

# Исследование влияния разброса технологических параметров СБИС на стойкость к эффектам накопленной дозы радиации с помощью средств приборно-технологического моделирования

А.В. Селецкий<sup>1,2</sup>, Н.А. Шелепин<sup>1,2</sup>, А.А. Смолин<sup>3,4</sup>, А.В. Уланова<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup>АО «НИИМЭ», aseletskiy@mikron.ru

<sup>2</sup>Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,

<sup>3</sup>Национальный исследовательский ядерный университет НИЯУ МИФИ,

<sup>4</sup>АО «ЭНПО СПЭЛС»

**Аннотация** — В данной статье исследуется влияние технологического разброса электрофизических параметров элементов СБИС на токи утечки схем, вызываемые воздействием радиации. В работе представлены результаты приборно-технологического моделирования технологического разброса и подтверждена возможность его существенного влияния на параметры стойкости КМОП СБИС по критерию статического тока потребления к величине накопленной дозы радиации.

**Ключевые слова** — КМОП, технологический разброс, радиационная стойкость, накопленная доза радиации.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Технологический процесс производства КМОП СБИС включает множество технологических операций, таких как осаждение, травление, ионное легирование, фотолитография и т.д. Особенностью технологических операций является неизбежный уход получаемых параметров (толщина осажденных слоёв, глубина травления, доза и энергия имплантации) от целевых параметров. Данный эффект принято называть технологическим разбросом. Как правило он проявляется в некоторой вариации электрических параметров элементов СБИС, расположенных в различных местах кремниевой пластины, кроме того вариации могут происходить в различных партиях пластин [1].

## II. ОПИСАНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Технологический разброс контролируется как физически - путем измерения толщин пленок, глубин канавок и т.д., так и косвенно - с помощью измерения электрических характеристик тестовых структур (параметрических мониторов). Контроль разброса параметров позволяет отсеивать негодные кристаллы, если уход от целевого значения выходит за границы допустимого коридора.

С точки зрения радиационной стойкости уход технологических параметров также играет

существенную роль – за счет технологического разброса будут изменяться толщины диэлектриков, концентрации примесей в карманах и на границах раздела кремний/изолятор, глубины межэлементной изоляции, глубины залегания р-п переходов и т.п. Все это будет влиять на параметры стойкости к эффектам накопленной дозы радиации, импульсным и одиночным радиационным эффектам [2-4].

Данная работа посвящена исследованию влияния вариации некоторых технологических параметров на стойкость к эффектам накопленной дозы ионизирующего излучения, которая в значительной степени определяется токами радиационно-индуцированных утечек для технологий КМОП СБИС с технологическим уровнем 0,25-0,13 мкм.

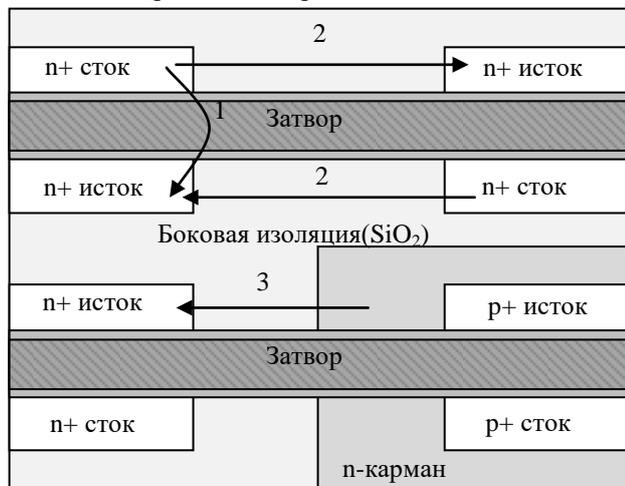
## III. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Воздействие ионизирующих излучений приводит к генерации электронно-дырочных пар в материалах СБИС. В случае эффектов накопленной дозы ионизирующего излучения это приводит к захвату положительного заряда на ловушечных уровнях в областях STI (Shallow Trench Isolation - мелкая щелевая изоляция) и подзатворном диэлектрике [5-7]. Аккумуляция достаточного количества заряда, в свою очередь, приводит в р-кармане к инверсии типа проводимости граничащих с окислом областей кремния и формированию радиационно-индуцированных каналов утечек, основные виды которых изображены на рис. 1. Их можно классифицировать следующим образом [8]:

- 1) Внутритранзисторная утечка – возникает между стоком и истоком п-канального транзистора - канал проходит через приповерхностную область по боковой стенке STI в месте пересечения её с затвором.
- 2) Межтранзисторная утечка – возникает между стоками и истоками соседних п-канальных транзисторов - канал будет проходить через донную область STI.

3) Утечка на p-карман – возникает между p-карманом p-канального транзистора и истоком n-канального транзистора.

В транзисторах с большой топологической нормой накопление положительного заряда в подзатворном диэлектрике также вызывало смещение порогового напряжения транзисторов, однако принято считать, что для КМОП СБИС изготовленных по 180-90 нм технологиям влияние радиационного излучения на смещение порогового напряжения незначительно [9].



**Рис. 1. Схематическое изображение утечек, индуцированных воздействием накопленной дозы ионизирующего излучения. Заштрихованная область – поликремниевый затвор**

Величина поглощенной дозы, при которой будет возникать утечка, по аналогии с пороговым напряжением транзистора будет определяться тремя параметрами [10]:

1) Эффективностью захвата радиационно-генерируемого заряда в изолирующих структурах. Определяется режимами осаждения и окисления, которые влияют на специфику распределения центров захвата в изоляторе и их концентрацию.

2) Геометрией STI, от которой зависит распределение электрических полей в окисле.

3) Концентрацией примесей в кремнии на границе раздела с изолятором. Определяется дозой и энергией имплантации карманов и rocket (halo) областей транзисторов, толщинами подзатворного диэлектрика и STI, геометрией «шапки» STI в месте ее пересечения с подзатворным диэлектриком.

Исследования проводились на основе типичной технологии КМОП СБИС с проектными нормами 0,18 мкм. Влияние вариаций первого и второго параметров исследовать не имеется возможности по причине физического отсутствия механизма контроля данных параметра в коммерческих технологиях.

Таким образом, задачей исследования являлось установление с помощью средств приборно-технологического моделирования влияние ухода технологических параметров, влияющих на изменение концентрации примесей вблизи границы раздела.

#### IV. МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

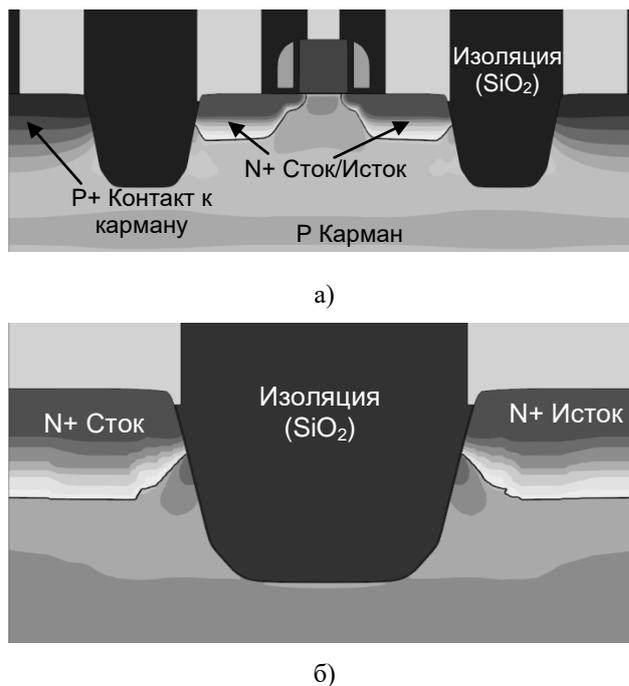
Задача исследования влияния ухода технологических параметров, приводящих к изменению концентрации примесей вблизи границы, решалась с помощью средств приборно-технологического моделирования, входящих в пакет программ TCAD Sentaurus фирмы Synopsys.

Для получения «идеального случая» производилось моделирование в программе Sentaurus Process полного технологического маршрута изготовления КМОП СБИС. Для моделирования технологического разброса имплантации кармана и травления канавки STI следующие параметры варьировались на величину ±5% (что примерно соответствует технологическому разбросу данной технологии):

- 1) Глубина STI.
- 2) Доза имплантации p-кармана.
- 3) Энергия имплантации p-кармана.

Дерево экспериментов содержало 27 позиций для каждого из трех исследуемых типов N-канальных транзисторов: с низкими токами утечек, высокопроизводительный (скоростной) и транзистор для схем входа-выхода с повышенным напряжением питания.

В результате технологического моделирования были получены два типа модельных структур: одиночный n-канальный МОП транзистор и структура, включающая n+ области соседних nМОПТ, разделенные областью STI. Вид полученных структур для скоростного nМОПТ изображен на рис. 2.



**Рис. 2. Структуры, полученные с помощью приборного моделирования технологического маршрута изготовления КМОП СБИС. а) NМОП транзистор, б) сток/истоковые области соседних NМОП транзисторов**

Результаты технологического моделирования в дальнейшем были использованы для приборного моделирования в программе Sentaurus Device.

Структура, изображенная на рис. 2а, в неизменном виде использовалась для моделирования проходной ВАХ и экстракции значений пороговых напряжений транзисторов. Набор математических моделей и их параметры выбирались при этом на основе работы [11].

Моделирование воздействия полной поглощенной дозы проводилось с использованием различных параметров моделей «Radiation» (описывает параметры рентгеновского излучения) и «Traps» (описывает распределение ловушек в оксиде и скорость их захвата), описанных в работах [11] и [12].

Структура, изображенная на рис. 2б, в неизменном виде использовалась для моделирования межтранзисторной утечки.

Для расчета уровня стойкости к межтранзисторной утечке использовалась «псевдотрехмерная» модельная структура. Она была получена методом импортирования в трехмерную структуру, сформированную с помощью программы Sentaurus Structure Editor, двумерного профиля распределения примесей, растянутого по третьей оси. Двумерный примесный профиль при этом экстрагировался из структуры, изображенной на рис. 2а. Вид структуры для транзистора «входа-выхода» изображен на рис. 3.

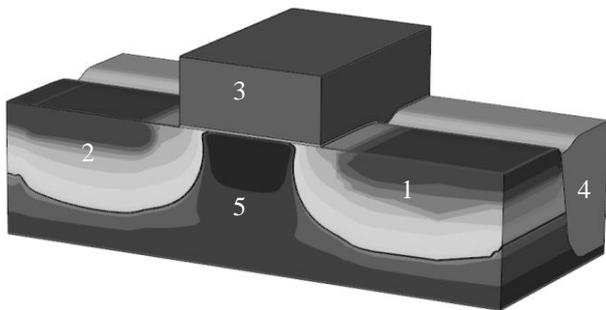


Рис. 3. Модельная структура, используемая для трехмерного моделирования воздействия ионизирующего излучения. 1 - сток, 2 - исток, 3 - поликремниевый затвор, 4 – область STI, 5 - карман P-типа

Во время моделирования радиационного воздействия напряжения на стоке и истоке (а также на затворе для внутритранзисторной утечки) были равны напряжению питания, так как выход первичной рекомбинации, и, как следствие, захваченный в оксиде заряд, зависят от электрического поля в оксиде [13].

Результаты, полученные с помощью приборно-технологического моделирования, могут не обеспечивать полного соответствия экспериментальным данным, однако вполне применимы для качественной оценки.

## V. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

С помощью приборно-технологического моделирования были получены проходные ВАХ и зависимости токов утечек от величины полной поглощенной дозы для трех типов транзисторов с минимальными топологическими размерами.

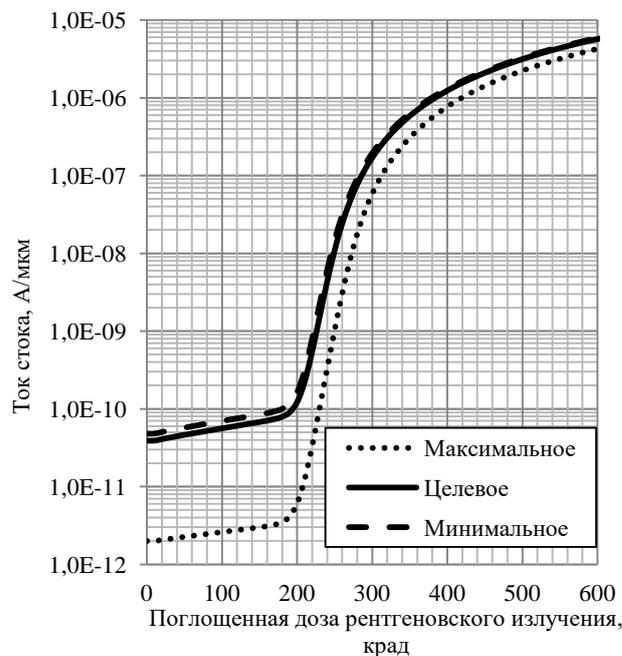


Рис. 4. Влияние технологического разброса на внутритранзисторную утечку N-канального транзистора «входа-выхода»

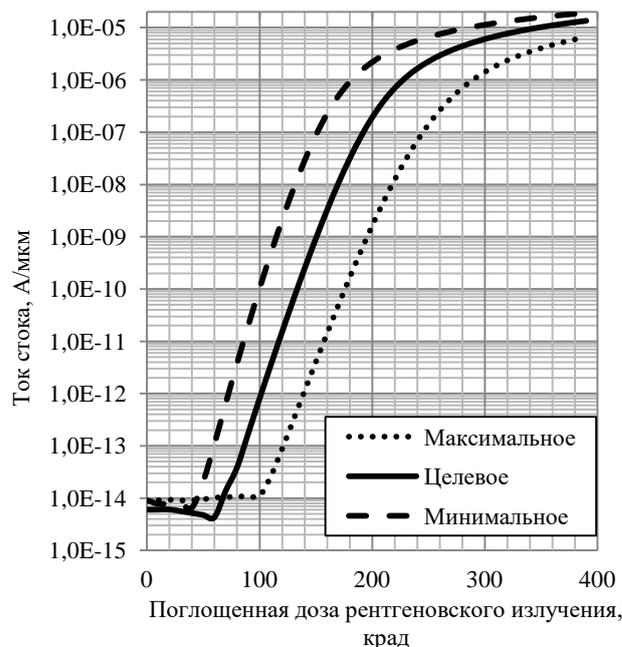
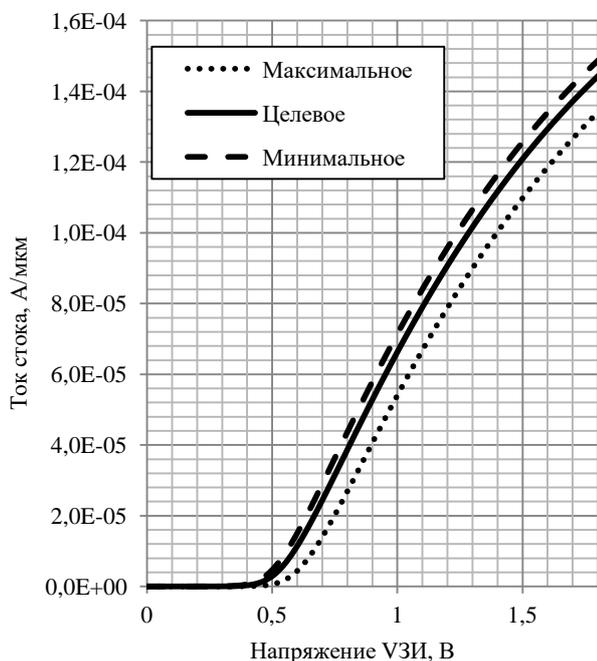


Рис. 5. Влияние технологического разброса на межтранзисторную утечку N-канального скоростного транзистора

На рис. 4 и 5 для примера изображены зависимости внутритранзисторной утечки транзистора «входа-

выхода» и межтранзисторной утечки скоростного транзистора от накопленной дозы с учетом разброса технологических параметров.

С целью оценки влияния технологического разброса на параметры основных транзисторов проводилась экстракция значений пороговых напряжений. Вид передаточной ВАХ (из которой проходила экстракция порогового напряжения) транзистора с низкими токами утечки изображен на рис. 6.



**Рис. 6.** Влияние технологического разброса на пороговое напряжение N-канального транзистора с низкими токами утечки

Результаты моделирования, аналогичные изображенным на рис. 4-6, были получены для всех типов транзисторов и всех исследуемых отклонений технологических параметров. Из характеристик были экстрагированы значения пороговых напряжений и стойкости к поглощенной дозе. Параметры радиационной стойкости находились по уровню тока, значение порогового напряжения – по методу Хаммера.

Таблица 1

*Вариации параметров nМОПТ с низкими токами утечек*

	Max	Min
Межтранзисторная утечка	-16,50%	21,36%
Внутритранзисторная утечка	-2,07%	2,07%
Пороговое напряжение	-5,16%	7,08%

Таблица 2

*Вариации параметров высокопроизводительных nМОПТ*

	Max	Min
Межтранзисторная утечка	-19,11%	23,21%
Внутритранзисторная утечка	-2,28%	10,50%
Пороговое напряжение	-3,53%	7,95%

Таблица 3

*Вариации параметров nМОПТ для схем входа-выхода*

	Max	Min
Межтранзисторная утечка	-17,70%	35,40%
Внутритранзисторная утечка	-11,67%	3,33%
Пороговое напряжение	-4,31%	3,59%

Полученные значения были представлены в виде максимальных и минимальных отклонений относительно «идеального» случая в процентном соотношении и приведены в Таблицах 1-3.

Исходя из результатов, представленных в табл.1-3, можно сделать вывод, что технологический разброс существенно изменяет уровень стойкости транзисторов к межтранзисторной утечке. С другой стороны, влияние на внутритранзисторную утечку и пороговое напряжение является не таким существенным.

Полученные результаты можно объяснить следующим:

1) На концентрацию примеси под областью STI влияют вариации всех трех рассматриваемых параметров, в то время как на концентрацию под затвором и вблизи боковой стенки STI вариации глубины канавки межэлементной изоляции не влияют.

2) В связи со спецификой технологии технологические вариации приводят к изменениям концентрации под затвором на 17,18% а под областью STI на 67,14%.

Отдельно необходимо отметить, что малое изменение уровня стойкости к внутритранзисторной утечке объясняется, в первую очередь, отсутствием вариаций геометрии боковой изоляции и имплантации rocket-областей. Так как легирование rocket-областей происходит под углом и с поворотом ионного пучка относительно базового среза, то степень легирования у границы раздела приповерхностной области кремния и боковой стенки STI (в месте пересечения её с затвором) будет существенно отличаться от распределения под затвором. Для корректного учета распределения примесей необходимо трёхмерное

технологическое моделирование. Таким образом, в реальных структурах технологический разброс может обеспечить куда более существенные изменения стойкости к межтранзисторной утечке, нежели было показано при использовании численного моделирования.

Полученные результаты свидетельствуют, о том, что схемы, изготовленные по коммерческим КМОП технологиям, могут иметь существенно различающийся уровень радиационной стойкости по критерию накопленной дозы ионизирующего излучения ввиду разброса технологических параметров.

## VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ влияния разброса технологических параметров типичной технологии КМОП СБИС с проектными нормами 0,18 выявил существенный недостаток, заключающийся в сильной зависимости уровня поглощенной дозы ионизирующего излучения, необходимого для образования межтранзисторных и внутритранзисторных токов утечек. Для некоторых типов транзисторов разница между максимальным и минимальным дозовым порогом образования радиационно-индуцированных утечек составляет более чем 50%.

Основной причиной такого разброса являются существенные вариации концентрации примесей в Р-кармане N-канального транзистора, которые вызваны неоптимальными (с точки зрения радиационной стойкости) режимами имплантации. В рассматриваемой технологии отсутствует ионное легирование, создающее пик концентрации вблизи донной границы STI/подложка. В связи с этим при моделировании технологического разброса изменения концентрации составляли порядка 67,14%.

Таким образом, необходимо контролировать стойкость к накопленной дозе радиации, как косвенно с помощью дополнительных параметрических мониторов (например, параметры, варьируемые в данной работе, можно контролировать по величине утечки или порогового напряжения МОП структуры с STI в роли подзатворного окисла), так и прямого измерения радиационной стойкости готовых изделий (отбраковочные испытания).

С другой стороны, известно, что КМОП СБИС, изготавливаемые по коммерческим технологиям, могут иметь недостаточный уровень радиационной стойкости для использования в космических аппаратах. Чтобы повысить радиационную стойкость можно использовать RHBD методики (Radiation Hardened By Design, повышение радиационной стойкости топологическими методами), или RHBP (Radiation Hardened By Process, повышение радиационной стойкости технологии).

Данная работа демонстрирует принципиальную возможность учитывать и находить критические с точки зрения обеспечения показателей стойкости к

эффектам накопленной дозы технологические операции изготовления КМОП СБИС с помощью средств приборно-технологического моделирования. Это может быть полезно как для контроля стойкости к накопленной дозе радиации, так и для разработки отечественных RHBD технологий.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Красников Г.Я., Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов. – Москва: Техносфера, 2011.
- [2] J.A. Felix, P.E. Dodd, M.R. Shaneyfelt, J.R. Schwank, and G.L. Hash, "Radiation response and variability of advanced commercial foundry technologies," *IEEE Trans. Nuclear Science*, vol. 53, no. 6, pp. 3187-3194, Dec. 2006.
- [3] A.V. Kauppila, B.L. Bhuvu, J.S. Kauppila, L.W. Massengill, and W.T. Holman, "Impact of process variations on SRAM single event upsets," *IEEE Trans. Nuclear Science*, vol. 58, no. 3, pp. 834-839, Jun. 2011.
- [4] Gasiot, G.; Glorieux, M.; Uznanski, S.; Clerc, S.; Roche, P., "Experimental characterization of process corners effect on SRAM alpha and neutron Soft Error Rates," *Reliability Physics Symposium (IRPS), 2012 IEEE International*, vol., no., pp.3C.4.1,3C.4.5, 15-19 April 2012
- [5] Никифоров А.Ю., Телец В.А., Чумаков А.И. Радиационные эффекты в КМОП ИС. М.: Радио и связь, 1994. С. 36-42.
- [6] А.И. Чумаков. Действие космической радиации на электронные схемы. – М.: Радио и связь, 2004.
- [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] Титов А.И., Шелепин Н.А., Селецкий А.В., «Исследование и разработка структур для экстракции параметров моделей схемотехнического учета дозовых радиационных эффектов субмикронных СБИС», Сборник научных трудов VI Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем – 2014 (МЭС-2014)», 2014г.
- [9] Панасюк М.И., Новиков Л.С. (Ред.). Модель космоса: В 2 томах. Т.1: Физические условия в космическом пространстве. Т.2: Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов. Т.1,2 2007.
- [10] С. Зи, Физика полупроводниковых приборов, книга 1, Москва: «Мир», 1984. С 381-384.
- [11] Селецкий А.В. Исследование и разработка конструктивно-технологических методов повышения радиационной стойкости глубоко-субмикронных СБИС с помощью средств приборно-технологического моделирования.: дис. ... канд. техн. наук: 05.27.01: защищена 25.12.12: утв. 29.04.13. — Москва., 2012.
- [12] А.А. Смолин, А.В. Сокоян, А.В. Уланова, А.А. Демидов., «Моделирование радиационно-индуцированных токов утечки в МОП-структурах при воздействии гамма- и рентгеновского излучений», Сборник научных трудов VI Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем – 2014 (МЭС-2014)», 2014г.
- [13] T.P. Ma, P.V.Dressendorfer. Ionizing radiation effects in MOS devices and circuits // N.Y.: John Wiley and Sons, 1989. -588 P.

# Research of the Process Parameters Variations Impact on VLSI on Radiation Hardness to TID effects by TCAD simulation

A.V.Seletskiy<sup>1,2</sup>, N.A.Shelepin<sup>1,2</sup>, A.A. Smolin<sup>3,4</sup>, A.V. Ulanova<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup>JSC Molecular Electronics Research Institute (MERI, JSC), aseletskiy@mikron.ru

<sup>2</sup>National Research University of Electronic Technology,

<sup>3</sup>National Research Nuclear University MEPHI,

<sup>4</sup>Specialized Electronic Systems

**Keywords** — CMOS, process variations, radiation hardness, TID.

## ABSTRACT

This paper explores the problem of radiation hardness variations because of the TID effects related to the process parameters variations. The process flow of a typical 0.18 micron CMOS technology was simulated using TCAD model with the special attention to pass CVC of NMOS transistors and radiation leakage arising due to the impact of TID effects.

Analysis of the results has shown a strong dependence of the absorbed radiation dose required for the formation of radiation-induced leakage currents on process variations. The difference between the maximum and minimum threshold dose necessary for the formation of radiation-induced leakage exceeds 50%.

The reason for such results are the process variations of P-well doping level at STI/silicon interface caused by not optimal (from the radiation hardness point of view) implantation modes. In this case the doping level variations were about 67%.

The possibility of the critical CMOS VLSI process steps identification (from the point of view of the TID leakage resistance) by using physical TCAD simulation is showed in the paper. This result is useful for the development mechanism to control the absorbed radiation dose resistance and for design of RHBD technologies.

## REFERENCES

- [1] Krasnikov G.Y., Constructive-technological features of submicron MOSFETs. – Moscow: Tehnosfera, 2011.
- [2] J.A. Felix, P.E. Dodd, M.R. Shaneyfelt, J.R. Schwank, and G.L. Hash, "Radiation response and variability of advanced commercial foundry technologies," IEEE Trans. Nuclear Science, vol. 53, no. 6, pp. 3187-3194, Dec. 2006.
- [3] A.V. Kauppila, B.L. Bhuvana, J.S. Kauppila, L.W. Massengill, and W.T. Holman, "Impact of process variations on SRAM single event upsets," IEEE Trans. Nuclear Science, vol. 58, no. 3, pp. 834-839, Jun. 2011.
- [4] Gasiot, G.; Glorieux, M.; Uznanski, S.; Clerc, S.; Roche, P., "Experimental characterization of process corners effect on SRAM alpha and neutron Soft Error Rates," Reliability Physics Symposium (IRPS), 2012 IEEE International , vol., no., pp.3C.4.1,3C.4.5, 15-19 April 2012
- [5] Nikiforov A.Y., Telec V.A., Chumakov A.I., Radiation Effects in CMOS ICs. M.: Radio i svjaz, 1994. C. 36-42. (in Russian)
- [6] A.I. Chumakov. The action of cosmic radiation on electronic circuits. – M.: Radio i svjaz, 2004. (in Russian)
- [7] Shaneyfelt M.R., Dodd P.E., Draper B.L., Flores R.S. Challenges in hardening technologies using shallow-trench isolation // IEEE IEEE Trans. on Nucl. Sci. 1998. Vol. 45. P. 2584–2592.
- [8] Titov A.I., Shelepin N.A., Seleckiy A.V. Research and development of structures for the extraction of circuit model parameters accounting dose radiation effects in submicron VLSI // Problems of Perspective Micro- and Nanoelectronic Systems Development - 2014. Proceedings / edited by A. Stempkovsky, Moscow, IPPM RAS, 2014. Part III. P. 149-154.
- [9] Panasjuk M.I., Novikov L.S. (Redaction.), Model of the cosmos: V 2 tomah. T.1: Fizicheskie usloviy v kosmicheskom prostranstve. T.2: Vozdeistvie kosmicheskoy sredi na materialy i oborudovanie kosmicheskikh apparatov. T.1,2 2007. (in Russian)
- [10] S. Zi, Fizika poluprovodnikovyh priborov, kniga 1, Moscow: «Mir», 1984. C 381-384. (in Russian)
- [11] Seleckiy A.V. Issledovanie i razrabotka konstruktivno-tehnologicheskikh metodov povysheniya radiacionnoy stoikosti gluboko-submikronnyh SBIS s pomoshhiu sredstv priborno-tehnologicheskogo modelirovaniya. dis. kand. tehn. nauk - Research and development of design-technological methods for increasing radiation resistance of deep-submicron VLSI by device-technological simulation diss PhD in Technical Sciences— Moscow, 2012. (in Russian)
- [12] Smolin A.A., Ulanova A.V., Sogoyan A.V., Demidov A.A. Modeling TID leakage current in MOS-structures under x-ray and gamma irradiation // Problems of Perspective Micro- and Nanoelectronic Systems Development - 2014. Proceedings / edited by A. Stempkovsky, Moscow, IPPM RAS, 2014. Part III. P. 197-200.
- [13] T.P. Ma, P.V.Dressendorfer. Ionizing radiation effects in MOS devices and circuits // N.Y.: John Wiley and Sons,1989. -588 P.