

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОЙ ОБЛАСТИ МОП-ТРАНЗИСТОРА К ВОЗДЕЙСТВИЮ ВТОРИЧНЫХ ЧАСТИЦ, ВОЗНИКАЮЩИХ ВСЛЕДСТВИЕ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2023 г. А. А. Глушко^а, *, С. А. Морозов^а, **, М. Г. Чистяков^б, ***

^аФедеральное государственное учреждение “Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук”, Нахимовский проспект, 36, к. 1, Москва, 117218 Россия

^бФедеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)”, ул. 2-я Бауманская, 5, к. 1, Москва, 105005 Россия

*E-mail: andrei19386@mail.ru

**E-mail: Sergey_Morozov@srisa.ru

***E-mail: chistyakov.mikhail.g@gmail.com

Поступила в редакцию 06.04.2023 г.

После доработки 20.04.2023 г.

Принята к публикации 22.04.2023 г.

Ранее было показано [1, 2], что зависимость сбоеустойчивости ячейки статической оперативной памяти от энергии вторичных частиц, возникающих в результате воздействия потока нейтронов, не учитывает другой существенный фактор — в какой части транзистора произошла генерация этих вторичных частиц. Для определения области ячейки памяти, в которой воздействие вторичных частиц может привести к возникновению сбоя, была исследована вероятность возникновения сбоя в зависимости от места возникновения вторичной частицы. Предложен метод анализа накопленного заряда для оценки сбоеустойчивости ячейки статической оперативной памяти в зависимости от места возникновения вторичной частицы, и заряда, соответствующего запасу статической помехоустойчивости. Анализ проводился на основе результатов приборно-технологического моделирования одиночного МОП-транзистора, входящего в состав ячейки статической оперативной памяти, и интегрирования полученных значений токовых откликов от областей транзистора.

Ключевые слова: TCAD, вторичные частицы, СОЗУ, МОП

DOI: 10.31857/S0544126923700448, **EDN:** NXDJBB

1. ВВЕДЕНИЕ

Вопросы радиационной стойкости электронной аппаратуры являются чрезвычайно важными с позиции ее проектирования и эксплуатации. Разработка сбоеустойчивой аппаратуры, отвечающей требованиям по снижению массогабаритных параметров, невозможна без обеспечения сбоеустойчивости электронной компонентой базы (ЭКБ). Для создания ЭКБ, стойкой к нейтронному облучению, необходимо разработать конструктивно-технологический базис, на основе которого будет разработана библиотека стандартных элементов и с ее помощью — микросхема. Основными элементами этого базиса должны быть схемно-технологические решения, обеспечивающие стойкость к воздействию нейтронного облучения [1, 2]. Оценка наличия и частоты сбоев, а также исследование механизмов их возникновения является центральной задачей при построении схемно-

технологических решений, обеспечивающих стойкость к воздействию нейтронного облучения.

Одним из важнейших элементов СБИС, чувствительных к воздействию одиночных заряженных частиц и нейтронов, является схема статической оперативной памяти [5, 6]. Рассмотрим одиночную ячейку статической оперативной памяти, ее электрическая принципиальная схема представлена на рис. 1.

Одним из факторов, вследствие которого происходит нарушение функционирования ячейки памяти, может быть воздействие потока быстрых нейтронов. Исследования, посвященные одиночным сбоям, возникающим вследствие их воздействия, описаны в работах [1, 3, 4]. В частности, в работе [1] для более детального изучения процесса проведено сопряжение системы приборно-технологического моделирования с системой моделирования радиационного транспорта. В этой работе в качестве критерия отбора событий ис-

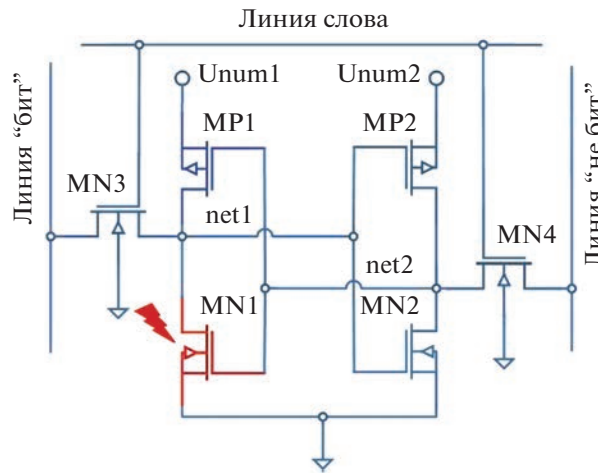


Рис. 1. Схема ячейки СОЗУ.

пользовался максимум энергии вторичной частицы, а под чувствительной областью подразумевалась вся область МОП-транзистора.

Выбранный в работе [1] метод отбора частиц приводил к тому, что при дальнейшем моделировании работы ячейки памяти воздействия вторичных частиц с одной и той же энергией приводили к различным результатам. Как следствие, это вызывало необходимость проводить моделирование работы ячейки СОЗУ для случаев, когда влияние вторичных частиц на составляющие ее транзисторы либо было пренебрежимо малым, либо транзисторы были не подвержены их влиянию, а, следовательно, и сбой в работе ячейки памяти не наблюдались.

Анализ результатов проведенного моделирования показал, что поведение ячейки СОЗУ зависит не только от энергии попадающей частицы, но и от места возникновения вторичной заряженной частицы в ней.

Кроме того, в работе [1] показано, что причиной возникновения сбоя в ячейке памяти является превышение критического заряда. В связи с этим, для оценки событий, заведомо не приводящих к сбою в ней, достаточно выполнить моделирование работы входящего в нее одиночного транзистора, а не моделирование работы всей ячейки памяти целиком. Это позволит без выполнения приборно-технологического моделирования определить, какие события потенциально могут привести к возникновению сбоя, а какие не могут. Подобный подход позволит в дальнейшем сократить объем и соответственно уменьшить время необходимого приборно-технологического моделирования работы ячейки памяти и определить ту область входящего в нее транзистора, которая наиболее чувствительна к воздействию вторичных заряженных частиц. Поэтому задача определения

области транзистора, при попадании в которую вторичных частиц потенциально возможен сбой ячейки памяти, является актуальной. Эту область транзистора в дальнейшем будем называть чувствительной областью.

Цель настоящей работы состояла в определении чувствительной области МОП-транзистора как критерия отбора вторичных частиц, пролетающих через него.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- провести анализ приборно-технологической модели МОП-транзистора ячейки памяти;
- разработать методику имитации треков вторичных частиц нейтронного облучения для выбранной приборно-технологической модели МОП-транзистора;
- провести анализ токовых откликов МОП-транзистора при воздействии вторичных частиц нейтронного облучения;
- определить статический запас помехоустойчивости ячейки памяти;
- определить чувствительные области МОП-транзистора ячейки памяти.

2. ПРИБОРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МОП-ТРАНЗИСТОРА

Для определения положения чувствительной области МОП-транзистора относительно его затвора, контактов к "телу" транзистора, областей стока и истока, рассмотрим приборно-технологическую модель МОП-транзистора с прямолинейным затвором. Топология и вертикальный профиль такого МОП-транзистора представлены на рис. 2 и 3.

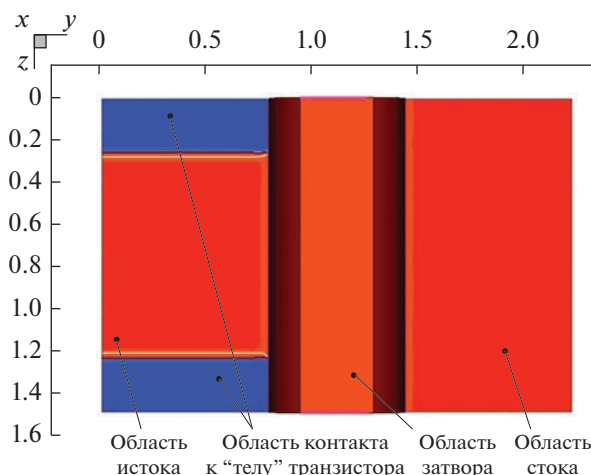


Рис. 2. Топология рассматриваемого транзистора.

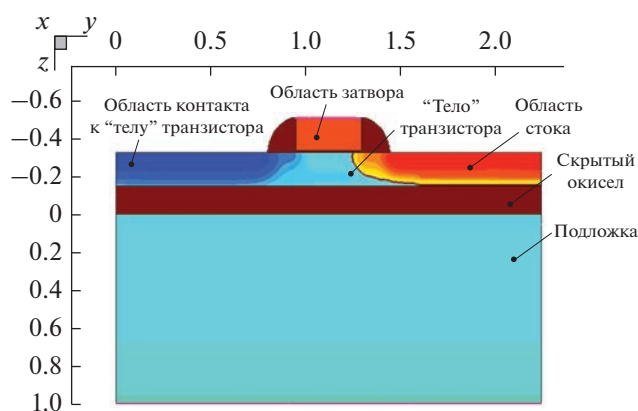


Рис. 3. Вертикальный профиль рассматриваемого транзистора.

3. ИМИТАЦИЯ ТРЕКОВ ВТОРИЧНЫХ ЧАСТИЦ

Определение чувствительной области МОП-транзистора выполнено на основе исследования треков, имитирующих треки вторичных частиц, возникших вследствие нейтронного взаимодействия.

Вследствие высокой вычислительной сложности расчета большого числа вариантов проникновения нейтрона в объеме полупроводникового материала необходимо определить те направления, в которых расчет чувствительной области был бы наиболее целесообразным и информативным. Очевидно, что наиболее чувствительными к воздействиям внешних частиц должны быть те области, в которых концентрация свободных носителей заряда наименьшая, а значит, изменение чувствительности следует искать в направлениях, где существует обратный смещенный $p-n$ -переход (с большой шириной обедненной области). Именно поэтому задача определения чувствительной области МОП-транзистора выполнена в первую очередь для оси y , перпендикулярной затвору транзистора.

Расчеты выполнены для двух взаимно перпендикулярных направлений пролета частицы — параллельно оси x и параллельно оси z . В качестве примера рассмотрено воздействие атома кремния с линейной потерей энергии 0.07 пКл/мкм. Длина трека, используемая для расчетов, составляла 1.6 мкм, что больше ширины канала МОП-транзистора, а также толщины областей истока и стока МОП-транзистора (областей стока и истока). Поэтому справедливо использование выбранного трека вторичной частицы совместно с приборно-технологической моделью.

Токовые всплески, полученные для имитирующих треков вторичных частиц, воздействующих параллельно оси x , на порядок меньше, чем токовые всплески для имитирующих треков вторичных частиц, воздействующих параллельно оси z . Поэтому в дальнейшем использовались именно имитирующие треки вторичных частиц, воздействующие параллельно оси z , а в результатах указана только начальная координата возникновения частицы.

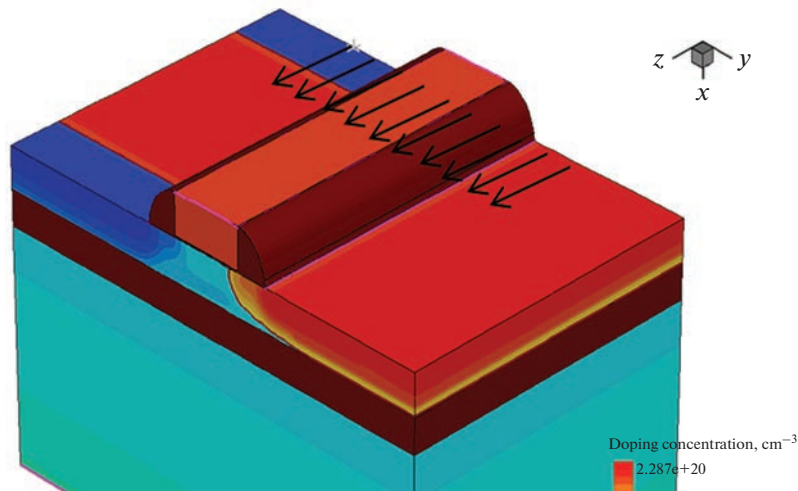


Рис. 4. Места возникновения вторичных частиц.

В связи с этим в дальнейшем выполнено моделирование воздействия вторичных частиц, начальная координата которых (в соответствии с рис. 2–3, координата по оси y) меняется перпендикулярно затвору транзистора.

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОКОВЫХ ОТКЛИКОВ ВТОРИЧНЫХ ЧАСТИЦ

Выполнено приборно-технологическое моделирование отдельного транзистора, входящего в состав ячейки статической оперативной памяти при воздействии вторичной заряженной частицы, порожденной в результате ядерной реакции взаимодействия нейтрона с кристаллической решеткой кремния. Места возникновения и направления пролета вторичных частиц показаны на рис. 4.

Начальная координата частицы варьировалась в направлении, перпендикулярном затвору транзистора (ось y , рис. 4). В результате моделирования построены семейства временных зависимостей токовых откликов транзистора с учетом начального положения, рис. 5 (a – на стоке, b – на затворе, $в$ – на истоке).

Токовые отклики построены при нулевом смещении на затворе (наихудший случай, [6]), а на сток подано напряжение, соответствующее напряжению питания ячейки памяти. По временным зависимостям токовых откликов можно определить накопленный заряд $q_{\text{нак}}$, полученный в результате воздействия вторичной заряженной частицы [5], формула (1).

$$q_{\text{нак}} = \int_0^T I_{\text{drain}} dt, \quad (1)$$

где I_{drain} – токовый отклик транзистора на выводе стока, T – продолжительность временного отклика воздействия вторичной частицы.

На рис. 6 представлен график накопленных зарядов от координаты попадания вторичной частицы. Помимо накопленного заряда, на рис. 6 пунктиром показаны границы затвора транзистора.

5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАТИЧЕСКОГО ЗАПАСА ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ

Рассчитана величина статического запаса помехоустойчивости (SNM) и соответствующий ей заряд [2, 6]. Для определения величины статического запаса помехоустойчивости использовалась электрическая схема, представленная на рис. 7.

Далее проведен анализ для определения статической передаточной характеристики инвертора ячейки памяти, представленной на рис. 8.

Из полученной статической передаточной характеристики инвертора ячейки памяти определен статический запас помехоустойчивости. Он определен следующим образом: в графики переключения ячейки памяти вписаны квадраты наибольшей диагонали, как это показано на рис. 8. Горизонтальные границы квадрата, расположенного рядом с осью ординат, и вертикальные границы квадрата, расположенного рядом с осью абсцисс, соответствуют напряжениям переключения ячейки памяти: 1.3 и 1.9 В, в соответствии с графиком. Критический заряд определялся по методике, описанной в [6]: в системе схемотехнического моделирования собрана схема, представленная ранее на рис. 8; на вход схемы поданы напряжения переключения ячейки памяти (1.3 и 1.9 В, как было показано ранее); результат интегрирования токового отклика на стоке и дает значение критического заряда, оно оказалось равным 60 фКл (наименьшее значение – для наихудшего случая).

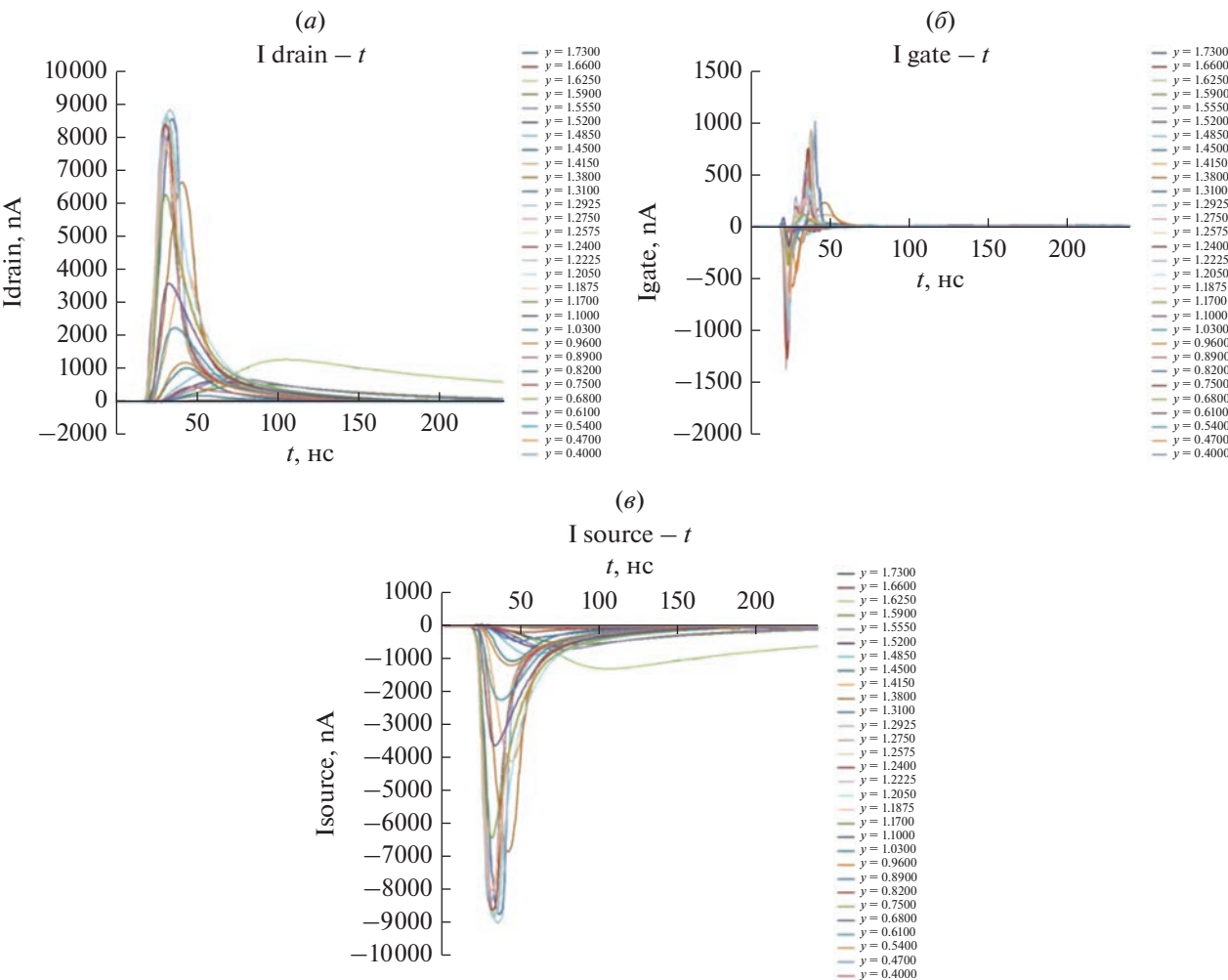


Рис. 5. Временные зависимости токовых откликов транзистора.

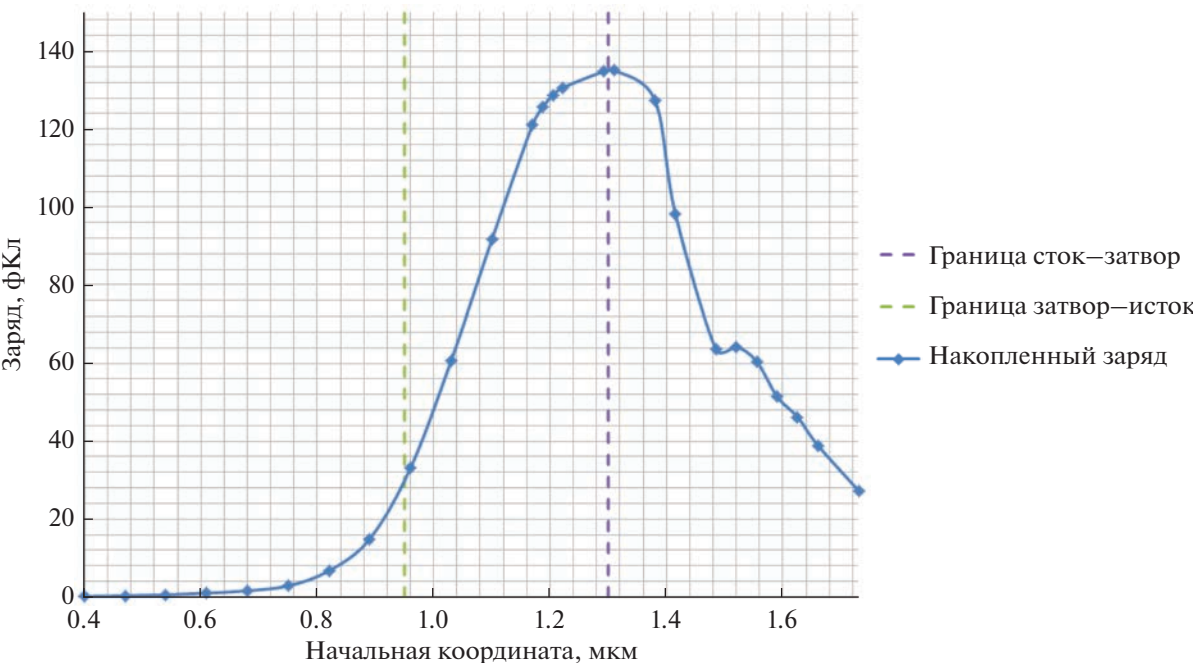


Рис. 6. Зависимость накопленного заряда от начального местоположения вторичной частицы.

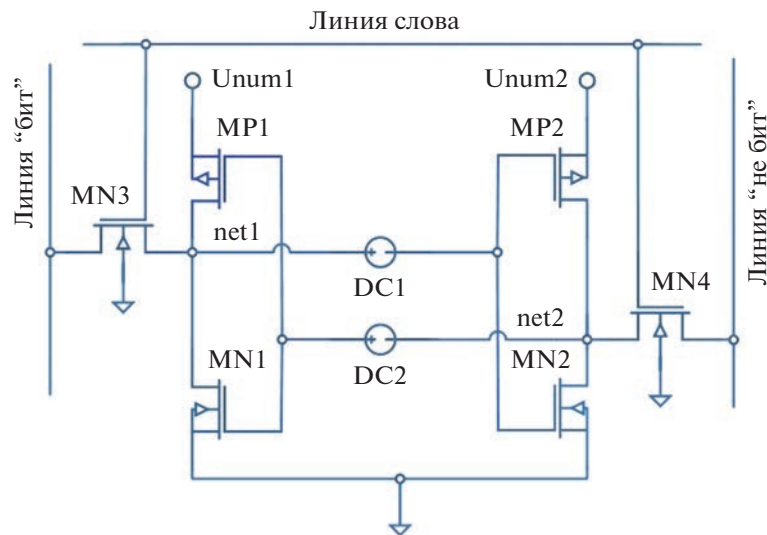


Рис. 7. Схема электрическая для определения статической передаточной характеристики инвертора ячейки памяти.

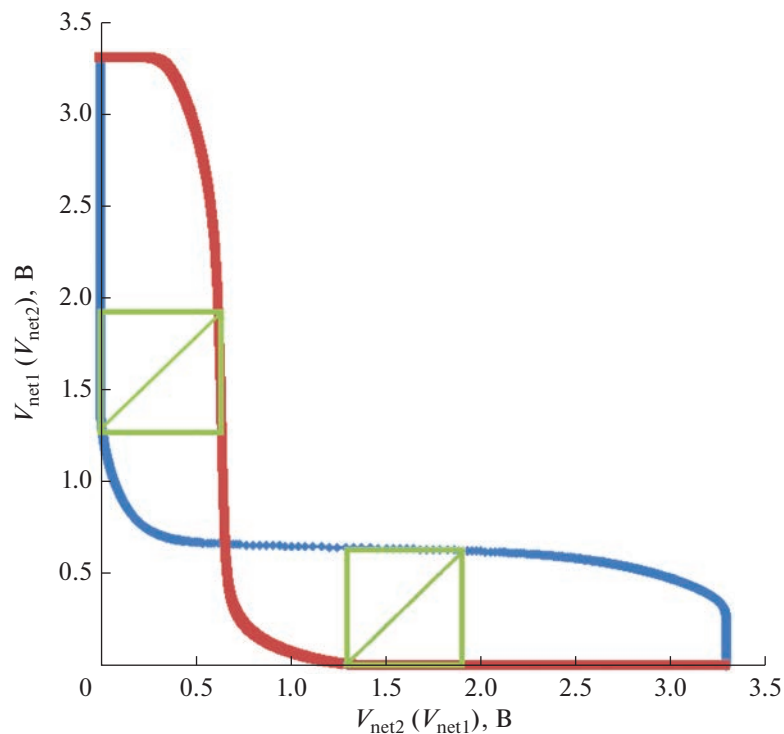


Рис. 8. Статическая передаточная характеристика инвертора ячейки памяти.

6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОЙ ОБЛАСТИ ТРАНЗИСТОРА

Для определения чувствительной области построены два графика — график зависимости накопленного заряда от начальной координаты вторичной частицы, и график заряда, определенный по результатам анализа статического запаса помехоустойчивости, рис. 9.

Те величины накопленного заряда, которые больше величины запаса статической помехоустойчивости, соответствуют переключению ячейки памяти, а, следовательно, сбоя в режиме хранения информации. Те же величины накопленного заряда, которые меньше величины заряда статического запаса помехоустойчивости, соответствуют бесбойной работе ячейки памяти, а, следовательно, и корректному режиму хранения информации.

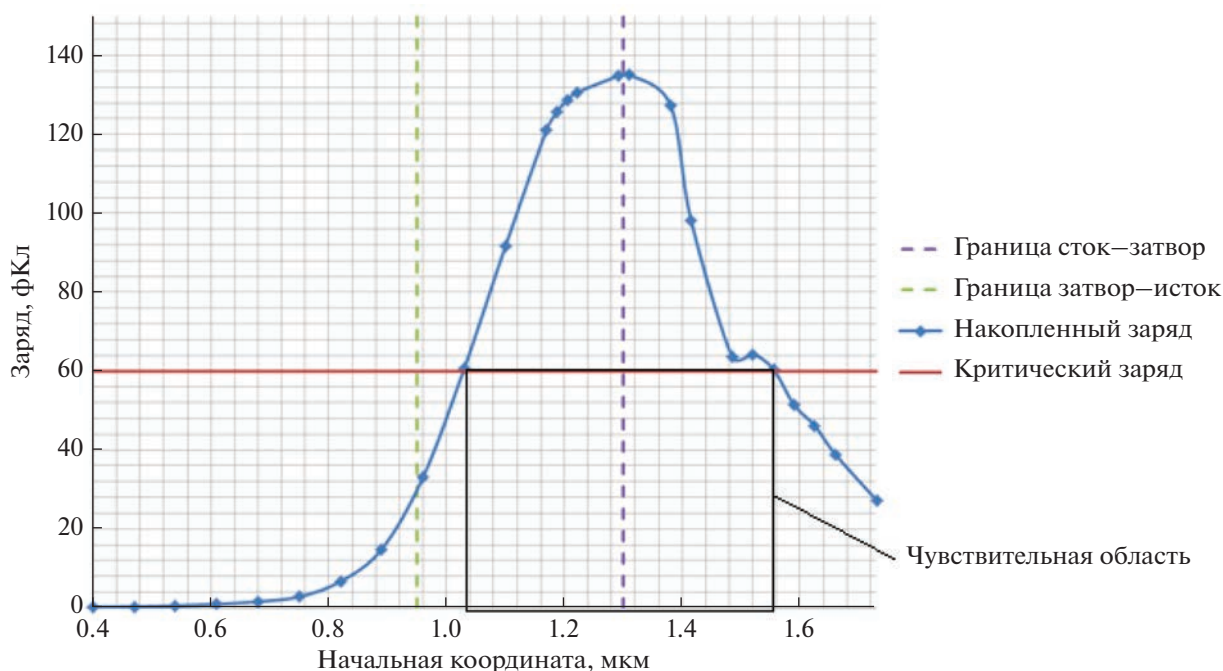


Рис. 9. Зависимости накопленного заряда от начальной координаты вторичной частицы и заряда, определенного по результатам анализа статического запаса помехоустойчивости.

На основании графика на рис. 9 можно сделать вывод, в какие области попадание вторичных заряженных частиц будет приводить к сбою ячейки, следовательно, эти области и можно назвать чувствительными. Для исследуемого транзистора чувствительная область расположена частично под затвором, а частично — в области стока. Остальные же вторичные частицы, не попавшие в чувствительную область транзисторов, к сбоям приводить не будут, и их рассмотрение для анализа сбоев нецелесообразно.

Необходимо отметить, что при пролете вторичной частицы под произвольным углом к осям y и z (в плоскости yz) значение накопленного заряда не будет превосходить значение заряда, полученного на графике (рис. 9). Это связано с тем, что при пролете частицы не параллельно оси z частица пролетает меньшую часть чувствительной области (в то время как пролет вдоль оси z в наихудшем случае затрагивает чувствительную область по всей ширине канала транзистора).

В соответствии с приведенным на рис. 9 графиком, можно оценить, что чувствительная область по протяженности (координаты от 1.05 до 1.5 мкм) составляет лишь 35% от всей протяженности транзистора. Это позволяет предполагать, считая попадание в любую часть транзистора частицы равновероятным, что полученные результаты позволяют уменьшить на 35% количество рассматриваемых частиц для приборно-технологического моделирования ячейки памяти, что должно

сократить суммарное время этого моделирования на 65%, считая одинаковым время моделирования каждого случая воздействия одиночной заряженной частицы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, вышеописанную методику можно использовать для определения чувствительных областей в теле транзистора. Моделирование показало, что чувствительная область расположена под затвором и стоком транзистора.

Применяемая методика позволяет оценить возможность возникновения сбоя в ячейке памяти, не применяя приборно-технологическое моделирование, на основе предварительного отбора входных данных о треках частиц по критерию их попадания в чувствительную область транзистора.

Определена эффективность применения предложенной методики. Показано, что ее применение позволит сэкономить время расчета приблизительно на 65%.

Авторы данной работы считают новой методику определения чувствительной области воздействия частиц для фильтрации большого количества событий, полученных методом Монте-Карло, и последующего моделирования ячейки памяти с использованием трёхмерных приборно-технологических моделей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глушко А.А., Чистяков М.Г., Кудинов И.В., Морозов С.А., Яшин Г.А., Амирханов А.В., Макачук В.В., Зинченко Л.А. Методика сопряжения Монте-Карло моделирования радиационного транспорта и приборно-технологического моделирования для исследования одиночных сбоев / В сборнике докладов Международного форума “Микроэлектроника 2018” 4-й научной конференции “Электронная компонентная база и электронные модули”, Республика Крым, г. Алушта, 1–6 октября 2018 г., М., Изд-во “Техносфера”. С. 292–293.
2. Чистяков М.Г. Исследование и оптимизация по критерию сбоеустойчивости ячейки памяти для технологии КНИ КМОП 0.25 мкм при облучении быстрыми нейтронами В сборнике докладов Международного форума “Микроэлектроника 2017” 3-й научной конференции “Электронная компонентная база и электронные модули”, Республика Крым, г. Алушта, 2–7 октября 2017 г., М., Изд-во “Техносфера”. С. 351–358.
3. Gordon M.S., Goldhagen P., Rodbell K.P., Zabel T.H., Tang H.H.K., Clem J.M., Bailey P. Measurement of the flux and energy spectrum of cosmic-ray induced neutrons on the ground / IEEE Transactions on Nuclear Science. 2004. V. 51. Issue 6.
4. Batista A.J.N., Leong C., Santos B., Fernandes A., Ramos A.R., Santos J.P., Marques J.G., Teixeira J.P., Gonçalves B. Test results of an ITER relevant FPGA when irradiated with neutrons / 4th International Conference on Advancements in Nuclear Instrumentation Measurement Methods and their Applications (ANIMMA), Lisbon, Portugal, 20–24 April 2015, IEEE.
5. Dodd P.E., Sexton F.W. Critical Charge Concepts for CMOS SRAMs / IEEE Transactions on Nuclear Science. 1995. V. 42. № 6.
6. Seevinck E., List F.J., Lohstroh J. Static-Noise Margin Analysis of MOS SRAM Cells / IEEE J. Solid-State Circuits. 1987. V. Sc-22. № 5.