

Влияние угла падения тяжелых заряженных частиц и записанного кода на кратность сбоев в микросхемах СОЗУ

А.Б. Боруздина^{1,2}, А.В. Уланова^{1,2}, М.С Горбунов³, А.И. Чумаков^{1,2}

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

²ОАО «ЭНПО СПЭЛС», abbor@spels.ru

³Научно-исследовательский институт системных исследований РАН

Аннотация—В статье представлены результаты исследования влияния угла падения тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) относительно нормали к поверхности кристалла на кратность сбоев в ячейках памяти СОЗУ 6Т типа, изготовленных по технологии 65 нм. Проводилось сравнение данных о сбоеустойчивости, полученных при облучении под углом и при нормальном падении ТЗЧ при близких значениях эффективных линейных потерь энергии (ЛПЭ). В результате установлено, что с ростом угла воздействия ТЗЧ возрастает как кратность сбоев, так и доля многократных сбоев (МС) от общего числа событий. При проведении исследования также наблюдалось влияние записанной информации на кратность сбоев в накопителе.

Ключевые слова—тяжелая заряженная частица (ТЗЧ), многократные сбои (МС), СОЗУ.

I. ВВЕДЕНИЕ

В ходе проведения исследований микросхем памяти на стойкость к воздействию ТЗЧ важную роль играет режим ее функционирования. Например, при проведении эксперимента по определению чувствительности к эффектам сбоев наиболее критичным является режим, при котором кратность наблюдаемых сбоев максимальна.

Вероятность возникновения МС увеличивается при уменьшении расстояния между смежными чувствительными областями. Подобное сближение чувствительных областей, в первую очередь, происходит из-за уменьшения проектных норм, но потенциально возможно и в результате изменений режима работы или условий проведения эксперимента.

На кратность сбоев, возникающих в физически соседних ячейках памяти, оказывают влияние такие факторы как угол падения частиц относительно нормали к поверхности кристалла [1]-[3] и записанная в накопитель информации [3], [4]. Также не маловажна при проведении экспериментальных исследований методика выявления МС [5], [6]: при анализе карты сбоев из-за накопления событий кратность сбоев может быть переоценена.

Возникновение МС в микросхемах характерно не только для субмикронных проектных норм, но также может наблюдаться в микросхемах, изготовленных с достаточно большими проектными нормами (0,8 мкм), но с определенными особенностями топологии [7]. Однако описанные в данной работе факторы наиболее критичны именно для современных микросхем, в связи с тем, что, как будет показано ниже, влияют на сбой большей кратности, чем могут возникнуть в случае с большими проектными нормами (0,25 мкм и более).

II. ВЛИЯНИЕ УГЛА ПАДЕНИЯ ЧАСТИЦ НА КРАТНОСТЬ СБОЕВ

A. Представление результатов при воздействии под углом, отличным от нормали

Исследованию влияния угла падения частиц на кратность сбоев посвящено достаточно большое количество работ [1]-[3]. Можно отметить два варианта представления такой информации: с расчетом эффективного значения линейных потерь энергии (ЛПЭ)(см. рис. 1а) и с построением отдельных кривых для каждого угла воздействия (см. рис. 1б).

Эффективное значение ЛПЭ при воздействии под углами рассчитывается согласно выражению:

$$ЛПЭ_{ef} \approx ЛПЭ_0 / \cos\theta, \quad (1)$$

где θ - угол падения частиц относительно нормали к поверхности кристалла.

При этом для однократных сбоев (ОС) расчет эффективного значения ЛПЭ не вызывает больших вопросов, тогда как при оценках многократных сбоев из-за потенциальной возможности прохождения трека частицы через одну чувствительную область данный подход не является корректным.

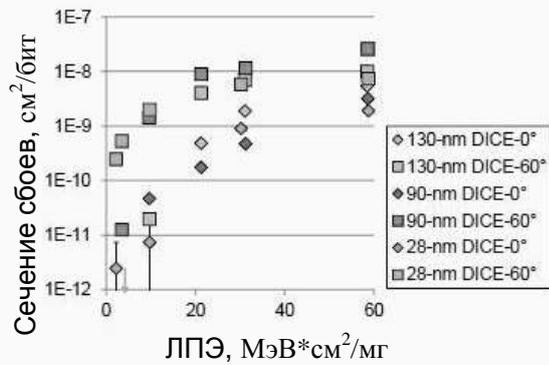
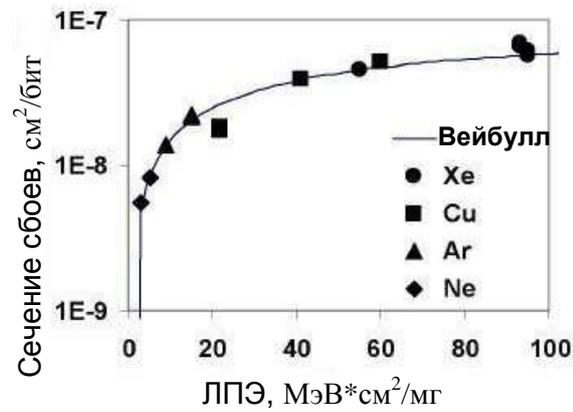


Рис. 1. Варианты представления данных при воздействии под углами, отличными от нормали: с расчетом эффективного значения ЛПЭ (а)[8] и с построением отдельных кривых для каждого угла воздействия (б) [2]

В. Экспериментальные результаты

В целях подтверждения влияния угла воздействия на кратность сбоев был проведен эксперимент на ускорителе ионов «У-400» (ОИЯИ ЛЯР, г. Дубна). Объектами исследования являлись тестовые кристаллы статических оперативных запоминающих устройств (СОЗУ) информационной емкостью 2Кх64. Микросхемы изготовлены по КМОП технологии с проектными нормами 65 нм (образцы предоставлены НИИСИ РАН). При формировании карт сбоев учитывалась связь логической и физической адресации микросхемы. Методика эксперимента, позволяющего выявлять многократные сбои, описана в работе [6].

Выбор объекта исследования был обусловлен тем, что в данной схеме в ходе предварительных исследований при воздействии ионами с различными значениями ЛПЭ наблюдались многократные сбои (МС) кратностью до 12. Причем с ростом ЛПЭ наблюдался рост кратности сбоев и их вклада в общее число событий [6], [9].

Эксперимент в диапазоне углов проводился при постоянной плотности потока воздействия ионов Ar, Ne, Kr и Xe. На рис. 2 представлена кривая зависимости сечения числа сбившихся ячеек от ЛПЭ. Значения ЛПЭ были рассчитаны с учетом толщины слоев

металлизации согласно формуле (1). Из анализа рис. 2 видно, что линия аппроксимации Вейбулла, построенная по точкам, полученным при нормальном падении частиц, проходит несколько ниже точек, полученных при воздействии под углами.

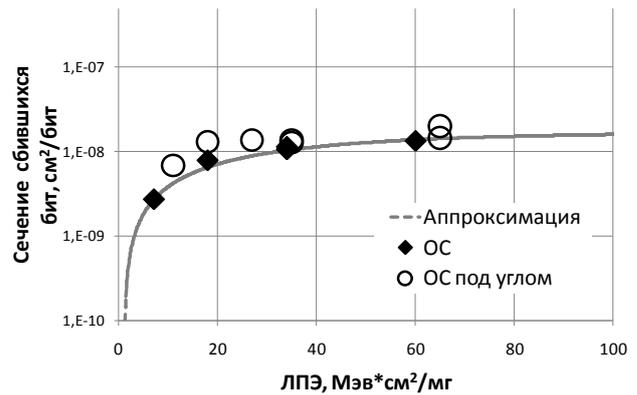


Рис. 2. Результаты расчетно-экспериментальной оценки сечения сбившихся ячеек при воздействии ТЗЧ

На рис. 3 представлены результаты более детального анализа полученных данных. Представленные диаграммы иллюстрируют разницу в полученных сечениях числа ячеек, входящих в сбой различной кратности, при одинаковых (рис. 3а) и близких (рис. 3б, 3в) значениях ЛПЭ.

Анализируя результаты можно отметить, что при воздействии под углом, отличным от нормали, наблюдается рост сечений сбоев большей кратности в сравнении с нормальным падением частиц. При воздействии ионами Kr под 0 градусов и под 30 градусов с близкими значениями ЛПЭ сечение сбоев кратностью 8 возрастает в более чем 2 раза. При воздействии ионами Ar под 0 градусов и ионами Ne под 60 градусов расчетные значения ЛПЭ по формуле (1) также одинаковые, но при воздействии под углом доля МС больше.

Предположительно такое поведение связано с тем, что при росте угла воздействия трек иона располагается геометрически ближе к соседним чувствительным областям, вследствие чего происходит более эффективное диффузионное собирание заряда несколькими ячейками памяти. Из полученных результатов можно сделать вывод о том, что оценка эффективного ЛПЭ по формуле (1) не всегда применима. В случае роста доли МС при воздействии под углом сечение будет завышено относительно сечения, полученного при нормальном падении частиц.

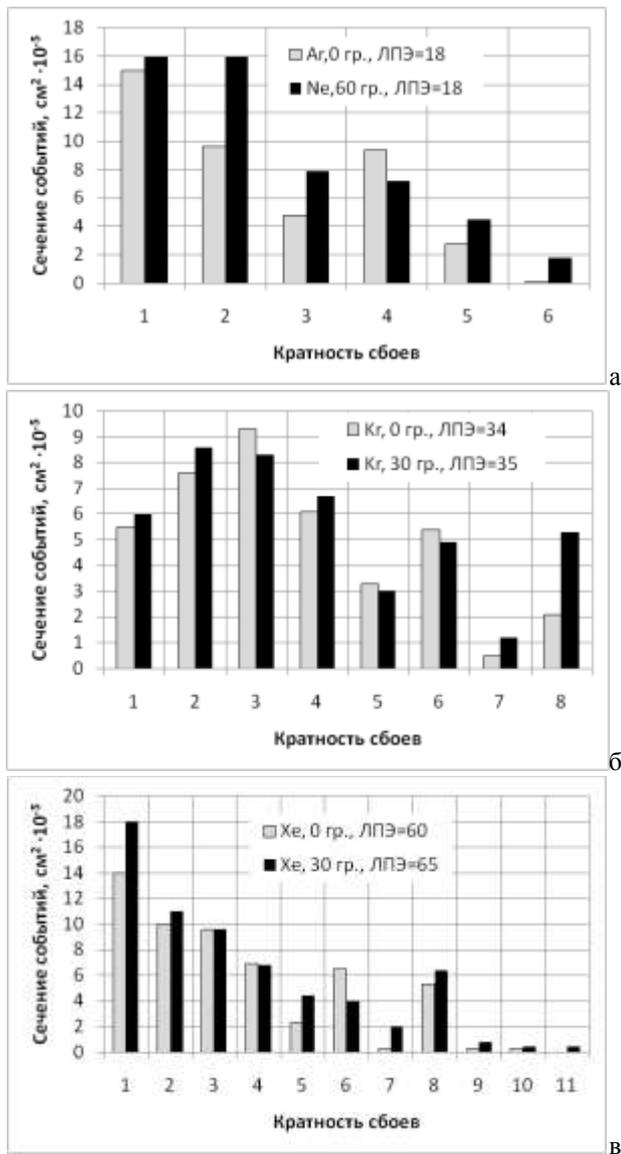


Рис. 3. Сечения сбившихся ячеек, входящих в сбой различной кратности. Значения ЛПЭ представлены в единицах МэВ·см²/мг

Некоторые небольшие расхождения в сечениях сбоев, представленных на рисунке 3, можно отнести к статистической погрешности и погрешности дозиметрии, которые в данном случае не были учтены.

III. Влияние записанного кода НА КРАТНОСТЬ СБОЕВ

При проведении данных исследований также изучалось влияние информации, записанной в физически соседние ячейки памяти, на чувствительность микросхем к эффекту многократных сбоев (МС).



Рис. 4. Фрагмент распределения информации в ячейках памяти при записи кодов «шахматный» и «столбцовый»

Накопитель микросхемы спроектирован таким образом, что физически соседние ячейки относятся к одному разряду данных. При проведении эксперимента применялись два тестовых алгоритма: алгоритм «шахматный» реализовывал запись в физически соседние ячейки равномерного кода, а алгоритм «столбцовый» - запись в физически соседние столбцы накопителя инверсной информации (см. рис.4).

Эксперимент проводился при воздействии ионами Ne под различными углами воздействия и ионами Bi при нормальном падении частиц в режиме динамического считывания информации из накопителя. Из табл. 1 видно, что при воздействии ионов Ne в случае записи до воздействия в накопитель кода «столбцовый» кратность сбоев не превышает 4, в то время как при записи кода «шахматный» наблюдались сбои кратностью до 6. При воздействии ионов Bi поведение аналогичное: при записи кода «столбцовый» максимальная наблюдаемая кратность сбоев ниже. Это можно объяснить тем, что при записи кода «шахматный» реализуется ситуация равномерного удаления чувствительных областей ячейки относительно её границ, что в силу низкой пороговой энергии переключения ячейки приводит к возникновению сбоев большой кратности при воздействии ТЗЧ. При записи кода «столбцовый» чувствительные области соседних ячеек расположены максимально близко друг к другу, но при этом максимальная кратность сбоев ниже, чем в предыдущем случае. Полученные сечения ячеек, входящих в МС различной кратности, при записи кода «шахматный» незначительно выше, чем при записи кода «столбцовый».

Описанный пример является частным случаем, однако полученные результаты свидетельствуют о необходимости проведения испытаний на стойкость к эффектам сбоев с применением нескольких тестовых кодов, при формировании которых учитываются особенности построения топологии накопителя.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенной работы можно сделать несколько важных выводов об особенностях проявления МС:

— Необходимо не только учитывать эффект МС при оценке сбоеустойчивости, но и уделять особое внимание факторам, влияющим на кратность МС.

— Полученные результаты подтверждают необходимость проведения испытаний микросхем памяти при воздействии ТЗЧ в диапазоне углов не только с целью получения сечений одиночных эффектов для большего числа значений ЛПЭ, но и для

оценки вклада кратных сбоев в общее число событий. Оценка эффективных ЛПЭ по закону косинуса в случае наблюдения МС может носить справочный характер. Для оценки реальных ЛПЭ необходимо проводить более детальную оценку, учитывающую особенности топологии.

— Выбор тестового алгоритма при проведении испытаний играет существенную роль: максимальная кратность сбоев может отличаться. Поэтому испытания в не критичных условиях могут привести к неверной оценке, а при эксплуатации к ситуации, когда средства коррекции информации окажутся не эффективными.

Таблица 1

Результаты контроля ОС и МС при воздействии ионов Ne и Bi

Записанный код	Ион	Угол, град. ¹⁾	Флюенс	Значение ЛПЭ, МэВ·см ² /мг	σ _{ячеек МС} , см ² /бит	Число сбоев различной кратности											
						1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Шахматный	Ne	0	1,4E+06	≈ 7	1,6E-09	204	122	8	6	0	0	0	0	0	0	0	0
		45	7,9E+05	≈ 11	4,7E-09	173	143	37	12	8	0	0	0	0	0	0	0
		60	4,6E+05	≈ 18	9,5E-09	77	78	38	35	22	9	0	0	0	0	0	0
Столбцовый		0	1,8E+06	≈ 7	1,6E-09	279	161	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		45	7,0E+05	≈ 11	2,9E-09	159	93	25	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		60	4,8E+05	≈ 18	8,2E-09	138	125	85	3	0	0	0	0	0	0	0	0
Шахматный	Bi	0	2,8E+05	≈ 75	6,1E-08	109	93	86	80	39	29	30	70	9	22	3	1
Столбцовый		0	1,2E+05	≈ 75	5,1E-08	130	25	66	47	36	13	8	2	2	1	0	0

Примечание: ¹⁾относительно нормали к поверхности кристалла

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Lawrence R.K., Kelly A.T. Single Event Effect Induced Multiple-Cell Upsets in a Commercial 90 nm CMOS Digital Technology // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2008. V. 55. № 6. P. 3367-3374.
- [2] Gaspard N., Jagannathan S., Diggins Z., Reece T. Angled Flip-Flop Single-Event Cross Sections for Submicron Bulk CMOS Technologies // RADECS. 2013. Proceedings.
- [3] Buchnerli S., Campbell A.B., Meehan T., Clark K.A. Investigation of Single-Ion Multiple-Bit Upsets in Memories on Board a Space Experiment // Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS). 1999. P. 558 – 564.
- [4] Raine M., Hubert G., Gaillardin M., Paillet P., Bournel A. Monte Carlo Prediction of Heavy Ion Induced MBU Sensitivity for SOI SRAMs Using Radial Ionization Profile // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2011. V. 58. № 6. P. 2607-2613.
- [5] Reviriego P., Maestro J.A. A Technique to calculate the MBU distribution of a memory under radiation suffering the event accumulation problem // Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS). 2008. P. 393-396.
- [6] Боруздина А.Б., Уланова А.В. Применимость методики подсчета многократных сбоев в СОЗУ, позволяющей уменьшить время проведения эксперимента // Электроника, микро- и нанoeлектроника. Сб. научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2013. С. 20-26.
- [7] Боруздина А.Б., Уланова А.В., Петров А.Г. Методика количественной оценки вклада многократных сбоев в общее число событий в ОЗУ от отдельных заряженных частиц // Электроника, микро- и нанoeлектроника. Сб. научных трудов. М.: НИЯУМИФИ, 2012. С. 73-79.
- [8] Hafer C., Mabra J., Slocum D., Farris T., Jordan A. SEE and TID Results for a RadHard-by-Design 1 6 Mbit SRAM with Embedded EDAC // Radiation Effects Data Workshop. IEEE. 2006. P. 131-135.
- [9] Горбунов М.С., Долотов П.С., Шунков В.Е., Антонов А.А. Сравнение сбоеустойчивости ячеек памяти статического КМОП ОЗУ с проектной нормой 65 нм // Электроника, микро- и нанoeлектроника. Сб. научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2013. С. 8-19.