

# Моделирование радиационно-индуцированных токов утечки в МОП-структурах при воздействии гамма- и рентгеновского излучений

А.А. Смолин<sup>1</sup>, А.В. Согоян<sup>1,2</sup>, А.В. Уланова<sup>1,2</sup>, А.А. Демидов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт экстремальной прикладной электроники (ИЭПЭ)

<sup>2</sup>ОАО «Экспериментальное научно-производственное объединение Специализированные электронные системы» (ОАО «ЭНПО СПЭЛС»), Москва, [aasmol@spels.ru](mailto:aasmol@spels.ru)

**Аннотация** — При воздействии рентгеновского и гамма-излучений на КМОП ИС в ряде случаев наблюдается различие дозовых зависимостей критериальных параметров. Данный эффект был изучен с помощью моделирования процесса накопления радиационно-индуцированного заряда в изолирующих окислах МОП-структур при воздействии гамма- и рентгеновского излучений. Установлена связь пространственного распределения центров захвата в осажденных окислах с кинетикой дозовой деградации токов утечки для двух типов излучения.

**Ключевые слова** — МОП, STI, ток утечки, дозовая деградация, гамма излучение, рентгеновское излучение.

## I. ВВЕДЕНИЕ

В практике проведения испытаний электронной компонентной базы (ЭКБ) на стойкость к дозовым воздействиям используются моделирующие установки на основе изотопных источников гамма-излучения и имитирующие установки на основе рентгеновских источников. Моделирующие установки обладают рядом недостатков, связанных со сложностью эксплуатации и проведением измерений во время испытаний. Невозможность определения некоторых параметров быстродействующих устройств путем дистанционных измерений обусловила необходимость использования в таких случаях рентгеновских имитаторов. Ряд теоретических и экспериментальных исследований показывает качественную эквивалентность дозовых эффектов от различных источников [1-6]. Как результат имитирующие установки были включены в стандарты испытаний ЭКБ как в России, так и за рубежом.

Методика калибровочной дозиметрии, используемая в настоящее время для испытаний ЭКБ на стойкость по дозовым эффектам на основе совместного использования источников гамма- и рентгеновского излучений, предполагает возможность полного совмещения дозовых зависимостей для критериального параметра от двух типов источников с использованием

линейного преобразования. Такой подход достаточно хорошо зарекомендовал себя для МОП-структур, дозовая деградация которых определяется тонким подзатворным диэлектриком. Для современных ИС, радиационное поведение которых определяется паразитными структурами, данная методика часто не позволяет получить совмещение дозовых зависимостей с заданными погрешностями. Примеры таких случаев приведены на рис. 1. На верхнем графике представлены совмещенные с использованием линейного преобразования дозовые зависимости тока потребления АЦП, полученные при воздействии рентгеновского и гамма-излучения. На нижнем графике на рис.1 показано расхождение дозовых зависимостей для функционально «сложного» параметра устройства, такого как смещение нуля характеристики преобразования.

Основным механизмом дозовой деградации для КМОП интегральных схем с глубоко-субмикронными проектными нормами является возрастание токов утечек n-канальных транзисторов, вызванное встраиванием заряда в области STI (Shallow trench isolation - изоляция мелкими канавками) [7]. Поэтому для выявления механизма, вызывающего описанное выше отличие деградации параметров от двух типов излучения, необходимо исследовать процесс накопления заряда в осажденных окислах, формирующих STI.

В данной работе на основе экспериментальных данных, представленных Mrstik *et al.* [8], с помощью моделирования получена оценка параметров пространственного распределения центров захвата дырок в осажденных окислах. С использованием установленного распределения проведено моделирование воздействия рентгеновского и гамма-излучений на МОП-структуру. Анализ полученных результатов позволил связать отличие кинетик дозовой деградации с особенностями захвата заряда в осажденном окисле при воздействии двух типов излучения. Результаты моделирования дозовых зависимостей токов утечек демонстрируют качественное соответствие расчетных и экспериментальных результатов. Моделирование накопления

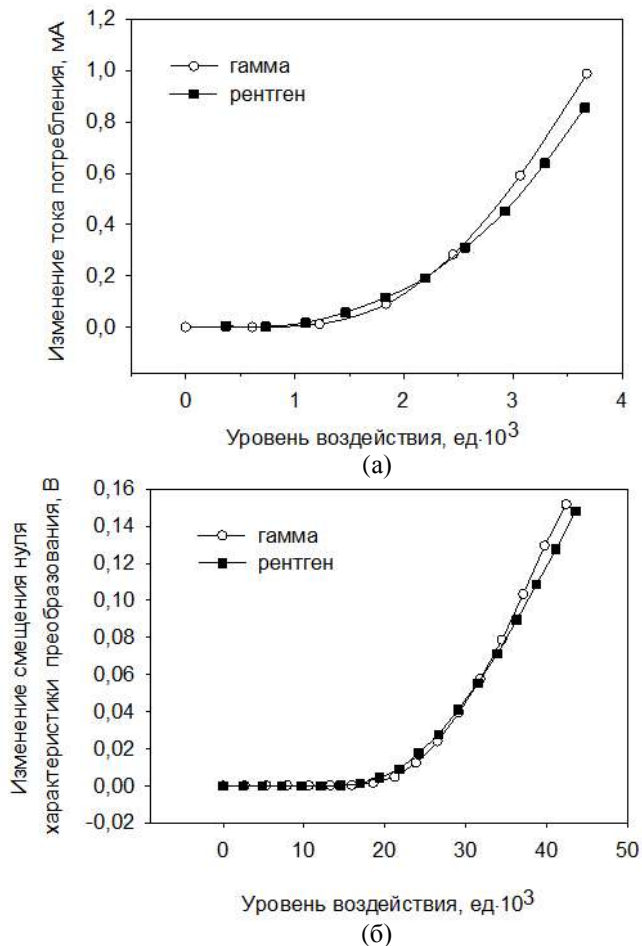


Рис. 1. Совмещенные дозовые зависимости изменения (а) тока потребления и (б) смещения нуля характеристики преобразования АЦП

радиационно-индуцированного заряда в области STI, проведенное для трехмерной транзисторной структуры, не выявило качественных отличий от выводов, сделанных на основе анализа одномерной МОП-структуры.

## II. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЛОВУШЕК В ОКИСЛЕ

При моделировании деградации параметров под воздействием ионизирующего излучения принципиальное значение имеет характер распределения центров захвата в окисле. В связи с этим, его определение было целью первого этапа данной работы.

Проведенные в работах [8,9] экспериментальные исследования демонстрируют существенные отличия окислов, полученных с помощью осаждения и термического окисления. В частности, в работе Mrstik *et al.* [8] исследуются МОП-структуры с толстыми окислами, изготовленными по технологиям, используемым для формирования STI. На основе экспериментальных результатов авторами делается вывод о значительном захвате положительного заряда в объеме окисла, а не только вблизи границы с кремнием, как в случае термических окислов. Представленные в [8] экспериментальные зависимости сдвига напряжения плоских зон

от дозы рентгеновского излучения были использованы в данной работе для определения распределения ловушек в окисле.

С использованием системы приборно-технологического моделирования TCAD Sentaurus был проведен расчет воздействия стационарного рентгеновского излучения на МОП-структуру с параметрами, соответствующими параметрам тестовых структур, использованных в работе [8]. Решалась самосогласованная задача моделирования процессов генерации, переноса, захвата и рекомбинации радиационно-индуцированных носителей заряда в окисле. Перенос носителей рассчитывался в рамках диффузионно-дрейфового приближения.

Для определения характера распределения центров захвата дырок в окисле были рассмотрены различные варианты распределения ловушек: поверхностное задание на границе раздела с кремнием, часто используемое в аналитических моделях, равномерное распределение по объему, а также совместное задание по объему окисла и в слое варьируемой толщины вблизи границы Si/SiO<sub>2</sub>, подобно предложенному в работе [10]. Наилучшее совмещение с экспериментальными данными для двух значений напряженности поля в окисле удалось получить при использовании сочетания равномерного распределения ловушек по объему и на границе раздела с кремнием. При этом совмещение достигалось только для близких по абсолютной величине поверхностной плотности ловушек на границе и в объеме окисла. Такое распределение соответствует физическим представлениям о природе центров захвата и результатам, описанным в работах [8,9]. Зависимости, полученные для итогового распределения с поверхностной плотностью ловушек  $5 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$  и объемной концентрацией  $1.4 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , представлены на рис. 2 вместе с экспериментальными зависимостями из работы [8].

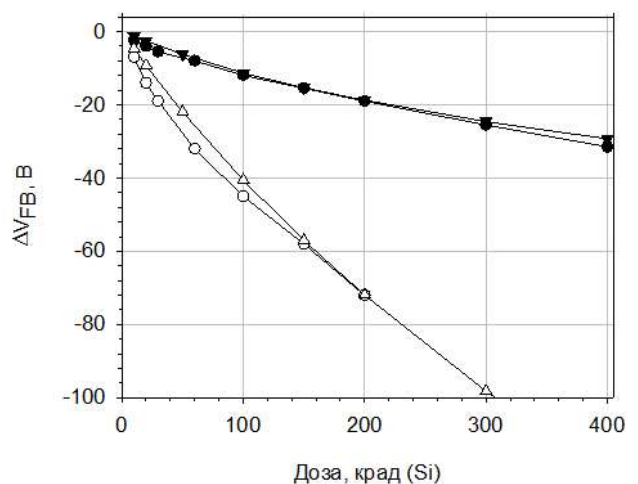


Рис. 2. Зависимости сдвига напряжения плоских зон от дозы рентгеновского излучения по материалам [8] (круги) и расчетные (треугольники) для напряженности поля в окисле 0.5 МВ/см (закрашенные) и 0.05 МВ/см (незакрашенные)

### III. ВОЗДЕЙСТВИЕ ГАММА- И РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЙ

#### A. Моделирование для МОП-структуры

Установленный характер пространственного распределения центров захвата был использован при моделировании воздействия гамма- и рентгеновского излучений на одномерную МОП-структуру. Моделирование для одномерной задачи было необходимо из-за сложности однозначной интерпретации результатов при рассмотрении только трехмерной структуры, близкой к реальному транзистору. Вид излучения при моделировании задавался зависимостью выхода первичной рекомбинации от напряженности поля. Функции, аппроксимирующие данные зависимости, определялись на основе экспериментальных данных [1,3,11] и представлены на рис. 3.

Дозовые зависимости сдвига напряжения плоских зон были рассчитаны для смещения 1.2 В, соответствующего режиму эксплуатации в составе микросхемы. На рис. 4 представлены расчетные зависимости для двух видов воздействия и кривая, полученная совмещением зависимости для рентгеновского излучения с зависимостью для гамма-излучения с помощью линейного преобразования с коэффициентом  $P_x = 0.33$ . Как видно из графика, достаточно хорошее совмещение удается получить только на начальном участке, однако насыщение зависимостей начинается на разных уровнях. Как показал анализ результатов моделирования, такое расхождение характеристик вызвано увеличивающимся с ростом дозы различием в распределениях захваченного заряда в объеме окисла. Генерация и перенос носителей заряда в каждый момент времени определяются электрическим полем в окисле и зависящей от поля первичной рекомбинацией. Поле в окисле, в свою очередь, определяется уже захваченным зарядом в объеме окисла, что и вызывает увеличение расхождения по мере накопления дозы.

На основе результатов моделирования были рассчитаны дозовые зависимости токов утечки МОП-структуры. Данные зависимости, совмещенные с использованием линейного преобразования, представлены на рис. 5. Полученное при этом расхождение характеристик позволяет заключить, что даже для случая простейшей МОП-структуры наблюдается качественное соответствие расчетных и экспериментальных зависимостей, представленных в Разделе I.

#### B. Моделирование для транзисторной структуры

Картина электрического поля в изолирующем окисле реального транзистора значительно отличается от поля в одномерной МОП-структуре. В связи с этим, подтверждение справедливости для реальных транзисторов выводов, сделанных для одномерной структуры, требует проведения дополнительного расчета. Используемая для расчета трехмерная структура представляет собой часть транзистора, граничащую с областью STI (рис. 6) Модель транзистора основана на параметрах и профилях легирования коммерческого

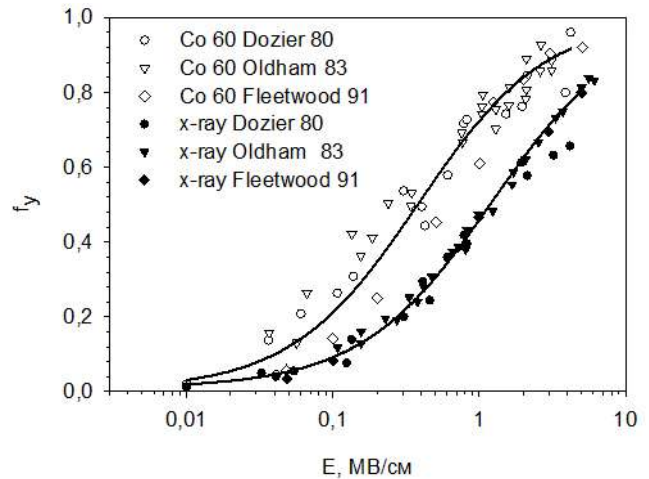


Рис. 3. Зависимости доли носителей, избежавших рекомбинации, от напряженности поля для двух типов излучения

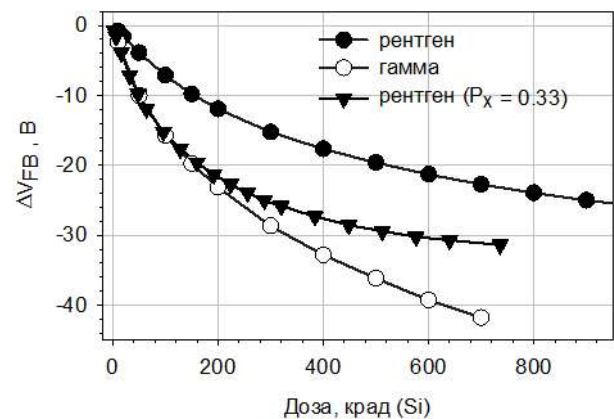


Рис. 4. Дозовые зависимости сдвига напряжения плоских зон

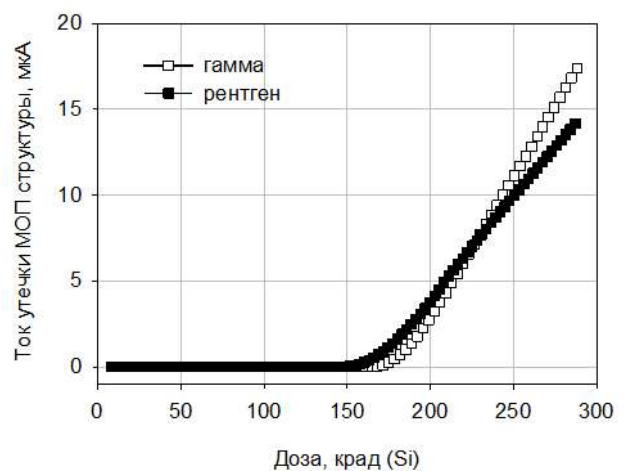


Рис. 5. Расчетные дозовые зависимости тока утечки МОП-структуры

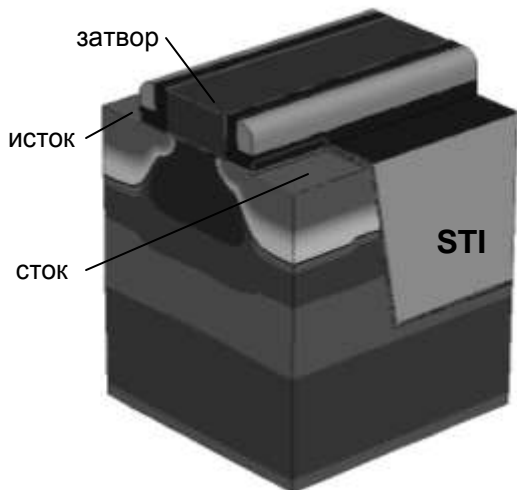


Рис. 6. Структура, использованная для моделирования токов утечки

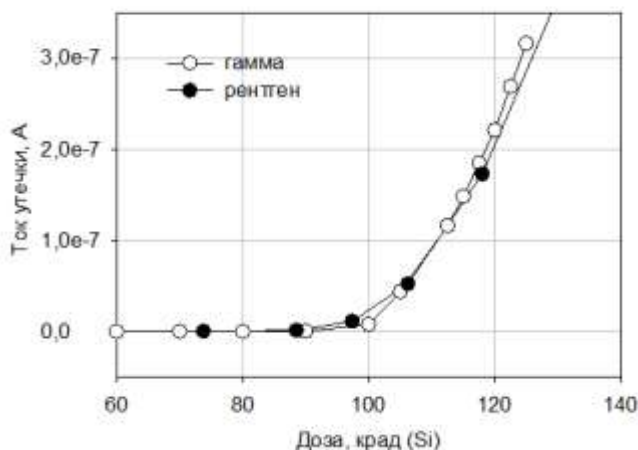


Рис. 7. Расчетные дозовые зависимости тока утечки для трехмерной транзисторной структуры

180 нм технологического процесса, предоставленных «НИИМЭ и Микрон». Локализация центров захвата в области STI задавалась также на основе пространственного распределения ловушек дырок, описанного в Разделе II.

Переход к трехмерному случаю значительно усложняет картину электрического поля в окисле и, как следствие, перенос радиационно-индуцированных носителей и итоговое распределение захваченного заряда. Результаты моделирования дозовой деградации токов утечек n-канального МОП транзистора для рентгеновского и гамма-излучения представлены на рис. 7. Как видно из данных зависимостей, качественный характер результатов, полученных для одномерной МОП-структуры, остается справедливым и при переходе к трехмерной модели, соответствующей реальному транзистору.

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное в данной работе моделирование позволило получить результаты, качественно соответствующие экспериментально наблюдаемым отличиям

дозовой деградации параметров при воздействии гамма- и рентгеновского излучений. Установлено, что соответствие расчетных и экспериментальных зависимостей достигается при учете пространственного распределения центров захвата, характер которого был определен на первом этапе данной работы. Моделирование дозовой деградации токов утечек показало, что качественные выводы, сделанные на основе анализа простой одномерной МОП-структуры, остаются справедливыми для трехмерного случая, отражающего геометрию реального транзистора, несмотря на значительное усложнение задачи.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность сотрудникам ОАО «НИИМЭ и Микрон» Шелепину Н.А. и Селецкому А.В. за информацию о параметрах МОП-транзисторов с проектными нормами 180 нм.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Dozier C.M., Brown D.B., Throckmorton J.L., Ma D.I. Defect Production in SiO<sub>2</sub> by X-Ray and Co-60 Radiations // IEEE Trans. on Nucl. Sci. 1985. Vol. 35. P. 4363-4368.
- [2] Fleetwood D.M., Beegle R.W., Sexton F.W., Winokur, P.S., Miller S.L., Treece R.K., Schwank J.R., Jones R.V., McWhorter P.J. Using a 10-keV X-Ray Source for Hardness Assurance // IEEE Trans. on Nucl. Sci. 1986. Vol. 33. P. 1330-1336.
- [3] Oldham T.R., McGarrity J.M. Comparison of Co-60 Response and 10 keV X-ray Response in MOS Capacitors // IEEE Trans. on Nucl. Sci. 1983. Vol. 30. P. 4377-4383.
- [4] Согоян А.В., Артамонов А.С., Богданов Ю.И., Никифоров А.Ю. Метод испытаний интегральных схем на стойкость к дозовому воздействию на основе совместного применения гамма- и рентгеновских источников // Спецтехника и связь. 2011. №4-5.
- [5] Belyakov V.V., Chumakov A.I., Nikiforov A.Y., Pershenkov V.S., Skorobogatov P.K., Sogoyan A.V. IC's radiation effects modeling and estimation // Microelectronics Reliability. 1999. 40 (12). P. 1997-2018.
- [6] Chumakov A.I., Nikiforov A.T., Telets V.A., Gerasimov V.F., Yanenko A.V., Sogoyan A.V. IC space radiation effects experimental simulation and estimation methods // Radiation Measurements. 1999. 30 (5). P. 547-552.
- [7] Shaneyfelt M.R., Dodd P.E., Draper B.L., Flores R.S. Challenges in hardening technologies using shallow-trench isolation // IEEE Trans. on Nucl. Sci. 1998. Vol. 45. P. 2584-2592.
- [8] Mrstik B.J., Hughes H.L., Lawrence R.K., McMarr P. J., Gouker P. Comparison of charge trapping in undoped oxides made by low- and high-temperature deposition techniques // IEEE Trans. on Nucl. Sci. 2001. Vol. 48. P. 2107-2113.
- [9] Warren W.L., Shaneyfelt M.R., Fleetwood D.M., Winokur P.S. Nature of defect centers in B- and P-doped SiO thin films // Appl. Phys. Lett. 1995. Vol. 67. P. 995-997.
- [10] Esqueda I.S.; Barnaby H.J.; Adell P.C.; Rax B.G.; Hjalmarson H.P. Modeling Low Dose Rate Effects in Shallow Trench Isolation Oxides // IEEE Trans. on Nucl. Sci. 2011. Vol. 58. P. 2945 - 2952.
- [11] Shaneyfelt M.R., Fleetwood D.M., Schwank J.R., Hughes K.L. Charge yield for 10-keV x-ray and cobalt-60 irradiation of MOS devices // IEEE Trans. on Nucl. Sci. 1991. Vol. 38. P. 1187 -1194.