

УДК 621.382:539.12.04

**ВЛИЯНИЕ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ НА МОП/КНИ-ТРАНЗИСТОРЫ**

Ю.В. БОГАТЫРЕВ, С.Б. ЛАСТОВСКИЙ, С.А. СОРОКА\*,  
С.В. ШВЕДОВ\*, Д.А. ОГОРОДНИКОВ

*Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению  
П. Бровки, 19, Минск, 220072, Беларусь*

*\*НТЦ «Белмикросистемы» ОАО «Интеграл»  
пл. Казинца, 1, Минск, 220108, Беларусь*

*Поступила в редакцию 16 ноября 2015*

Приведены результаты исследований влияния гамма-излучения  $Co^{60}$  на характеристики тестовых МОП/КНИ-транзисторов с различными конструктивно-технологическими особенностями и электрическими режимами.

*Ключевые слова:* МОП/КНИ-транзистор, гамма-излучение, радиационная стойкость.

**Введение**

Технология «кремний на изоляторе» (КНИ) перспективна для производства МОП больших интегральных схем (БИС) с повышенной радиационной стойкостью, особенно к импульсной радиации [1–5]. КНИ-технология рассматривается как вероятная альтернатива применяемым в настоящее время радиационностойким технологиям изготовления БИС. Наличие диэлектрической изоляции и уменьшение размеров активных областей МОП-транзисторов способствует снижению фототоков в микросхемах и позволяет избавиться от тиристорного эффекта при высоких интенсивностях ионизирующих излучений. В качестве КНИ-структуры обычно применяется монокристаллическая кремниевая пленка на слое диоксида кремния. Такие структуры отличаются надежной электроизоляцией, повышенной плотностью упаковки, уменьшением паразитных емкостей [1–5]. Значительную проблему для обеспечения стойкости КНИ-структур к стационарному облучению создает наличие второй границы раздела полупроводник-окисел, которая может иметь плавающий потенциал. Конструктивной особенностью при этом является наличие паразитного транзистора, у которого в качестве подзатворного диэлектрика служит скрытый окисел, затвором является изолированная подложка. Существование второй границы раздела и возможность появления радиационно-индуцированного заряда в изолирующем окисле подложки может привести к образованию проводящего канала на обратной стороне кремниевой пленки [1–5]. Основная проблема при оценке влияния обратного канала обусловлена тем, что, как правило, скрытый окисел бывает «толстым», и к нему не приложено напряжение. Следовательно, для таких структур бывает очень трудно оценить суммарный заряд, который остался после процессов первичной рекомбинации в объеме окисла. Во многих случаях этот заряд сам может формировать электрическое поле, делая задачу самосогласованной. Из-за относительно слабых напряженностей электрического поля радиационно-индуцированный заряд может зависеть от режима работы МОП-транзистора (напряжения сток-исток), а его положение внутри окисла из-за этого может меняться. Цель данной работы: экспериментальные исследования влияния гамма-излучения  $Co^{60}$  на характеристики тестовых МОП/КНИ-транзисторов (рабочих и паразитных) с разными конструктивно-технологическими особенностями (элементов КМОП/КНИ БИС) при различных электрических режимах.

## Методика эксперимента

Объектами исследований были тестовые элементы КМОП/КНИ БИС – тестовые МОП/КНИ-транзисторы с каналом  $n$ -типа, которые изготавливались на КНИ-подложках по проектной норме от 0,6 мкм и выше. КНИ-структуры имели толщину эпитаксиальной пленки кремния 0,2–0,3 мкм и скрытого окисла – 0,4 мкм. Тестовые МОП/КНИ-транзисторы имели различные длины канала  $L = 0,6–1,2$  мкм при его ширине  $W = 4,8$  мкм, а также  $H$ -образную конфигурацию запитки канала. Конструкция разработанных МОП/КНИ транзисторов с  $H$ -образной запиткой канала исключает возможность образования паразитного транзистора по боковой грани островка кремния. Паразитный транзистор может сформироваться между истоком и стоком рабочего транзистора по дну островка (по границе между островком и скрытым изолирующим окислом).

Облучение тестовых образцов гамма-квантами  $Co^{60}$  проводилось на установке «Исследователь» при температуре 300 К. Мощность дозы гамма-излучения составляла 0,2 Гр/с, доза  $D = 10^3–2 \cdot 10^4$  Гр. Дозиметрия гамма-излучения проводилась образцовыми твердотельными стеклянными детекторами ДТС-0.01/1.0 с погрешностью  $\pm 7\%$ .

До и после облучения с помощью автоматизированного измерителя параметров полупроводниковых приборов ИППП-1/6 измерялись сток-затворные  $I_D(U_G)$  вольтамперные характеристики (ВАХ) тестовых МОП/КНИ-транзисторов, пороговые напряжения  $U_T$  и токи утечки  $I_L$ . Радиационные испытания тестовых рабочих и паразитных МОП/КНИ транзисторов проводились при следующем электрическом режиме: на затвор, запитку канала и подложку подается нулевое напряжение, на сток и исток подается положительное напряжение +5 В. Этот режим, согласно литературным данным [6], является самым «жестким». В дополнительном режиме на подложку подавалось отрицательное напряжение  $U_{Sub} = -3$  В.

## Результаты и их обсуждение

Результаты воздействия гамма-излучения на тестовые рабочие и паразитные МОП/КНИ-транзисторы (толщина пленки кремния  $d_{Si} = 0,2$  мкм,  $L = 0,6$  мкм) представлены на рис. 1. Сток-затворные ВАХ рабочих транзисторов при облучении значительно изменились: происходит заметное возрастание токов утечки при дозах облучения  $D \geq 2 \cdot 10^3$  Гр (рис. 1, а). У паразитных транзисторов токи утечки изменились незначительно, но происходит большой сдвиг ВАХ (порогового напряжения) в сторону отрицательных напряжений  $U_{Sub}$  (рис. 1, б).

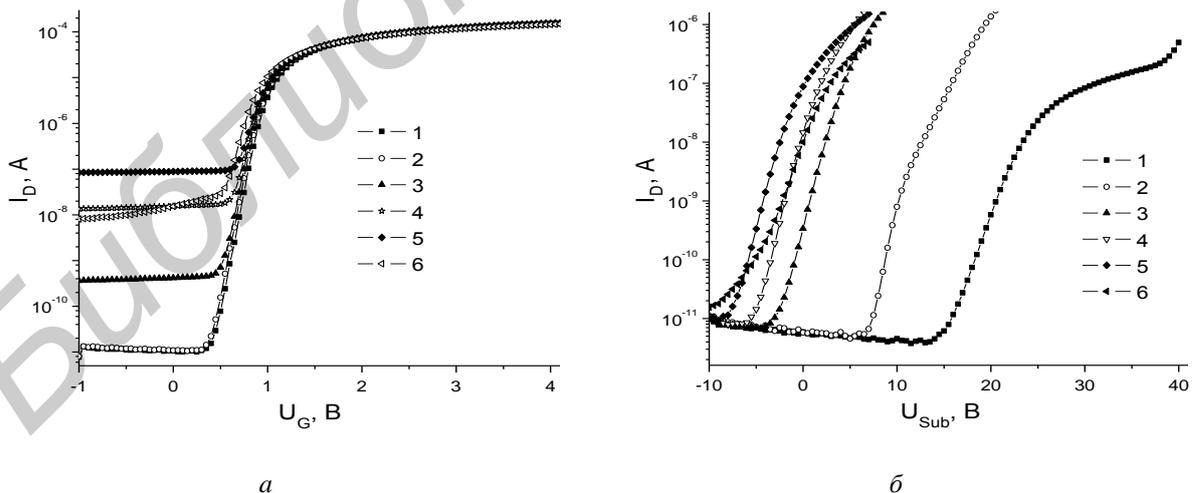


Рис. 1. Влияние гамма-излучения на ВАХ рабочих (а) и паразитных (б) МОП/КНИ-транзисторов ( $d_{Si} = 0,2$  мкм;  $U_D = +5$  В;  $U_{Sub} = 0$  В); 1 –  $D = 0$ ; 2 –  $1 \cdot 10^3$ ; 3 –  $2 \cdot 10^3$ ; 4 –  $4 \cdot 10^3$ ; 5 –  $5 \cdot 10^3$ ; 6 –  $1,2 \cdot 10^4$  Гр)

Наблюдается корреляция радиационных изменений ВАХ рабочего и паразитного транзисторов: токи утечки рабочего транзистора начинают резко возрастать, как только ВАХ паразитного транзистора сдвинется в область  $U_{Sub} < 0$ .

Полученные результаты объясняются следующим образом. Под действием ионизирующего излучения в окисле генерируются электронно-дырочные пары. Большая часть образовавшихся электронов и дырок рекомбинирует, но часть дырок захватывается ловушками, расположенными в окисле кремния у границы раздела кремний-окисел [7, 8]. Положительный заряд в окисле на дне островка кремния уменьшает величину порогового напряжения паразитного *n*-канального транзистора. Электрическое поле в окисле может замедлить или ускорить процесс накопления заряда в окисле на границе раздела кремний-окисел.

Для выяснения причин низкой стойкости паразитного *n*-канального транзистора было проведено моделирование полей в заглубленном окисле с использованием модуля Atlas программного комплекса компании Silvaco [9]. На рис. 2 показано распределение потенциала в заглубленном окисле *n*-канального транзистора. Стрелками показано направление дрейфа дырок в поле стока и истока. Видно, что положительное напряжение на стоке и истоке создает в защитном окисле поле, направленное к границе раздела кремний – заглубленный окисел. Под действием этого поля дырки, которые генерируются в окисле во время облучения, дрейфуют к границе раздела кремний–окисел и захватываются на ловушках. Это приводит к уменьшению порогового напряжения паразитного *n*-канального транзистора и появлению утечек между стоком и истоком рабочего транзистора.

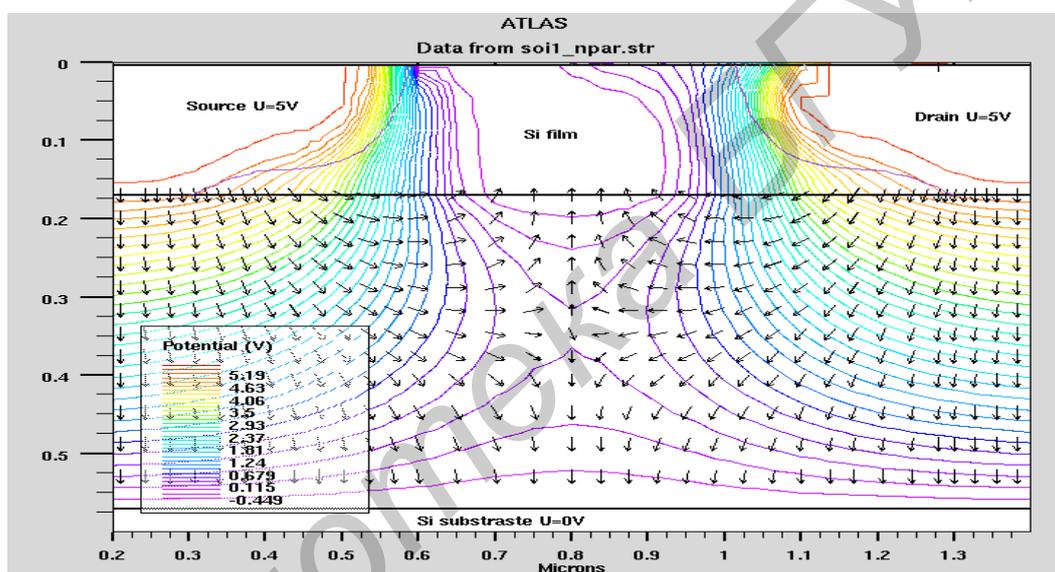


Рис. 2. Распределение потенциала в МОП/КНИ-транзисторе ( $d_{Si} = 0,17$  мкм;  $U_D = U_S = +5$  В;  $U_{Sub} = 0$  В)

Для уменьшения воздействия положительного поля стока были проведены экспериментальные испытания транзисторов при отрицательном смещении подложки. Режим испытаний: напряжения на стоке, истоке +5 В; на затворе, запитке канала 0 В; на подложке –3 В. Результаты испытаний: исходное пороговое напряжение паразитного *n*-канального транзистора  $U_T = 37$  В (по уровню тока стока  $1 \cdot 10^{-7}$  А); после облучения дозой  $1 \cdot 10^3$  Гр  $U_T = 9$  В; после облучения дозой  $2 \cdot 10^3$  Гр  $U_T = 0$  В. Фактически получен тот же результат, что и без смещения подложки (рис. 1, б).

Для выяснения причин недостаточного влияния смещения подложки на стойкость транзисторов было проведено моделирование полей в окисле со смещением подложки. На рис. 3 приведены результаты моделирования. Видно, что смещение подложки до –3 В уменьшило вертикальное поле в окисле, хотя осталась горизонтальная составляющая поля в окисле у самой границе с кремнием.

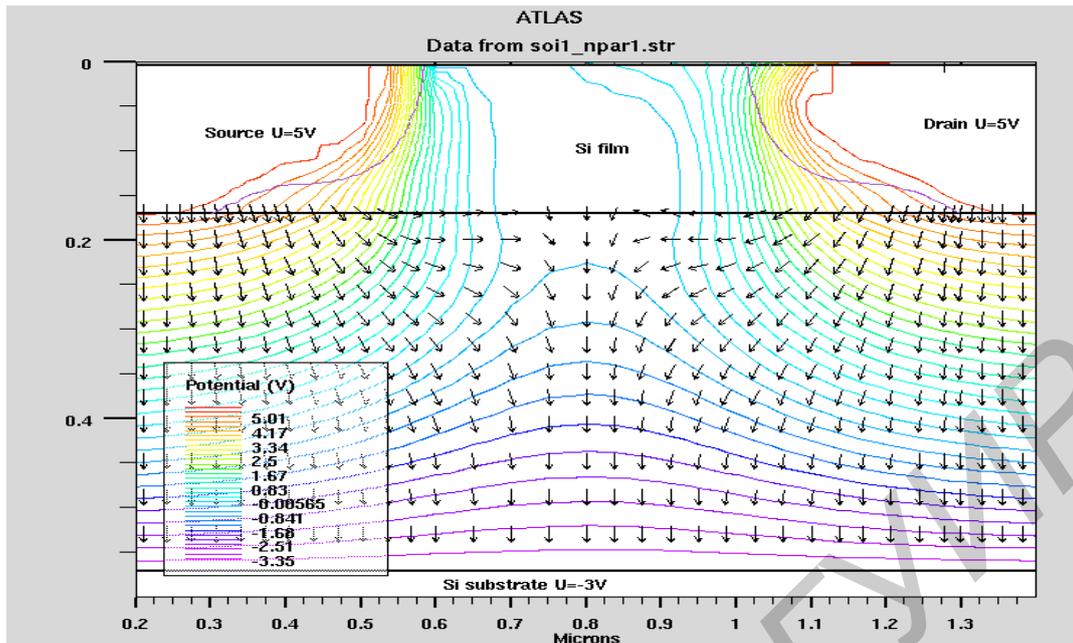


Рис. 3. Распределение потенциала в МОП/КНИ-транзисторе ( $d_{Si} = 0,17$  мкм;  $U_D = U_S = +5$  В;  $U_{Sub} = -3$  В)

Для выяснения возможности дополнительного уменьшения влияния потенциала стока было проведено моделирование структуры с более толстой пленкой кремния, когда исток и сток не достигают границы с окислом.

На рис. 4 показано распределение потенциала в заглубленном окисле  $n$ -канального транзистора с более толстой пленкой кремния. Стрелками показано направление дрейфа дырок в поле стока и истока. Видно, что в этом случае смещение подложки эффективно подавляет поле стока и истока в заглубленном окисле. Дырки оттягиваются к подложке и не накапливаются на границе с пленкой кремния.

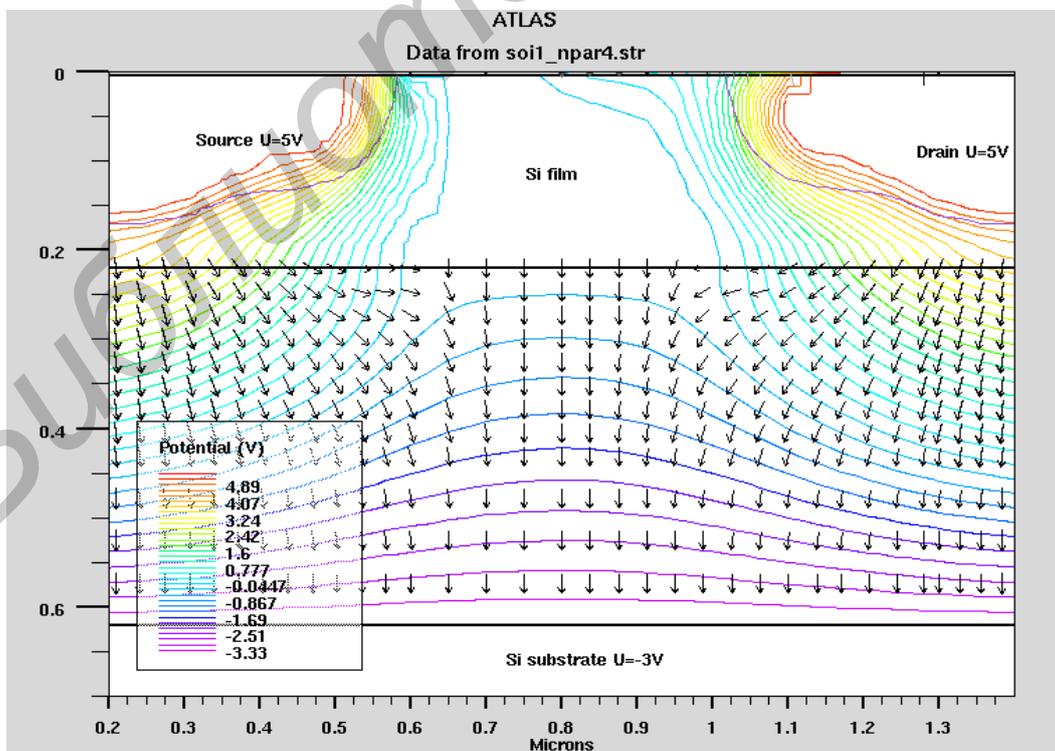


Рис. 4. Распределение потенциала в МОП/КНИ-транзисторе ( $d_{Si} = 0,22$  мкм;  $U_D = U_S = +5$  В;  $U_{Sub} = -3$  В)

На рис. 5 показано влияние гамма-излучения на сток-затворные ВАХ рабочих и паразитных МОП/КНИ транзисторов с более толстой пленкой кремния ( $d_{Si} = 0,3$  мкм,  $L = 0,6$  мкм). Видно, что ВАХ рабочих транзисторов (токи утечки) изменились незначительно вплоть до максимальной дозы  $D = 1,2 \cdot 10^4$  Гр (рис. 5, а), что обусловлено относительно небольшим сдвигом ВАХ паразитного транзистора только в области  $U_{Sub} > 0$  (рис. 5, б).

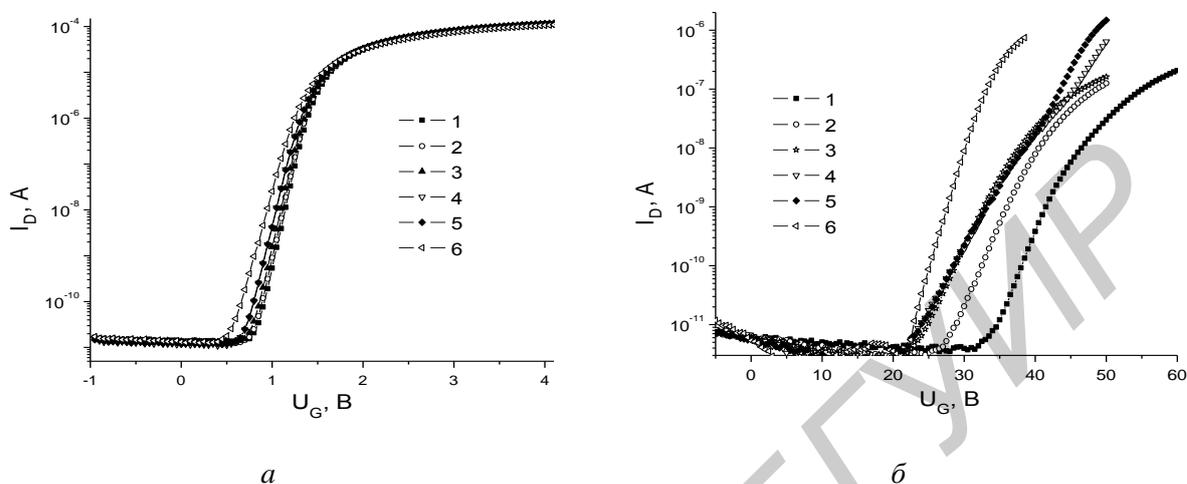


Рис. 5. Влияние гамма-излучения на ВАХ рабочих (а) и паразитных (б) МОП/КНИ-транзисторов ( $d_{Si} = 0,3$  мкм,  $U_D = +5$  В;  $U_{Sub} = -3$  В); 1 –  $D = 0$ ; 2 –  $1 \cdot 10^3$ ; 3 –  $2 \cdot 10^3$ ; 4 –  $4 \cdot 10^3$ ; 5 –  $5 \cdot 10^3$ ; 6 –  $1,2 \cdot 10^4$  Гр

На рис. 6 представлены дозовые зависимости токов утечки рабочих МОП/КНИ-транзисторов с различной толщиной пленки кремния. Наблюдается резкое увеличение значений  $I_L$  при  $D > 2 \cdot 10^3$  Гр у транзисторов с  $d_{Si} = 0,2$  мкм, а в случае  $d_{Si} = 0,3$  мкм ток утечки практически не изменяется во всем исследованном диапазоне доз облучения.

Кроме того, при отрицательном смещении подложки  $U_{Sub} = -3$  В величина сдвига порогового напряжения  $\Delta U_T$  паразитного транзистора еще дополнительно уменьшается с ростом длины канала до  $L = 1,2$  мкм (рис. 7). Следовательно, имеется достаточный запас для повышения радиационной стойкости МОП/КНИ-транзисторов с помощью конструктивно-технологических методов.

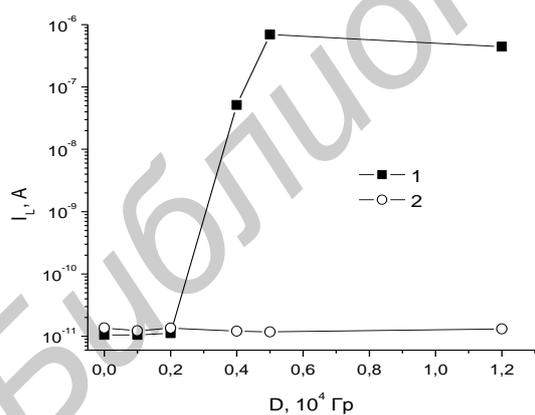


Рис. 6. Дозовые зависимости токов утечки рабочих МОП/КНИ транзисторов с различной толщиной пленки кремния ( $U_D = +5$  В;  $U_{Sub} = -$  В); 1 –  $d_{Si} = 0,2$ ; 2 –  $0,3$  мкм

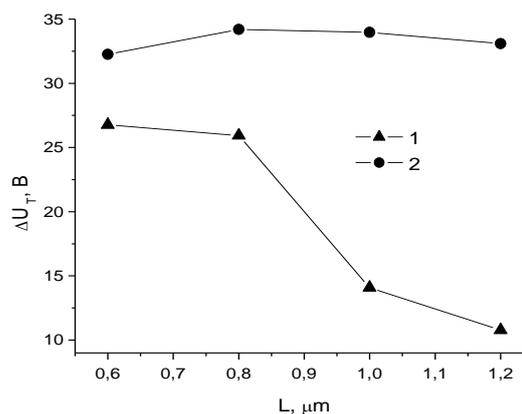


Рис. 7. Изменение порогового напряжения паразитного транзистора в зависимости от длины канала при облучении ( $d_{Si} = 0,3$  мкм;  $U_D = +5$  В;  $D = 1,2 \cdot 10^4$  Гр); 1 –  $U_{Sub} = -3$  В; 2 –  $0$  В

### Закключение

Установлено, что в результате воздействия гамма-излучения ( $D = 10^3 - 1,2 \cdot 10^4$  Гр) при напряжении на стоке и истоке +5 В происходит значительное изменение ВАХ  $n$ -канальных МОП/КНИ-транзисторов с толщиной пленки кремния  $d_{Si} = 0,2$  мкм (увеличение токов утечки на

несколько порядков). Более высокую радиационную стойкость (до  $D = 1,2 \cdot 10^4$  Гр) показали МОП/КНИ-транзисторы с повышенной толщиной  $d_{Si} = 0,3$  мкм. При этом величина сдвига порогового напряжения паразитного транзистора еще дополнительно уменьшается с ростом длины канала от 0,6 до 1,2 мкм. Следовательно, с помощью конструктивно-технологических методов достигается эффективное обеспечение работоспособности МОП/КНИ-транзисторов при воздействии ионизирующего излучения.

*Работа выполнялась при частичной финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований в рамках проекта Ф15-038.*

## INFLUENCE OF GAMMA RADIATION ON MOS/SOI TRANSISTORS

Yu.V. BOGATYREV, S.B. LASTOVSKY, S.A. SOROKA,  
S.V. SHWEDOV, D.A. OGORODNIKOV

### Abstract

The results of experimental researches of influence of gamma radiation  $Co^{60}$  on test MOS/SOI transistors with different constructive-technologic features and electrical modes are submitted.

*Keywords:* MOS/SOI transistor, gamma radiation, radiation resistance.

### Список литературы

1. *Claeys C., Simoen E.* Radiation Effects in Advanced Semiconductor Materials and Devices. Berlin, 2002.
2. *Barnaby H.J.* // IEEE Trans. Nucl. Sci., 2006. Vol. 53. P. 3103–3121.
3. *Colinge J.P.* Silicon-On-Insulator Technology: Materials to VLSI. Kluwer Academic Publishers, 1997.
4. *Revesz A.G., Hughes H.L.* Physical and Technical Problems of SOI Structures and Devices / Ed. by J.P. Colinge, et. al. Kluwer Academic Publishers, 1995.
5. *Чумаков А.И.* Действие космической радиации на интегральные схемы. М., 2004.
6. *Liu S.T., Fechner P.E., Jenkins W.C., et. al.* // Electrochemical Society Proceedings. 2001. Vol. 3. P. 121–126.
7. *Коршунов Ф.П., Богатырев Ю.В., Вавилов В.А.* Воздействие радиации на интегральные микросхемы. Минск, 1986.
8. *Периенков В.С., Попов В.Д., Шальнов А.В.* Поверхностные радиационные эффекты в элементах интегральных микросхем. М., 1988.
9. SILVACO International. ATLAS User's Manual. Device Simulation Software. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.silvaco.com>. – Дата доступа: 11.08.2015.