

ОДНОЧНЫЕ СТРУКТУРНЫЕ ПОВРЕЖДЕНИЯ В СБИС

© 2023 г. А. И. Чумаков*

Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ” – АО “ЭНПО СПЭЛС”, Москва, Россия

*E-mail: aichum@spels.ru

Поступила в редакцию 13.02.2023 г.

После доработки 20.04.2023 г.

Принята к публикации 20.04.2023 г.

Представлены результаты анализа проявления одиночных структурных повреждений в элементах СБИС при воздействии нейтронного излучения. Приведены оценки для определения энерговыделения при одном акте взаимодействия нейтронов с атомами кремния в чувствительном микрообъеме элемента СБИС. Определены условия влияния отдельных разупорядоченных областей, кластеров радиационных дефектов, на работоспособность СБИС. Показаны возможности проявления нестационарного отжига даже при стационарном воздействии и аддитивного влияния увеличения обратных токов нескольких элементов СБИС на условия возникновения отказов всей микросхемы.

Ключевые слова: одиночные радиационные эффекты, тяжелые заряженные частицы, СБИС, ускорители ионов

DOI: 10.31857/S0544126923700370, **EDN:** SLCKEZ

1. ВВЕДЕНИЕ

Современная тенденция развития изделий микроэлектроники определяется непрерывным уменьшением активных объемов элементов СБИС и связанных с этим снижением напряжений питания и зарядов переключения. Подобная тенденция приводит к тому, что оценка радиационной стойкости СБИС с использованием традиционных подходов, основанных на усредненных величинах поглощенной энергии в чувствительных объемах, во многих случаях оказывается неприменима из-за статической природы взаимодействия излучения с веществом. Ярким примером подобного поведения являются одиночные радиационные эффекты (ОРЭ), приводящие к сбоям и отказам СБИС, за счет ионизационных потерь отдельных ядерных частиц [1, 2].

Однако, помимо объемной ионизации, имеют место радиационные эффекты, обусловленные структурными повреждениями и накоплением заряда в окислах. Их отличительной особенностью является формирование радиационного эффекта за счет накопления поглощенной энергии в чувствительной области отдельного элемента. Поэтому помимо традиционных ОРЭ, в которых рассматривается только один акт энерговыделения в чувствительном объеме, для этих случаев возможно проявление эффектов при наличии нескольких событий в течение промежутка времени [3, 4]. В этом случае количество взаимодействий ядерных частиц с веществом в активном объеме

элемента, необходимых для проявления радиационного эффекта, превышает одно, но остается достаточно малым. Тем не менее, потенциально возможны отказы отдельных элементов СБИС и при одном акте энерговыделения в чувствительной области отдельного элемента СБИС. В настоящей работе представлены результаты оценок влияния одиночных структурных повреждений (ОСП) применительно к эффектам, обусловленных вводом радиационных дефектов в их чувствительные области. Это является первым шагом для дальнейшей оценки микродозиметрических эффектов в СБИС.

2. ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЕ НА СТРУКТУРНЫЕ ПОВРЕЖДЕНИЯ

Анализ ОСП базируются на оценке энерговыделения, затрачиваемой на дефектообразование (неионизационные потери, NIEL) от одного акта взаимодействия отдельной ядерной частицы в чувствительном объеме [5]. Ярким примером таких ОСП являются “спайки” в ПЗС матрицах [6], но подобные эффекты возможны и в других типах СБИС. Наиболее актуально эта проблема стоит при анализе сбоев и отказов при нейтронном воздействии, обладающих наиболее значимой долей неионизационных потерь, хотя подобные эффекты возможны и при воздействии протонов высоких энергий и тяжелых заряженных частиц.

В отличие от классических ОРЭ, вызванных объемной ионизацией, подход с использованием линейных потерь энергии (ЛПЭ) здесь не приме-

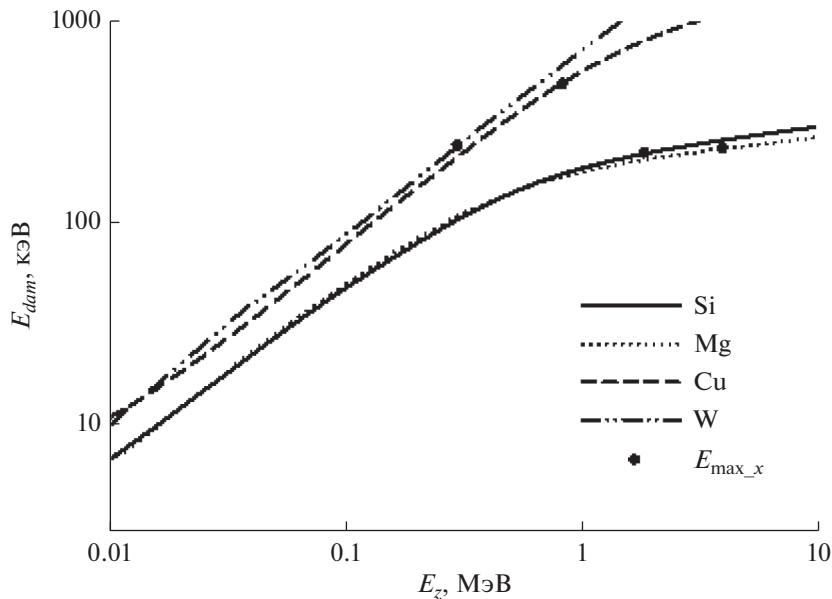


Рис. 1. Энергия, идущая на структурные повреждения в кремнии, в функции энергии вторичных частиц. Символы — максимальная энергия ионов для 14 МэВ нейтронов.

ним, так как в этом случае требуется оценка только энергии, затрачиваемой на дефектообразование. Второй отличительной особенностью, является размытый спектр этой энергии, так как локальные структурные повреждения вызываются вторичными ядерными частицами в результате рассеяния нейтрона или ядерной реакции с ним. В основном, структурные повреждения вызываются первично-выбитыми атомами (ПВА, обычно атомами кремния внутри чувствительного объема элемента СБИС). При этом основная доля энергии выделяется в конце пробега, образуя, как правило, разупорядоченные области (РО) с типичными размерами в районе 25–100 нм [7].

На рис. 1 представлены расчетные зависимости энергии, затрачиваемой на структурные повреждения в кремнии, от энергии ионов с использованием программы SRIM [8], которые потенциально могут попасть в чувствительную область элемента СБИС. Символами на графиках отложены максимальные энергии этих ионов при облучении 14 МэВ нейтронами.

На следующем рисунке (рис. 2) представлены аналогичные зависимости для пробегов в кремнии для этих же ионов. Нетрудно заметить, что для ионов меди и вольфрама даже при их максимальной энергии пробеги крайне малые, что делает маловероятным возникновение ОСП от материалов, входящих в состав металлизации СБИС. Они могут играть только значимую роль при облучении тяжелыми заряженными частицами высоких энергий. Ионы магния, образующиеся в результате ядерной реакции $Si^{28}(n,\alpha)Mg^{25}$, при облучении

14 МэВ нейтронами имеют максимальную энергию среди всех образующихся тяжелых вторичных частиц. При этом различия по энергетике на дефектообразование между ионами магния и кремния не очень существенное, что в ряде случаев позволяет оценки проводить только для ионов кремния, но с учетом суммарного сечения всех процессов взаимодействий нейтронов с кремнием и максимальной энергии, идущей на дефектообразование.

Средняя энергия E_{dam1_av} от одного акта взаимодействия, затрачиваемая на структурные повреждения, при воздействии нейтронов может быть определена из следующего соотношения:

$$E_{dam1_av} = K_{dn}\rho/\Sigma_n, \quad (1)$$

где K_{dn} — величина неионизационных потерь для нейтронов [5], ρ — плотность вещества, Σ_n — макроскопическое сечение взаимодействия нейтронов с веществом. Например для спектра деления ($K_d = 3.8 \times 10^{-11}$ рад см², $\Sigma_n = 0.16$ см⁻¹) получим $E_{dam1_av} = 34$ кэВ, а для 14 МэВ нейтронов ($K_d = 6.1 \times 10^{-11}$ рад см², $\Sigma_n = 0.09$ см⁻¹) — $E_{dam1_av} = 97$ кэВ. При этом значение средней полной энергии ПВА составляет величины порядка 80 кэВ в первом случае и 2 МэВ для 14 второго случая.

Очевидно, что при оценке чувствительности СБИС к ОСП пользоваться только средними величинами нельзя. Необходим полный спектр энерговыделения на структурные повреждения, из которого важна только та часть, которая превышает некоторое пороговое значение E_{do} .

Плотность вероятности выделения энергии на структурные повреждения при однократном вза-

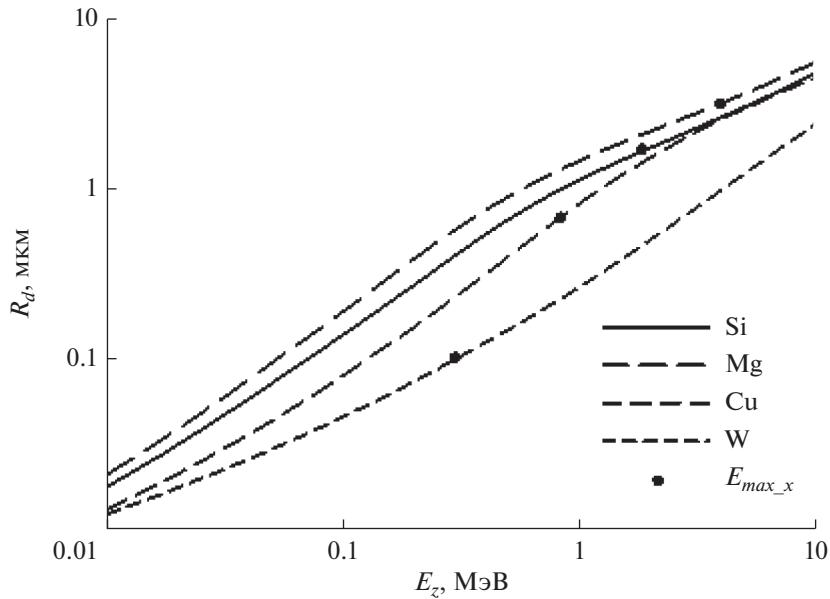


Рис. 2. Пробеги ионов в кремнии в функции его кинетической энергии. Символы – максимальные пробеги ионов для 14 МэВ нейтронов.

имодействии нейтрона с веществом dN/dE_{dam} может быть оценена из следующего соотношения:

$$dN/dE_{dam} = dN/dE_z dE_z/dE_{dam}, \quad (2)$$

где dN/dE_z – энергетический спектр тяжелых вторичных частиц, продуктов рассеяния нейтронов на атомах кремния; dE_z/dE_{dam} – производная для зависимости полной энергии вторичной частицы E_z от энергии E_{dam} , затрачиваемой на структурные повреждения. Последняя зависимость может быть оценена из графиков на рис. 1 или через функцию Линхарда [2]:

$$E_{dam} = E_a/[1 + k_l g(\varepsilon_a)], \quad (3)$$

где $k_l = 0.1334Z^{2/3}A^{-0.5}$; $g(\varepsilon_a) = \varepsilon_a + 0.4\varepsilon_a^{3/4} + 3.4\varepsilon_a^{1/6}$; E_z – энергия ПВА; $\varepsilon_a = E_z/E_l$; E_l – энергия Линхарда ($E_l = 41$ кэВ для Si); Z, A – заряд и атомный вес иона.

Сложнее дело обстоит с оценкой dN/dE_z . В первом приближении можно считать, что при упругом рассеянии отсутствует угловая анизотропия, а для неупругого рассеяния имеет место изотропное распределение вторичных частиц в системе центра масс.

На рис. 3 представлены приближенные зависимости dN/dE_{dam} для трех значений энергий нейтронов: 1, 2.5 и 14 МэВ при сделанных выше предположениях. При воздействии 1 МэВ нейтронов имеет место только упругое рассеяние нейтронов. При энергиях 2.5 МэВ дополнительный включается механизм неупругого рассеяния. Для 14 МэВ нейтронов необходимо также учитывать

образование вторичных частиц – продуктов ядерных реакций.

При указанных предположениях получаем консервативную оценку спектра dN/dE_{dam} . Например, из этих зависимостей значение средней энергии для 14 МэВ нейтронов будет почти на 1/3 больше, чем оценки через соотношение (1). Однако с учетом неопределенностей и погрешностей оценки сечений взаимодействия нейтронов с веществом, можно ориентироваться на полученные консервативные зависимости. Более точные функции могут быть получены с помощью программного обеспечения типа GEANT4 [9], но эти результаты достаточно тяжело распространить на другие элементы СБИС, так как они привязаны к конкретной структуре чувствительного объема.

3. НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ЭФФЕКТЫ

Хотя традиционно считается, что структурные повреждения являются стабильными во времени и слабо отжигаются, тем не менее, на начальном этапе имеет место трансформация образуемых первичных радиационных дефектов (вакансий и междоузлий) в стабильные радиационные эффекты. Эти процессы обычно характеризуют коэффициентом быстрого отжига AF , который изменяется во времени от нескольких единиц до своего стационарного значения $AF = 1$ [10]. Продолжительность этих процессов и максимальное значение AF зависят от многих факторов: уровня инжекции, температуры, типа полупроводниковой структуры и т.п. Типовые значения AF лежат в пределах 2–4, но могут и достигать величины около 10, а для

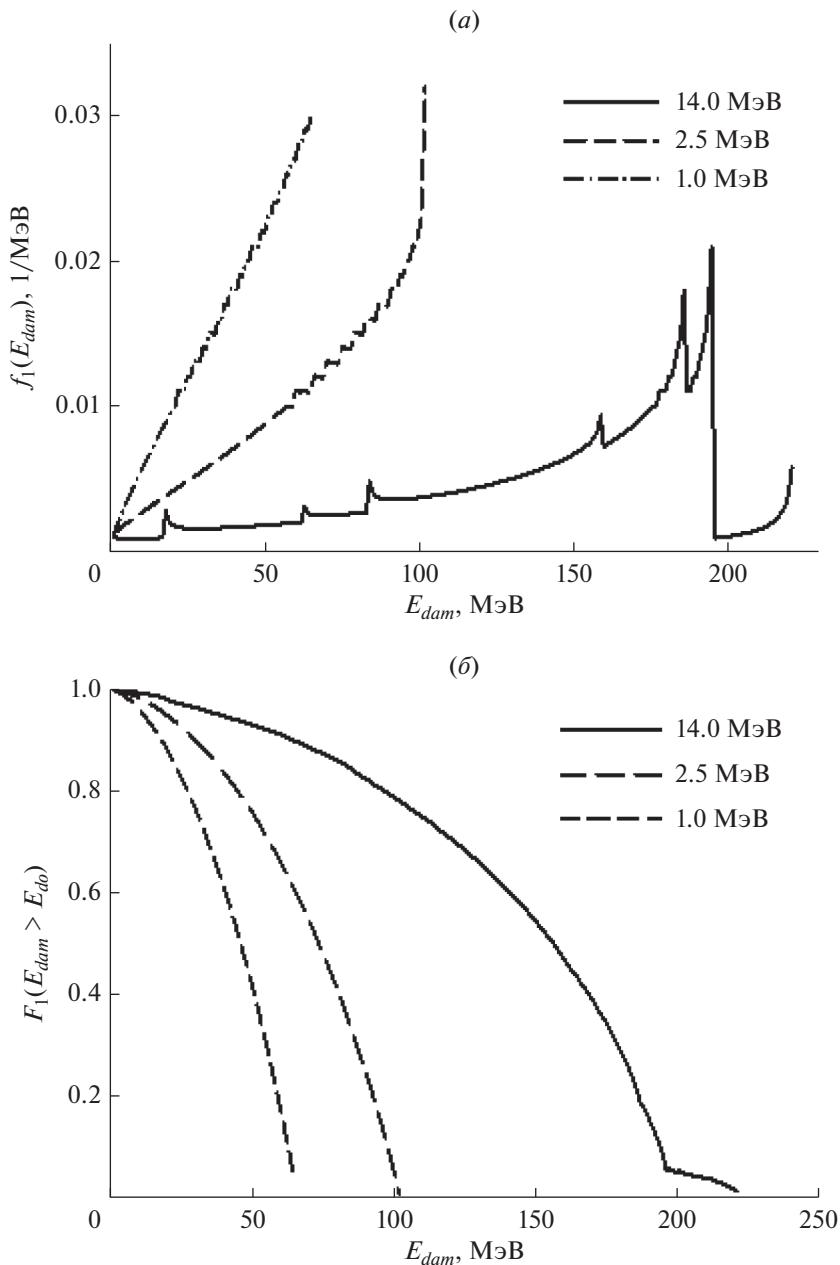


Рис. 3. Дифференциальные (а) и интегральные (б) распределения энергии на дефектообразование при разных значениях энергий нейтронов.

тельность этого процесса может исчисляться секундами.

Любое отдельное взаимодействие нейтрона с веществом может трактоваться как импульсное воздействие с очень короткой длительностью, фактически это дельта импульс во времени. Поэтому с формальной точки зрения учет процессов быстрого отжига приводит к увеличению коэффициента AF энергии, затрачиваемой на структурные повреждения. Поэтому не исключен случай временной потери работоспособности элемента СБИС,

когда после выделения энергии в его чувствительном объеме в течение определенного промежутка времени элемент вышел из режима нормального функционирования [11].

Однако важно отметить, что наряду с неионизационными потерями одновременно имеет место также генерация избыточного заряда. Генерирующий при этом избыточный заряд имеет достаточно высокое значение. Например, при выделении энергии ПВА в области пространственного заряда $p-n$ перехода имеет место увеличение обратного тока

$p-n$ перехода, как за счет собственно ионизационного тока, так и возрастания скорости рекомбинации при вводе радиационных дефектов. Как показывают оценки в начальные моменты времени ионизационный ток доминирует, и только после завершения процессов содирания заряда начинает сказываться влияние на обратный ток радиационных дефектов.

Типовое время завершения диффузионных процессов содирания заряда t_{df} можно оценить из следующего соотношения:

$$t_{df} \approx (10l_c)^2 / D_n \sim 100A_s / D_n, \quad (4)$$

где D_n – коэффициент диффузии неосновных носителей заряда, l_c – эффективная длина содирания носителей заряда [12, 13], A_s – площадь чувствительной области. Например, при $A_s = 0.1 \text{ мкм}^2$ ионизационные процессы завершаться за времена порядка нс. Однако этот процесс может затянуть во времени из-за возможного влияния внутренних и внешних инерционностей СБИС [14]. В дальнейшем будут играть основную роль нестационарные процессы дефектообразования.

4. ОЦЕНКА УРОВНЯ СТОЙКОСТИ ЭЛЕМЕНТА СБИС

При вводе радиационных дефектов уменьшаются время жизни неосновных носителей заряда, концентрация и подвижность основных носителей заряда. Роль двух последних факторов в СБИС не очень велика, в силу исходных малых размеров активных областей и относительно высоких уровней легирования для активных областей (на уров-

не 10^{16} см^{-3} и выше), поэтому остановимся только на анализе деградации характеристик элементов СБИС за счет изменения рекомбинационных свойств в локальной области элемента.

Полученные выше соотношения позволяют провести оценки уровня стойкости отдельного элемента при наличии ОСП через количественную меру повреждения η_d , которая характеризует вероятность возникновения эффекта при одном акте взаимодействия нейтрона в чувствительном объеме элемента СБИС:

$$\eta_d = \int_0^{E_{dam_mx}} \psi_d(E) f_1(E) dE, \quad (5)$$

где $\psi_d(E)$ – функция чувствительности отдельного элемента СБИС. В случае, если необходимо учесть возможность временной потери работоспособности аргумент функции $f_1(E)$ нужно расширить/сдвинуть в область больших энергий, умножив на AF .

В первом приближении $\psi_d(E)$ можно представить в виде ступенчатой функции (все элементы СБИС имеют одинаковый уровень стойкости). В этом случае получаем простое соотношение

$$\eta_d = F_1(E_{dam} > E_{do}), \quad (6)$$

где E_{do} – пороговая энергия, необходимая для отказа.

Величина E_{do} напрямую зависит от величины чувствительного объема элемента V_s и уровня стойкости Φ_n , определяемого через усредненные значения:

$$E_{do} = \Phi_n V_s K_d \rho = \Phi_n V_s E_{dam1_av} \Sigma_n \quad (7)$$

Таким образом, ОСП могут иметь место в СБИС при $E_{do} \sim 200 \text{ кэВ}$ при облучении 14 МэВ нейтронами, а при воздействии 2.5 нейтронов при E_{do} менее 100 кэВ. Данные результаты позволяют оценить проектные нормы, при которых будут иметь место ОСП с учетом ограничений на уровень стойкости и величину чувствительного объема. В качестве типо-

вого уровня стойкости элемента СБИС возьмем величину равную $\Phi_n = 1 \times 10^{15} \text{ нейтрон/см}^2$ при облучении нейтронами со спектром деления.

Связь величины чувствительного объема V_s и проектных норм λ можно представить в следующем виде [15]:

$$V_s \cong 3.5\lambda^2 \lambda^2 2.8\lambda \leq E_{dam1_mx} / (E_{dam1_av} \Sigma_n \Phi_n), \quad (8)$$

где E_{dam1_mx} – максимальная энергия на дефектообразование при одном акте взаимодействия.

При сделанных предположениях получим, что ОСП будут иметь место в СБИС с проектными нормами менее 0.1 мкм для 14 МэВ нейтронов и

0.08 мкм для 2.5 МэВ нейтронов. Это ограничение определяется флюенсом Φ_n , необходимым для отказа отдельного элемента по критериально-му параметру. Если же принять во внимание возможность нестационарных процессов, то ОСП

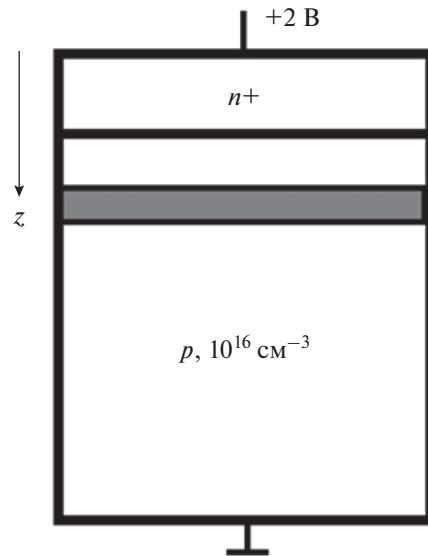


Рис. 4. Структура для оценки влияния РО на изменения обратных токов.

могут иметь место при проектных нормах в два раза больше.

Проведем оценку возможности ОСП в КМОП СБИС. Предположим, что основными причинами отказов КМОП СБИС за счет структурных повреждений является существенное увеличение токов утечек [2, 14]. Увеличение токов утечек происходит в первую очередь из-за роста обратных токов $p-n$ переходов при вводе в него и в соседние с ним области радиационных дефектов.

Оценка влияния создаваемых радиационных дефектов на величину обратного тока проводилась в рамках двумерного численного моделирования простейшей диодной структуры, представленной на рис. 4. Узкий слой толщиной 0.1 мкм и площадью 0.35 мкм² моделировал влияние РО за счет резкого уменьшения в нем времени жизни.

Результаты проведенного численного моделирования показали (рис. 5), что заметные изменения в обратных токах $p-n$ перехода будут иметь место при расположении РО только внутри обедненной области $p-n$ перехода. При этом увеличение обратного тока может быть на более, чем четырех порядка выше по сравнению с исходной величиной.

Эти результаты носят качественный характер, так как на самом деле все разупорядоченная область состоит из субклластеров с типовыми размерами в районе нескольких нм. При этом размеры самой РО зависят от энергии ПВА и на порядок и более превышают размеры субклластеров [7]. Например, при энергии ПВА в районе 50 кэВ сама РО имеет размеры порядка 50 нм. В качестве первого приближения можно принять, что энергия

образования субклластера $E_{sb} \sim 5$ кэВ, тогда их количество N_{sc} и радиус РО r_c можно оценить следующим образом:

$$N_{sc} = E_{dam1}/E_{sb}, \quad (9)$$

$$r_c \approx r_{co} \sqrt[3]{E_{dam1}/E_{sb}} \quad (10)$$

при $r_{co} \cong 15$ нм. Таким образом, при максимальной энергии E_{dam1_mx} потенциально возможно образование до 40 субклластеров, а радиус РО будет порядка 50 нм. Следовательно, в наихудшем варианте одна РО может перекрывать чувствительный объем элемента СБИС с линейными размерами менее 100 нм.

В ряде случаев даже полное перекрытие чувствительной области одной РО не всегда может привести к отказу элемента СБИС. В этом случае надо ориентироваться на субклластеры, которые имеют существенно более высокую концентрацию РД. Перекрытие одним субклластером будет иметь место только при линейных размерах элементов СБИС на уровне нескольких нанометров.

Следует отметить, что в ряде СБИС резкое увеличение обратного тока стокового $p-n$ перехода одного МОП транзистора не всегда может привести к отказу микросхемы. Однако увеличение обратных токов нескольких транзисторов приводит к увеличению статического тока потребления и может вызвать отказ всей СБИС. При этом достижение этого критериального значения будет иметь место при более низких уровнях флюенсов нейтронов, чем это имело бы место при использовании усредненных дозиметрических величин. Например, из рис. 5 видно, что обратный ток может

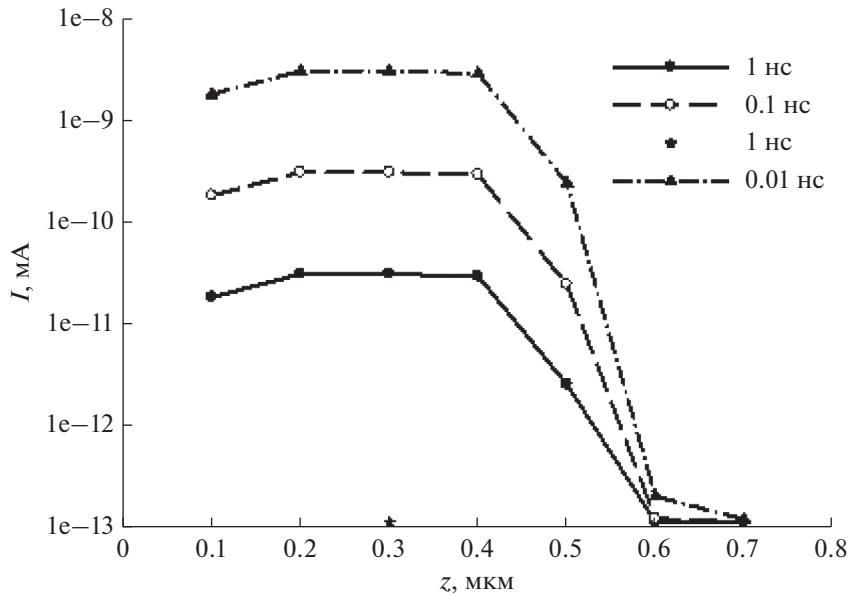


Рис. 5. Изменение обратного тока $p-n$ перехода в зависимости от расположения РО от поверхности кристалла и различных временах жизни в ней.

увеличиваться в отдельном элементе на 3–4 порядка по сравнению с исходным значением. Поэтому даже если, критериальная величина суммарного статического тока потребления превышает исходное значение на порядок, то в среднем это может привести к снижению уровня стойкости к флюенсу нейтронов на 1–3 порядка. Однако эти оценки применимы только к “чисто” нейтронному воздействию. В реальных условиях вместе с ним действует сопутствующее гамма-излучение, которое вызывает более сильное возрастание утечек за счет образования паразитных каналов [2, 14].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты представленной работы позволяют выделить следующие основные выводы:

- максимальное энерговыделение на структурные повреждения в чувствительном микрообъеме элемента СБИС может отличаться в 2–5 раз от своего среднего значения при нейтронном облучении со спектром деления и синтеза;
- потенциально за счет процессов нестационарного отжига возможна временная потеря работоспособности СБИС даже при стационарном воздействии. Однако в области относительно малых времен будут доминировать ионизационные одиночные радиационные эффекты, которые маскируют структурные повреждения;
- одиночные структурные повреждения в элементах КМОП СБИС могут проявляться уже при проектных нормах менее 100 нм, однако они не

всегда могут приводить к потере функционирования всей СБИС;

— отказ СБИС возможен за счет деградации нескольких элементов СБИС при наличии одиночных радиационных эффектов, при этом уровни стойкости будут на 1–3 порядка ниже, чем оцениваемые через усредненные дозовые характеристики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Petersen E. Single Event Effects in Aerospace. Wiley-IEEE Press. 2011. 520 р.
2. Чумаков А.И. Действие космической радиации на ИС. М.: Радио и Связь. 2004. 320 с.
3. Агаханян Т.М., Аствацатуровян Е.Р., Скоробогатов П.К., Чумаков А.И. Физические ограничения на стойкость биполярных полупроводниковых структур в ИМС повышенной степени интеграции к дестабилизирующему воздействиям // Микроэлектроника. 1984. Т. 13. № 5. С. 392–400.
4. Агаханян Т.М., Аствацатуровян Е.Р., Чумаков А.И. Особенности использования БИС и сверхБИС в аппаратуре ядерного физического эксперимента // В сб.: Электронные приборы и схемы для экспериментальной физики / Под ред. Т.М. Агаханяна. М.: Энергоатомиздат. 1983. С. 3–9.
5. <https://www.sr-niel.org/index.php/sr-niel-long-write-up/sr-niel-results>.
6. Ionizing Radiation Effects in Electronics: From Memories to Imagers / Ed. by M. Bagatin and S. Gerardin. Taylor&Francis Group. 2016. 390 р.

7. *Srou J.R., Palko J.W.* Displacement Damage Effects in Irradiated Semiconductor Devices // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2013. V. 60. № 3. P. 1740–1766.
8. <http://www.srim.org>.
9. <https://geant4.web.cern.ch/support>.
10. *McMurray L.R., Messenger G.C.* Rapid annealing factor for bipolar silicon devices irradiated by fast neutron pulse // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1981. V. 28. № 6. P. 4392–4396.
11. *Agahanyan T.M., Astvachaturyan E.R., Chumakov A.I.* On the possibility of controlling non-stationary annealing characteristics in a stationary environment // International J. Electronics. 1986. V. 61. № 1. P. 73–78.
12. Чумаков А.И. Оценка чувствительности интегральных схем к одиночным радиационным эффектам для точечной области сорбции заряда // Микроэлектроника. 2015. Т. 44. № 1. С. 34–40.
13. *Chumakov A.I.* Modified Charge Collection Model by Point Node for SEE Sensitivity Estimation // Proceedings of the European Conference on Radiation and its Effects on Components and Systems, RADECS. 2015. December. P. 511–515.
14. Радиационная стойкость изделий ЭКБ: Научное издание // Под ред. А.И. Чумакова. М.: НИЯУ МИФИ. 2015. 512 с.
15. *Xiao-Ming Jin.* Single event upset on static random access memory devices due to spallation, reactor, and monoenergetic neutrons // Chinese Phys. B 28. № 10. 2019. P. 104212-1–104212-10.