

# ИССЛЕДОВАНИЯ РЕАКЦИИ МИКРОСХЕМ С ЦЕПЬЮ АВТОКОМПЕНСАЦИИ ТОКОВ УТЕЧКИ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ НИЗКОИНТЕНСИВНЫХ ПРОНИКАЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

*Н. Ф. Асмолова, И. Ю. Забавичев, К. А. Насеткин, А. А. Потехин, А. С. Пузанов*

Филиал РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю. Е. Седакова», г. Нижний Новгород

## Введение

Исторически полевые транзисторы со структурой металл-оксид-полупроводник (МОП транзисторы), изготовленные по технологии «кремний-на-изоляторе» (КНИ МОПТ, международный термин «Silicon-On-Insulator», SOI MOSFET), появились достаточно давно как элементы схем специального применения. До начала 90-х гг. XX в. КНИ технологии не рассматривались как серьезная альтернатива коммерческой объемной технологии, главным образом, из-за своей дороговизны. Однако в 90-х гг. XX в. выяснилось, что КНИ МОПТ имеют существенные функциональные преимущества перед транзисторами обычных объемных технологий с неизолированной подложкой. В настоящее время технология КНИ является доминирующей [1] для изготовления высокоинтегрированной электроники как коммерческого (класс «industrial»), так и специализированного (классов «military» и «space») применений.

Активная область КНИ МОП транзистора, имеваемая базой или «телом» (международный термин «body»), представляет собой тонкую кремниевую пленку между контактами стока и истока, изолированную со всех сторон слоями окислов. Скрытый или «захороненный» окисел (международный термин «buried oxide», BOX), в КНИ структурах изолирует активную область прибора от подложки, а вертикальная изоляция существенно ограничивает токи утечки и тиристорный эффект между двумя соседними приборами при радиационном воздействии.

Транзисторы, изготовленные по технологии КНИ, обладают рядом важных преимуществ над транзисторами объемных технологий с аналогичной проектной нормой:

1. Область стока/истока расположена прямо над скрытым окислом, поэтому изоляция скрытым окислом имеет существенно меньшую емкость, чем изоляция p-n переходом в объемных транзисторах, что объясняется большей толщиной скрытого окисла и меньшей диэлектрической проницаемостью окисла по сравнению с кремнием. Это дает уменьшение паразитных емкостей (на 30...50 %) и соответствующее увеличение быстродействия из-за уменьшения времени задержки.

2. По той же причине, из-за уменьшения паразитной емкости, уменьшается динамическое энергопотребление (приблизительно на 30% при той же тактовой частоте и напряжении питания).

3. Улучшается электростатическое качество транзисторов за счет подавления геометрических короткоканальных эффектов. Повышается (на ~15 %) плотность интеграции за счет уменьшения расстояния между транзисторами.

4. В КНИ схемах отсутствуют эффекты влияния общей подложки на пороговые напряжения, как это имеет место в схемах объемной КМОП технологии.

5. КНИ транзисторы могут иметь очень малое (близкое к минимальному) значение подпорогового размаха (~60 мВ/декада при комнатных температурах), что позволяет снизить пороговое напряжение до 0,3 В, не увеличивая статические токи утечки. Соответственно, это позволяет уменьшать напряжения питания и динамическое энергопотребление.

6. Из-за высокой степени изоляции перекрываются пути для развития паразитного тиристорного эффекта (эффекта «защелки»), часто имеющего место в n-p-n-p структурах объемных КМОП технологий.

7. Боковая изоляция (например, изоляция типа «птичий клюв» (LOCOS), мелкими канавками (STI)) дает возможность более компактного расположения элементов и более простой технологии изготовления, поскольку нет необходимости в карманах и глубоких канавках, как это имеет место в объемной технологии.

Радиационные эффекты в изделиях микроэлектроники при воздействии низкоинтенсивных проникающих излучений можно разделить на 2 большие группы [2]: одиночные события и постепенная деградация, связанная с накоплением заряда на ловушках, генерируемых в объеме окисла и на поверхности раздела кремний-диэлектрик. Большинство отказов, связанных с накоплением заряда, являются параметрическими, они предсказуемы и возможен их расчет на основе детерминированного подхода. Одним из методов, реализующих схемотехническую защиту от постепенной деградации, является схема автокомпенсации напряжения подложки [3]. Работа схемы следующая: при постепенном накоплении заряда в объеме окисла и на поверхности раздела кремний-диэлектрик через транзистор начинает протекать паразитный ток. Это изменение фиксируется схемой автокомпенсации, которая автоматически меняет напряжение на подложке, тем самым компенсируя накапливаемый заряд. В данной работе проведены экспериментальные исследования реакции микросхем с цепью автокомпенсации токов утечки на воздействие низкоинтенсивных проникающих излучений, а также предложена модель, альтернативная

широко используемой в настоящее время BSIMSOI-RAD [4, 5].

### Математическая модель

Схему, которая реализует компенсирующее напряжение, можно заменить функциональной зависимостью линейного изменения напряжения автосмещения в зависимости от накопленного заряда [3]. Так как на пластине находятся миллионы транзисторов, не представляется возможным моделировать всю схему целиком. Однако, за счет того, что все они в схемотехническом плане подключены параллельно, за рабочую модель можно взять один облучаемый транзистор.

Для моделирования процессов в транзисторах МОП структуры КНИ часто применяют математические модели, основанные на методе эквивалентной схемы. Суть метода состоит в замене отдельных элементов, т.е. конструктивных частей транзистора, радиотехническими элементами: конденсаторами, резисторами и источниками токов и напряжений. Такой подход позволяет разбить весь комплекс взаимосвязанных процессов, протекающих в приборе, на составные части, для каждой из которых может быть применен аналитический подход к вычислению токов, напряжений и иных параметров, характеризующих процессы в анализируемом приборе. В результате обобщения удается синтезировать общую модель транзистора, позволяющую проводить расчеты радиотехнических схем на основе данных о конструкции, уровнях легирования, подвижности и иных характеристик полупроводниковых слоев и областей из которых составлен интересующий нас транзистор.

Основной моделью, используемой в пакетах моделирующих программ на данный момент, является BSIMSOI [6, 7]. На рис. 1 представлено поперечное сечение активной области полевого транзистора КМОП структуры КНИ для стандартной модели BSIMSOI.

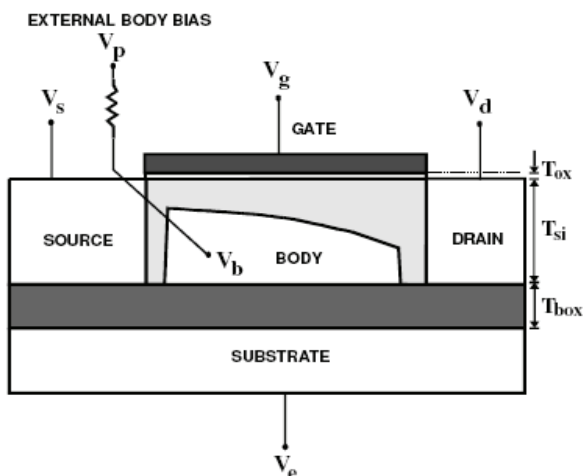


Рис. 1. Поперечное сечение полевого транзистора КМОП структуры КНИ: GATE – затвор; SOURCE – исток; DRAIN – сток; SUBSTRATE – подложка; BOX – заглубленный слой диэлектрика; BODY – подзатворная область; INTERNAL BODY BIAS – напряжение смещения подзатворной области

Рассматриваемая модель позволяет вычислить проводимость индуцированного канала, возникающего в подзатворной области при подаче управляющего напряжения на затвор. Потенциал  $V_p$ , приложенный с помощью специального контакта к подзатворной области, позволяет минимизировать токи утечки исток-сток, когда транзистор находится в состоянии «закрыто».

Для вычисления тока в стандартной модели BSIMSOI используются следующие соотношения [6, 7]

$$I_{ds} = \frac{I_{ds0}}{1 + \frac{R_{ds} I_{ds0}}{V_{dseff}}} \left( 1 + \frac{V_{ds} - V_{dseff}}{V_A} \right), \quad (1)$$

$$I_{ds0} = \frac{\beta V_{gseff} \left( 1 - A_{bulk} \frac{V_{dseff}}{2(V_{gseff} - 2v_t)} \right) V_{dseff}}{1 + \frac{V_{dseff}}{E_{sat} L_{eff}}}, \quad (2)$$

$$\beta = \mu_{eff} C_{ox} \frac{W_{eff}}{L_{eff}}, \quad (3)$$

где  $R_{ds}$  – сопротивление исток – сток,  $\mu_{eff}$  – подвижность в подзатворной области;  $E_{sat}$  – критическая напряженность поля в канале, при которой скорость носителей заряда достигает насыщения;  $V_A$  – коэффициент для учета модуляции длины канала,  $C_{ox}$  – емкость, определяемая подзатворным диэлектриком,  $A_{bulk}$  – выражение для объемного заряда;  $V_{ds}$  – напряжение исток-сток  $V_{gs}$  – напряжение исток-затвор,  $I_{ds}$  – ток исток – сток.

Модель BSIMSOI непосредственно не содержит параметров, отвечающих за учет радиационного воздействия. Поэтому был разработан ряд дополнений к указанной модели, позволяющих учесть радиационное воздействие. В настоящее время в отечественной практике доминирующим является подход, предложенный в работах [4, 5]. В данных работах вводится зависимость подвижности от дозы, описываемая следующим выражением

$$\mu_{eff}(D) = \frac{\mu_0}{1 + \alpha N_{it}(D)}, \quad (4)$$

$$N_{it}(D) = a_{it} D^{b_{it}}, \quad (5)$$

где  $\alpha$ ,  $a_{it}$  и  $b_{it}$  – подгоночные коэффициенты.

Такой подход дает хорошие результаты для схемотехнического анализа, однако дает неверные результаты при физическом моделировании. Подвижность не может зависеть от величины накопленного заряда, так как на микроскопическом уровне определяется частотой рассеяния носителей, то есть несовершенствами кристаллической решетки полупроводника. При радиационном воздействии подвижность может меняться только за счет структурных повреждений. Рентгеновское излучение с энергией квантов менее сотен килоэлектронвольт не вы-

зывает структурных повреждений, а значит подвижность не должна меняться.

Таким образом, подобный феноменологический подход существенным образом зависит от топологии структуры и требует большого объема дорогостоящих калибровочных облучательных экспериментов при ее изменении. Поэтому более перспективным является подход, основанный на изменении емкостей МОП структур при облучении.

При воздействии ионизирующего излучения на КНИ транзистор накапливается заряд на границе раздела кремний-диэлектрик. Тем самым изменяется пространственное распределение электрического поля, управляющего транзистором. Межэлектродная емкость вычисляется как производная от заряда соответствующего электрода по напряжению между интересующими электродами

$$C_{ij} = \frac{dQ_i}{dV_j}. \quad (6)$$

Важно отметить, что емкость, также, как и подвижность, входит в качестве сомножителя в выражение (3), что обуславливает эквивалентность предлагаемого подхода с традиционным со схемотехнической точки зрения. Однако, с позиций физического моделирования, предлагаемая модель обладает преимуществом по сравнению с традиционным подходом, так как в настоящее время существуют хорошо разработанные теоретические представления накопления заряда и изменения емкости в МОП структурах [8, 9].

### Результаты и их обсуждение

При построении модели оказалось, что разброс критически важных для расчета параметров по нормативным документам велик. Как видно для примера на рис. 2 распределение параметра «сопротивление контактного окна» между слоями имеет нормальное распределение для партии пластин, на которых производился эксперимент.

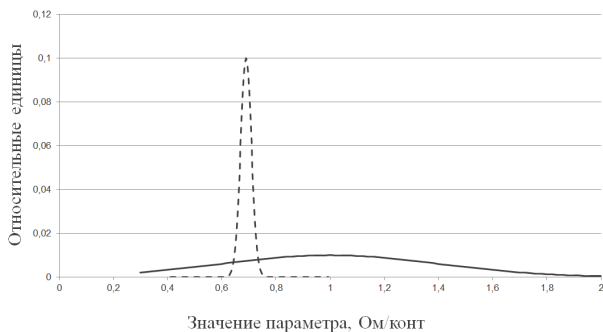


Рис. 2. Распределения для партии пластин: - - - — нормальное распределение; — — допустимое распределение по техническим условиям

Совокупность параметров дает широкие границы изменения радиационно-критического параметра —

напряжения смещения подложки в зависимости от дозы облучения для микросхем из разных партий пластин, узкие — для микросхем из одной партии. Сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными представлено на рис. 3.

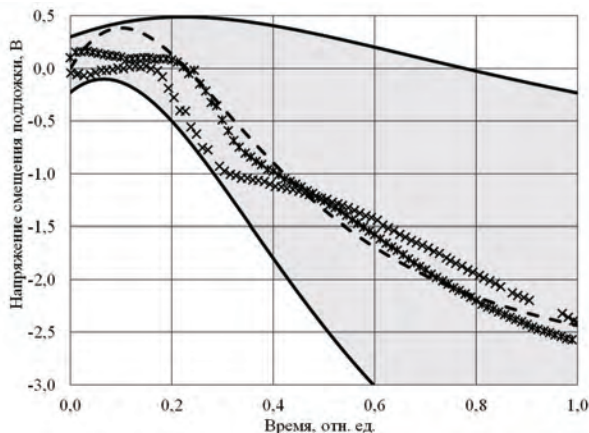


Рис. 3. Зависимость напряжения смещения на подложке от времени облучения: — — результаты расчета границ изменения радиационно-критического параметра для микросхем из разных партий; - - - — расчет изменения радиационно-критического параметра для «усредненной» структуры; × — данные облучательных экспериментов. Длительность облучения — 1,0 отн. ед.

При достижении напряжения смещения подложки 3В автосмещение перестает работать, что приводит к параметрическому отказу микросхемы. Следует отметить, что в ходе проведенных облучательных экспериментов не достигнут уровень воздействия, достаточный для параметрического отказа.

Из графика зависимости, рис. 3, видно, что в ходе эксперимента проводилось 2 измерения над микросхемами с одинаковой топологией. Результаты получились очень близкими, потому что микросхемы из одной партии пластин.

Результаты расчетов зависимости напряжения смещения на подложке совпадают с экспериментальными данными с погрешностью, меньшей дозиметрической, что показывает адекватность предлагаемого подхода.

Авторы выражают благодарность сотрудникам ИЯРФ ФГУП «РФЯЦ ВНИИЭФ» за проведение облучательных экспериментов в рамках совместных работ и С. В. Оболенскому за полезные замечания при подготовке теоретической части работы.

### Литература

1. International roadmap for devices and systems: 2017 edition. More Moore
2. Чумаков А. И. Действие космической радиации на ИС. М.: Радио и связь, 2004.
3. А.с. 1408424 СССР кл. G 05 F 1/56. Устройство для автоматического смещения напряжения

подложки интегральной схемы / А. С. Свердлов, Б. М. Соскин

4. Петросянц К. О., Самбурский Л. М., Харитонов И. А. Компактная макромодель КНИ/КНС МОП-транзистора, учитывающая радиационные эффекты // Известия ВУЗов. Электроника. 2011. №1(87). С. 20–28.

5. Петросянц К. О., Кожухов М. В., Попов Д. А., Орехов Е. В. Математические модели, встроенные в систему TCAD, для учета влияния гамма- и нейтронного излучения на полупроводниковые приборы // Известия ЮФУ. Технические науки. 2012. № 6(131). С. 77–82.

6. BSIMSOI3.1 Mosfet model user's manual // BSIM group, US Berkeley, 2003.

7. P. Su, "An International Standard Model for SOI Circuit Design," // Ph. D. Dissertation, Department of EECS, University of California at Berkeley, December 2002. (<http://www.eecs.berkeley.edu/~pinsu>).

8. Зебрев Г. И. Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах высокой степени интеграции. М.: НИЯУ МИФИ, 2010.

9. Зебрев Г. И. Физические основы кремниевой наноэлектроники // Учебное пособие. М.: МИФИ, 2008.