

Особенности оценки ионизационной реакции СБИС при импульсном нейтронном воздействии

А.И. Чумаков^{1,2}, К.А. Чумаков³, С.Ю. Дианков⁴

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, г. Москва

²АО «ЭНПО Специализированные электронные системы», г. Москва, aichum@spels.ru

³ФГУ «Федеральный научный центр НИИСИ РАН», г. Москва

⁴ФГБУ 46 ЦНИИ МО РФ, г. Москва

Аннотация — Представлен подход для моделирования ионизационной реакции СБИС при воздействии импульсного нейтронного излучения за счет генерации электронно-дырочных пар в полупроводниковых структурах. Показано, что в зависимости от интенсивности воздействия ионизационная реакция формируются интегрированной реакцией всего кристалла, одиночными радиационными эффектами или одиночными ионизационными эффектами, имеющими место с одновременным формированием импульса ионизационного тока. Представлены критерии для определения каждой из этих областей формирования ионизационной реакции. Во всех областях интенсивностей нейтронного излучения представлены модели для оценки уровней сбоев в СБИС.

Ключевые слова — Объемные ионизационные радиационные эффекты, импульсное нейтронное излучение, интегрированная ионизационная реакция, одиночные радиационные эффекты.

I. ВВЕДЕНИЕ

При воздействии нейтронного импульса за счет генерации заряда вторичными частицами - продуктами упругого или неупругого рассеяния нейтронов на атомах вещества формируется ионизационная реакция СБИС, приводящая, в первую очередь, к сбоям. Традиционный подход базируется на оценке величины ионизационного тока с учетом ионизационной способности нейтронов и формы импульса излучения [1-2]. Вместе с тем, в современных СБИС от нейтронного излучения возможно также возникновение одиночных сбоев [2-4]. При этом очевидно, что классическая ионизационная реакция (ИР) от нейтронного излучения за счет объемной ионизации всей полупроводниковой структуры будет доминировать при достаточно высоких интенсивностях уровнях воздействия, тогда как одиночные радиационные эффекты (ОРЭ) будут проявляться в области низких интенсивностей.

Следует отметить, что для современных СБИС уровни сбоев определяются интегрированной ИР всего кристалла за счет эффекта «просадки» питания. Этот эффект никак практически не связан с уровнями переключения отдельных элементов и структур внутри СБИС. Поэтому не следует ожидать корреляции между

уровнями отказов в области высоких и низких интенсивностей воздействия. Вместе с тем, совершенно не затронут вопрос, об уровнях сбоеустойчивости в области средних интенсивностей нейтронного излучения. В настоящей работе представлены подходы для оценки уровней сбоев СБИС во всем диапазоне интенсивностей при воздействии нейтронного импульса.

II. ИНТЕГРИРОВАННАЯ ИОНИЗАЦИОННАЯ РЕАКЦИЯ СБИС

Традиционный подход при оценке уровней сбоев СБИС при воздействии импульсного ионизирующего излучения базируется на схемотехническом включении генераторов ионизационного тока параллельно всем обратным смещенным p-n переходам [2]. Не говоря о практической нереализуемости такого моделирования в СБИС из-за невозможности определить параметры всех генераторов ионизационного тока и сложности вычислительных процедур, он методически не корректен. Основная сложность заключается в необходимости учета перераспределения потенциалов по всему объему полупроводниковой структуры за счет протекания больших импульсных ионизационных токов. Именно этот эффект - «просадка» питания (rail span collapse) и будет определять уровни сбоев в СБИС. С этой точки зрения попытки распространения результатов расчетно-экспериментального моделирования отдельных тестовых структур на весь кристалл СБИС заведомо приведут к неверным выводам.

Грубая оценка уровней сбоев СБИС может быть проведена из анализа ИР в цепи питания, так как именно в ней формируется ионизационные токи от всех элементов, входящих в состав СБИС [5]. При этом в цепи питания наблюдается не импульс ионизационного тока, а именно ИР, которая определяется интегрированием этого тока на внутренних емкостях отдельных элементов и всего кристалла СБИС, которая может достигать величин единиц-десятков нФ. Так собиравание заряда идет со всей полупроводниковой структуры, то чувствительная область V_{ic} будет определяться площадью кристалла A_{ic} , умноженную на эффективную длину собиравания W_{ef} . Последняя величина меняется в широких пределах от долей мкм для тонко-

пленочных структур типа КНИ до десятков мкм, определяемой диффузионной длиной в подложке. С учетом сделанных предположений величина V_{ic} в СБИС находится в диапазоне от 10^{-1} до 10^{-5} см³.

Амплитудно-временные характеристики ИР СБИС по цепи питания в сильной степени зависят как от особенностей самой микросхемы, в первую очередь, ее внутренней инерционности, так и формы импульса нейтронного излучения. При этом использовать для оценок исходную форму импульса нейтронов (плотности потока нейтронов) некорректно, так как ионизирующая способность нейтронов зависит от их энергии.

Действительно, надо иметь в виду, что по мере удаления от источника нейтронов длительность импульса увеличивается. Это происходит за счет того, что время пролета t_r от источника до детектора зависит от энергии нейтронов E :

$$t_r \cong R / c \sqrt{2E/m_n}, \quad (1)$$

где c - скорость света, m_n - масса нейтрона в МэВ (939.6 МэВ), R - расстояние от источника до детектора, и по мере удаления от источника импульс растягивается во времени.

Предположим, что у нас действует мгновенный источник нейтронов со спектром деления dN_n/dE :

$$\frac{dN_n}{dE} = k_f \cdot e^{-\frac{E}{E_0}} \cdot sh \left(\sqrt{\frac{2E}{E_0}} \right). \quad (2)$$

где E энергия нейтронов в МэВ, $E_0=1$ МэВ, а k_f - коэффициент нормировки для нейтронов деления.

В этом случае оценка плотности потока нейтронов без учета поглощения в окружающей среде на удалении R от источника нейтронов приводит к следующему результату:

$$\frac{dN_n(t)}{dt} = k_d \cdot \exp \left(-\frac{E(t)}{E_0} \right) \cdot sh \left(\sqrt{\frac{2E(t)}{E_0}} \right) \cdot \frac{2E(t)}{t}. \quad (3)$$

где $E(t) = \frac{m_n}{2} \cdot \left(\frac{R}{c \cdot t} \right)^2$.

Ионизационная способность нейтронов в диапазоне энергий 0.1...15 МэВ меняется почти на два порядка, из-за чего нейтроны с малой энергией будут давать существенно меньший вклад в общую ионизацию полупроводниковой структуры. Форма импульса мощности поглощенной ионизационной дозы получается путем умножения плотности потока на K_i - коэффициент ионизационных потерь от нейтронов. Это обстоятельство приводит к уменьшению длительности импульса (3) эквивалентной мощности дозы $P_n(t)$ за счет различной эффективности ионизации при разных энергиях нейтронов. Надо иметь в виду, что коэффициент K_i будет также зависеть от полупроводникового материала, так как помимо энергии нейтронов коэффициент ионизационных потерь K_i зависит от химического состава материала.

Следует отметить, что нейтронный спектр не является фиксированным на различных расстояниях от источника, так как имеют место потери энергии нейтронов при взаимодействии их с веществом, например, с атомами, входящими в состав атмосферы. Поэтому из-за замедления нейтронов будет происходить более сильное увеличение длительности эквивалентной мощности дозы нейтронного импульса.

Величина порогового уровня мощности дозы для возникновения массовых сбоев при заданной форме импульса ионизирующего излучения определяется из условия достижения ионизационной реакции (ИР) $U(t)$ некоторой критической величины. Это может быть напряжение отпираания закрытого р-п перехода, уровень помехоустойчивости логического элемента, амплитуды скачка напряжения в цепи питания и т.п. Типичное значение этой величины для СБИС лежит около 1 В.

Амплитудно-временные характеристики ИР будут определяться как формой импульса эквивалентной мощности дозы, так и параметрами самого изделия, в первую очередь, собственной ионизационной постоянной времени τ_i . Приближенно оценку ИР $U(t)$ можно провести с помощью следующего соотношения:

$$U(t) = k_U \cdot P_m \int_0^t f(t-x) \cdot h(x) dx, \quad (4)$$

где P_m - амплитуда мощности поглощенной дозы нейтронного излучения с нормированной формой импульса $f(t)$; k_U - коэффициент пропорциональности между мощностью дозы и напряжением [2]; $h(t)$ - импульсная переходная характеристика [6]:

$$h(t) = \left[1 + \left(\frac{\tau_i}{t} \right) \right]^{-\nu-1} \left(\frac{\tau_i}{t} \right)^{1+1/\nu}. \quad (5)$$

где показатель по умолчанию можно принять $\nu=1.5$.

На рис. 1 в качестве примера представлены ИР на расстоянии 10 м от точечного источника нейтронов со спектром деления при трех значениях инерционности СБИС. Наблюдаемые немонотонности в зависимостях обусловлены особенностью энергетической зависимости сечений взаимодействия нейтронов с кремнием.

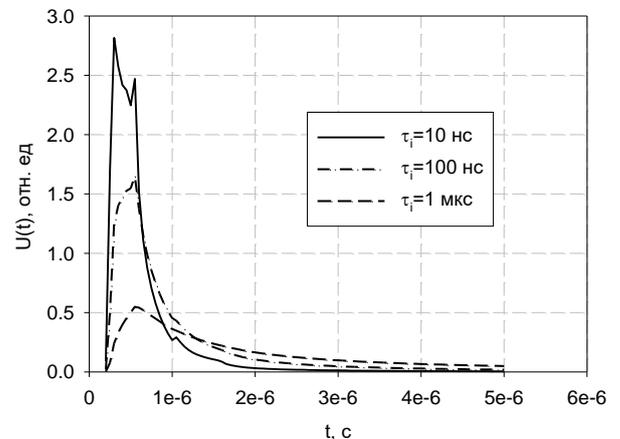


Рис. 1. Ионизационная реакция СБИС в цепи питания на расстоянии 10 м от источника нейтронов при трех значениях ее инерционности

Необходимо отметить следующий парадокс для СБИС при формировании интегрированной ИР всего кристалла. Несмотря на увеличение быстродействия отдельных логических элементов СБИС по мере уменьшения проектных норм, собственная ионизационная постоянная времени, как правило, увеличивается. В современных СБИС она лежит в пределах от сотен наносекунд до единиц микросекунд. Данное обстоятельство обусловлено ростом емкости всего кристалла. Этот факт также подтверждает невозможность прогнозирования уровня радиационной стойкости всего кристалла на основе анализа ИР отдельных тестовых структур.

Для грубых оценок при воздействии относительно короткого нейтронного импульса с длительностью менее 100 нс, когда ИР в цепи питания носит преимущественно емкостной характер, можно воспользоваться следующим соотношением [3]:

$$\Delta U(t) = \frac{Q_o}{C_{ic}} \exp\left(-\frac{t}{R_{ic}C_{ic}}\right), \quad (6)$$

где Q_o – величина полного собранного заряда, C_{ic} – емкость кристалла СБИС, R_{ic} – эквивалентное сопротивление в цепи питания с учетом вкладов контактов, подложки и токоподводящих дорожек.

В свою очередь, оценка полного заряда может быть сделана из предположения, что все р-п переходы, в первую очередь, карман-подложка дают вклад в его величину:

$$Q_o \approx q \cdot g_o \cdot K_i \cdot \Phi_n \cdot A_{ic} \cdot W_{ef}, \quad (7)$$

где q – заряд электрона, g_o – скорость генерации носителей заряда ($g_o = 4.3 \cdot 10^{13}$ 1/(рад(Si)см³)), Φ_n – флюенс нейтронов. При типичных значениях параметров в объемных СБИС для спектра деления этот заряд будет находиться в районе $\sim 2 \cdot 10^{-18} \cdot \Phi_n$ Кл. Однако следует отметить, что соотношения справедливы только для небольших расстояний не более нескольких метров, так как при увеличении его длительность импульса нейтронов возрастает, и зарядовая модель (6) будет уже некорректной.

III. ОДИНОЧНЫЕ РАДИАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ

Большое локальное энерговыделение в чувствительном микрообъеме при воздействии нейтронного излучения со спектром деления и синтеза (с энергий E_n нейтронов в диапазоне 0.1...20 МэВ) осуществляется за счет относительно высокоэнергетичных тяжелых вторичных частиц в процессах упругого и неупругого рассеяний [2,3,7,8]. Возникновение одиночных радиационных эффектов (ОРЭ) при более низких энергиях нейтронов обусловлено частными механизмами резонансных ядерных реакций, в частности, ядерными реакциями на атомах бора при воздействии тепловых нейтронов. Однако вероятность таких событий достаточно низкая.

Аналитическую оценку сечений возникновения ОРЭ $\sigma_i(E_n)$ в СБИС при воздействии быстрых нейтронов можно осуществить, принимая во внимание только

первично-выбитые атомы кремния, возникающие при упругом и неупругом рассеяниях, а также атомы магния, возникающие в процессе ядерной реакции с выходом альфа-частицы [3]. Важно отметить, что одиночные сбои от нейтронного воздействия имеют место практически во всех микросхемах с проектными нормами менее 1 мкм, а отказы фактически не наблюдаются до проектных норм около 45 нм. Однако в изделиях нанoeлектроники потенциально уже возможно возникновение тиристорных эффектов, а также отказы, обусловленные скоплением радиационных дефектов в малой локальной области. Фактически можно ожидать в них отказы типа спайков, наблюдаемых в ПЗС структурах.

Оценка чувствительности СБИС в этом случае оценивается по средней частоте возникновения ОРЭ [2, 9] v :

$$v = \int_{E_o}^{E_{mx}} \sigma(E) \cdot \varphi_n(E) dE, \quad (8)$$

где E_{mx} – максимальная энергия нейтронов, E_o – пороговая энергия нейтронов для возникновения ОРЭ, σ – сечение возникновения ОРЭ, которое зависит от их энергии, φ_n – энергетическая плотность потока нейтронов, которая зависит от времени (1).

Таким образом, на некотором расстоянии от источника нейтронов без учета трансформации спектра в окружающей среде можно будет считать, что ОРЭ прекратятся после интервала времени t_o , определяемого из соотношения:

$$t_o \cong R / \left(c \sqrt{2E_o/m_n} \right). \quad (9)$$

В современных СБИС пороговая энергия возникновения одиночных сбоев (ОС) E_o при воздействии нейтронов, как правило, меньше 2 МэВ. Это дает основание связать пороговую энергию (МэВ) с зарядом переключения отдельного логического элемента Q (ФКл), принимая во внимание только механизм упругого рассеяния нейтрона на атомах кремния [3]:

$$E_o \cong 0.2 Q. \quad (10)$$

Таким образом, с использованием соотношений (9) и (10) несложно провести оценку времени потери работоспособности СБИС на некотором удалении от источника нейтронов за счет эффектов одиночных сбоев.

Однако эти оценки имеют некоторые ограничения. Одно из них, как было отмечено выше, связано с трансформацией спектра нейтронов при прохождении окружающей среды, а другое с минимальной частотой возникновения ОРЭ.

Очевидно, что минимальная частота должна быть по порядку величины сравнима с интенсивностью отказов λ [10]. Данное условие накладывает ограничение на минимальную величину φ_n :

$$\int_{E_o}^{E_{mx}} \sigma(E) \cdot \varphi_n(E) dE > a \cdot \lambda, \quad (11)$$

где a - коэффициент запаса. Из решения этого неравенства можно определить максимальное расстояние от источника нейтронов, где могут еще влиять ОРЭ на функционирование электронной аппаратуры.

IV. ОБЛАСТЬ СРЕДНИХ ИНТЕНСИВНОСТЕЙ

На первый взгляд представляется, что в области средних интенсивностей ИР будет формироваться из импульсов ИР отдельных элементов, которые распределены по закону Пуассона по времени с наложением их друг на друга около границы высоких интенсивностей и отдельных импульсов вблизи границы ОРЭ. Однако такой подход не совсем корректен из-за различий в эффективных объемах, формирующих ИР.

Как было отмечено выше, в области высоких интенсивностей формируется интегрированная ионизационная реакция всем кристаллом СБИС. Поэтому чувствительный объем V_{ic} в этом случае фактически определяется величиной площади кристалла A_{ic} , умноженной на эффективную длину собирания неравновесного заряда с подложки кристалла W_{ef} (рис. 2).

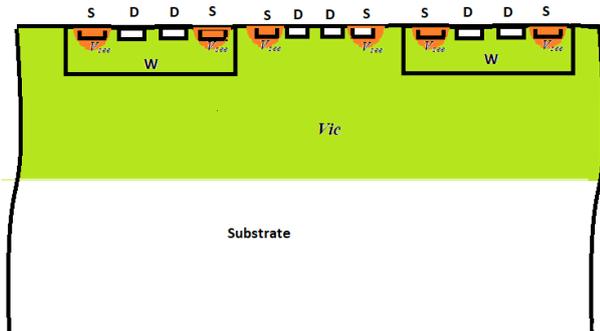


Рис. 2. Чувствительные области по эффектам массовых сбоев (зеленая) и ОРЭ (коричневые): S – сток, D – исток, W - карман

В первом приближении можно положить для объемной технологии W_{ef} равной диффузионной длине неосновных носителей заряда для подложки. В этом случае типичная величина V_{ic} будет по порядку величины в районе 10^{-2} см³.

Совершенно другой случай реализуется при оценке чувствительного объема для ОРЭ. Чувствительный объем V_{see} будет определяться фактически размерами на уровне отдельного транзистора (рис.2) [11-13]. Только для ряда ОРЭ (тиристорные эффекты, многократные сбой), связанных с паразитными структурами, эти размеры будут коррелировать с частью объема кармана [14,15]. Но для спектра деления нейтронов вероятность этих событий для технологии с проектными нормами не менее 28 нм крайне низкая.

Таким образом, условие наложения импульсов от отдельных взаимодействий нейтронов можно оценить из условия:

$$\Sigma_n \cdot V \cdot \psi_n \cdot \tau \sim 1, \quad (12)$$

где Σ_n – макроскопическое сечение взаимодействие нейтронов с веществом ($\Sigma_n \approx 0.15$ 1/см в кремнии для спектра деления), V – чувствительный объем, ψ_n – плотность потока нейтронов, τ – характерное время возникновения радиационного эффекта.

В случае формирования интегрированной ионизационной реакции неравенство (12) приводит к следующим типовым величинам на минимальную плотность потока нейтронов: $\psi_n \sim 10^9 \dots 10^{10}$ нейтрон/см². При таких плотностях потока нейтронов эквивалентная мощность поглощенной дозы оставляет не более 1 рад(Si)/с, что является крайне малой величиной, не способной приводить к массовым сбоям.

Подобное ограничение при оценке наложения ОРЭ приводит к тому, что плотность потока нейтронов не должна превышать $10^{23} \dots 10^{25}$ нейтрон/см². При этом эквивалентная мощность поглощенной дозы будет порядка более 10^{10} рад(Si)/с. Очевидно, что при этих уровнях уже будут место массовые сбои.

Представленные оценки показывают, что фактически область промежуточных интенсивностей отсутствуют по критерию наложения ОРЭ для отдельного элемента. Это означает, что в области средних интенсивностей отдельные ОРЭ будут иметь место на фоне интегрированной ИР (рис. 3). А как было отмечено выше, интегрированная ионизационная реакция практически сводится к «просадке» питания. Другими словами, в области средних интенсивностей будут иметь место ОРЭ на фоне уменьшенного эффективного напряжения питания. При этом, как правило, чувствительность по ОРЭ к эффектам отказов уменьшается, а к эффектам сбоев – увеличивается.

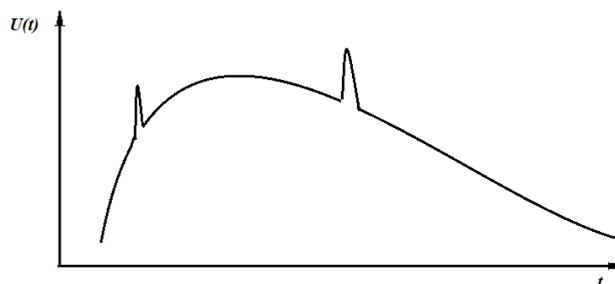


Рис. 3. ИР в области средних интенсивностей

Представленные результаты позволяют провести оценки областей возникновения формирования ИР для разных интенсивностей нейтронного излучения (рис. 4). В первой области (1), ближайшей к источнику нейтронов, формируется интегрированная ионизационная реакция. Очевидно, что для нее минимальная плотность нейтронов $\psi_{n,min}$ ограничена началом области возникновения массовых сбоев за счет просадки питания. Далее начинается область средних интенсивностей (рис. 4, 2), граница которой с другой стороны определяется отсутствием практического влияния напряжения питания на чувствительность к ОРЭ. Ее можно установить на уровне 10% от номинального напряжения питания. Таким образом, вся область

средних интенсивностей находится в диапазоне (1-0.2) $\psi_{n, \text{max}}$, т.е. область в границах между R_m и $2R_m$, где R_m - радиус определяется условием формирования интегрированной ионизационной реакции. За пределами этого радиуса находится область возникновения ОРЭ (рис. 4, 3). Ее максимальный размер оценивается из условия (11).

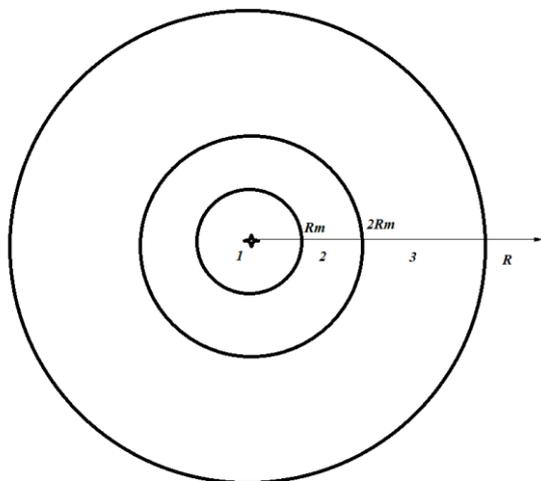


Рис. 4. Области формирования ИР в зависимости от удаления от источника нейтронов

Представленные результаты носят оценочный характер, так как для более корректных оценок необходимо принимать влияние сопутствующего гамма импульса, который может изменить радиус R_m . Еще один существенный фактор обусловлен изменением нейтронного спектра по мере прохождения через внешнюю среду.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрены особенности формирования сбоев и отказов в СБИС во всем диапазоне интенсивностей нейтронного излучения. Показано, что в области высоких интенсивностей нейтронного излучения уровни сбоев и отказов определяются интегрированной ионизационной реакцией всего кристалла, при этом в качестве чувствительной области выступает вся площадь кристалла, умноженная на эффективную длину собирания неосновных носителей заряда.

В области низких интенсивностей уровень стойкости определяется частотой возникновения одиночных радиационных эффектов, оценка которой проводится на основании данных о сечении эффектов. Чувствительная область определяется размерами области собирания для отдельных активных или паразитных элементов.

Из-за различий в размерах чувствительных областей для областей низких и высоких интенсивностей в промежуточном диапазоне на фоне интегрированной ионизационной реакции возникают отдельные одиночные радиационные эффекты. При этом их чувствительность меняется из-за изменения эффективного напряжения питания при протекании ионизационного тока. Эта область практически имеет радиус в два раза

больше, чем область высоких интенсивностей.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Чумаков А.И. и др. Особенности оценки радиационной стойкости интегральных схем к нейтронному воздействию // Безопасность информационных технологий, 2021. Т. 28. № 2. С. 34-43.
- [2] Радиационная стойкость изделий ЭКБ. Научное издание./Под ред. А.И. Чумакова. М.:НИЯУ МИФИ, 2015, 512 с.
- [3] Чумаков А.И. Оценка чувствительности СБИС к одиночным радиационным эффектам при нейтронном воздействии // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС). 2020. Выпуск 2. С. 153-157. doi:10.31114/2078-7707-2020-2-153-157
- [4] Титовец Д.О. и др. Использование функции генерации заряда при оценке параметров чувствительности КМОП микросхем к одиночным сбоям при воздействии нейтронов // Безопасность информационных технологий. 2020. Т. 27. № 3. С. 89-97.
- [5] Чумаков А.И. Моделирование эффекта «просадки» питания в ИС при воздействии импульса ионизирующего излучения // Микроэлектроника. 2006. Т.35. №3. С.184-190.
- [6] Чумаков А.И., Согоян А.В., Яненко А.В. Ограничения методов оценки стойкости изделий микроэлектроники к одиночным радиационным эффектам на ускорителях ионов // Микроэлектроника. 2022. Т 51. № 1. С. 19–27.
- [7] Баранов С.В. и др. Моделирование локальных радиационных эффектов при воздействии высокоэнергетичных нейтронов в тестовых образцах СБИС, изготовленных по различным технологиям // Микроэлектроника. 2008. Т 37. № 1. С. 52–59.
- [8] Стенин В.Я., и др. Перспективы использования субмикронных КМОП СБИС в сбоеустойчивой аппаратуре, работающей под воздействием атмосферных нейтронов // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем - 2008. Сборник научных трудов / под общ. ред. А.Л.Стемпковского. М.:ИППМ РАН, 2008. С. 256-259.
- [9] Согоян А.В., Смолин А.А., Чумаков А.И. Оценка соответствия интегральных схем требованиям по стойкости к воздействию тяжелых заряженных частиц // Безопасность информационных технологий. 2020. Т.27. №1. С.68-82.
- [10] Надежность ЭРИ. Справочник. М.: МО РФ, 2006. 641 с.
- [11] Sogoyan A.V., Chumakov A.I., Smolin A.A. SEE rate estimation based on diffusion approximation of charge collection // Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. 2018. V. 418. P. 87-93.
- [12] Petersen E.L., et. al. Rate prediction for single event effects-a critique // IEEE Trans. On Nucl. Sci. 1992. V.39, P. 1577-1599.
- [13] Petersen E. Single Event Effects in Aerospace. John Wiley & Son. 2011. 520 p.
- [14] Чумаков А.И. и др. Нестабильные одиночные тиристорные эффекты в КМОП ИС // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем. 2018. Выпуск 4. С. 177-181. doi:10.31114/2078-7707-2018-4-177-181
- [15] Boruzdina A.B., et al. Temperature Dependence of MCU Sensitivity in 65nm CMOS SRAM // IEEE Trans. On Nucl. Sci. NS. 2015. V.62. P 2860–2866.

Evaluation of VLSI Ionization Response Under Pulsed Neutron Exposure

A.I. Chumakov^{1,2}, K.A. Chumakov³, S.Y. Diankov⁴

¹National Research Nuclear University MEPhI, Moscow

²Specialized Electronic Systems, Moscow, aichum@spels.ru

³Scientific Research Institute for System Analysis of RAS, Moscow

⁴46 Central Research Institute, Moscow

Abstract — An approach for VLSI ionization response simulation under pulsed neutron irradiation due to the generation of electron-hole pairs in semiconductor structures is presented. The ionization response is determined by integrated ionization response in power circuits (rail span collapse) of the entire chip crystal for high intensity, single event effects (SEE) occur for low intensity range and SEEs for changing effective power voltage appear in the intermediate intensity range. The criteria for determining each intensity range are presented.

The ionization response depends on neutron pulse intensity. There are three ranges of neutron radiation intensity: high, medium and low intensities. The integrated ionization response in power circuits (rail span collapse) determines level of radiation hardness for high neutron pulse intensity. Sensitive volume depends on VLSI chip area and effective charge collection level. These values lie in the range between $10^{-4} \dots 10^{-1} \text{ cm}^3$. Simplified approach to estimate level of radiation hardness is considered.

Single event effects (SEE) are the main radiation effects for low neutron irradiation intensity. Traditional approach to estimate SEE rate can be applied for this region. It is necessary to take into account the typical SEE effective volumes in this case, which depend on sizes of separate VLSI elements.

The model for the intermediate region of neutron radiation intensities is based on SEE sensitivity parameters dependence on supply power voltage. The distance for these effects is twice more than high intensity one.

Keywords — ionization effects in semiconductor, pulse neutron irradiation, rail span collapse, single event effects.

REFERENCES

- [1] Chumakov A.I., et al. Some aspects of IC radiation hardness evaluation when exposed to neutrons // IT Security (Russia). 2021. V. 28. № 2. S. 34-43. (in Russian).
- [2] Radiacionnaya stoikost izdeliy EKB (Radiation hardness of electronic parts) /Pod red. A.I. Chumakov. M. NRNU MEPhI. 2015. 512 s. (in Russian)
- [3] Chumakov A.I. Estimation of single event effect sensitivity in VLSI to neutron irradiation // Problems of Perspective Micro- and Nanoelectronic Systems Development - 2020. Issue 2. P. 153-157. doi:10.31114/2078-7707-2020-2-153-157 (in Russian).
- [4] Titovets D.O., et al. Evaluating CMOS chip sensitivity parameters to single event upsets under influence of neutrons by the burst generation rate function // IT Security (Russia). 2020. V. 27. № 3. P. 89-97. (in Russian).
- [5] Chumakov A.I. Modeling rail-span collapse in ICs exposed to a single radiation pulse //Russian Microelectronics. 2006. V. 35, № 3. P. 156-161.
- [6] Chumakov A.I., Sogoyan A.V., Yanenko A.V. Limitations of Methods for Evaluating the Hardness of Microelectronic Devices to Single Event Effects on Ion Accelerators // Russian Microelectronics. 2022. V. 51, № 1, P. 16-23.
- [7] Baranov S.V., et al. Simulating single-event effects associated with high-energy neutrons for different VLSI technologies //Russian Microelectronics. 2008. V. 37.№1. P. 47-54.
- [8] Stenin V.Ya., et al. Prospects of using submicronic CMOS VLSI in failure-proof equipment working under impact of atmospheric neutrons // Problems of Perspective Micro- and Nanoelectronic Systems Development - 2008. Proceedings / edited by A. Stempkovsky, Moscow, IPPM RAS, 2008. P. 256-259. (in Russian).
- [9] Sogoyan A.V., Smolin A.A., Chumakov A.I. Single event effects qualification of integrated circuits // IT Security (Russia). 2020. V. 27. №1. S. 68-82. (in Russian).
- [10] Reliability of electronic parts. Handbook. M., 2006. 641 s. (in Russian).
- [11] Sogoyan A.V., Chumakov A.I., Smolin A.A. SEE rate estimation based on diffusion approximation of charge collection // Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. 2018. Vol. 418. P. 87-93.
- [12] Petersen E.L., et. al. Rate prediction for single event effects-a critique // IEEE Trans. On Nucl. Sci. 1992. V.39, P. 1577-1599.
- [13] Petersen E. Single Event Effects in Aerospace. John Wiley & Son. 2011. 520 p.
- [14] Chumakov A.I., et al. Non-Stable Single Event Latch-up // Problems of Perspective Micro- and Nanoelectronic Systems Development - 2018. Issue 4. P. 177-181. doi:10.31114/2078-7707-2018-4-177-181 (in Russian).
- [15] Boruzdina A.B., et al. Temperature Dependence of MCU Sensitivity in 65nm CMOS SRAM // IEEE Trans. On Nucl. Sci. NS. 2015. V.62. P 2860-2866.