

Влияние процесса формирования единичного кластера радиационных дефектов на проводимость канала транзисторной структуры

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

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

² Филиал РФЯЦ ВНИИЭФ „НИИИС им. Ю.Е. Седакова“, 603950 Нижний Новгород, Россия

E-mail: zabavichev.rf@gmail.com

Поступила в Редакцию 2 марта 2022 г.

В окончательной редакции 25 марта 2022 г.

Принята к публикации 25 марта 2022 г.

Исследовано влияние формирования единичного кластера радиационных дефектов на характеристики короткоканальных структур. Проведены оценки величины энергии ядерной частицы, способной сформировать кластер радиационных дефектов, вызывающий сбой и отказ работы современных кремниевых транзисторов с различными размерами рабочих областей.

Ключевые слова: короткоканальный транзистор, кластер радиационных дефектов, одиночный сбой.

DOI: 10.21883/FTP.2022.07.52752.07

1. Введение

Радиационное воздействие потока отдельных ядерных частиц (ОЯЧ) приводит к ухудшению таких параметров полупроводниковых материалов, как концентрация и подвижность основных носителей заряда. Причиной данных изменений является возникновение скоплений структурных повреждений — кластеров радиационных дефектов (КРД), вызванных упругим взаимодействием ОЯЧ (протона, нейтрона, α -частицы, тяжелой заряженной частицы или первичного атома отдачи) с атомами кристаллической решетки вещества [1]. Данные скопления дефектов выступают в качестве энергетических ловушек для основных носителей заряда, уменьшая их концентрацию в объеме полупроводника. Так как после радиационного воздействия сохраняется электронейтральность облученного образца, то кластеры радиационных дефектов окружены областью пространственного заряда (ОПЗ), что формирует внутри и вокруг разупорядоченной области потенциал рассеяния. Поэтому кластеры радиационных дефектов выступают в роли центров рассеяния носителей заряда, снижая их направленную скорость и, как следствие, подвижность.

Поскольку ОЯЧ могут передавать атомам вещества энергии до нескольких мегаэлектронвольт, то размеры КРД могут быть значительно больше, чем характерные длины релаксации энергии и импульса электронов, длина Дебая и т.д. В современных приборах, где энергия носителей заряда может достигать 1 эВ и более, длина волны электронов становится меньше расстояний между ОПЗ субкаскадов в каскаде смещенных атомов. Таким образом, протяженные кластеры радиационных дефектов распадаются на цепочку независимых, непрозрачных

для высокоэнергетических носителей заряда включений — субкластеров радиационных дефектов (СКРД).

Параллельно с упругим взаимодействием протекают ионизационные процессы. Ионизация при радиационном воздействии возникает по причине двух процессов: кулоновского взаимодействия заряженной частицы с электронами внешних орбиталей атомов кристаллической решетки и ударного взаимодействия двух атомов, в результате которого изначально покоящийся атом кристаллической решетки приобретает скорость большую, чем скорость орбитальных электронов в приближении полуклассической модели атома Бора.

Процессы дефектообразования и ионизации при воздействии ОЯЧ имеют различные пространственные и временные масштабы, поэтому по мере уменьшения топологических размеров транзисторных структур и характерных времен переключения ячеек статической памяти на их основе описанные выше явления в различной степени влияют на процессы переноса носителей заряда. В полупроводниковых структурах, размеры рабочих областей которых много больше характерной длины релаксации энергии электронно-дырочного газа, перенос носителей заряда в основном осуществляется потоком электронов и дырок с температурой, близкой к температуре кристаллической решетки. При этом даже в сильных электрических полях направленная компонента скорости носителей заряда меньше хаотической, вызванной тепловым движением частиц. С уменьшением размеров рабочих областей элементов количество рассеяний носителей заряда уменьшается, поэтому характер движения электронов и дырок меняется на квазибаллистический [2] с преимущественным переносом „горячих“ частиц.

Известно, что электроны с энергией порядка нескольких $k_B T$ рассеиваются на КРД в целом. Для „горячих“ электронов с большими энергиями КРД представляется как набор близко расположенных частично перекрывающихся потенциалов субкластеров радиационных дефектов (СКРД) [3]. Таким образом, образование дефектов в канале транзистора накладывает дополнительные условия на характер движения электронов (диффузионное или квазибаллистическое) в нем [4].

Традиционно считается [5], что сбоеустойчивость ячейки статической памяти определяется соотношением между величиной критического заряда, т.е. величиной заряда в канале транзистора, вызывающего переключение ячейки статической памяти, и величиной собранного заряда, т.е. зарядом неравновесных носителей в части трека ОЯЧ, проходящей через рабочую область транзистора. Если величина критического заряда меньше величины собранного заряда, то переключение, вызывающее сбой, происходит; в противном случае переключения и, как следствие, сбоя не происходит. При этом характер движения носителей в данной модели не учитывается, что приводит к погрешности оценки сбоеустойчивости субмикронных структур [6].

В данной работе впервые проведен анализ влияния процесса формирования единичного кластера радиационных дефектов на характеристики короткоканальных транзисторных структур.

2. Математическая модель

В настоящее время существует широкий спектр методов моделирования развития каскадов атомных столкновений в веществе [7], которые можно разделить на 4 класса: квантово-механические методы „из первых принципов“, методы классической молекулярной динамики, стохастические методы (алгоритмы Монте-Карло) и континуальные методы, основанные на законах тепломассопереноса в сплошной среде. В данной работе для оценки размеров КРД использовалась программа SRIM [8], в основе алгоритма которой лежит модель упругого взаимодействия твердых шаров, а для оценок динамики формирования КРД и сопутствующих ионизационных процессов — программа LAMMPS [9], в которой реализован метод классической молекулярной динамики вместе с двухтемпературной моделью атомной и электронной подсистем кристаллической решетки [10].

Для оценки средних параметров КРД (размеры СКРД, число СКРД в одном КРД и расстояние между СКРД) использовалась следующая методика. Для каждой энергии первичного атома отдачи с помощью программы SRIM моделировалось сто реализаций каскадов атомных смещений с последующим усреднением оцененных параметров. Для решения задачи кластеризации (разбиения отдельного каскада смещений на отдельные субкаскады) каждой реализации разупорядоченной области использовался алгоритм DBSCAN [11], входными параметрами

которого являются минимальное число радиационных дефектов $N_{cl}^{(min)}$, необходимое для образования субкластера, и минимальное расстояние $L_{cl}^{(min)}$ между соседними точечными дефектами. Исходя из соображений, что каждый СКРД окружен ОПЗ, $L_{cl}^{(min)}$ определяется длиной Дебая в материале. Минимальное число радиационных дефектов $N_{cl}^{(min)}$, образующих СКРД, для расчетов было выбрано равным четырем. Размеры СКРД оценивались с помощью алгоритма минимального эллипсоида [12].

Для оценки величины радиационно-индуцированного заряда, сгенерированного при образовании разупорядоченной области, использовался подход, описанный в работе [13]. В каждый момент времени, с помощью программы LAMMPS рассчитывается количество энергии, переданной из атомной подсистемы в электронную. Учитывая среднюю энергию образования электронно-дырочной пары (3.6 эВ в кремнии), можно вычислить суммарный радиационно-индуцированный заряд, так как темп генерации существенно превосходит темп рекомбинации неравновесных носителей заряда.

После радиационного воздействия в канале транзистора формируется разупорядоченная область, удельная проводимость которой близка к удельной проводимости собственного полупроводника σ_i . Для оценки изменения проводимости канала транзисторной структуры после воздействия нейтронов σ_{rad} использовалось уравнение Вейнера [14]:

$$\frac{\sigma_{rad} - \sigma_{ch}(N_d)}{\sigma_{rad} + 2\sigma_{ch}(N_d)} = \frac{V_{cl}}{V_{ch}} \frac{\sigma_i - \sigma_{ch}(N_d)}{\sigma_i + 2\sigma_{ch}(N_d)}, \quad (1)$$

где σ_{rad} — проводимости канала транзисторной структуры после воздействия нейтронов, σ_i — проводимость собственного полупроводника, σ_{ch} — проводимость канала транзисторной структуры до радиационного воздействия, V_{cl} — объем кластера радиационных дефектов, V_{ch} — объем канала транзисторной структуры, N_d — концентрация донорной примеси.

3. Результаты расчетов и обсуждение

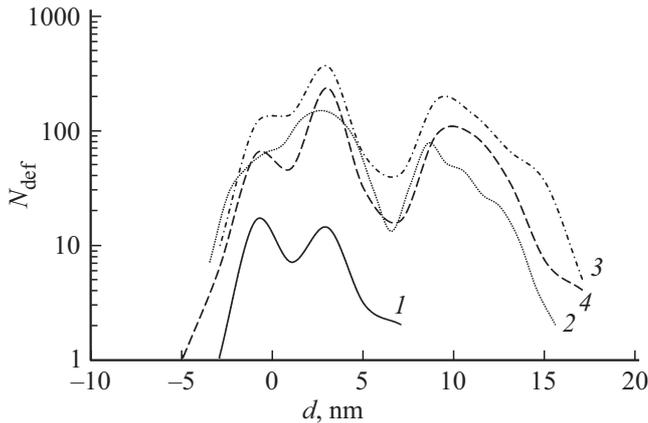
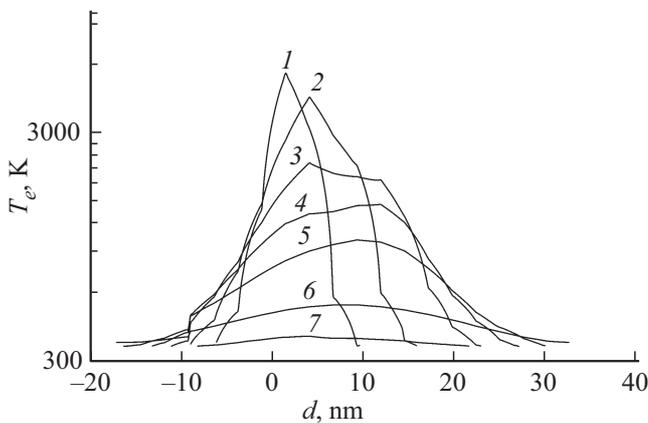
3.1. Параметры разупорядоченной области

На рис. 1 и 2 представлены результаты моделирования зависимости числа дефектов N_{def} и температуры электронно-дырочного газа T_e от глубины d при формировании КРД первичным атомом отдачи Si с энергией 50 кэВ для различных моментов времени.

Из полученных результатов следует, что в процессе формирования кластера радиационных дефектов можно выделить четыре характерные стадии, связанные с изменением размеров и концентрации дефектов: начальный баллистический участок (рис. 1, кривая 1), в течение которого первичный атом отдачи движется с минимальным числом столкновений; участок термического расширения (рис. 1, кривые 2 и 3), на протяжении которого число дефектов в кластере и его размеры

Таблица 1. Пространственные и временные масштабы процесса формирования кластера радиационных дефектов

Масштаб	Объект			
	Пара Френкеля	Электронно-дырочная пара	Кластер радиационных дефектов	Ток ионизации
Расстояние, нм	2	3	11	24
Время, пс	10^{-4}	10^{-3}	100	0.2

**Рис. 1.** Распределение числа дефектов N_{def} от глубины d для различных моментов времени процесса формирования кластера радиационных дефектов: 1 — 0.05, 2 — 0.15, 3 — 2.2, 4 — 102 пс. Начало координат соответствует точке инициации кластера.**Рис. 2.** Распределение температуры электронно-дырочной плазмы T_e от глубины d для различных моментов времени процесса формирования кластера радиационных дефектов: 1 — 0.03, 2 — 0.05, 3 — 0.1, 4 — 0.15, 5 — 0.22, 6 — 0.42, 7 — 1.22 пс. Начало координат соответствует точке инициации кластера.

стремительно увеличиваются; стадия первичной стабилизации, которая характеризуется резким уменьшением числа дефектов за счет рекомбинации близких пар Френкеля, и стадия быстрого отжига (рис. 1, кривая 4), которая может длиться несколько наносекунд, сопро-

вожаясь при этом плавным по сравнению со стадией первичной стабилизации уменьшением числа дефектов и размеров кластера за счет отжига. При этом процессы разогрева электронно-дырочной плазмы, сопровождающие образование кластера радиационных дефектов, протекают значительно быстрее описанных выше процессов. К концу стадии термического расширения температура электронно-дырочной плазмы устанавливается в районе равновесных значений, которые наблюдались до радиационного воздействия.

Обобщая вышесказанное, в табл. 1 представлены характерные пространственные и временные масштабы процесса формирования кластера радиационных дефектов в кремнии, среди которых выделены стадии генерации электронно-дырочных пар и образования отдельных точечных дефектов, субкластеров, а также кластеров в целом.

Из полученных результатов следует, что пространственные и временные масштабы процессов упругого взаимодействия и ионизации существенно различаются. Поэтому для оценки влияния формирования единичного кластера на параметры работы транзисторных структур данные процессы можно рассматривать независимо.

4. Изменение проводимости канала транзисторной структуры

Для моделирования изменения проводимости канала транзисторной структуры необходимо оценить размеры кластера радиационных дефектов, которые образуют первичные атомы отдачи с различной энергией. На рис. 3 и 4 представлены зависимости распределения размеров субкластеров, количества субкластеров и расстояния между ними для различных энергий первичного атома.

Из представленных результатов следует, что при увеличении энергии первичного атома отдачи изменяется характер распределения размеров субкластеров. При этом для небольших энергий, при которых не происходит разделения кластера на отдельные субкаскады, распределение размеров имеет вид, близкий к нормальному. С ростом энергии первичного атома отдачи увеличивается число небольших субкластеров в каскаде атомных столкновений, так как потери энергии на упругое взаимодействие уменьшаются, что и приводит к изменению характера распределений.

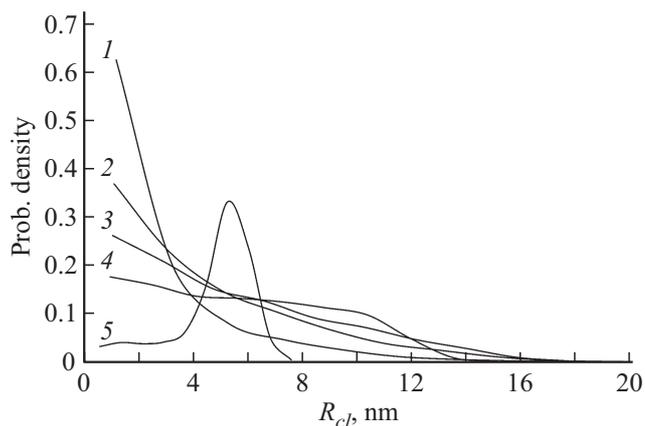


Рис. 3. Распределение размеров субкластеров R_{cl} для различных энергий первичного атома отдачи: 1 — 800, 2 — 90, 3 — 60, 4 — 30, 5 — 10 кэВ.

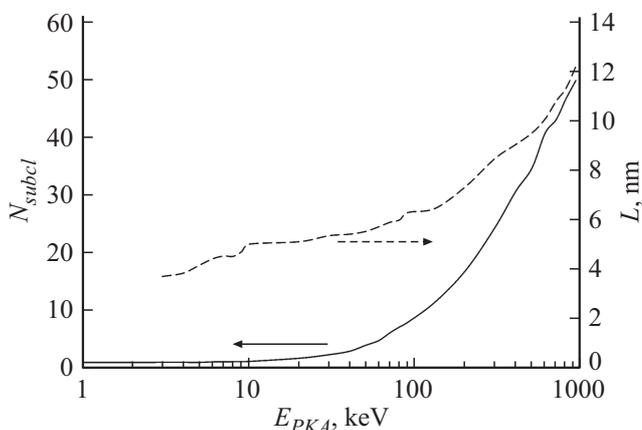


Рис. 4. Зависимости среднего числа субкластеров N_{subcl} в одном кластере (сплошная линия) и среднего расстояния между ними L (пунктирная линия) от энергии первичного атома отдачи E_{PKA} .

Параметры современных транзисторных структур, такие как топологические размеры, напряжение, емкость затвора и критический заряд, величина которого определяет минимальный собранный выводом стока заряд, необходимый для переключения ячейки статической памяти, для которых проведены оценки изменения проводимости канала, представлены в табл. 2 [15].

В соответствии с выражением (1), а также данными, представленными в табл. 2, были рассчитаны зависимости относительного изменения проводимости канала транзистора при нулевом смещении на затворе и величины радиационно-индуцированного заряда от энергии первичного атома отдачи для различных топологических норм, представленные на рис. 5.

Из полученных результатов следует, что для технологических процессов № 3, 4 и 5 отказ транзистора, связанный с уменьшением проводимости канала, наступает раньше сбоя, вызванного нештатным переключени-

Таблица 2. Параметры современных транзисторных структур

Параметр	Технический процесс				
	1	2	3	4	5
Длина канала, нм	24	18	14	10	10
Ширина канала, нм	92	90	56.5	56.5	56.5
Глубина канала, нм	21	18	12	10	6
Напряжение, В	0.8	0.75	0.7	0.65	0.55
Емкость затвора фФ/мкм	1.81	1.49	1.229	0.97	1.04
Критический заряд, фКл	1.33	1	0.49	0.36	0.33

ем транзисторной ячейки. Однако для технологических процессов № 1 и 2 реализуется обратная ситуация.

На рис. 6 представлены зависимости относительного изменения проводимости канала транзисторной структу-

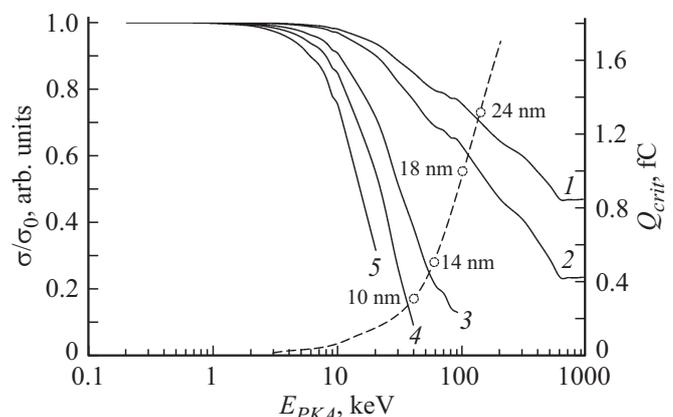


Рис. 5. Относительное изменение проводимости канала транзисторных структур σ/σ_0 для различных проектных норм (сплошная линия) и величина критического заряда Q_{crit} (пунктирная линия) от энергии первичного атома отдачи E_{PKA} : Номер графика соответствует номеру конфигурации в табл. 2.

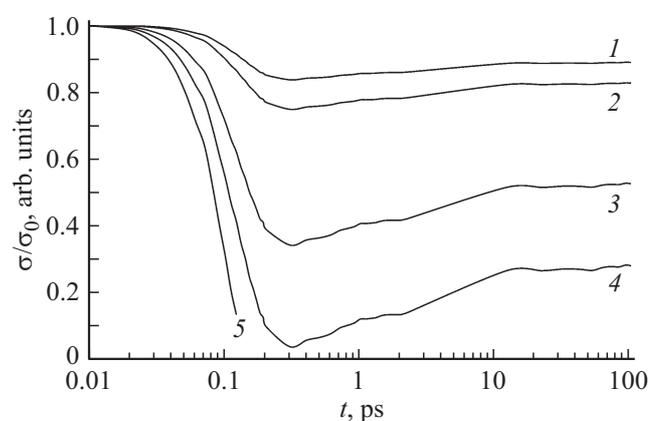


Рис. 6. Относительное изменение проводимости канала транзисторных структур σ/σ_0 для различных проектных норм во времени в процессе формирования кластера радиационных дефектов: Номер графика соответствует номеру конфигурации в табл. 2.

ры для различных длин затвора при формировании КРД первичным атомом отдачи Si с энергией 50 кэВ.

Из представленных результатов следует, что с уменьшением размеров канала транзистора возможна ситуация, когда в течение короткого промежутка времени проводимость канала падает практически до нуля с последующим восстановлением. В этом случае возникает обратимый сбой работы транзисторной структуры, несвязанный с ионизационными процессами.

5. Заключение

Подводя итог, необходимо отметить, что более точные оценки возможны при использовании подходов, основанных на методах физико-топологического моделирования. В этом случае изменение проводимости канала будет оцениваться по изменению подвижности и концентрации носителей заряда.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках базовой части государственного задания, проект 0729-2020-0057.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] А.С. Давыдов. *Теория твердого тела* (М., Наука, 1976).
- [2] А.С. Пузанов, С.В. Оболенский, В.А. Козлов. *ФТП*, **49** (1), 71 (2015).
- [3] С.В. Оболенский. *Изв. вузов. Электроника*, **4**, 49 (2003).
- [4] И.Ю. Забавичев, А.А. Потехин, А.С. Пузанов, С.В. Оболенский, В.А. Козлов. *ФТП*, **51** (11), 1520 (2017).
- [5] К.О. Петросянци, 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 нанoeлектронных систем — 2012“* (М., 2012) с. 413.
- [6] А.С. Пузанов, С.В. Оболенский, В.А. Козлов. *ФТП*, **54** (8), 791 (2020).
- [7] Б.А. Калинин. *Физическое материаловедение. Т. 4. Физические основы прочности. Радиационная физика твердого тела. Компьютерное моделирование* (М., МИФИ, 2008).
- [8] J.F. Ziegler, J.P. Biersak, U. Littmark. *The stopping and range of ions in solids* (Pergamon, N.Y., 1996).
- [9] S. Plimton. *J. Comput. Phys.*, **117**, 1 (1995).
- [10] D. Duffy, A. Rutherford. *J. Phys.: Condens. Matter*, **19**, 016207 (2007).
- [11] M. Ester, H.P. Kriegel, J. Sander, X. Xu. *Proc. Second Int. Conf. on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD-96)* (AAAI Press, 1996) p. 226.
- [12] L.G. Khachiyan. *Mathematics of Operations Res.*, **21** (2), 307 (1996).
- [13] И.Ю. Забавичев, А.А. Потехин, А.С. Пузанов, С.В. Оболенский, В.А. Козлов. *ФТП*, **53** (9), 1279 (2019).

[14] C.J.F. Bottcher. *Theory of Electric Polarisation* (Elsevier, N.Y., 1952) p. 415.

[15] *International Roadmap for Devices and Systems. 2017 Edition, Copyright & 2018 IEEE.*

Редактор Г.А. Оганесян

The influence of a single radiation defect cluster forming on the transistor structure channel conductivity

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 Branch of Russian federal nuclear center all-Russian research institute of experimental physics „Sedakov Scientific Research Institute of Measurement Systems“, 603950 Nizhny Novgorod, Russia

Abstract The effect of a single radiation defects cluster formation on the characteristics of short-channel structures was studied. Estimates of the nuclear particle energy, capable of forming a cluster of radiation defects, causing a failure and modern silicon transistors failure with various channel sizes.