

Влияние процесса образования единичного кластера радиационных дефектов на переключение состояния транзисторной ячейки памяти

© И.Ю. Забавичев^{1,2}, А.С. Пузанов^{1,2}, С.В. Оболенский^{1,2}

¹ Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
603022 Нижний Новгород, Россия

² Российский федеральный ядерный центр —
Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,
607188 Саров, Нижегородская обл., Россия

E-mail: zabavichev.rf@gmail.com

Поступила в Редакцию 5 мая 2023 г.

В окончательной редакции 29 июня 2023 г.

Принята к публикации 6 июля 2023 г.

Исследовано влияние образования единичного кластера радиационных дефектов на переключение состояния транзисторной ячейки памяти. Проведены оценки величины энергии ядерной частицы, способной сформировать кластер радиационных дефектов, вызывающий сбой и отказ работы современных кремниевых транзисторов с различными размерами рабочих областей. Рассчитаны сечения сбоев для шести- и восьмизлементной транзисторной ячейки памяти для различных технологических процессов при воздействии потока нейтронов мгновенного спектра деления.

Ключевые слова: транзисторная ячейка памяти, кластер радиационных дефектов, сечение сбоев.

DOI: 10.21883/FTP.2023.04.55897.15k

1. Введение

Статическая память с произвольным доступом (SRAM) широко применяется для организации небольших объемов оперативной и кэш-памяти микропроцессоров и программируемых логических интегральных схем по причине ее низкого энергопотребления, которое определяется низким значением тока, протекающим через канал транзистора в закрытом состоянии. Наиболее эффективным способом уменьшения энергопотребления ячейки является уменьшение напряжения питания. Однако уменьшение напряжения питания наряду с уменьшением размеров транзисторов приводит к уменьшению стабильности состояния ячейки памяти, вызванному увеличением влияния шумов и внешнего воздействия [1].

Воздействие отдельных ядерных частиц (ОЯЧ) приводит к нештатному переключению состояния ячейки памяти, а в некоторых случаях воздействие ОЯЧ приводит к необратимым отказам и невозможности сохранения текущего состояния ячейки памяти (так называемому „залипанию“). Сбоеустойчивость ячейки статической памяти определяется соотношением между величиной заряда в канале транзистора, вызывающего переключение ячейки статической памяти (критический заряд), и величиной заряда радиационно-индуцированных носителей в части трека ОЯЧ, проходящей через чувствительную область транзистора (собранный заряд) [2]. Если величина критического заряда меньше величины собранного заряда, то переключение, вызывающее сбой, происходит; в противном случае переключения и, как следствие, сбоя не происходит.

Отказ ячейки статической памяти происходит вследствие формирования в чувствительной области канала

транзисторной структуры стабильных кластеров радиационных дефектов, которые выступают в качестве рассеивающих центров для подвижных носителей заряда. В случае, когда проводимость канала в открытом состоянии становится меньше критического значения, транзистор переходит в постоянный непроводящий режим и тем самым реализуется необратимый отказ транзисторной ячейки памяти.

Актуальность проводимого исследования обусловлена тем, что по мере уменьшения размеров транзистора уменьшается величина критического заряда и концентрации радиационных дефектов, которые вызывают сбой и отказы, что делает ячейку статической памяти более уязвимой к воздействию ОЯЧ [3].

В последнее время опубликован ряд работ, посвященных моделированию сбоеустойчивости статических ячеек памяти, изготовленных по современным технологическим процессам, при радиационном воздействии. В работах [4,5] с помощью численного моделирования исследовано влияние космического излучения на ячейку статической памяти, выполненную на 65 нм КМОП транзисторах. В работе [6] проведено моделирование реакции 22 нм ячейки памяти на воздействие тяжелых ядерных частиц (ТЗЧ). В работе [7] при моделировании тока ионизации в треке заряженной частицы учитываются возникающие при радиационном воздействии дефекты.

Возникновение одиночных событий в интегральных схемах при воздействии нейтронов впервые было теоретически предсказано в работе [8] и экспериментально подтверждено в работе [9] для элементов динамической памяти, изготовленных на объемном кремнии по 3-мкм технологическому процессу.

Применение технологии „кремний-на-изоляторе“ существенно увеличивает сбое- и отказоустойчивость эле-

ментов интегральных схем при радиационном воздействии [3]. В работе [10] рассмотрены экспериментальные исследования сбоеустойчивости статической памяти, выполненной по технологии „кремний-на-изоляторе“ 350 нм, продемонстрировавшие наличие сбоев при воздействии потока быстрых нейтронов.

Общим для вышеперечисленных работ механизмом сбоев является попадание ОЯЧ в закрытый транзистор ячейки памяти, его несанкционированное открывание за счет переходных ионизационных процессов, протекающих в нем, и последующее переключение ячейки памяти. В работе [11] впервые был предложен другой механизм возникновения сбоя ячейки статической памяти, который обусловлен процессом образования разупорядоченной области, а не процессом генерации неравновесных носителей заряда, который в настоящее время хорошо изучен для транзисторов, выполненных по современным проектным нормам [4–6]. При формировании кластера радиационных дефектов в канале транзистора возможно возникновение ситуации, когда его проводимость за счет дополнительного рассеяния подвижных носителей заряда на образующихся радиационных дефектах опустится ниже критического значения, которое определяет границу между открытым и закрытым состояниями. Если этого времени будет достаточно, то произойдет нештатное изменение состояния ячейки памяти. При дальнейшей стабилизации кластера за счет рекомбинации близко расположенных пар Френкеля проводимость канала вернется к прежним значениям, достаточным для штатной работы транзистора, поэтому в данном случае реализуется обратимый сбой. Возникновение сбоя в соответствии с предложенным механизмом возможно только в случае, когда время переключения состояния ячейки сопоставимо со временем формирования разупорядоченной области. Данное условие может выполняться для ячеек памяти, состоящих из транзисторов, изготовленных по современным топологическим нормам 20 нм и менее.

Подобная ситуация кратковременного радиационно-индуцированного снижения проводимости канала транзистора является промежуточной между обратимым сбоем за счет временного роста проводимости канала транзистора из-за ионизационных эффектов и необратимым отказом элемента ячейки памяти вследствие долговременного снижения проводимости канала из-за структурных повреждений при воздействии ОЯЧ. Анализ влияния процесса формирования кластера радиационных дефектов на сбоеустойчивость современных транзисторных ячеек памяти посвящена настоящая работа.

2. Объекты исследования

В качестве объектов исследования были выбраны шести- и восьмиэлементные ячейки памяти, в качестве элементов которых выступали транзисторы, выполненные по различным технологическим процессам с топологическими нормами от 20 до 7 нм. Классическая

Таблица 1. Геометрические размеры рабочей области современных транзисторов [13]

Размер	Технологический процесс	
	20 нм	7 нм
Длина затвора, нм	24	11
Высота затвора, нм	28	18
Толщина затвора, нм	15	7

Таблица 2. Времена записи в ячейку статической памяти [13]

Ячейка статической памяти	Время записи, пс	
	20 нм	7 нм
6Т	7.5	2.5
8Т	9	3

статическая ячейка памяти состоит из шести транзисторов: четыре транзистора образуют два инвертора с положительной обратной связью, а еще два транзистора используются для операций чтения и записи. В ячейке памяти, состоящей из восьми транзисторов, дополнительные транзисторы образуют буфер для чтения, чтобы разделить операции чтения и записи [12].

Геометрические размеры рабочей области современных транзисторов, из которых состоит ячейка статической памяти, представлены в табл. 1 [13].

В зависимости от величины порогового напряжения, при котором происходит переключение транзистора, выделяют две группы ячеек статической памяти на их основе: режим высокой производительности (ВП) (низкое значение порогового напряжения) и режим низкого энергопотребления (НЭ) (высокое значение порогового напряжения). Для всех транзисторов, рассматриваемых в данной работе, напряжение питания изменяется в диапазоне от 0.7 до 0.9 В. Для режима низкого энергопотребления значение порогового напряжения равняется 0.4 В при напряжении питания 0.5 В. Время записи определяется как промежуток времени между появлением управляющего сигнала на линии записи и переключением состояния ячейки. Времена записи состояния в 6Т- и 8Т-ячейке статической памяти для режима ВП представлены в табл. 2 [13].

Для исследуемых ячеек памяти параметр, определяющий чувствительность к шуму (HSNM) в режиме хранения состояния ячейки памяти, составляет ~ 200 мВ [13]. Если амплитуда шума будет > 200 мВ, то ячейка памяти перейдет в противоположное стабильное состояние. Отношение токов в открытом и закрытом состояниях, рассчитанное с помощью ВАХ исследуемых транзисторов с учетом параметра HSNM, составляет 0.3.

Таким образом, для возникновения сбоя при формировании кластеров радиационных дефектов (КРД) необходимо, чтобы у одного из открытых транзисторов ток уменьшился до значений закрытого состояния на

время, превышающее время записи состояния в ячейку памяти.

3. Математическая модель

Для расчета числа сбоев, приходящихся на транзисторную ячейку статической памяти и вызванных формированием КРД при воздействии потока нейтронов, необходимо задать распределение нейтронов по энергии. В данной работе рассматривается мгновенный спектр деления. Он является непрерывным и простирается от единиц килоэлектронвольт до 18 МэВ со средней энергией ~ 2 МэВ. В настоящее время существует ряд эмпирических формул, описывающих спектр деления тех или иных ядер. Для спектра деления нейтронов ^{235}U на основании экспериментальных измерений Кранбергом [14] была предложена следующая формула, описывающая функцию распределения нейтронов по энергии:

$$\phi(E_n) = 0.453 [\text{sh}(2.29E_n)^{0.5}] \exp\left(\frac{-E_n}{0.965}\right), \quad (1)$$

где E_n — энергия нейтрона.

Для заданного потока вероятность попадания нейтрона в канал транзистора и взаимодействия с атомами кристаллической решетки может быть оценена с помощью следующей формулы [15]:

$$P = 1 - \exp(-\sigma F_n V N_{\text{at}}), \quad (2)$$

где σ — сечение рассеяния нейтронов в заданном диапазоне энергий, F_n — интегральный поток нейтронов в заданном диапазоне энергий, V — объем рабочей области транзистора, N_{at} — концентрация атомов вещества, P — вероятность взаимодействия нейтрона с атомом кристаллической решетки.

Для каждого нейтрона, который провзаимодействовал с атомами вещества, необходимо рассчитать энергию в соответствии с функцией распределения (1). Затем определяется энергия первичного атома отдачи кремния E_A , которая определяется в соответствии с моделью взаимодействия упругих шаров [16]:

$$E_A = \frac{4A}{(1+A)^2} E_n \sin^2\left(\frac{\vartheta}{2}\right), \quad (3)$$

где ϑ — угол отдачи между направлением движения нейтрона до и после столкновения, A — атомный вес. При изотропном рассеянии нейтронов все углы отдачи ϑ являются равновероятными в диапазоне от 0 до 2π .

На рис. 1 представлены спектры нейтронов и первичных атомов отдачи, рассчитанные с помощью соотношений (1) и (3). Спектр нейтронов по энергии ограничен величиной порядка десятков МэВ со средним значением ~ 2 МэВ. Спектр первичных атомов отдачи кремния по энергии ограничен несколькими МэВ со средним значением ~ 250 кэВ.

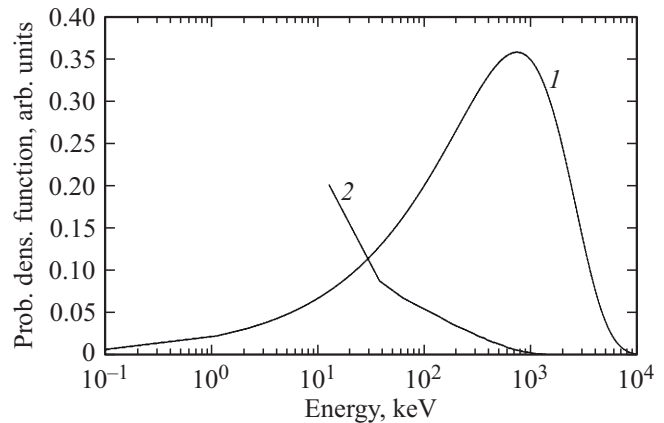


Рис. 1. Функции плотности вероятности распределения частиц по энергии: 1 — быстрые нейтроны мгновенного спектра деления, 2 — первичные атомы отдачи.

Если энергия атома отдачи попадает в диапазон энергий от $E_1^{(\text{кр})}$ до $E_2^{(\text{кр})}$, то в этом случае реализуется сбой транзисторной ячейки статической памяти, вызванный процессом формирования единичного кластера радиационных дефектов. Энергия первичного атома отдачи $E_1^{(\text{кр})}$ соответствует случаю, когда процесс формирования КРД вызывает нештатное переключение состояния ячейки памяти. Энергия первичного атома отдачи $E_2^{(\text{кр})}$ соответствует случаю, когда процесс формирования КРД вызывает отказ ячейки памяти. Общее число сбоев, рассчитанное таким образом для каждого нейтрона из числа N_{act} , определяет сечение сбоя ячейки памяти.

Для определения значений от $E_1^{(\text{кр})}$ до $E_2^{(\text{кр})}$ для каждого рассматриваемого техпроцесса необходимо рассчитать изменение тока транзистора при нулевом смещении на затворе в момент формирования КРД. С этой целью использовался оригинальный подход, основанный на самосогласованном методе Монте-Карло [17], в котором дополнительно рассматривается механизм рассеяния на формирующемся кластере радиационных дефектов. На исследуемых масштабах времени порядка нескольких пикосекунд КРД можно считать электрически нейтральным, так как процесс захвата подвижных носителей заряда на глубокие энергетические уровни радиационных дефектов в кремнии составляет единицы микросекунд [18]. Тогда частота рассеяния λ_{form} на формирующемся незаряженном КРД зависит от концентрации точечных дефектов, изменяющейся во времени за счет процессов термического расширения и стабилизации КРД. По аналогии с рассеянием на нейтральных атомах примеси [19] частоту рассеяния на формирующемся КРД можно описать следующим выражением:

$$\lambda_{\text{form}}(t) = 20 \frac{N_{\text{def}}(t)}{V_{\text{ch}}} \frac{\varepsilon \varepsilon_0 h^2}{(m^* q)^2}, \quad (4)$$

где h — постоянная Планка, N_{def} — число пар Френкеля; ε — диэлектрическая проницаемость материала, ε_0 —

диэлектрическая проницаемость вакуума, m^* — эффективная масса носителей заряда, q — заряд электрона. Важным условием применимости данного подхода является выполнение условия стационарности процесса образования дефектов относительно времени свободного пробега носителей заряда τ :

$$\tau \ll \frac{1}{\lambda_{\text{form}}(t)}. \quad (5)$$

Также необходимо отметить, что частота и угол рассеяния на формирующемся КРД не зависят от энергии носителей энергии.

В данной работе для моделирования динамики формирования КРД и сопутствующих ионизационных процессов использовалось ПО LAMMPS [20], в котором реализован метод классической молекулярной динамики вместе с двухтемпературной моделью атомной и электронной подсистем кристаллической решетки [21]. В каждый момент времени оцениваются следующие параметры: число пар Френкеля N_{def} ; энергия, переданная в электронную подсистему, и температура электронно-дырочной плазмы.

По полученным временным зависимостям тока стока транзистора оценивается промежуток времени, в течение которого значения тока стока соответствуют закрытому состоянию транзистора. Если данное время больше характерного времени переключения ячейки памяти, то в этом случае реализуется сбой. Энергия первичного атома отдачи, которая приводит к реализации сбоя ячейки памяти, соответствует $E_1^{(\text{кр})}$. Если восстановления тока стока транзистора не наблюдается в течение интервала времени, на порядок превышающего время переключения, то сбой переходит в отказ ячейки памяти. Энергия первичного атома отдачи, которая приводит к реализации отказа ячейки памяти, соответствует $E_2^{(\text{кр})}$. Отметим, что представленная модель не учитывает влияние паразитных индуктивностей и емкостей межэлектродных соединений в ячейке памяти.

4. Результаты расчетов и обсуждение

На рис. 2 представлены временные зависимости относительного изменения тока стока транзистора в момент формирования в канале КРД, образованных первичными атомами отдачи с различной энергией для транзистора, выполненного по технологическому процессу 7 нм.

На рис. 3 представлены временные зависимости относительного изменения тока стока транзистора в момент формирования в канале КРД, образованных первичными атомами отдачи с различной энергией для транзистора, выполненного по технологическому процессу 20 нм. По сравнению с результатами, представленными на рис. 2, переключение транзистора, выполненного с большими топологическими нормами, переключение транзистора в закрытое состояние происходит при более высоких энергиях.

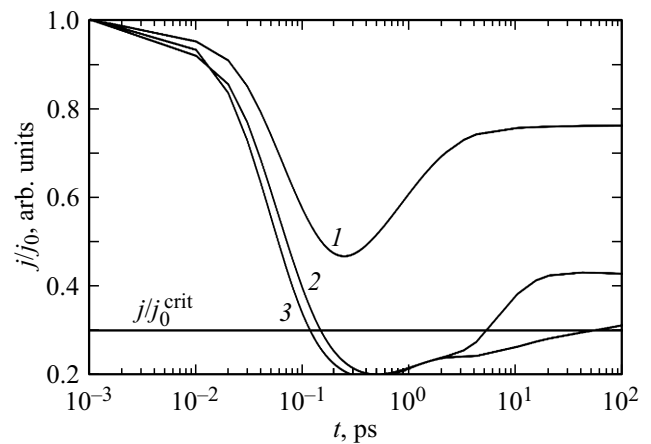


Рис. 2. Относительное изменение тока стока транзисторных структур j/j_0 для проектной нормы „7 нм“ во времени в процессе формирования кластера радиационных дефектов, образованного первичным атомом отдачи с энергией, кэВ: 1 — 12, 2 — 30, 3 — 50. На графике также показано критическое соотношение j/j_0^{crit} , при котором транзистор переходит в закрытое состояние.

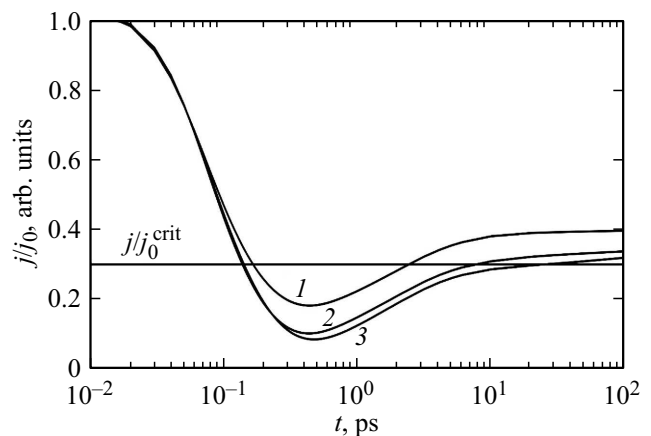


Рис. 3. Относительное изменение тока стока транзисторных структур j/j_0 для проектной нормы „20 нм“ во времени в процессе формирования кластера радиационных дефектов, образованного первичным атомом отдачи с энергией, кэВ: 1 — 50, 2 — 100, 3 — 130. На графике также показано критическое соотношение j/j_0^{crit} , при котором транзистор переходит в закрытое состояние.

Для топологических норм, представленных в табл. 1, было проведено моделирование изменения тока стока транзистора в момент формирования в канале КРД, образованного первичным атомом отдачи с энергией в диапазоне от 3 до 200 кэВ и рассчитаны значения $E_1^{(\text{кр})}$ до $E_2^{(\text{кр})}$. Результаты расчетов представлены в табл. 3. Сбой при формировании КРД для ячеек памяти наступает при энергиях первичного атома отдачи в диапазоне от 100 до 200 кэВ для технологического процесса „20 нм“ и от 30 до 40 кэВ для технологического процесса „7 нм“.

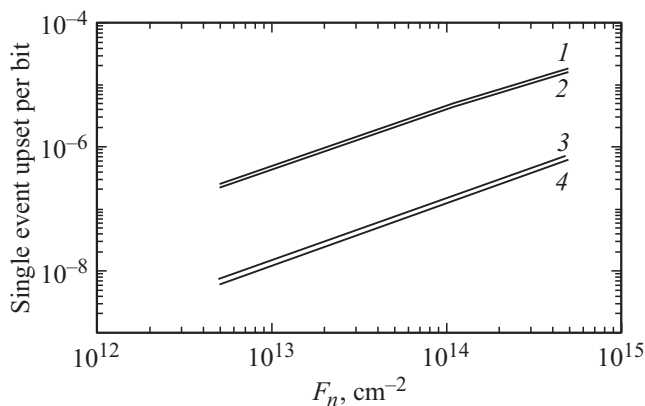


Рис. 4. Зависимости числа сбоев на бит, вызванных процессом формирования КРД, от интегрального потока нейтронов для 6Т и 8Т ячейки статической памяти, выполненных по технологическому процессу „20 нм“ и „7 нм“: 1 — 8Т-20 нм, 2 — 6Т-20 нм, 3 — 8Т-7 нм, 4 — 6Т-7 нм.

Полученные диапазоны энергий были использованы для расчета числа сбоев на бит ячейки памяти, вызванных процессом формирования КРД, для различных значений интегрального потока нейтронов, результаты которого представлены на рис. 4. Из данных зависимостей также были рассчитаны сечения сбоев на бит, вызванных процессом формирования КРД, представленные в табл. 4. Для сравнения в табл. 4 указано экспериментальное значение полного сечения сбоев на бит, полученное для топологических норм „350 нм“ [17]. Рассчитанные сечения сбоев для шести- и восьмиэлементной транзисторной ячейки памяти для различных технологических процессов при воздействии потока нейтронов мгновенного спектра деления на несколько порядков меньше

Таблица 3. Энергии первичного атома отдачи, при которых процесс формирования КРД приводит к сбою ($E_1^{(кр)}$) и отказу ($E_2^{(кр)}$) транзисторной ячейки памяти

Ячейка статической памяти	$E_1^{(кр)}/E_2^{(кр)}$, кэВ	
	20 нм	7 нм
6Т	99/191.4	28.9/38.88
8Т	101.4/211.7	29.15/41.2

Таблица 4. Сечения сбоев на бит, вызванных процессом формирования КРД

Ячейка статической памяти	Сечение сбоев на бит, $см^2/бит$
6Т-7 нм	$1.23 \cdot 10^{-21}$
8Т-7 нм	$1.46 \cdot 10^{-21}$
6Т-20 нм	$3.2 \cdot 10^{-20}$
8Т-20 нм	$3.65 \cdot 10^{-20}$
6Т-350 нм [17]	$1.4 \cdot 10^{-17}$

величин, наблюдаемых в ходе экспериментальных исследований. Это связано с тем, что в эксперименте было получено сечение сбоев, вызванных ионизационными процессами, а не процессом формирования КРД. Однако полученные оценки позволяют сделать вывод о том, что по мере уменьшения топологических норм транзисторов процесс формирования КРД будет все больше влиять на общее число сбоев.

5. Заключение

В работе проведено исследование влияния образования единичного кластера радиационных дефектов на переключение состояния транзисторной ячейки памяти. Согласно полученным оценкам, кластер радиационных дефектов, вызывающий сбой современных кремниевых транзисторов, образуется первичным атомом отдачи, энергия которого лежит в диапазоне от десятков до нескольких сотен кэВ. Полученные оценки позволяют точнее прогнозировать общее число сбоев современных ячеек статической памяти при радиационном воздействии.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках научной программы Национального центра физики и математики (проект „Ядерная и радиационная физика“).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] S.W. Chang, P.W. Chou, W.C. Wu. IEEE J. Solid-State Circuits, **46** (2), 520 (2011).
- [2] К.О. Петросянц, И.А. Харитонов, Е.В. Орехов, Л.М. Самбурский, А.П. Ятманов, А.В. Воеводин. *Сб. тр. 5-й Всероссийской науч.-техн. конф. Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем — 2012* (М., 2012).
- [3] P.E. Dodd, M.R. Shaneyfelt, J.R. Schwank, J.A. Felix. IEEE Trans. Nucl. Sci., **57** (4), 1747 (2010).
- [4] L. Atias, A. Teman, A. Fish. *Proc. 28th Convention of Electrical and Electronics Engineers in Israel*, 2014, p. 1.
- [5] M. Sajid, N.G. Chechenin, F.S. Torres, U.A. Gulzari, M.U. Butt, Z. Ming, E.U. Khan. / *Microelectron. Reliab.*, **78**, 11 (2017).
- [6] J. Yuan, Y. Zhao, L. Wang, T.Li, C. Sui. *J. Phys.: Conf. Ser.*, **1920**, 012069 (2021).
- [7] T. Copetti, G.C. Medeiros, M. Taouil, S. Hamdioui, L.B. Poehis, T.R. Balen. *J. Electron. Testing*, **37**, 383 (2021).
- [8] J.F. Ziegler, W.A. Lanford. *Science*, **206**, 776 (1979).
- [9] C.S. Guenzer, E.A. Wolicki, R.G. Allas. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **26** (6), 5048 (1979).
- [10] А.С. Пузанов, С.В. Оболенский, М.М. Венедиктов, В.А. Козлов. *ФТП*, **53** (9), 1250 (2019).

- [11] И. Ю. Забавичев, А. С. Пузанов, С. В. Оболенский. ФТП, **56** (7), 637 (2022).
- [12] L. Chang, D.M. Fried, J. Hergenrother, J.W. Sleight, R.H. Dennard, R.K. Montoye, L. Sekaric, S.J. McNab, A.W. Topol, C.D. Adams. *Proc. Symp. on VLSI Technology*, 2005, p. 128.
- [13] M. Ansari, H. Afzali-Kusha, B. Ebrahimi, Z. Navabi, A. A-Kusha, M. Pedram. *Integration, the VLSI J.*, **50**, 91 (2015).
- [14] Е.А. Крамер-Агеев. *Экспериментальные методы нейтронных исследований* (М., Энергоиздат, 1990).
- [15] С.В. Оболенский, Е.В. Волкова, А.Б. Логинов, Б.А. Логинов, Е.А. Тарасова, А.С. Пузанов, С.А. Королев. *Письма ЖТФ*, **47** (5), 38 (2021).
- [16] А.С. Давыдов. *Теория твердого тела* (М., Наука, 1976).
- [17] И.Ю. Забавичев, А.А. Потехин, А.С. Пузанов, С.В. Оболенский, В.А. Козлов. ФТП, **51** (11), 1520 (2017).
- [18] В.Л. Винецкий, Г.А. Холодарь. *Радиационная физика полупроводников* (Киев, Наук. думка, 1979).
- [19] И.Ю. Забавичев. *Сб. тр. XXVI науч. конф. по радиофизике* (Н. Новгород, ННГУ, 2021).
- [20] S. Plimton. *J. Comput. Phys.*, **117**, 1 (1995).
- [21] D. Duffy, A. Rutherford. *J. Phys.: Condens. Matter*, **19**, 016207 (2007).

Редактор Г.А. Оганесян

Influence of single radiation defect cluster formation on transistor memory cell switching

I.Yu. Zabavichev^{1,2}, A.S. Puzanov^{1,2},
S.V. Obolenskiy^{1,2}

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

² Russian Federal Nuclear Center —
All-Russian Scientific Research Institute
of Experimental Physics,
607188 Sarov, Nizny Novgorod region, Russia

Abstract The effect of a single radiation defects cluster formation on the transistor memory cell switching was studied. Estimates of the nuclear particle energy, capable of forming a cluster of radiation defects, causing a soft error of modern silicon transistors with various channel sizes. The failure cross sections for six and eight-element transistor memory cells are calculated for various technological processes under the influence of a neutron flux.