of the investigations of MOS RAM response on of about 1 MeV/a.m.u. heavy ion influence are given. In particular, the energetic dependence of memory element sensitivity and temporary dependence of soft error accumulation are described.

The investigation has been performed at the Nuclear Reactions, JINR.

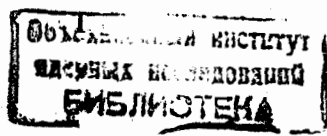
Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1991

Среди факторов, дестабилизирующих работу электронных схем, особо выделяют ионизирующие излучения, которые могут иметь как искусственное, так и естественное происхождение. Из физических эффектов, вызываемых излучением, практически важны лишь два: ионизация чувствительного объема и накопление дефектов структуры в процессе облучения. Первый эффект исчезает после снятия облучения и может приводить лишь к сбоям в процессе работы, а изменение структуры полупроводника из-за накопления радиационных дефектов приводит в конечном итоге к устойчивому отказу. Роль и взаимообусловленность радиационных эффектов может быть выяснена лишь в конкретном случае действия радиации определенного происхождения.

Прогресс микроэлектроники сместил "центр тяжести" в электронных системах в сторону использования больших интегральных схем (БИС) и сверхбольших интегральных схем (СБИС) и эта тенденция в дальнейшем вряд ли будет нарушена. Для такого рода элементной базы влияние излучения дополняется эффектами, связанными с прохождением частицей чувствительного объема активного элемента. В основном это характерно для тяжелых заряженных частиц, создающих ионизацию высокой плотности вдоль трека. Создаваемого избыточного заряда может оказаться достаточно для возникновения спонтанного переключения элемента в противоположное логическое состояние. Величина избыточного заряда при полном сборе может быть рассчитана по формуле: $Q = \Delta E_{ion} \cdot q / \epsilon$, где ΔE_{ion} - энергия, диссипированная частицей в чувствительном объеме, ϵ - энергия образования пары электрон-дырка, q - элементарный заряд.

Исследования распределений величины ΔE представляет собой ядерно-физическую задачу, решение которой возможно посредством оценки потерь энергии частиц в пределах чувствительных объемов элементов. Ядра элементов с относительно большими зарядами являются частицами, которые преимущественнее других создают сбой.

В естественных условиях это ядра He (альфа-частицы), возникающие в процессах спонтанных ядерных превращений нуклидов



ряда урана и тория, а также космические лучи за пределами земной атмосферы.

Совокупность ионизационных и ядерных процессов взаимодействия приводит к сложной картине формирования распределения энергии, диссипированной в пределах чувствительного объема. Для выяснения вкладов различных излучений естественного происхождения был выполнен комплекс научно-исследовательских работ совместно МИФИ и ОИЯИ. Наиболее важные результаты, суммирующие основные особенности картины формирования сбоев, касаются спектра энерговыделения в чувствительных объемах микросхем, а также исследования отклика СБИС ОЗУ на действие тяжелых ионов - моделирование реального воздействия космических излучений.

Структура энерговыделения в чувствительном объеме анализировалась в общепринятых аппроксимациях формы объема в виде параллелепипеда с различными размерами в зависимости от степени интеграции схемы [1,2]. Сводная картина представлена на рис. 1, на котором изображены вклады электромагнитных и ядерных процессов взаимодействия, а также от инкорпорированных нуклидов естественного происхождения в конструкционных материалах схемы. Ход кривых для энергий выше 25 МэВ практически не представляет интереса из-за незначительного числа схем, имеющих большую стойкость по отношению к сбоям. Из известных авторам это КМОП/КНС БИС ОЗУ. На рис. 1 отмечены интервалы энерговыделения, характерные для сбоев определенных микросхем, изготовленных по разным технологиям.

Основываясь на этом рисунке, можно сформулировать требования к моделированию сбоев в оперативных запоминающих устройствах и выбрать адекватные методы и установки для изучения реакции микросхемы на прохождение чувствительного объема заряженной частицей. Прежде всего, необходимо, чтобы потери энергии ионов на ионизацию ($\Delta E_{ion.}$) в объеме чувствительного элемента составляли 5-30 МэВ. Это условие может быть выполнено при использовании пучков частиц тяжелее Ne с энергиями 1 МэВ/а.е.м. и выше. В качестве примера в таблице 1 приведены полные ионизационные потери и пробеги в кремнии

Таблица 1

Тип иона	Энергия иона, МэВ	($\Delta E_{ion.}$), МэВ	R_p , мкм
^{11}B	13,6	13,5	16,2
^{22}Ne	26,7	26,6	13,1
^{40}Ar	46,3	46,1	12,1
^{12}C	109	109	212
^{16}O	145	145	168
^{56}Fe	400	398	69,8
^{84}Kr	300	289	23,6

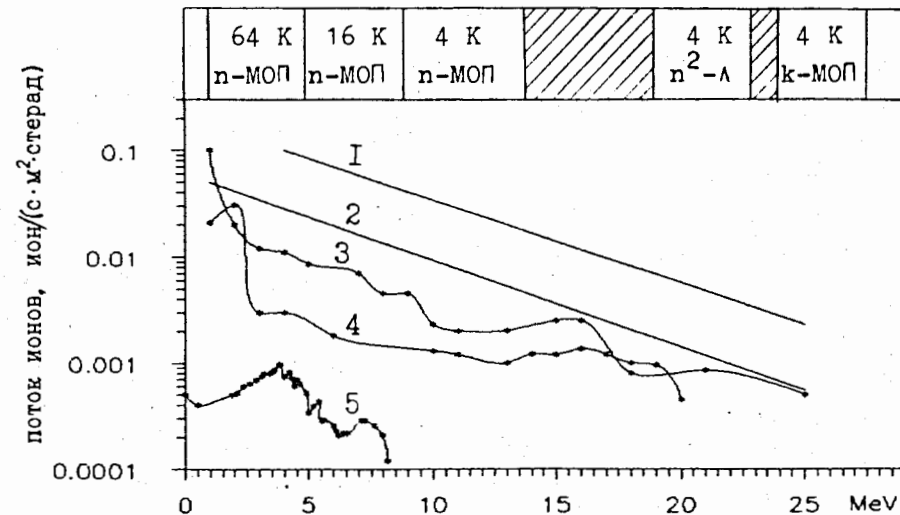


Рис. 1. Распределение энергетических потерь в чувствительном объеме микросхемы с характерным размером $L=50$ мкм; 1-вклад ядерных взаимодействий (спокойное солнце); 2-вклад ядерных взаимодействий (активное солнце); 3-вклад электромагнитных взаимодействий (спокойное солнце); 4-вклад электромагнитных взаимодействий (активное солнце); 5-вклад от инкорпорированных нуклидов.

для некоторых типов ионов с энергиями $E \approx 1 + 10$ МэВ/а.е.м., ускоряемых на циклотронах ЛЯР ОИЯИ, которые применялись в экспериментах по моделированию воздействия космического излучения.

Для исследования процессов накопления сбоев во времени и энергетической зависимости чувствительности ячеек памяти была разработана экспериментальная установка, содержащая ряд конструктивных особенностей, диктуемых характером эксперимента. Тяжелые ионы после упругого рассеяния на металлической фольге попадают на исследуемую микросхему и полупроводниковый детектор, расположенные симметрично под углом 30° или 45° по отношению к направлению падения пучка. Изменение интенсивности пучка, материала фольги и угла, под которым устанавливаются микросхема и детектор, позволяют варьировать поток ионов на микросхему от 10^{-2} до 10^3 с^{-1} . Энергетические спектры и число частиц определялись с помощью анализатора, разработанного на базе ПЭВМ "Правец-16" и аппаратуры в стандарте КАМАК. Программный пакет, обеспечивающий сбор и обработку спектрометрической информации, описан в работе [3].

Тестирование микросхем осуществлялось специально разработанным драйвером динамического ОЗУ, позволяющим задавать различные фоновые заполнения ячеек памяти. В эксперименте использовались нулевое и единичное состояния всех элементов. На выходе контролировались число единичных состояний поля ОЗУ. Для повышения надежности работы драйвера был применен способ выделения регулярной информации на фоне помех посредством последовательного десятикратного опроса микросхемы ОЗУ. В этом случае данные смещаются на один десятичный регистр, который заполняется помехами. Такой способ маскирования помех более эффективен, если число десятичных разрядов (опросов) будет равно двум (ста).

В качестве примера приведем некоторые данные, касающиеся временного характера накопления сбоев в БИС ОЗУ (микросхема 565РУ1) в режиме хранения данных и зависимости чувствительности ячеек памяти от энергии бомбардирующих ионов [4-6].

Проведенные эксперименты, включая спектрометрические измерения, позволили установить, что собой не имеет принципиальных отличий в характере проявления в зависимости от типа частиц, вызвавших его. На рис. 2 приведены временные зависи-

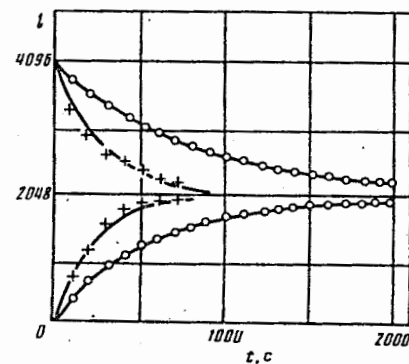


Рис. 2. Зависимость числа сбоев от времени для нулевого и единичного фонового заполнения ячеек памяти при облучении ионами $^{16}\text{O}^{+3}$ (+) и $^{22}\text{Ne}^{+4}$ (o).

мости числа сбоев в процессе облучения ионами ^{16}O и ^{22}Ne с энергиями 19,4 и 26,7 МэВ соответственно. Как видно из рисунка, проявление эффекта имеет характер, близкий к экспоненциальному, и аппроксимируется следующими выражениями:

$$l(t) = \Phi_0 \cdot [1 - e^{-\psi \cdot S \cdot t}]$$

для нулевого фонового состояния и

$$l(t) = \Phi_0 \cdot [1 - e^{-\psi \cdot S \cdot t} + 1]$$

в случае единичного фонового состояния. В этих формулах $l(t)$ - число ячеек, изменивших свое состояние к моменту времени t . Φ_0 - полное число ячеек на кристалле схемы, ψ - плотность потока ионов, S - эффективная площадь ячейки. Значения этих параметров в случае облучения ионами кислорода и неона приведены в таблице 2.

При любом фоновом заполнении число чувствительных элементов на кристалле микросхемы составляет $N/2$, где N - информационная емкость схемы. Фоновое состояние "0", например, в микросхеме представлено 2048 нулями и 2048 единицами.

Таблица 2

Тип иона	Состояние ячеек	Φ_0	$\psi, \text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$	$S \cdot 10^5, \text{см}^{-2}$
^{22}Ne	нулевое	2048	141	1,3
^{22}Ne	единичное	2048	141	0,9
^{16}O	нулевое	2048	352	1,3
^{16}O	единичное	2048	352	1

Меньшая чувствительность единичного фонового состояния (см. рис. 2) соответствует меньшему значению эффективной площади чувствительного элемента в единичном состоянии, по сравнению с нулевым, примерно на 30%.

Энергетическая зависимость чувствительности ячеек памяти при пониженном напряжении питания микросхемы U_{Π} и в номинальном режиме представлена на рис. 3. Из данных, приведенных на этом рисунке, помимо информации о величине энергетического порога появления сбоев, следует также, что матрица запоминающих элементов может применяться для контроля потоков любых ионов с энергией выше 16 МэВ в номинальном режиме и с энергией выше 10 МэВ при пониженном напряжении питания. Такой способ мониторинга потоков ионов представляется перспективным для задач автоматического регулирования и контроля параметров пучков ионов.

В заключение можно отметить, что задача исследования сбоев в оперативных запоминающих устройствах является комплексной и состоит из двух основных частей: исследования отклика БИС ОЗУ и изучения спектра энергетических потерь в чувствительном объеме элемента. Исследования показывают, что в практически важных случаях тяжелые ионы в диапазоне

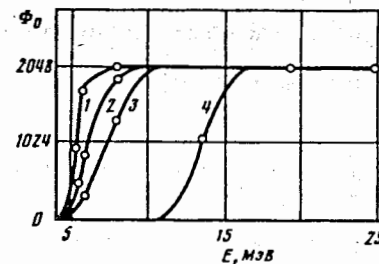


Рис. 3. Зависимость полного числа сбоев от энергии ионов при разных режимах работы микросхемы. Напряжение питания: 1 - 7,0; 2 - 7,5; 3 - 8,0; 4 - 12 В (номинальный режим).

энергий (1-20) МэВ/а.е.м. моделируют сбои в БИС ОЗУ различных технологий и полностью перекрывают энергетический спектр потерь от фрагментов, возникающих при бомбардировке ядрами галактических космических лучей [6].

Адекватность моделирования сбоев подтверждена расчетами и экспериментами на синхрофазотроне ОИЯИ при исследованиях действия ядер p , He , ^{12}C , ^{16}O с энергией 3,65 ГэВ/а.е.м. на БИС ОЗУ.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Farrel G.E, McNulty P.J., Abdel-Kader. IEEE Trans. Nucl. Sci. v. NS-31, N6, 1984, pp. 1073-1077.
2. McNulty P.J., Abdel-Kader, Bisgrove J.M. IEEE Trans. Nucl. Sci. v. NS-32, N6, 1985, pp. 4180-4184.
3. Жучко В.Е. Рабочее совещание "Современные направления в активационном анализе в ОИЯИ". Дубна, 28 - 29 июня 1988.: Сб. трудов (Д14-88-883), ОИЯИ, Дубна, 1989, с.191-196.
4. Барашенков В.С. и др. Препринт ОИЯИ P2-89-640, Дубна, 1989.
5. Акиншин Д.В. и др. ПТЭ, 1990, №6, с. 49-50.
6. Големинов Н.Г., Крамер-Агеев Е.А. В сб.: Вопросы микроэлектроники. М. Энергоатомиздат, 1982, с. 68-75.

Рукопись поступила в издательский отдел
5 мая 1991 года.