

Расчетно-экспериментальное моделирование обратимых сбоев ячеек статической памяти субмикронных микросхем при воздействии потоков нейтронов

© А.С. Пузанов^{1,2}, М.М. Венедиктов^{1,2}, С.В. Оболенский^{1,2}, В.А. Козлов^{1,3}

¹ Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 603950 Нижний Новгород, Россия

² Филиал РФЯЦ-ВНИИЭФ „Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова“, 603950 Нижний Новгород, Россия

³ Институт физики микроструктур Российской академии наук, 603087 Нижний Новгород, Россия

E-mail: aspuzanov@inbox.ru

Поступила в Редакцию 24 апреля 2019 г.

В окончательной редакции 29 апреля 2019 г.

Принята к публикации 29 апреля 2019 г.

Проведено моделирование обратимых одиночных сбоев в тестовых образцах микросхем статической памяти с проектными нормами 0.5, 0.35, 0.25 и 0.1 мкм при воздействии потоков нейтронов с различной энергией. Теоретически и экспериментально показано, что в современных изделиях микро- и нанoeлектроники могут иметь место обратимые одиночные сбои при воздействии потока нейтронов спектра деления, вызванные прохождением первичных атомов отдачи и продуктов ядерных реакций вдоль поверхности микросхемы перпендикулярно линиям электрического тока в области вблизи стока транзистора. На основе предложенной модели проведена интерпретация серии облучательных экспериментов микросхем статической памяти с проектными нормами 0.35 мкм.

Ключевые слова: переходная ионизационная реакция, обратимый одиночный сбой, кремний-на-изоляторе.

DOI: 10.21883/FTP.2019.09.48133.16

1. Введение

Уменьшение топологических норм изделий микроэлектроники приводит к улучшению их характеристик, в частности уменьшению энергии, необходимой для переключения элементов сверхбольших интегральных схем. Это положительным образом сказывается на энергопотреблении и обеспечивает дальнейшее увеличение числа активных элементов на кристалле. С другой стороны, уменьшение энергии переключения неизбежно приводит к снижению пороговых энергий возникновения локальных радиационных эффектов, приводящих к сбоям и отказам сверхбольших интегральных схем вследствие воздействия тяжелых заряженных частиц космического пространства [1].

Впервые возникновение аномалий в работе спутников связи из-за действия галактических космических лучей детально обсуждается в работе [2] на примере сбоев JK-триггера, изготовленного по биполярной технологии. Анализ возникновения ошибок в элементах памяти на полевых транзисторах рассмотрен в работе [3]. Спустя несколько лет аналогичный эффект, вызванный α -частицами, источником которых являлся спонтанный распад атомов урана и тория из состава корпусов, наблюдался в нормальных условиях в микросхемах динамической памяти [4], выполненных на базе массива приборов с зарядовой связью. Значительный интерес к проблеме обратимых одиночных сбоев в изделиях

микроэлектроники привел к выходу работы [5], в которой было предсказано явление обратимых одиночных сбоев при воздействии нейтронов, а также дальнейшая актуализация проблемы сбоев в будущем в связи с уменьшением размеров активных элементов интегральных схем.

Считается, что обратимые одиночные сбои в изделиях микроэлектроники при воздействии нейтронов возникают вследствие ядерных реакций, например $n + {}^{28}\text{Si} \rightarrow \alpha + {}^{25}\text{Mg}$ с пороговой энергией 2.75 МэВ [6]. Действительно, в этом случае значительная доля энергии быстрого нейтрона передается атому магния и α -частице, которые ионизируют чувствительный объем полупроводникового элемента, приводя к его сбою. Напротив, легко показать, что упругое взаимодействие нейтрона с атомом кремния передает последнему не более 13% энергии нейтрона. Поэтому для исследований сбоев в изделиях микроэлектроники обычно применяются нейтронные генераторы, выдающие поток нейтронов высоких энергий, существенно превосходящих пороговые энергии ядерных реакций в кремнии.

Как отмечалось выше, уменьшение размеров рабочих областей полупроводниковых элементов приводит к уменьшению минимальной энергии частиц, достаточной для реализации сбоя. Это делает возможным применение исследовательских ядерных реакторов для определения сечения обратимых одиночных сбоев и пороговой величины линейной передачи энергии в совре-

менных интегральных схемах. Преимуществом данного подхода является существенно более низкая стоимость проводимых работ по сравнению с экспериментами на ускорителях протонов и тяжелых заряженных частиц. Также следует отметить, что исследования на ускорителях требуют декорпусирования интегральных схем ввиду недостаточной энергии заряженных частиц для их эффективного прохождения через корпус. Это приводит к нарушению конструктивной целостности изделий микроэлектроники, что влияет на их функционирование как при облучении, так и в нормальных условиях. Указанного недостатка лишены эксперименты на исследовательских ядерных реакторах ввиду высокой проникающей способности нейтронного излучения.

Ранее в работе [7] был проведен анализ процессов формирования и стабилизации кластера радиационных дефектов при попадании быстрого нейтрона в область пространственного заряда полупроводникового диода, выполняющего роль детектора, и рассчитан импульс тока. В данной работе проведено моделирование обратимых одиночных сбоев микросхем памяти, изготовленных по технологии „кремний-на-изоляторе“, при воздействии потоков нейтронов с энергией 14 МэВ и спектра деления на базе модифицированной локально-неравновесной диффузионно-дрейфовой модели переноса носителей заряда, ранее предложенной в работе [8]. Результаты моделирования используются для интерпретации данных серии оригинальных облучательных экспериментов.

2. Возникновение обратимых одиночных сбоев в изделиях микро- и нанoeлектроники при воздействии нейтронов и заряженных частиц

Обычно действие нейтронного облучения на дискретные полупроводниковые приборы и интегральные схемы связывают с эффектами структурных повреждений полупроводника, приводящих к деградации его электрофизических характеристик: уменьшению подвижности и концентрации основных носителей заряда, а также снижению времени жизни неосновных носителей заряда. Упругое взаимодействие нейтрона с полупроводником приводит к образованию первичного атома отдачи. Этот атом с достаточно высокой энергией (до сотен кэВ), двигаясь в среде, возбуждает как электронную подсистему кристалла, генерируя электронно-дырочные пары, так и выбивает за счет кулоновского взаимодействия близлежащие атомы среды, генерируя тем самым вторичные атомы отдачи, в результате чего каскад смещений разветвляется наподобие дерева. Так как средний пробег первичных атомов отдачи в кремнии составляет не более сотни нм, а вторичных — на порядок меньше, то в результате образуется плотная разупорядоченная область — кластер радиационных дефектов.

Стабилизация кластера радиационных дефектов включает в себя несколько этапов [7]. Образование об-

ласти разупорядочения происходит за время пролета первичного атома отдачи и лежит в пределах $\sim 10^{-13}$ с. Первичные точечные дефекты (вакансии и межузельные атомы) диффундируют, частично рекомбинируют, а частично образуют плотные скопления — кластеры радиационных дефектов. При этом мелкие (менее 5 нм в случае кремния) кластеры радиационных дефектов „рассасываются“, а остальные „застывают“ в форме обогащенного дивакансиями ядра и межузельными атомами на периферии. Характерное время „остывания“ кластера радиационных дефектов составляет $\sim 10^{-10}$ с.

Кластер радиационных дефектов содержит набор глубоких уровней, что приводит к захвату на них основных носителей заряда и локальной компенсации примеси. Характерное время зарядки кластера радиационных дефектов составляет $\sim 10^{-6}$ с. Таким образом, кластер радиационных дефектов представляет собой потенциальный барьер для основных носителей заряда, снижая их подвижность, и потенциальную яму для неосновных носителей заряда. Наличие глубоких уровней в кластере радиационных дефектов уменьшает время жизни неосновных носителей заряда и снижает концентрацию основных носителей заряда в облученном материале.

Заряженные частицы космического пространства имеют существенно большую энергию (десятки и сотни МэВ) относительно первичных атомов отдачи, в результате чего плотных разупорядоченных областей в полупроводниках не образуется.

Неравновесные электронно-дырочные пары, генерированные первичным атомом отдачи или заряженной частицей космического пространства, разделяются электрическим полем в рабочей области полупроводникового элемента, в результате чего через структуру проходит импульс тока, образуя SET (Single Event Transient) — переходную ионизационную реакцию, которая может привести к SEU (Single Event Upset) — обратимому одиночному сбою в ячейке памяти интегральной схемы.

Таким образом, несмотря на то что действие нейтронов и тяжелых заряженных частиц космического пространства на полупроводниковые структуры в целом различно, ионизационные эффекты данных видов излучений сопоставимы. При этом структурные повреждения, вносимые первичным атомом отдачи, не оказывают влияния на переходную ионизационную реакцию, длительность которой лежит в субнаносекундном диапазоне времен [8], ввиду того что, как отмечалось выше, зарядка кластера радиационных дефектов происходит за $\sim 10^{-6}$ с.

Действие γ -излучения, которое сопутствует нейтронному излучению, а также электронного и протонного излучений космического пространства приводит к накоплению заряда на границах Si/SiO₂ структур „кремний-на-изоляторе“. Анализ методом нестационарной емкостной спектроскопии глубоких уровней DLTS (Deep-Level Transient Spectroscopy) показывает, что в структурах „кремний-на-изоляторе“ характерное время перезарядки глубоких уровней лежит в микросекундном

Параметры моделируемых транзисторов, выполненных по технологии „кремний-на-изоляторе“ [10]

Длина затвора, мкм	0.5	0.35	0.25	0.1
Толщина подзатворного диэлектрика, мкм	0.0115	0.0068	0.004	0.003
Толщина активного слоя кремния, мкм	0.2	0.19	0.15	0.04
Толщина скрытого диэлектрика, мкм	0.15	0.19	0.15	0.1
Ширина канала <i>n</i> -МОПТ, мкм	1.4	1.0	0.7	0.4
Ширина канала <i>p</i> -МОПТ, мкм	2.8	2.0	1.4	0.8
Напряжение питания, В	3.3	2.5	1.8	1.2

диапазоне [9]. Это не может повлиять на переходную ионизационную реакцию и обуславливает независимость событий сбоя между собой, наиболее отчетливо проявляющуюся через экспериментальную зависимость накопления обратимых сбоя от интегрального потока нейтронов, носящую линейный характер. Вышеуказанные обстоятельства позволяют не учитывать эффекты накопления структурных повреждений в рабочей области, накопления заряда в диэлектрических слоях и на границах раздела Si/SiO₂ структур „кремний-на-изоляторе“, а также перезарядки глубоких уровней при анализе одиночных событий при воздействии нейтронов и заряженных частиц.

3. Методика моделирования

Для теоретического исследования воздействия тяжелых заряженных частиц на ячейки памяти широко используется метод смешанного приборно-схематехнического моделирования [10]. Переходные процессы в транзисторе, в который попадает частица, рассчитываются при помощи физико-топологических моделей, а остальная часть схемы анализируется в программе схематехнического моделирования. Традиционно используется комбинация TCAD (Technology Computer Aided Design) и SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) для физико-топологического и схематехнического моделирования соответственно. Однако, как было показано в работе [8], комплекс локально-равновесных моделей переноса носителей заряда, применяемый в том числе в TCAD, может давать большую погрешность в расчете ионизационной реакции полупроводниковых структур при длительности возбуждающего воздействия порядка времен релаксации энергии и импульса электронно-дырочной плазмы ($\sim 10^{-13}$ с), что реализуется при воздействии тяжелых заряженных частиц [11–13]. Поэтому для расчета переходной ионизационной реакции была применена оригинальная локально-неравновесная диффузионно-дрейфовая модель переноса носителей заряда [8]. Отметим, что применение математических моделей, корректно рассчитывающих не только величину критического заряда, но и форму возникающих всплесков тока, является важным для расчета одиночных событий в ячейках памяти интегральных схем [10]. К сожалению, влияние формы импульса тока на вероятность сбоя при заданной величине критического заряда

практически не исследовано ни для „объемной“ технологии, ни для технологии „кремний-на-изоляторе“, так как характерные времена указанных процессов составляют ~ 0.1 пс, что существенно затрудняет экспериментальные исследования. Поэтому моделирование в настоящее время является единственной возможностью детально исследовать влияние переходной ионизационной реакции элементов интегральных схем на обратимые одиночные сбой.

Характерные размеры транзисторов, изготовленных по технологии „кремний-на-изоляторе“, приведены в таблице. Рабочая область элемента представлялась в виде параллелепипеда: L — длина канала и прилегающих областей стока и истока, W , H — ширина и толщина рабочей области транзистора соответственно. В произвольной точке рабочей области транзистора моделировалась ядерная реакция $n + {}^{28}\text{Si} \rightarrow \alpha + {}^{25}\text{Mg}$ при энергии нейтрона, достаточной для ее реализации, либо упругое взаимодействие нейтрона с атомом кремния с передачей ему доли энергии в приближении изотропного рассеяния. Вероятность процесса P оценивалась по формуле [14,15]

$$P = 1 - \exp(-\sigma F_n V N_a), \quad (1)$$

где σ — сечение процесса в заданном диапазоне энергий, F_n — интегральный поток нейтронов в заданном диапазоне энергий, V — объем рабочей области полупроводниковой структуры, N_a — концентрация атомов мишени.

Треки α -частиц, ионов магния и кремния предполагались прямолинейными. Зависимость линейной передачи энергии и средней длины пробега от энергии частиц рассчитывалась при помощи программы SRIM [16] (рис. 1). В результате решения дифференциального уравнения

$$-\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dr} = LET(E) \quad (2)$$

с начальным условием $E(l_0) = E_0$ получали зависимость величины потерь энергии частицы вдоль ее траектории. Здесь $\rho = 2.33 \text{ г/см}^3$ — плотность кремния, LET (Linear Energy Transfer) — линейная передача энергии, E — энергия частицы, l — расстояние вдоль трека.

Очевидно, что с уменьшением топологических норм роль короткопробежных частиц с большой максимальной линейной передачей энергии возрастает, что делает возможным сбой элементов памяти, изготовленных

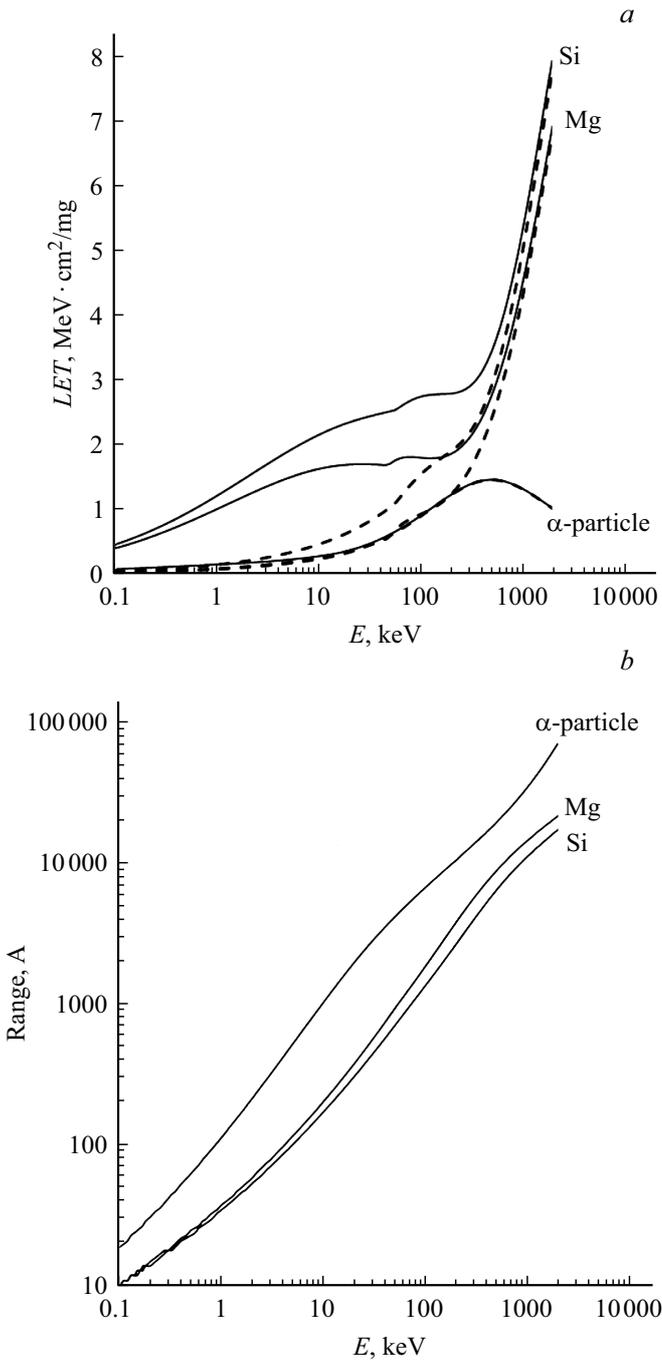


Рис. 1. Зависимость линейной передачи энергии (a) и средней длины пробега (b) ионов Si, Mg и α-частиц от их энергии: сплошные кривые — общая передача энергии, пунктирные кривые — передача энергии на ионизацию.

по субмикронной технологии, при воздействии потока нейтронов спектра деления непосредственно от первичных атомов отдачи (Si), а также „тяжелых“ продуктов ядерных реакций (Mg). Отметим, что, несмотря на то что максимальная величина линейной передачи энергии атомов кремния в кремнии составляет $14 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2/\text{мг}$, а атомов магния в кремнии — $11.5 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2/\text{мг}$ [16],

энергия, передаваемая нейтроном спектра деления как при упругом, так и при неупругом рассеянии, недостаточна для реализации данных значений. Реальное значение величины линейной передачи энергии атомов кремния и магния в кремнии при воздействии нейтронов спектра деления лежит в пределах $1\text{--}3 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2/\text{мг}$, а при воздействии нейтронов с энергией 14 МэВ — не более $7.6 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2/\text{мг}$, что обуславливает достаточно низкое типовое значение сечения сбоев, равное $(1\text{--}4) \cdot 10^{-14} \text{ см}^2/\text{бит}$ [1], далекое от сечения насыщения, получаемого при воздействии тяжелых заряженных частиц космического пространства.

4. Результаты и их обсуждение

Результаты моделирования показывают, что обратимые одиночные сбои в ячейках памяти микросхем, изготовленных по технологии „кремний-на-изоляторе“ с субмикронными нормами, при воздействии потока нейтронов спектра деления реализуются только при прохождении ионов кремния и магния вдоль поверхности микросхемы перпендикулярно линиям электрического тока в области вблизи стока транзистора (рис. 2). Отметим, что реализация такого направления движения ионов, особенно при испытаниях на ускорителях частиц, когда облучение микросхем проводят со стороны максимальной площади $L \times W$: лицевой и тыльной, маловероятна и обычно не учитывается при проведении расчетов. Например, в вышеупомянутой работе [10] авторы справедливо пренебрегли этим эффектом, так как рассматривали ионы железа с энергией 16 МэВ и линейной передачей энергии $21 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2/\text{мг}$, так что при нормальном падении на поверхность микросхемы такие ионы приводят к сбою. В рассматриваемом в данной работе случае только при направлении движения вдоль „ширины“ транзистора реализуется слабая вероятность расположения длинного участка траектории иона внутри чувствительной области, так чтобы заряд неравновесных носителей сформировал переходную ионизационную реакцию, достаточную для возникновения обратимого сбоя в ячейке памяти интегральной схемы.

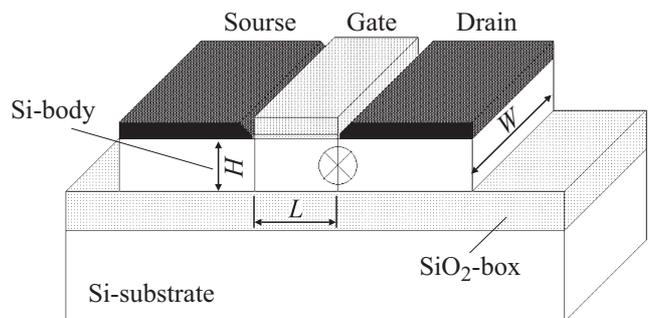


Рис. 2. Упрощенная топология полевого транзистора: L — длина канала, W — ширина и H — толщина рабочей области транзистора, ⊗ — направление движения иона.

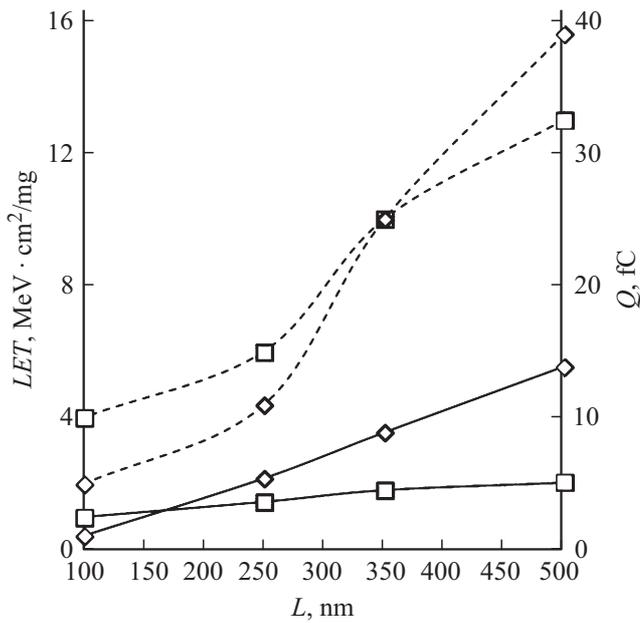


Рис. 3. Расчетные пороговые значения линейной передачи энергии (квадраты) и критический заряд ячейки статической памяти (ромбы) для различных длин затвора транзисторов: сплошные кривые — данная работа, пунктирные кривые — данные из работы [10].

Результаты расчетов пороговых значений линейной передачи энергии и критического заряда ячейки статической памяти для различных длин затвора транзисторов приведены на рис. 3. Моделировалась совместная работа двух транзисторов, образующих бистабильную ячейку памяти. В соответствии с подходом, изложенным в работе [10], на один из транзисторов пары воздействовала заряженная частица, и анализировалось возможное переключение ячейки памяти. Первичный атом отдачи с заданной энергией, однозначно определяющей величину линейной передачи энергии, запускали в направлении, отмеченном на рис. 2, и рассчитывали пространственно-временное распределение коэффициента генерации неравновесных носителей заряда [17,18]

$$G(l, r, t) = G_{LET}(l) \cdot R(r, l) \cdot T(t). \quad (3)$$

Здесь $G_{LET}(l)$ — амплитудный коэффициент, определяемый величиной линейной передачи энергии вдоль трека частицы, $R(r, l)$ — нормированный пространственный множитель, описываемый экспоненциальной или гауссовой функциями, $T(t)$ — нормированный временной множитель, описываемый гауссовой функцией, r — радиус, определяемый как перпендикулярное расстояние к треку, l — расстояние вдоль трека. Трек первичного атома отдачи предполагался прямолинейным. Затем при помощи локально-неравновесной диффузионно-дрейфовой модели переноса носителей заряда [8] рассчитывали переходную ионизационную реакцию, которая выступала в роли граничных условий на второй транзистор ячейки

памяти. В случае переключения ячейки памяти переходной ионизационный ток интегрировали, тем самым получая величину критического заряда. Теоретически установлено, что для топологической нормы 0.35 мкм пороговое значение линейной передачи энергии составляет $1.8 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2/\text{мг}$. Полученные меньшие значения, по сравнению с данными работы [10], обусловлены учетом направления движения частиц вдоль поверхности микросхемы. Другим следствием является, как будет показано далее, существенно более низкое значение сечения обратимых сбоев ($\sim 10^{-17} \text{ см}^2/\text{бит}$), на много порядков меньшее сечения насыщения.

Экспериментальная работа по исследованию сбоев в тестовых образцах микросхем статической памяти с информационной емкостью 1 Мбит, изготовленных по технологии „кремний-на-изоляторе“ с топологической нормой 0.35 мкм, проводилась на генераторе нейтронов 14 МэВ и исследовательском ядерном реакторе. Размер ячейки памяти из 6 транзисторов (стандартная ячейка без схемотехнической защиты: 2 транзистора, образующих бистабильную ячейку, 2 транзистора установки/сброса (Set/Reset) ячейки, 2 транзистора выборки ячейки) составлял $5.8 \times 8.2 \text{ мкм}$, в целом размер микросхемы $9.0 \times 9.9 \text{ мм}$. Микросхемы изготавливались на подложках, имеющих проводимость в 50–100 раз ниже (из-за низкой концентрации легирующих атомов бора), чем проводимость слоев кремния, используемых для изготовления p -кармана транзисторов. Поэтому ядерная реакция $n + {}^{10}\text{B} \rightarrow \alpha + {}^7\text{Li}$ не учитывалась.

Результаты эксперимента по облучению приведены на рис. 4. Получены значения сечений обратимых сбоев $1.7 \cdot 10^{-9} \text{ см}^2$ для нейтронов с энер-

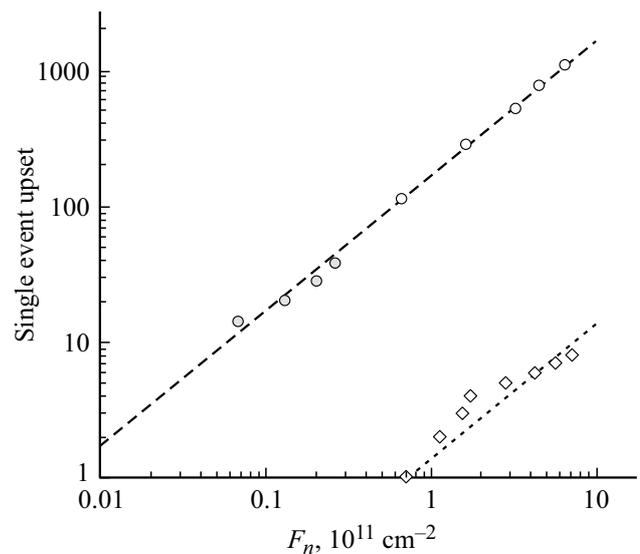


Рис. 4. Зависимость количества обратимых сбоев от потока нейтронов: с энергией 14 МэВ: кружки — экспериментальные данные, пунктирная линия — аппроксимирующая прямая; спектра деления: ромбы — экспериментальные данные, точечная линия — аппроксимирующая прямая.

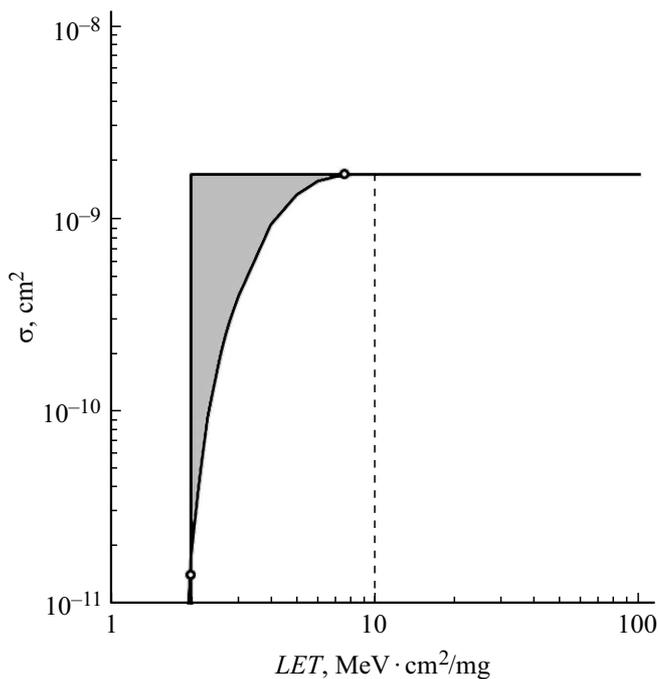


Рис. 5. Зависимость сечения обратимых сбоев от линейной передачи энергии: кружки — экспериментальные данные; сплошные кривые — оценочные кривые Вейбулла для $LET_0 = 1.8 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2/\text{мг}$; пунктирная линия — оценочная кривая Вейбулла для $LET_0 = 10 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2/\text{мг}$; цветом отмечена область возможных значений сечений обратимых сбоев.

гней 14 МэВ и $1.4 \cdot 10^{-11} \text{ см}^2$ для нейтронов спектра деления, что в пересчете на одну ячейку памяти составляет $1.7 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2/\text{бит}$ и $1.4 \cdot 10^{-17} \text{ см}^2/\text{бит}$ соответственно. Эта величина на порядок меньше полученной в работе [1], хотя в основе обеих микросхем лежит единая технология SIMOX (Separation by Implantation of Oxygen), что может объясняться различиями в качестве технологии и топологии транзисторов.

Зависимость сечения сбоев σ от линейной передачи энергии LET в области, превышающей пороговое значение, как правило, аппроксимируется функцией Вейбулла

$$\sigma(LET) = \begin{cases} \sigma_{\text{sat}} \left(1 - \exp\left(-\left(\frac{LET - LET_0}{\lambda}\right)^k\right) \right) & LET \geq LET_0, \\ 0 & LET < LET_0, \end{cases} \quad (4)$$

где σ_{sat} — сечение насыщения, LET_0 — пороговое значение линейной передачи энергии, k и λ — параметры распределения. В соответствии с результатами расчетов, приведенными выше на рис. 3, пороговое значение линейной передачи энергии для транзисторов с длиной затвора 0.35 мкм принималось равным $1.8 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2/\text{мг}$. Семейство близлежащих кривых, описывающих зависимость сечения сбоев от линейной передачи энергии для исследованных микросхем статической памяти, приведено на рис. 5.

5. Заключение

Результаты проведенных расчетов показывают, что при движении первичных атомов отдачи и продуктов ядерных реакций вдоль поверхности микросхемы перпендикулярно линиям электрического тока в области вблизи стока транзистора реализуется минимальное значение линейной передачи энергии, достаточное для возникновения обратимого сбоя в ячейке статической памяти. Так как при облучении потоком нейтронов спектра деления заряда, выделившегося при прохождении атомов отдачи и продуктов ядерных реакций по нормали к поверхности микросхемы, оказывается недостаточно для реализации обратимого сбоя, направление вдоль „ширины транзистора“ оказывается единственным возможным.

Из геометрических соображений следует, что сечение данного события составляет $L \times H$, что более чем на порядок меньше сечения $L \times W$, традиционно используемого для оценки сбоеустойчивости микросхем при воздействии тяжелых заряженных частиц космического пространства. Также важным является то, что только нейтроны с большой энергией в спектре (т. е. на „хвосте“ распределения) могут передать энергию, достаточную для реализации обратимого одиночного сбоя. Таким образом, сечение обратимых одиночных сбоев при воздействии потока нейтронов спектра деления должно быть на несколько порядков меньше сечения обратимых одиночных сбоев при воздействии нейтронов с энергией 14 МэВ, что подтверждается экспериментально.

Финансирование работы

Исследование поддержано грантом Российского научного фонда (проект № 18-13-00066).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] С.В. Баранов, Б.В. Васелегин, П.Н. Осипенко, А.И. Чумаков, А.В. Яненко. Микроэлектроника, **37** (1), 52 (2008).
- [2] D. Binder, E.C. Smith, A.B. Holman. IEEE Trans. Nucl. Sci., **22** (6), 2675 (1975).
- [3] J.C. Pickel, J.T. Blandford, jr. IEEE Trans. Nucl. Sci., **25** (6), 1166 (1978).
- [4] T.C. May, M.H. Woods. IEEE Trans. Electron Dev., **26** (1), 2 (1979).
- [5] J.F. Ziegler, W.A. Lanford. Science, **206**, 776 (1979).
- [6] C.S. Guenzer, E.A. Wolicki, R.G. Allas. IEEE Trans. Nucl. Sci., **26** (6), 5048 (1979).
- [7] А.С. Пузанов, С.В. Оболенский, В.А. Козлов, Е.В. Волкова, Д.Г. Павельев. ФТП, **49** (12), 1585 (2015).
- [8] А.С. Пузанов, С.В. Оболенский, В.А. Козлов. ФТП, **52** (11), 1295 (2018).

- [9] И.В. Антонова, В.П. Попов, В.И. Поляков, А.И. Руковишников. ФТП, **38** (12), 1439 (2004).
- [10] К.О. Петросянц, И.А. Харитонов, Е.В. Орехов, Л.М. Самбурский, А.П. Ятманов, А.В. Воеводин. *Сб. тр. 5-й Всеросс. науч.-техн. конф. „Проблемы разработки перспективных микро- и нанозлектронных систем–2012“* (М., ФГБУ ИППМ РАН, 2012) с. 413.
- [11] А.М. Митерев. УФН, **172** (10), 1131 (2002).
- [12] Ф.Ф. Комаров. УФН, **173** (12), 1287 (2003).
- [13] Ф.Ф. Комаров. УФН, **187** (5), 465 (2017).
- [14] А.С. Пузанов, С.В. Оболенский, В.А. Козлов. *Науч.-техн. сб. „Радиационная стойкость электронных систем — Стойкость–2016“* (М., НИЯУ МИФИ, 2016) с. 69.
- [15] А.С. Пузанов, С.В. Оболенский. *Физические и физико-химические основы ионной имплантации: Тез. докл. VI всеросс. конф.* (Нижеий Новгород, 2016) с. 89.
- [16] Электронный ресурс: <http://www.srim.org/>
- [17] Электронный ресурс <https://www.synopsys.com>
- [18] Электронный ресурс <https://www.silvaco.com>

Редактор А.Н. Смирнов

Computational and experimental simulation of soft errors of static memory cells of submicron microcircuits under the influence of neutron fluxes

A.S. Puzanov^{1,2}, M.M. Venediktov^{1,2},
S.V. Obolenskiy^{1,2}, V.A. Kozlov^{1,3}

¹ Lobachevski State University of Nizhny Novgorod,
603950 Nizhny Novgorod, Russia

² Branch of Russian Federal Nuclear Center all-Russian
Research Institute of Experimental Physics „Sedakov
Scientific Research Institute of Measurement Systems“,
603950 Nizhny Novgorod, Russia

³ Institute for Physics of Microstructure,
Russian Academy of Sciences,
603087 Nizhny Novgorod, Russia

Abstract Simulation of soft errors in test samples of static memory microcircuits with design norms of 0.5, 0.35, 0.25 and 0.1 μm under the influence of neutron fluxes with different energies was carried out. It is theoretically and experimentally shown that in modern micro and nanoelectronics products there can be soft errors caused by the fission spectrum neutron flux caused by the passage of primary recoil atoms and nuclear reaction products along the surface of the microcircuit perpendicular to the electric current lines in the area of the transistor drain. On the basis of the proposed model, a series of irradiation experiments of static memory microcircuits with design standards of 0.35 μm was interpreted.