

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).

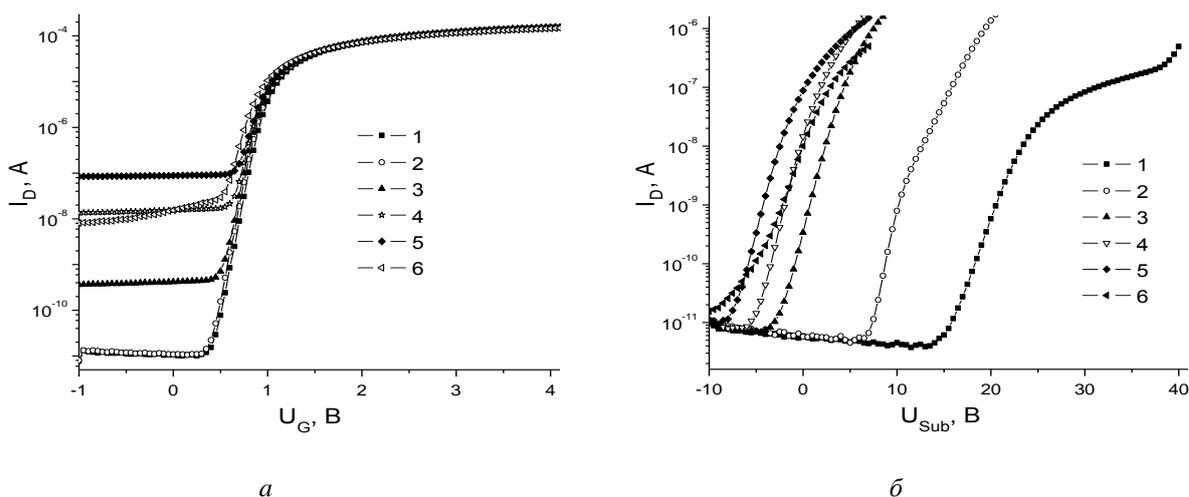


Рис. 1. Влияние гамма-излучения на ВАХ рабочих (а) и паразитных (б) МОП/КНИ-транзисторов ($d_{Si} = 0,2$ мкм; $U_D = +5$ В; $U_{Sub} = 0$ В); 1 – $D = 0$; 2 – $1 \cdot 10^3$; 3 – $2 \cdot 10^3$; 4 – $4 \cdot 10^3$; 5 – $5 \cdot 10^3$; 6 – $1,2 \cdot 10^4$ Гр)

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.

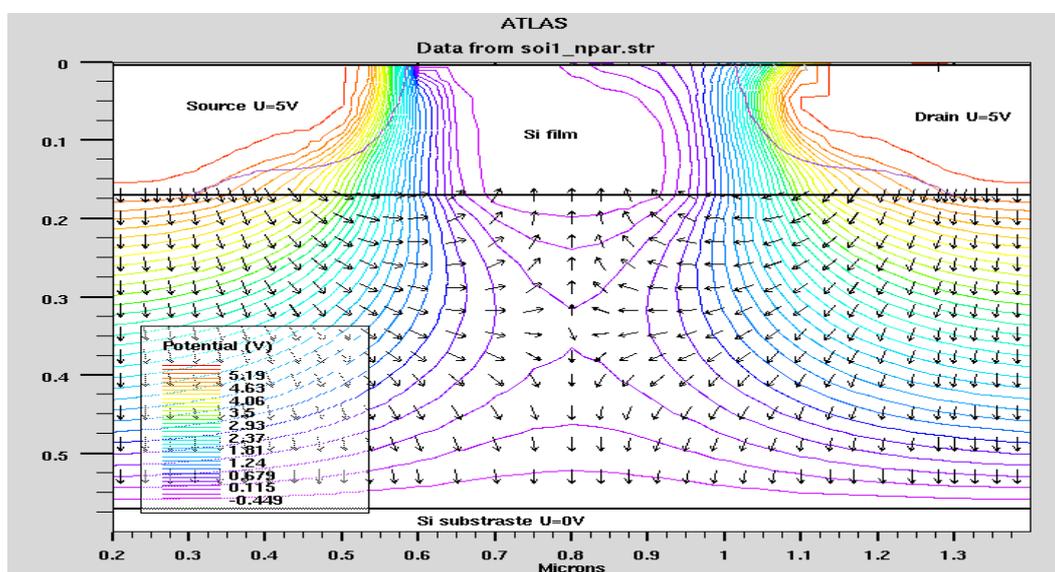


Рис. 2. Распределение потенциала в МОП/КНИ-транзисторе ($d_{Si} = 0,17$ мкм; $U_D = U_S = +5$ В; $U_{Sub} = 0$ В)

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.

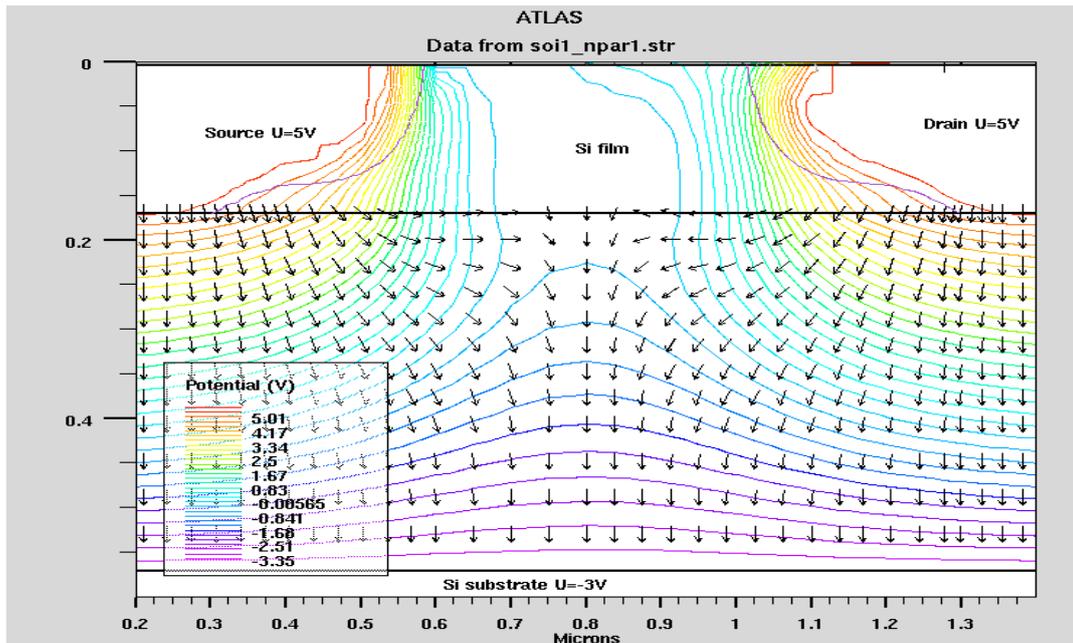


Рис. 3. Распределение потенциала в МОП/КНИ-транзисторе ($d_{Si} = 0,17$ мкм; $U_D = U_S = +5$ В; $U_{Sub} = -3$ В)

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.

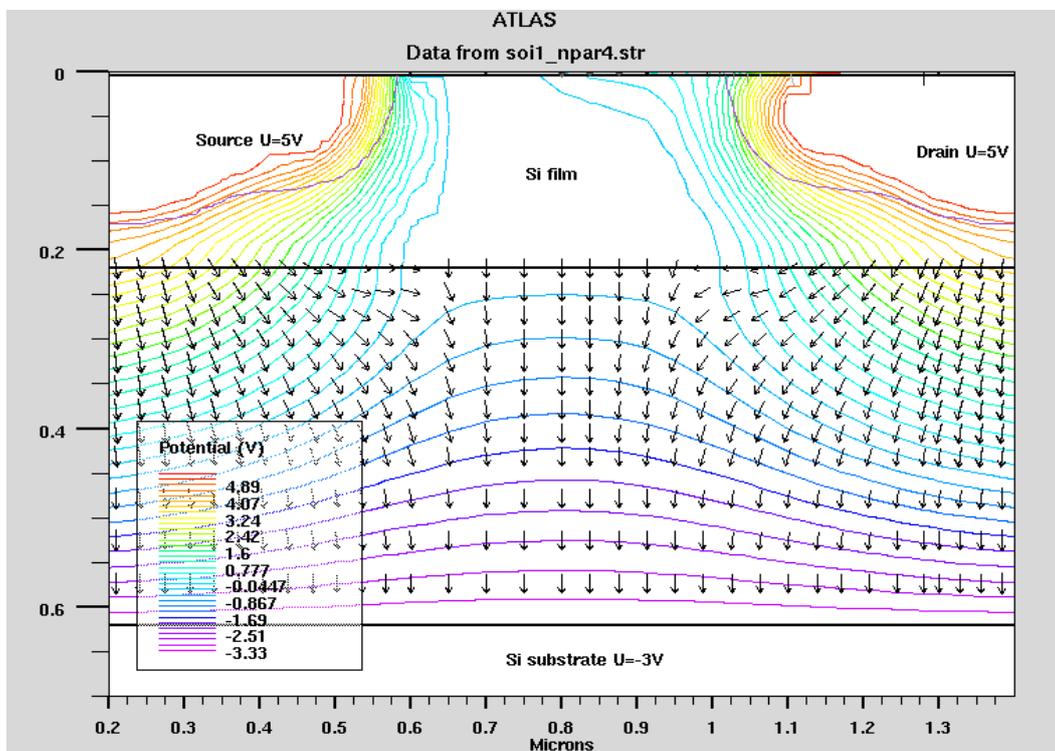


Рис. 4. Распределение потенциала в МОП/КНИ-транзисторе ($d_{Si} = 0,22$ мкм; $U_D = U_S = +5$ В; $U_{Sub} = -3$ В)

На рис. 5 показано влияние гамма-излучения на 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).

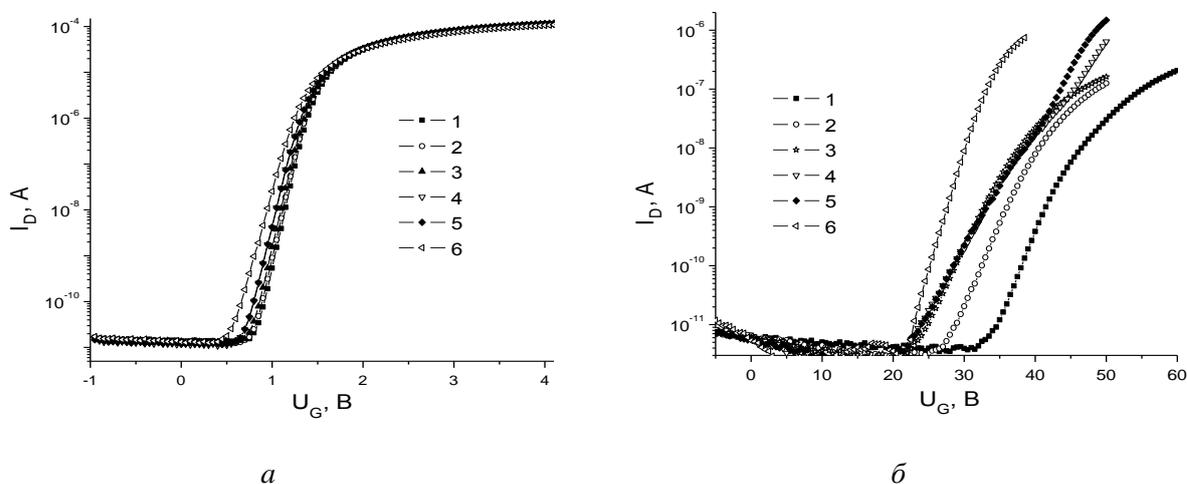


Рис. 5. Влияние гамма-излучения на ВАХ рабочих (а) и паразитных (б) МОП/КНИ-транзисторов ($d_{Si} = 0,3$ мкм, $U_D = +5$ В; $U_{Sub} = -3$ В); 1 – $D = 0$; 2 – $1 \cdot 10^3$; 3 – $2 \cdot 10^3$; 4 – $4 \cdot 10^3$; 5 – $5 \cdot 10^3$; 6 – $1,2 \cdot 10^4$ Гр

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 ΔU_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.

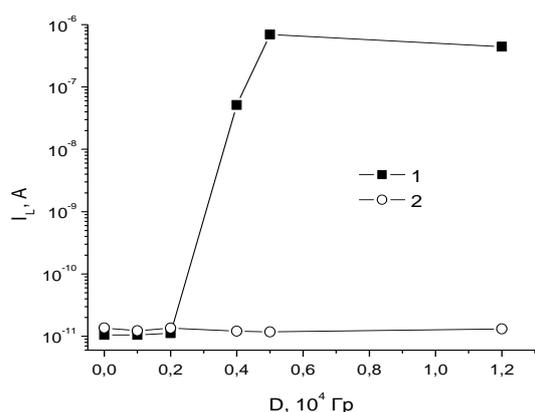


Рис. 6. Дозовые зависимости токов утечки рабочих МОП/КНИ транзисторов с различной толщиной пленки кремния ($U_D = +5$ В; $U_{Sub} = -3$ В); 1 – $d_{Si} = 0,2$; 2 – $0,3$ мкм

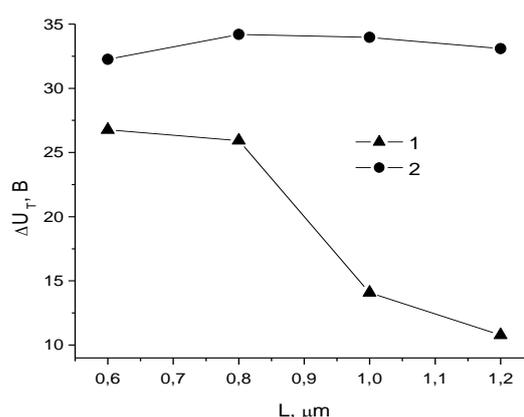


Рис. 7. Изменение порогового напряжения паразитного транзистора в зависимости от длины канала при облучении ($d_{Si} = 0,3$ мкм; $U_D = +5$ В; $D = 1,2 \cdot 10^4$ Гр); 1 – $U_{Sub} = -3$ В; 2 – 0 В

Заключение

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. *Першенков 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.