

# Оценка конструктивно-технологических возможностей повышения радиационной стойкости глубоко-субмикронных СБИС

А.В. Селецкий<sup>1</sup>, Н.А. Шелепин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет «МИЭТ», zakz333@yandex.ru

<sup>2</sup>ОАО «НИИМЭ и Микрон»

**Аннотация** — В статье представлена методика создания радиационно-стойких глубоко-субмикронных СБИС на основе незначительной модификации технологического маршрута их изготовления. Основой предложенной методики является создание узкой области концентрации Р-типа вдоль боковой и донной поверхностей изоляции активных областей. Технологические режимы формирования данных областей и электрические характеристики приборов получены при помощи приборно-технологического моделирования.

**Ключевые слова** — КМОП-транзистор, космическое излучение, накопленная доза ионизирующего излучения, радиационная стойкость.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Радиационная стойкость интегральных схем является важным условием при проектировании систем космического применения. Радиация в космосе обуславливается наличием частиц и ионизирующих излучений, порождаемых множеством источников в нашей солнечной системе и вне ее пределов. Радиационные эффекты приводят к деградации свойств интегральных схем и, соответственно, могут являться причиной отказов электроники в космических аппаратах. Даже при полете коммерческих рейсовых пассажирских самолетов полярных маршрутов на большой высоте были зарегистрированы случаи авиационных сбоев, связанных с радиационными эффектами [1,2,3].

В космическом пространстве полупроводниковые устройства должны функционировать в условиях радиационного воздействия, обусловленного облучением ионами, присутствующими в космических лучах и солнечном ветре, а также захваченными в радиационных поясах вокруг Земли.

Разработка методик создания радиационно-стойких СБИС является важным направлением современной микроэлектроники.

## II. ОПИСАНИЕ ПРОБЛЕМЫ

При разработке технологии и конструкции интегральных микросхем на основе КМОП элементной

базы, устойчивых к воздействию ионизирующего излучения, следует учитывать, что для этого класса схем наибольшее влияние на работоспособность в условиях ионизирующей радиации оказывают не объемные эффекты в кремнии, а поверхностные эффекты, связанные с границей раздела кремний – диэлектрик [3].

Воздействие ионизирующего излучения приводит к образованию электронно-дырочных пар в кремнии, областях STI (Shallow Trench Isolation - мелкая целевая изоляция) и подзатворном диэлектрике. Значительная их часть подвергается рекомбинации в течение очень короткого промежутка времени. Оставшаяся часть под действием внутренних и внешних электрических полей в окисле начинает двигаться. Электроны, имеющие большую подвижность, перемещаются к аноду, а дырки, имеющие низкую подвижность, захватываются на ловушках в диэлектриках КМОП интегральной схемы, обусловленных наличием оборванных связей в структуре оксида. В случае, если изолятор граничит с кремнием, легированным примесью N-типа, то это приведет к обогащению приповерхностной области и дополнительному запираению паразитных структур. Однако, если изолятор граничит с кремнием, легированным примесью P-типа, то это приведет к обеднению приповерхностной области. При увеличении количества захваченного положительного заряда в кремниевой подложке на границе с оксидом произойдет слабая, а затем и сильная инверсия типа проводимости (образуется паразитный канал N-типа) [4].

Паразитный канал может вызвать токовые утечки в следующих местах:

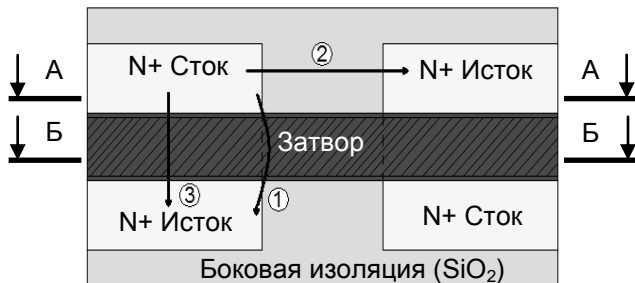
1). Между стоком и истоком N-канального транзистора - канал будет проходить через приповерхностную область по боковой стенке STI в месте пересечения ее с затвором - внутритранзисторная утечка (в дальнейшем утечка первого типа).

2). Между стоками и истоками соседних p-канальных транзисторов - канал будет проходить через

донную область STI - межтранзисторная утечка (в дальнейшем утечка второго типа).

3). Между стоком и истоком n-канального транзистора - канал будет проходить под подзатворным диэлектриком (из-за накопления положительного заряда непосредственно в подзатворном диэлектрике).

На рис. 1 показано схематическое изображение токовых утечек, индуцированных воздействием накопленной дозы ионизирующего излучения, по трем описанным выше механизмам.



**Рис. 1.** Схематическое изображение утечек, индуцированных воздействием накопленной дозы ионизирующего излучения. Заштрихованная область – тонкий подзатворный диэлектрик

В современных субмикронных СБИС толщина подзатворного окисла МОПТ снижается до 2–5 нм, в результате чего радиационная чувствительность МОПТ резко уменьшается [5]. Как следствие, роль и степень дозовой деградации подзатворного диэлектрика снижаются по сравнению с влиянием токов утечек через паразитные каналы вблизи дна и боковой стенки STI. Поэтому основной задачей при создании радиационно-стойких КМОП СБИС является устранение первых двух механизмов утечек.

### III. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

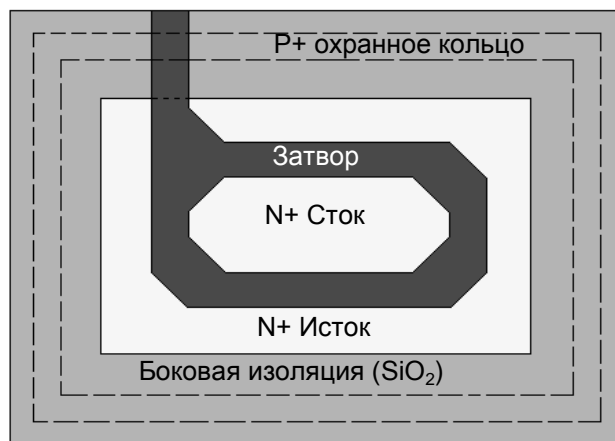
Для придания КМОП СБИС стойкости к накопленной дозе ионизирующего излучения необходимо избавиться от радиационных утечек, механизмы которых описаны в предыдущем пункте статьи. Чтобы предотвратить данные утечки необходимо разорвать паразитные N-каналы, возникающие из-за накопления положительного заряда в изолирующих структурах. Сделать это можно двумя способами:

1). Конструктивно убрать толстые слои диэлектрика на пути протекания тока.

2). Создать на пути протекания тока P+ охранную область, которая повысит порог накопленной дозы, при которой возникнет утечка [6].

Классическим способом получения радиационно-стойких элементов КМОП БИС является применение конструкции транзисторов, в которой затвор N-канальных транзисторов имеет кольцевую форму, а между активными N+ областями соседних

транзисторов сформированы P+ охранные кольца. Схематичный вид транзистора с кольцевым затвором изображен на рис. 2.



**Рис. 2.** Схематичный вид транзистора с кольцевым затвором и P+ охранными кольцами

Недостатком КМОП-транзисторов с кольцевым затвором и P+ охранными кольцами является значительно большая площадь, занимаемая на кристалле, по сравнению с линейными транзисторами. Увеличение площади происходит ввиду следующих причин:

1). Минимальная площадь активной области транзистора с линейным затвором очевидно меньше, чем минимальная площадь активной области транзистора, ввиду необходимости соблюдения норм проектирования (расстояние от боковой изоляции до затвора, минимальные ширины стока/истока и т.д.).

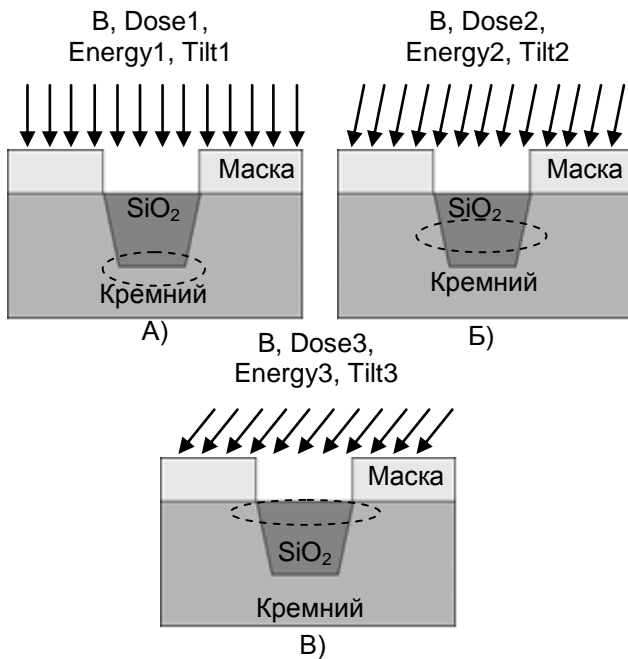
2). Ширина областей боковой изоляции при использовании охранных колец P+ типа является большей, чем при стандартной технологии. Это объясняется необходимостью формирования зазора между P+ кольцом и N+ стоком с целью предотвращения падения пробивных напряжений.

Таким образом, представляет интерес решение задачи создания радиационно-стойких КМОП СБИС при минимальном увеличении площади транзисторов.

### IV. МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

В данной работе рассмотрена возможность повышения радиационной стойкости элементов глубоко-субмикронных КМОП СБИС к накопленной дозе ионизирующего излучения без применения конструктивных методов, существенно увеличивающих площадь транзистора, занимаемую на кристалле. Повышение радиационной стойкости заключается в формировании по всей площади границы раздела STI/кремний узкой высоколегированной области P-типа. В качестве легируемой примеси можно использовать бор или индий. В данной статье описана методика создания охранной области посредством легирования примеси бора.

Охранную область предлагается формировать в несколько этапов ионной имплантации с различными уровнями дозы, энергии и углом наклона. На рис. 3 схематично изображены этапы формирования охранной области P-типа.



**Рис. 3.** Схематическое изображение этапов формирования охранной области P-типа. А) Этап легирования дна STI, Б) Этап легирования стенок STI, В) Этап легирования приповерхностной области вблизи STI. Пунктиром обозначено расположение пика концентрации легирующей примеси

«В» (на рис. 3) обозначает, что легируемой примесью был бор; «Dose», «Energy», «Tilt» означают дозу, энергию и угол наклона подложки при ионной имплантации, соответственно. Величины этих параметров выбираются в зависимости от используемой технологии, однако вне зависимости от технологии необходимо выполнить следующие условия:

$$\begin{aligned} Dose1 &\leq Dose2 \leq Dose3, \\ Energy1 &> Energy2 > Energy3, \\ Tilt1 &\leq Tilt2 \leq Tilt3. \end{aligned}$$

Повышение энергии легирования необходимо для создания охранной области по всему периметру границы раздела STI/подложка. Имплантация с самой большой энергией должна создать пик концентрации легируемой примеси на уровне дна области STI, имплантация с наименьшей энергией – в приповерхностной области рядом с границей раздела. Увеличение угла наклона подложки при имплантации желательно для уменьшения ширины охранной области при легировании в приповерхностную область. С увеличением угла наклона необходимо увеличить дозу имплантации, т.к. в этом случае часть легируемой примеси застрянет в маскирующем слое.

При отсутствии возможности увеличения угла наклона подложки альтернативным вариантом является проведение всех этапов легирования под одним минимальным углом, предотвращающим каналирование. Однако в данном случае при подлегировании боковых стенок и дна STI примесь будет существенно уходить в активную область транзистора ввиду необходимости расширения окна в маскирующем слое. Это, в свою очередь, может негативно сказаться на значении пробивного напряжения.

При легировании под углом для повышения однородности профилей распределения примесей желательно использовать квадроимплантацию (каждый этап производить в четыре легирования с поворотом подложки на  $90^\circ$  относительно предыдущего, что обеспечивается в автоматическом режиме современными установками ионной имплантации, которые применяются в технологии глубоко-субмикронных СБИС). Толщина маскирующего слоя выбирается так, чтобы на первом этапе легирования примесь не попадала в активную область транзистора.

Для создания защитного кольца с концентрацией примеси P+ типа порядка  $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  по всей площади границы раздела STI/кремний этапов легирования может быть необходимо больше, чем три. Такой уровень легирования способен обеспечить стойкость к радиации по накопленной дозе ионизирующего излучения до 300 кРад, что вполне достаточно для применения в космической технике [4,7].

## V. МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для оценки работоспособности предложенной методики повышения радиационной стойкости глубоко субмикронных СБИС по критерию накопленной дозы ионизирующего излучения проводилось приборно-технологическое моделирование коммерческой технологии CMOS8 с проектными нормами 180 нм в среде TCAD Sentaurus. С помощью программы Sprocess проводилось двумерное моделирование базового технологического маршрута изготовления транзистора и измененного маршрута, в который были внесены дополнительные операции фотолитографии и четыре квадроимплантации бора с целью создания охранного кольца P+ типа (в дальнейшем модифицированный маршрут). Дополнительных операций термической обработки в технологический маршрут не вводилось. Было проведено двумерное технологическое моделирование исходного и модифицированного технологических маршрутов по сечениям А-А и Б-Б (см. рис. 1).

Результирующий двумерный профиль распределения примесей в модифицированном маршруте по сечению А-А представлен на рис. 4, по сечению Б-Б - на рис. 5.

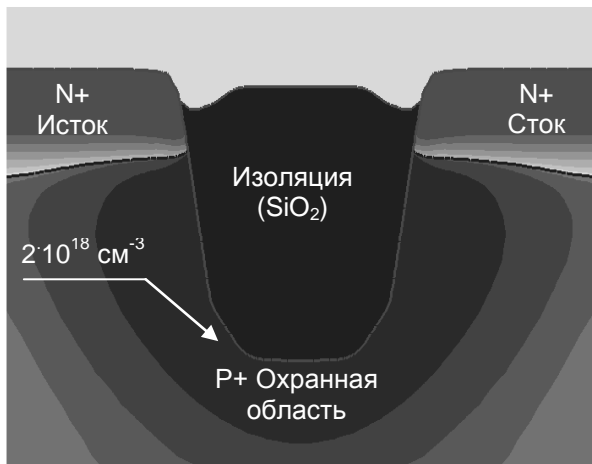


Рис. 4. Результирующий двумерный профиль распределения примесей по сечению А-А смоделированный с помощью программы Sprocess

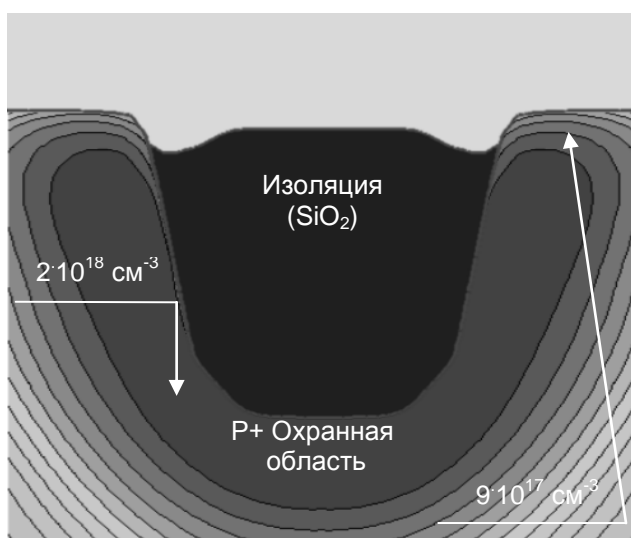


Рис. 5. Результирующий двумерный профиль распределения примесей по сечению Б-Б смоделированный с помощью программы Sprocess

Из рис. 4 и 5 видно, что на пути протекания тока радиационно-индуцированной утечки второго типа находится P+ охранная область с концентрацией  $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , а на пути первого типа –  $9 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Концентрация примесей в приповерхностной области падает вследствие дополнительной сегрегации примесей в подзатворный диэлектрик.

#### А. Исследование радиационного воздействия

Моделирование радиационного воздействия проводилось с помощью модуля Radiation программы SDevice.

На рис. 6 показан вид расчетных зависимостей тока радиационно-индуцированной утечки второго типа от величины накопленной дозы ионизирующего излучения для базового и модифицированного технологических маршрутов. Моделирование радиационного воздействия производилось при

различных напряжениях на стоке, затворе и истоке. Значение тока утечки рассчитывалось при напряжении на стоке 1.8 В, остальные электроды находились на нулевом потенциале. В качестве модельной использовалась структура, изображенная на рис. 4, в которой над областью изоляции находился поликремниевый затвор.

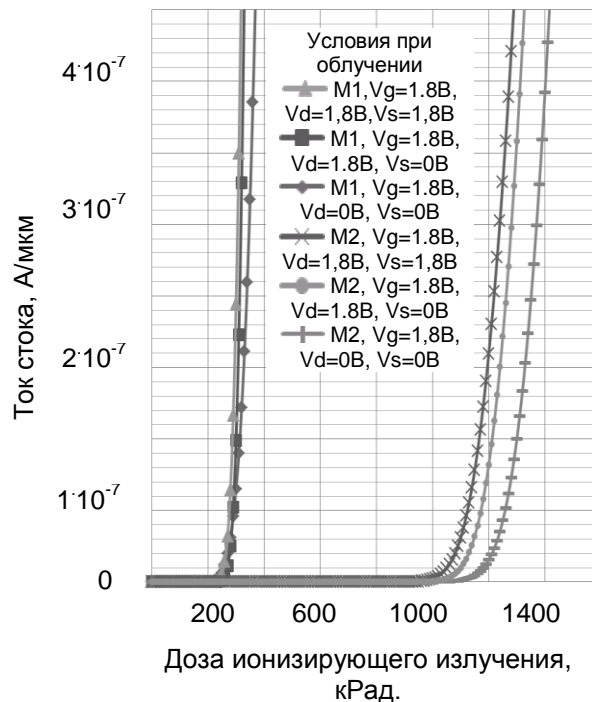
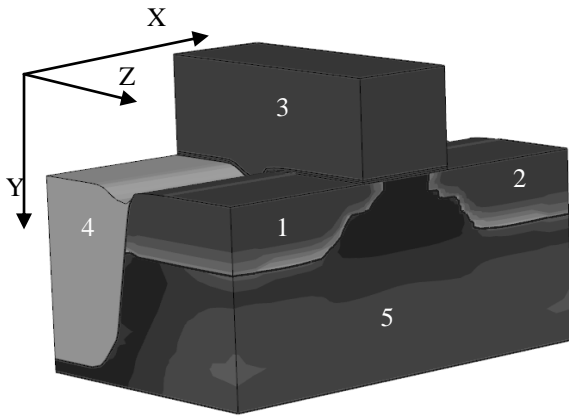


Рис. 6. Расчетная зависимость тока утечки второго типа от величины накопленной дозы ионизирующего излучения. M1 - базовый маршрут, M2 – модифицированный маршрут, Vg, Vd, Vs – напряжение на затворе, стоке и истоке при облучении, соответственно

Из зависимости, изображенной на рис. 6, можно сделать вывод, что в исследуемой модифицированной структуре критические радиационно-индуцированные утечки по второму механизму возникают при накопленной дозе ионизирующего излучения большей, чем 1 МРад. Наиболее сильные утечки, индуцированные воздействием ионизирующего излучения, возникают, когда электроды стока истока и затвора транзистора находятся под положительным смещением.

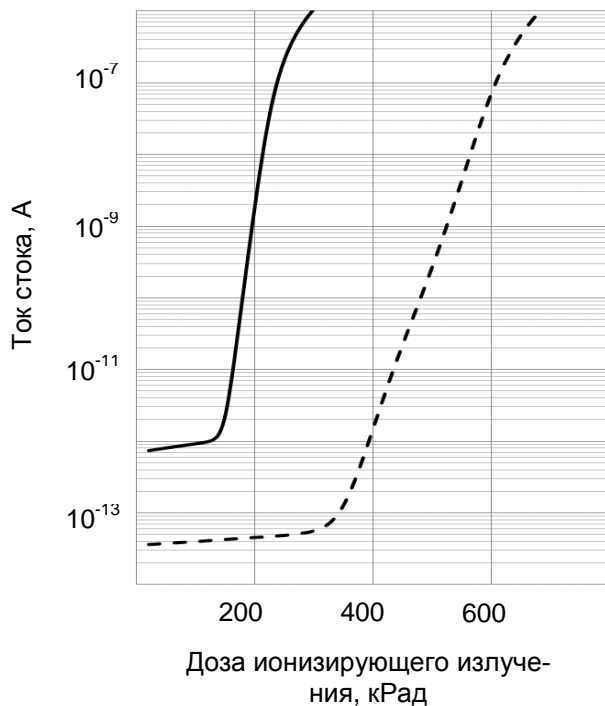
С помощью двумерного приборного моделирования рассчитать утечки по первому механизму невозможно, поэтому было проведено трехмерное моделирование структуры, изображенной на рис. 7. Структура была получена с помощью программы Sentaurus Structure Editor. Для базового маршрута использовался двумерный профиль распределения примесей в транзисторной структуре, вытянутый по оси Z, для модифицированного дополнительно использовался профиль, изображенный на рис. 5, вытянутый по оси X.



**Рис. 7. Модельная структура, используемая для трехмерного моделирования воздействия ионизирующего излучения. 1 - сток, 2 - исток, 3 - поликремниевый затвор, 4 – область STI, 5 - карман P-типа**

Для оценки стойкости модифицированной структуры был выбран «худший» вариант включения транзистора – во время моделирования радиационного воздействия электроды затвора, стока и истока находились под смещением 1.8 В.

На рис. 8 изображены расчетные зависимости токов утечки первого типа от величины накопленной дозы ионизирующего излучения. С целью учета влияния противоположной стенки STI полученные в результате моделирования значения тока стока были удвоены.



**Рис. 8. Расчетная зависимость тока утечки первого типа от величины накопленной дозы ионизирующего излучения. Черная линия – базовый маршрут, пунктир – модифицированный маршрут**

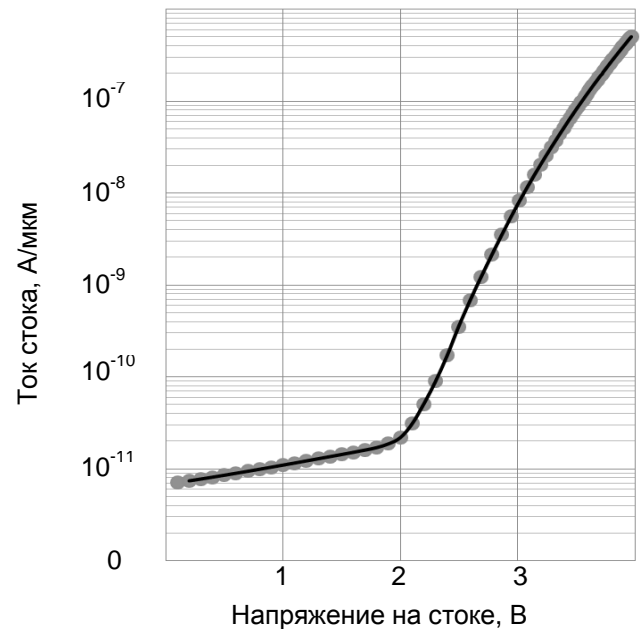
Из зависимости тока утечки от накопленной дозы радиации, изображенной на рис. 8, видно, что радиационная утечка первого типа в модифицированной структуре возникает при накопленной дозе большей 300 кРад, однако достигает начального значения тока утечки базовой структуры при дозе порядка 400 кРад. Критическая величина накопленной дозы радиации составляет 600 кРад.

Следует заметить, что результаты были получены при моделировании с некалиброванными коэффициентами, обуславливающими генерацию электронно-дырочных пар при воздействии ионизирующего излучения. Для более точной оценки необходимо сопоставлять расчетные значения с экспериментальными.

#### *В. Исследование влияния охранных областей на ВАХ*

В качестве оценки паразитного влияния сформированных охранных областей на электрические параметры транзистора проводился расчет тока утечки в закрытом состоянии, пробивного напряжения, выходных и проходных ВАХ (Вольт-Амперных Характеристик) с помощью программы SDevice.

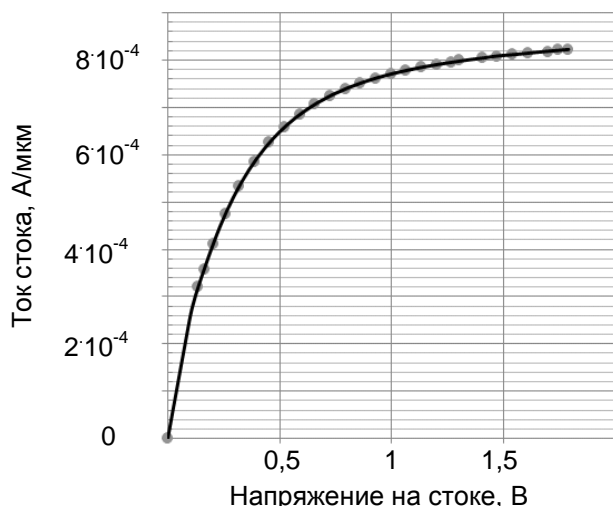
На рис. 9 изображены результаты моделирования токов утечки в закрытом состоянии и пробивного напряжения для базового и модифицированного маршрутов.



**Рис. 9. Расчетная ВАХ зависимости тока утечки в выключенном состоянии от напряжения на стоке. Черная линия – базовый маршрут, пунктир – модифицированный маршрут**

Из ВАХ, изображенной на рис. 9, можно сделать вывод, что сформированные охранные области P-типа не приводят к увеличению тока утечки в закрытом состоянии и снижению величины пробивного напряжения транзистора.

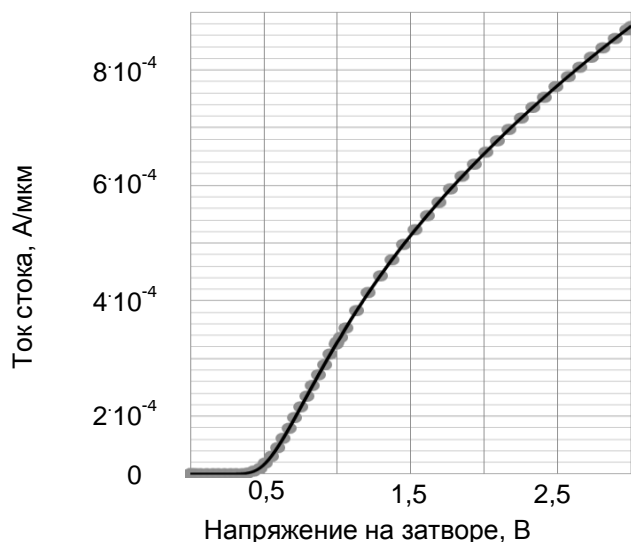
На рис. 10 изображены смоделированные выходные ВАХ для базового и модифицированного маршрутов при смещении на затворе, равном 1.8 В.



**Рис. 10. Расчетная выходная ВАХ. Черная линия – базовый маршрут, пунктир – модифицированный маршрут**

Анализируя смоделированные выходные ВАХ, изображенные на рис. 10, можно сделать вывод, что вносимые в технологический маршрут изменения не влияют на выходные токи транзистора.

Также производилось приборное моделирование проходных ВАХ с целью оценки влияния охранных областей на пороговое напряжение транзистора. Результаты моделирования изображены на рис. 11.



**Рис. 11. Расчетная передаточная ВАХ. Черная линия – базовый маршрут, пунктир – модифицированный маршрут**

Анализируя рис. 11 можно сделать вывод, что дополнительное легирование не оказывает влияние на величину порогового напряжения.

По результатам проведенного исследования влияния операций, вносимых в технологический маршрут изготовления транзистора, на ВАХ выявлено не было.

## VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали теоретическую возможность существенного повышения радиационной стойкости коммерческих глубоко-субмикронных КМОП СБИС по критерию накопленной дозы, с целью их применения в космических аппаратах, путем введения дополнительной операции фотолитографии и нескольких операций ионной имплантации без изменения конструкций транзисторов и правил проектирования.

Основными достоинствами предложенной методики являются:

- отсутствие конструктивных изменений транзисторов, что обуславливает возможность их применения в уже существующих проектах;
- незначительное изменение технологического маршрута изготовления СБИС.

К недостаткам можно отнести некоторое увеличение емкости переходов сток-подложка, оценка которого с помощью приборно-технологического моделирования является очень трудоемким процессом, ввиду чего не производилась.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Space radiation effects on electronic components in low-earth orbit, practice no. pd-ed-1258. URL: <http://www.nasa.gov/offices/oce/llis/0824.html> (дата обращения: 7.03.2010).
- [2] Василенко О.И., Ишханов Б.С., Капитонов И.М., Селиверстова Ж.М., Шумаков А.В. Web-версия учебного пособия "Радиация". URL: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/radiation/> (дата обращения: 13.11.2011).
- [3] Никифоров А.Ю., Телец В.А., Чумаков А.И. Радиационные эффекты в КМОП ИС. М.: Радио и связь, 1994. С. 36-42.
- [4] Методы повышения радиационной стойкости интегральных микросхем НПО «ИНТЕГРАЛ», предназначенных для условий работы в космических летательных аппаратах. URL: <http://www.1551a3.ru/datafiles/1817vfl1.pdf> (дата обращения: 13.11.2011).
- [5] Сокоян А.В., Зебрев Г.И., Никифоров А.Ю., Першенков В.С., Чумаков А.И. Поверхностные радиационные эффекты в интегральных схемах. URL: [http://micro.ah-09.ru/present/zebrev\\_mar07/rad\\_effects\(draft\).pdf](http://micro.ah-09.ru/present/zebrev_mar07/rad_effects(draft).pdf) (дата обращения: 9.11.2011).
- [6] Зи С. Физика полупроводниковых приборов, книга 1. М.: Мир, 1984. С. 381-384.
- [7] Юдинцев В., Радиационно стойкие интегральные схемы. Надежность в космосе и на земле // Электроника: Наука, технология, бизнес. Рекламно-издательский центр "Техносфера", 2007. С. 72-76.