

Статистический подход к описанию множественных сбоев в цифровых схемах памяти высокой степени интеграции

Г.И. Зебрев¹, М.С. Горбунов^{2,1}, Р.Г. Усейнов^{3,1}, А.И. Озеров³, В.В. Емельянов³, В.С. Анашин⁴,
А.С. Козюков^{4,1}, К.С. Земцов^{1,2}, Г.С. Шередеко¹

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва,
gizebrev@mephi.ru

²НИИ системных исследований РАН, Москва

³ФГУП НИИ приборов, Лыткарино, Московская область

⁴ОАО НИИ космического приборостроения, Москва

Аннотация — Проблема множественных сбоев от одиночных частиц в цифровых схемах памяти высокой интеграции обсуждается с использованием новых концепций примитивной ячейки, парциальных сечений сбоев и статистического распределения сбоев по кратности. Показано, что зависимость среднего сечения множественных сбоев от линейной передачи энергии во многих современных схемах памяти с технологической нормой менее 100 нм имеет вид, близкий к линейному.

Ключевые слова — одиночные эффекты, множественные сбои, кратность сбоя, ячейка памяти, ТЗЧ, сечение сбоя, ЛПЭ, цифровая память.

I. ВВЕДЕНИЕ

Современные схемы цифровой памяти характеризуются высокой степенью интеграции, когда площадь ячейки памяти становится меньше 1 мкм^2 , а также низкой помехоустойчивостью, когда критический заряд токовой помехи, приводящей к переключению элемента памяти, составляет 1 фК и менее. Все это является причиной того, что высокоинтегрированные схемы цифровой памяти оказываются очень уязвимыми к воздействию одиночных ионизирующих частиц различного происхождения, таких как высокоэнергетичные протоны и тяжелые заряженные частицы (ТЗЧ) космического пространства [1]. Электронно-дырочные пары, генерируемые прямой ионизацией в треке ТЗЧ, разделяются в электрических полях $p-n$ переходов, и заряд собирается в контактах на пространственных масштабах порядка диффузионной длины. Поэтому для современных схем памяти с технологическими нормами менее 100 нм основным эффектом от одиночных ионизирующих частиц становятся множественные сбои (MCU, Multiple Cell Upsets), когда попадание одной частицы приводит к сбоям сразу в кластере физически близких элементов памяти [2].

Одним из ключевых параметров интегральной схемы (ИС) памяти является её полная площадь A_m . Если N_{SBU} есть число сбоев (одиночных переключений, Single Bit Upsets) при воздействии на ИС ионов с полным флюенсом Φ , то экспериментальным критерием наличия множественных сбоев является условие

$$N_{SBU}/\Phi A_m > 1, \quad (1)$$

которое означает, что любое попадание ТЗЧ в площадь памяти приводит в среднем более чем к одному сбою. Обратное неравенство (менее одного сбоя на попадание) типично для схем с низкой степенью интеграции. Цель данной работы – обсудить методологические проблемы и новые понятия, возникающие при экспериментальной характеристике множественных сбоев от ТЗЧ в ИС памяти.

II. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

A. Примитивная ячейка

Твердотельная цифровая память имеет, как правило, упорядоченную периодическую структуру, сходную со структурой двумерной кристаллической решетки. Воспользовавшись этой аналогией, можно ввести понятие примитивной ячейки интегральной памяти. Это понятие заимствовано из кристаллографии и означает наименьший элемент периодической структуры памяти, которым с помощью трансляций можно без пробелов заполнить всю поверхность кристалла [3]. Отметим, что примитивная ячейка на чипе может содержать более чем одну ячейку памяти и иметь весьма сложную внутреннюю структуру, определяемую топологией и технологией схемы. Выбор формы примитивной ячейки не является единственно возможным, но площадь ячейки (a_{cell}) не зависит от выбора формы ячейки и связана с плотностью интеграции чипа N_M соотношением $N_M a_{cell} = 1$.

В. Парциальное сечение сбоев разной кратности

Любое попадание ТЗЧ в площадь памяти может приводить, вообще говоря, к появлению n сбоев, где n , которую мы будем называть кратностью события, есть случайная величина, принимающая целочисленные значения $n = 0, 1, 2, \dots$. Важно, что случай отсутствия сбоев ($n = 0$) также должен быть включен в математическую структуру описания. Зная соответствие между физическими и логическими адресами элементов памяти, мы можем экспериментально разделить все сбои в группы с разными кратностями. Для каждой кратности можно ввести свое парциальное сечение сбоев на примитивную ячейку σ_n , определяя его как

$$\sigma_n(\Lambda) = \frac{N_\Lambda^{(n)}}{M\Phi}, \quad (2)$$

где $N_\Lambda^{(n)}$ есть количество сбоев кратности n при воздействии ТЗЧ с флюенсом Φ и линейной передачей энергии (ЛПЭ или Λ), $M = N_M A_M$ - полное количество примитивных ячеек на чипе. Значения парциальных сечений зависят от угла падения ТЗЧ, технологии и топологии ИС. Используя понятие парциальных сечений, можно ввести понятие среднего сечения множественных сбоев, определяемого как

$$\langle \sigma(\Lambda) \rangle = \sum n \sigma_n(\Lambda). \quad (3)$$

Очень важно, что несмотря на то, что парциальные сечения зависят от ЛПЭ, их сумма равна площади примитивной ячейки, которая определяется только топологией схемы

$$\sum_{n=0} \sigma_n(\Lambda) = a_{cell}. \quad (4)$$

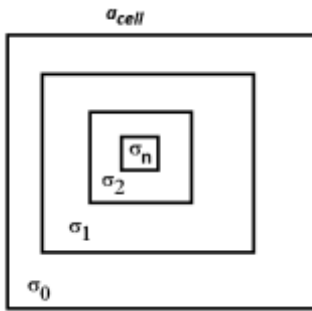


Рис. 1. Примитивная ячейка как сумма сечений сбоев всех кратностей

Это условие, которое мы будем называть условием полноты, обусловлено тем простым обстоятельством, что каждое из попаданий ТЗЧ соответствует событию какой-либо кратности. Другими словами, площадь элементарной ячейки может быть поделена между сечениями сбоев разных кратностей, что схематично изображено на рис. 1.

С. Связь средних кратности и сечений сбоев

Распределение сечений по кратностям соответствует распределению вероятностей по кратностям, определяемому как:

$$p_n(\Lambda) = \frac{\sigma_n(\Lambda)}{\sum_{n=0} \sigma_n(\Lambda)} = \frac{\sigma_n(\Lambda)}{a_{cell}}, \quad (5)$$

где использовано условие полноты (4). Тогда средняя кратность события дается усреднением по этому распределению

$$\langle n(\Lambda) \rangle = \sum_{n=0} n p_n(\Lambda) = \frac{\sum_{n=0} n \sigma_n(\Lambda)}{\sum_{n=0} \sigma_n(\Lambda)} = \frac{\langle \sigma(\Lambda) \rangle}{a_{cell}}. \quad (6)$$

Таким образом, нормируя экспериментальное среднее сечение сбоя на площадь элементарной ячейки, можно получить зависимость кратности сбоя как функцию ЛПЭ.

Д. Низкая степень интеграции

Описанный подход является общим и может быть применен для ИС малой степени интеграции. В этом случае множественные сбои отсутствуют, то есть ненулевыми являются только значения сечений σ_0 и σ_1 ; следовательно, условие полноты может быть записано в виде $\sigma_0(\Lambda) + \sigma_1(\Lambda) = a_{cell}$, а средняя кратность сбоя в зависимости от ЛПЭ определяется как

$$\langle n(\Lambda) \rangle = \frac{\sigma_1(\Lambda)}{a_{cell}} = \frac{\sigma_1(\Lambda)}{\sigma_0(\Lambda) + \sigma_1(\Lambda)} \leq 1. \quad (7)$$

При увеличении ЛПЭ σ_0 уменьшается, а σ_1 увеличивается, но при этом σ_1 всегда остается меньше чем a_{cell} , а средняя кратность сбоя не превысит единицы. Это означает, что сечение единичных (однократных) сбоев насыщается на уровне $\sigma_{SAT} < a_{cell}$ (см. рис. 2).

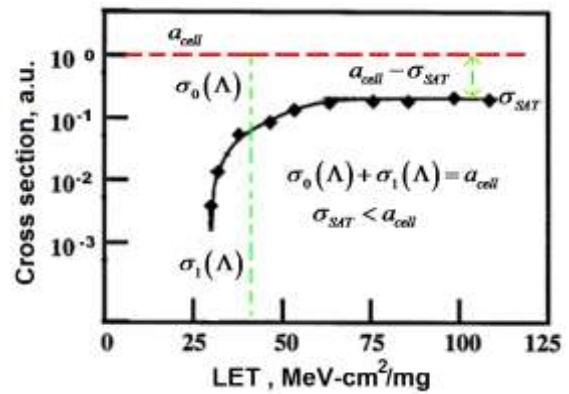


Рис. 2. Насыщение сечения сбоя для единичных сбоев

При низкой степени интеграции существуют области, в которых не происходит собирание заряда в контакты ни при каких значениях ЛПЭ. Эти «мертвые зоны» с площадью $a_{cell} - \sigma_{SAT}$ находятся, как правило, в буферных областях, разделяющих активные области отдельных ячеек памяти.

Е. Геометрический смысл сечения множественных сбоев

Полное количество сбоев от воздействия ТЗЧ с заданным ЛПЭ можно представить в виде

$$N_{SBU}(\Lambda) = M \langle \sigma(\Lambda) \rangle \Phi = \langle \langle \sigma(\Lambda) \rangle N_M \rangle (\Phi A_M) = \langle n(\Lambda) \rangle A_M \Phi. \quad (8)$$

Таким образом, средняя кратность сбоя определяется экспериментально как

$$\langle n(\Lambda) \rangle = \frac{N_{SBU}(\Lambda)}{A_M \Phi}. \quad (9)$$

Тогда среднее сечение $\langle \sigma(\Lambda) \rangle = \langle n(\Lambda) \rangle a_{cell}$ представляет собой среднюю площадь кластера сбитых ячеек. Площадь этого кластера зависит от ЛПЭ и угла падения ТЗЧ и определяется процессами сбора в схемах данной технологии и топологии.

III. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

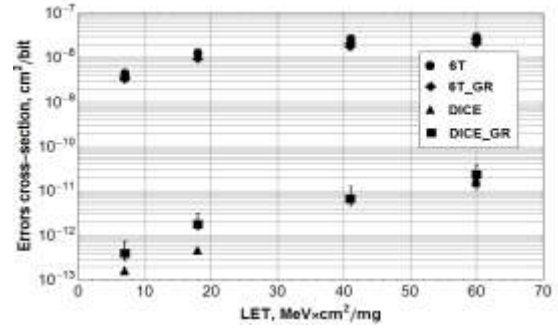
А. Линейная зависимость от сечения ЛПЭ

На рис. 3 представлены типичные экспериментальные зависимости средних сечений для схем памяти высокой интеграции, представленные, согласно многолетней традиции, в логарифмическом масштабе. Эти данные имеют три особенности, существенно отличающие их от данных для схем низкой интеграции. Во-первых, очень мал выраженный порог при малых ЛПЭ; во-вторых, отсутствует выраженное насыщение при больших ЛПЭ. И, наконец, динамический диапазон изменения полного сечения для разных ЛПЭ оказывается очень небольшим, укладываясь в 1.5 порядка, в отличие от ИС низкой интеграции, где наблюдаемое изменение сечений составляет обычно 2-3 порядка. По сути, экспериментальные зависимости на рис. 3а,б,с удобнее представлять в линейном масштабе, поскольку они представляют собой степенные функции, часто не очень сильно отличающиеся от линейных, как это видно на рис. 3д. Экстраполяция прямых дает непосредственно пороговые значения ЛПЭ Λ_c , которые оказываются близки к нулю для всех приведенных образцов. Это означает, что критические ЛПЭ и заряды для данных ИС очень малы, что типично для ИС высокой интеграции. Стоит отметить, что это не относится к радиационно-стойким DICE ячейкам (нижние точки на рис. 3а), для которых сечения сбоев на 2 порядка меньше, множественные сбои отсутствуют и наблюдается суперлинейная зависимость сечения от ЛПЭ.

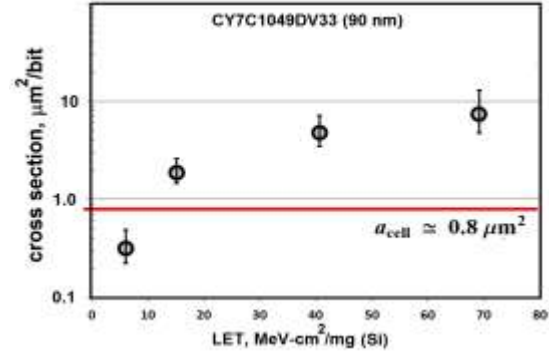
Представленные экспериментальные данные удобно аппроксимировать соотношением

$$\sigma(\Lambda) = K_d W \ln \left[1 + \exp \left(\frac{\Lambda - \Lambda_c}{W} \right) \right] \quad (10)$$

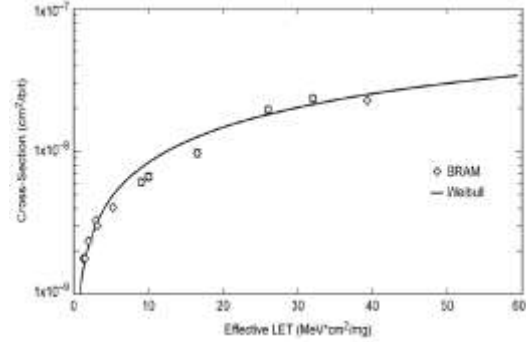
с пороговым ЛПЭ Λ_c и подгоночным параметром W , характеризующим подпороговую область $\Lambda < \Lambda_c$.



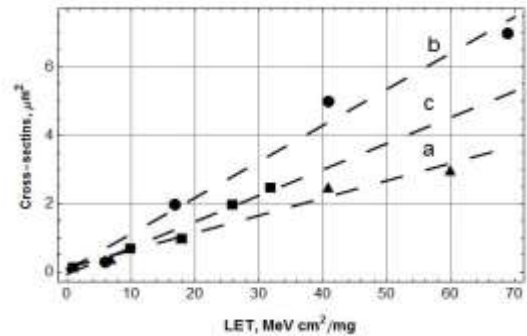
(a)



(b)



(c)



(d)

Рис. 3. Зависимости сечений от ЛПЭ: (а) 65 нм [4], (б) 90 нм технология CY7C1049DV33-10ZSXI, (с) Virtex-5QV BRAM [5]; (д) те же данные в линейной шкале

В надпороговой области $\Lambda > \Lambda_c$ мы имеем наблюдаемый линейный рост сечения $\sigma(\Lambda) \cong K_d (\Lambda - \Lambda_c)$. Вспоминая, что средняя поглощенная доза определяет

ся соотношением $D = \Lambda \Phi$, получаем для малых значений Λ_c линейную зависимость сечения от средней поглощенной дозы $\sigma \cong K_d D$ с коэффициентом K_d , который можно найти непосредственно из наклона линейной зависимости сечения от ЛПЭ. Экспериментальные значения для данных на рис. 4 составляют $K_d \cong 0.05 - 0.1 \text{ мг} \times \text{мкм}^2 \times \text{МэВ}^{-1} \times \text{см}^2$, или в более удобных единицах $K_d \cong (6-3) \times 10^{-5} \text{ рад}^{-1}$.

В. Распределение кратностей сбоев

Полное количество сбоев $N_{SBU}(\Lambda)$ можно представить в виде произведения двух независимых случайных сомножителей: (1) количества ТЗЧ, попадающих в площадь памяти со средним $A_m \Phi$, и (2) кратности каждого попадания со средним значением $\langle n(\Lambda) \rangle$. Первый сомножитель распределен по пуассоновскому закону с дисперсией, равной среднему значению. Тогда, с учетом независимости двух множителей, среднеквадратичное отклонение количества сбоев для заданного значения флюенса ТЗЧ записывается как

$$\langle \delta N_{SBU}^2 \rangle = \langle n \rangle^2 A_m \Phi + (A_m \Phi)^2 \langle \delta n^2 \rangle, \quad (11)$$

где $\langle \delta n^2 \rangle$ - среднеквадратичная вариация кратности сбоев, которую можно определить экспериментально. Нормируя дисперсию на среднее значение, получаем соотношение

$$\frac{\langle \delta N_{SBU}^2 \rangle}{\langle N_{SBU} \rangle^2} = \frac{1}{A_m \Phi} + \frac{\langle \delta n^2 \rangle}{\langle n \rangle^2}. \quad (12)$$

Вклад первого из слагаемых может быть уменьшен за счет хорошей статистики, второе слагаемое определяется только видом распределения сбоев по кратностям. Оно равно единице для пуассоновского распределения, но может быть заметно больше единицы для субпуассоновского (более широкого) распределения. Вообще говоря, вся статистическая информация о множественных сбоях содержится в распределениях. Исходя из общих соображений, нет никаких априорных оснований приписывать распределению кратности какой-то определенный функциональный вид. Например, экспериментальные данные, приведенные на рис. 4, показывают, что распределение сбоев по кратности для некоторых схем памяти с технологической нормой 90 нм очень похоже на пуассоновское распределение. В других случаях оно носит более сложный характер, зависящий от технологии и топологии схемы памяти. Например, статистика кратностей для тестовых структур с технологией 65 нм [4], демонстрирует доминирование сбоев четной кратности над нечетными. Это можно объяснить тем, что примитивная ячейка этих схем содержит две ячейки памяти с общими областями стока. Таким образом, попадание в область стока приводит к сбою сразу двух ячеек памяти, а сбор заряда в соседние стоки дает преимущественно четное полное количество сбоев. Тем не менее, зависимости средней кратности и среднего сечения сбоев от ЛПЭ в обоих

случаях весьма похожи и имеют почти линейный вид, как это представлено на рис. 3д.

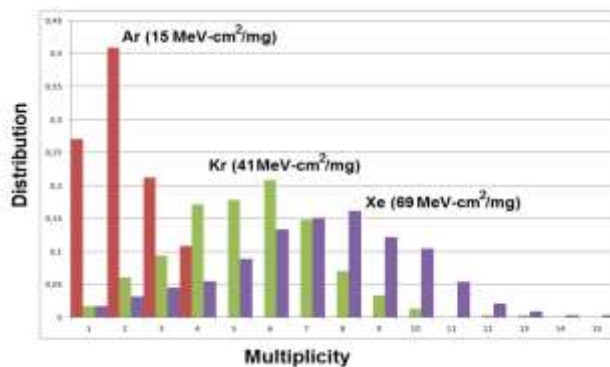


Рис. 4. Распределения сбоев по кратности при различных значениях ЛПЭ ионов для технологии 90 нм [5]

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, показано, что понятие средней кратности сбоев может быть использовано для экспериментальной характеристики одиночных сбоев в ИС памяти как высокой, так и низкой степени интеграции. Введено понятие примитивной ячейки, каждая точка которого эквивалентна такой же точке в других примитивных ячейках схемы. Наряду с понятием сечения «нулевой кратности» это позволяет ввести условие полноты, связывающее сумму всех парциальных сечений для разных кратностей с топологическим инвариантом, - плотностью интеграции. Это, в свою очередь, дает возможность определить понятие распределение вероятностей по кратности, содержащее всю информацию о систематических и случайных статистических свойствах отклика схемы памяти на воздействия одиночных частиц. Показано, что эти распределения могут иметь разный вид для разных технологий и ЛПЭ, но среднее значение кратности, или, что то же самое, среднее сечение множественных сбоев, часто имеет вид линейной функции.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] ITRS 2010, www.itrs.net (дата обращения 07.05.2014).
- [2] Black J.D., Dodd P.E., and Warren K.M. Physics of Multiple-Node Charge Collection and Impacts on Single-Event Characterization and Soft Error Rate Prediction // IEEE Trans. Nucl. Sci. June 2013. Vol. 60. № 3. P. 1836-1851.
- [3] Ашкрофт Н., Мермин Н. Физика твердого тела : в 2 т., пер. с англ. М.: Мир, 1979. Гл. 4.
- [4] Gorbunov M.S., Dolotov P.S., Antonov A.A., Zebrev G.I., Emeliyanov V.V., et al. Design of 65 nm CMOS SRAM for Space Applications: a Comparative Study // accepted to IEEE Trans. Nucl. Sci. 2014. Vol. 61. № 4.
- [5] Емельянов В.В., Озеров А.И., Усейнов Р.Г., Анашин В.С. Оценка сечений множественных сбоев в КМОП СОЗУ по результатам экспериментов на ускорителях ТЗЧ // Конференция «Стойкость-2013». Лыткарино, 2013.
- [6] Swift G., Allen G. Virtex-5QV Static SEU Characterization Summary. May 17, 2013.