

УДК 621.382

РАДИАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ В ЭЛЕМЕНТАХ СУБМИКРОННЫХ КМОП ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

Ф.П. КОРШУНОВ, Ю.В. БОГАТЫРЕВ, А.И. БЕЛОУС*, С.В. ШВЕДОВ*, В.С. МАЛЫШЕВ*,
С.Б. ЛАСТОВСКИЙ, В.И. КАРАСЬ, В.А. ГУРИНОВИЧ

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

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

Поступила в редакцию 26 сентября 2010

Рассмотрено влияние гамма-излучения Co^{60} на параметры тестовых металл-окисел-полупроводник (МОП)-структур, а также n - и p -канальных МОП-транзисторов (МОПТ): элементов субмикронных (0,35 мкм) КМОП интегральных схем. Установлено, что при облучении происходит значительный сдвиг и уменьшение наклона CV-характеристик тестовых МОП-конденсаторов с толстым окислом ($d_{\text{ок}} = 0,52$ мкм); CV-характеристики МОП-структур с $d_{\text{ок}} = 7$ нм при облучении дозой $D = 10^4$ Гр практически не изменились. Стокзатворные вольтамперные характеристики (ВАХ) n -МОПТ «классической» конструкции при облучении изменились более значительно по токам утечки, чем ВАХ n -МОПТ «кольцевой» конструкции. ВАХ «классических» p -МОПТ при облучении изменились за счет небольшого сдвига в сторону отрицательных напряжений затвора, однако токи утечки p -МОПТ возросли незначительно. Обнаружена корреляция токов утечки «классических» n -МОПТ и токов через паразитный n -МОПТ при облучении в пассивном и активном электрическом режиме.

Ключевые слова: МОП-структуры, n - и p -канальные МОП-транзисторы, элементы КМОП интегральных схем, гамма-излучение, CV-характеристики, вольтамперные характеристики.

Введение

Повышение требований к работоспособности и долговечности радиоэлектронной аппаратуры ставит актуальную задачу обеспечения функционирования интегральных схем (ИС) при длительном воздействии ионизирующих излучений в реальных условиях эксплуатации на различных промышленных и космических объектах. При этом необходимо создание новых типов функционально-сложных больших и сверхбольших интегральных схем (БИС и СБИС), которые должны обладать повышенной устойчивостью к радиационным воздействиям.

Исследование радиационных нарушений в структурах металл-окисел-полупроводник (МОП) является актуальной задачей сегодняшнего дня, с точки зрения обеспечения радиационной стойкости изделий электронной техники. Радиационные эффекты в МОП-структурах (ионизация, накопление заряда в диэлектрике, образование поверхностных состояний на границе раздела Si-SiO₂, создание радиационных дефектов в приповерхностной области полупроводника) приводят к деградации электрических характеристик и сокращению срока работы МОП-приборов в условиях облучения [1–3].

Наибольшее применение в различной радиоэлектронной аппаратуре получили интегральные схемы на комплементарных МОП-транзисторах (КМОП ИС), что обусловлено их низким энергопотреблением и повышенной помехоустойчивостью [4]. В настоящее время су-

существует проблема обеспечения радиационной стойкости КМОП ИС высокой степени интеграции (с топологическими нормами менее 0,5 мкм), в которых при облучении проявляются эффекты, связанные с паразитными структурами, в первую очередь, с утечками вдоль диэлектрической изоляции [5, 6]. Токи утечки формируются в паразитных МОП-структурах под «толстыми» окислами. По мере уменьшения геометрических размеров элементов ИС все больший вклад дают краевые эффекты, связанные с процессами переноса носителей через периферийные области.

В данной работе рассмотрены результаты экспериментальных исследований радиационной стойкости элементной базы КМОП ИС с топологическими нормами 0,35 мкм (МОП-конденсаторов и транзисторов) при воздействии гамма-излучения Co^{60} .

Методика

Эксперименты проводились на тестовых элементах 0,35 мкм КМОП ИС, изготовленных по эпитаксиально-планарной технологии: тестовых МОП-структурах с толстым изолирующим окислом (толщина $d_{ox} = 0,52$ мкм) и тонким подзатворным окислом ($d_{ox} = 7,0$ нм); паразитных МОП-транзисторах (МОПТ); тестовых МОПТ с каналами *n*- и *p*-типа (длина и ширина канала $L/W = 0,35/10,0$ мкм). Исследовались тестовые МОПТ «классической» конструкции, а также «кольцевой» конструкции (сток окружен затвором).

Облучение тестовых образцов гамма-квантами Co^{60} проводилось на установке «Исследователь» при температуре 300 ± 310 К и различных электрических режимах. Мощность дозы гамма-излучения составляла 0,4 Гр/с, доза $D = 10^2 \div 10^4$ Гр.

Измерение параметров МОПТ до и после облучения проводилось с помощью автоматизированного измерителя параметров транзисторов Л2-70. CV-характеристики МОП-структур измерялись с помощью автоматизированного цифрового LCR измерителя E7-12 на частоте 1 МГц.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 1 показаны изменения CV-характеристик МОП-структур ($d_{ox} = 0,52$ мкм) при облучении в активном электрическом режиме (при напряжении на затворе $U_s = 3,3$ В). В результате воздействия гамма-излучения происходит значительный сдвиг CV-характеристик тестовых МОП-конденсаторов с толстым окислом в сторону отрицательных напряжений затвора, что обусловлено накоплением положительного фиксированного заряда в объеме окисла. Наблюдается также уменьшение наклона CV-характеристик и искажение их первоначальной формы, что объясняется увеличением плотности быстрых поверхностных состояний на границе раздела Si-SiO₂ [1–3].

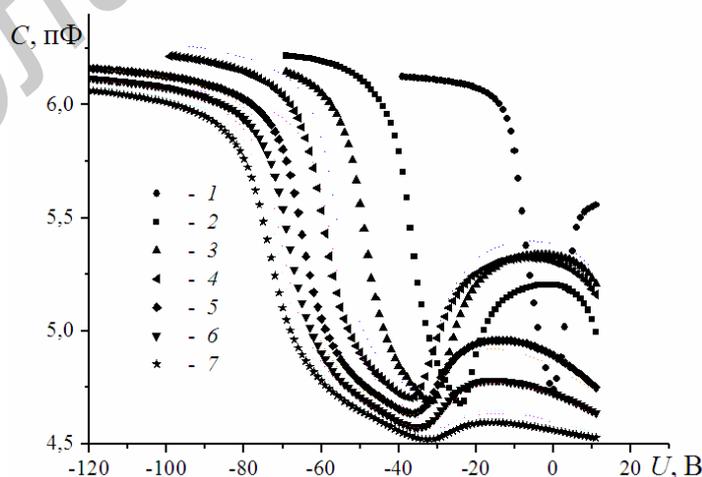


Рис. 1. Влияние гамма-излучения на CV-характеристики МОП-структур ($d_{ox} = 0,52$ мкм): 1 – $D = 0$; 2 – $5 \cdot 10^2$ Гр; 3 – 10^3 Гр; 4 – $2 \cdot 10^3$ Гр; 5 – $4 \cdot 10^3$ Гр; 6 – $6 \cdot 10^3$ Гр; 7 – 10^4 Гр

После облучения наблюдалось частичное восстановление CV-характеристик тестовых МОП-конденсаторов ($d_{\text{ок}} = 0,52$ мкм). Этот эффект обусловлен нейтрализацией захваченного положительного заряда в приграничной области окисла в результате туннелирования электронов из кремния на заряженные дырочные ловушки [1].

Испытания МОП-конденсаторов ($d_{\text{ок}} = 7$ нм) при гамма-облучении в активном электрическом режиме ($U_3 = 3,3$ В) показали, что при дозе $D = 10^4$ Гр сдвиг CV-характеристик по напряжению составляет не более 0,1 В (рис. 2).

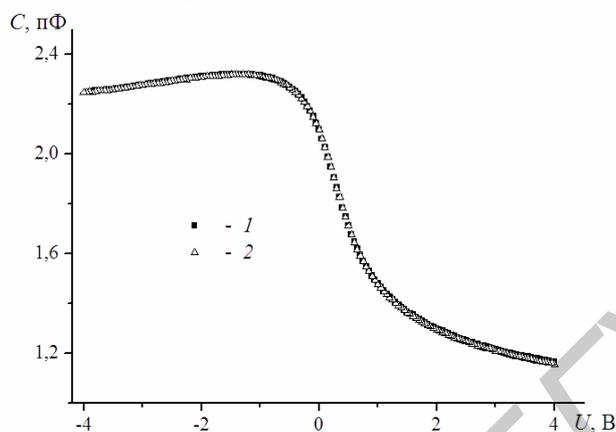


Рис. 2. Влияние гамма-излучения на CV-характеристики МОП-структур ($d_{\text{ок}} = 7$ нм): 1 — $D = 0$; 2 — 10^4 Гр

Результаты испытаний тестовых n -МОПТ при воздействии гамма-излучения Co^{60} в активном электрическом режиме ($U_3 = 3,3$ В) представлены на рис. 3. Сток-затворные вольтамперные характеристики (ВАХ) n -МОПТ «классической» конструкции при облучении изменились более значительно (рис. 3,а), чем ВАХ n -МОПТ «кольцевой» конструкции (рис. 3,б). В первом случае происходит заметное возрастание токов утечки с ростом дозы облучения. Во втором случае токи утечки изменились очень незначительно вплоть до $D = 10^4$ Гр.

У n -МОПТ «кольцевой» конструкции при облучении токи утечки практически не возрастают, поскольку там не имеется активных краевых областей, перекрываемых поликремнием, т. е. нет контакта между толстым изолирующим окислом и p -областью подложки, где могут протекать токи утечки [7].

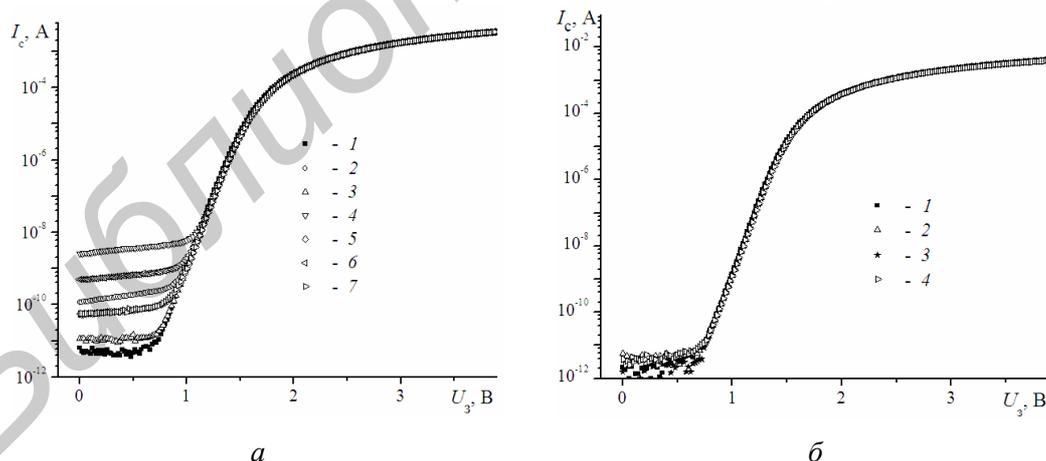


Рис. 3. Влияние гамма-излучения на ВАХ n -канальных МОПТ с «классической» геометрией (а), где 1 — $D = 0$; 2 — 10^3 Гр; 3 — $2 \cdot 10^3$ Гр; 4 — $4 \cdot 10^3$ Гр; 5 — $6 \cdot 10^3$ Гр; 6 — $8 \cdot 10^3$ Гр; 7 — 10^4 Гр; и «кольцевой» геометрией (б) где 1 — $D = 0$; 2 — $2 \cdot 10^3$ Гр; 3 — $6 \cdot 10^3$ Гр; 4 — 10^4 Гр

Следует отметить, что в результате облучения не происходит сдвиг и искажение ВАХ n -МОПТ обоих типов, т.е. в подзатворном диэлектрике не накапливается объемный положительный заряд, а также не увеличивается плотность быстрых поверхностных состояний. Этот результат подтверждается данными по стабильности CV-характеристик МОП-конденсаторов ($d_{\text{ок}} = 7$ нм) при гамма-облучении (рис. 2). Полученный эффект объясняется тем, что толщина

подзатворного окисла сравнима с характеристической длиной туннелирования дырок (~5 нм) [7]. Поэтому при наличии внешнего электрического поля радиационно-индуцированный заряд дырок выносится из окисла в кремний путем туннелирования, а вероятность захвата дырок в объеме окисла или их участия в образовании граничных поверхностных состояний становится очень малой.

Результаты испытаний тестовых p -МОПТ при воздействии гамма-излучения Co^{60} в активном электрическом режиме ($U_3 = -3,3$ В) представлены на рис. 4. В отличие от n -МОПТ сток-затворные ВАХ p -МОПТ «классической» конструкции при облучении изменились за счет небольшого сдвига в сторону отрицательных напряжений затвора, что обусловлено накоплением некоторого положительного фиксированного заряда в объеме окисла, примыкающего к затвору. Однако токи утечки p -МОПТ при облучении возросли незначительно.

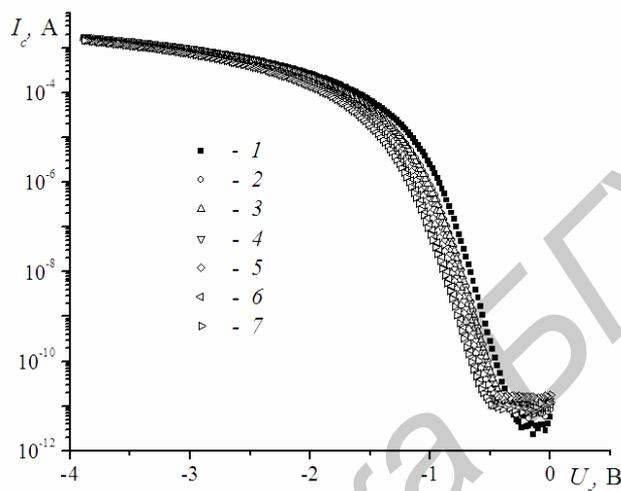


Рис. 4. Влияние гамма-излучения на ВАХ p -канальных МОПТ с «классической» геометрией: 1 – $D = 0$; 2 – 10^3 Гр; 3 – $2 \cdot 10^3$ Гр; 4 – $4 \cdot 10^3$ Гр; 5 – $6 \cdot 10^3$ Гр; 6 – $8 \cdot 10^3$ Гр; 7 – 10^4 Гр

Было установлено, что возрастание токов утечки I_L n -МОПТ «классической» конструкции с ростом дозы радиации имеет немонотонный характер при облучении в активном электрическом режиме: на дозовой зависимости $I_L(D)$ наблюдаются несколько максимумов (рис. 5). В случае облучения в пассивном электрическом режиме ($U_3 = 0$ В) токи утечки n -МОПТ увеличиваются меньше и монотонно.

Токи утечки формируются в паразитных МОПТ с толстым окислом вследствие накопления зарядов преимущественно в краевых областях между «толстым» и «тонким» окислами, в которых действуют значимые электрические поля от напряжения на затворах [8].

Была обнаружена корреляция токов утечки «классического» n -МОПТ и токов через паразитный n -МОПТ при облучении в пассивном и активном электрическом режиме (рис. 5).

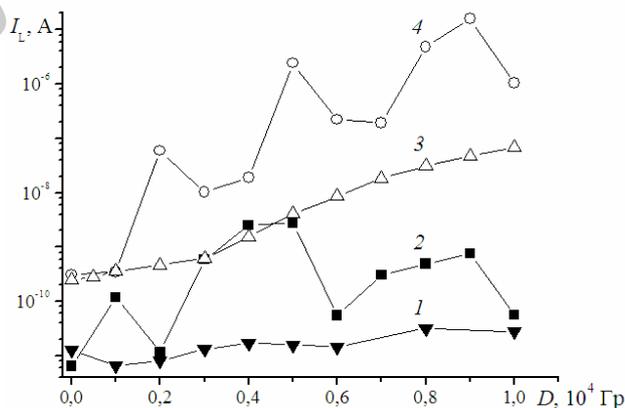


Рис. 5. Дозовые зависимости токов утечки n -МОПТ (1 и 2 – классических, 3 и 4 – паразитных) при различном электрическом режиме: 1; 3 – $U_3 = 0$ В; 2; 4 – $U_3 = 3,3$ В

Полученный эффект (немонотонная дозовая зависимость токов утечки), по-видимому, обусловлен процессами накопления и нейтрализации положительного объемного заряда в «птичьем клюве» изолирующего окисла паразитного МОПТ при наличии внешнего электрического поля. Эти немонотонные процессы синхронно проявились также на CV-характеристиках МОП-структур с толстым изолирующим окислом в области небольших (нулевых) напряжений затвора (рис. 1). Причиной немонотонного характера зависимости $I_L(D)$ может быть также перемещение ионов примеси (водорода и др.) в SiO₂.

Полученные в нашей работе результаты в целом можно объяснить следующим образом. В работах [3–6, 9, 10] отмечалось, что наибольшее влияние на радиационную стойкость МОП-приборов оказывают толщины подзатворного и изолирующего окислов. Наиболее чувствительными структурами (по дозовым эффектам) являются активные МОП-транзисторы (особенно *n*-канальные) и паразитные МОП-транзисторы, связанные с изолирующим окислом. Поэтому основное влияние на радиационную стойкость МОП-приборов оказывают температурный режим окисления и отжига, механические напряжения и неконтролируемые примеси в тонких слоях приборов. Разброс параметров технологического процесса может приводить к изменению характеристик нестехиометричного окисла вблизи кремния, а также к введению различных примесей, в основном водородосодержащих. Эти факторы приводят к нестабильности характеристик радиационной стойкости МОП-транзисторов (возникновению токов утечки подзатворного окисла и канала).

Заключение

Выполнены исследования радиационной стойкости элементной базы субмикронных (0,35 мкм) КМОП ИС при воздействии гамма-излучения Co⁶⁰.

Установлено, что при облучении в активном электрическом режиме происходит значительный сдвиг и уменьшение наклона CV-характеристик тестовых МОП-конденсаторов с толстым окислом ($d_{ox} = 0,52$ мкм). Испытания МОП-структур ($d_{ox} = 7$ нм) при облучении в активном электрическом режиме показали, что при дозе $D = 10^4$ Гр CV-характеристики структур практически не изменились.

Обнаружено, что сток-затворные ВАХ *n*-МОПТ «классической» конструкции при облучении изменились более значительно, чем ВАХ *n*-МОПТ «кольцевой» конструкции. В первом случае происходит заметное возрастание токов утечки с ростом дозы облучения до $D = 10^4$ Гр. ВАХ *p*-МОПТ «классической» конструкции при облучении изменились за счет небольшого сдвига в сторону отрицательных напряжений затвора, однако токи утечки *p*-МОПТ возросли незначительно.

Установлено, что возрастание токов утечки *n*-МОПТ «классической» конструкции с ростом дозы радиации имеет немонотонный характер при облучении в активном электрическом режиме. Обнаружена корреляция токов утечки *n*-МОПТ «классической» конструкции и токов через паразитный *n*-МОПТ при облучении в пассивном и активном электрическом режиме.

RADIATION EFFECTS IN ELEMENTS OF SUBMICRON CMOS INTEGRATED CIRCUITS

F.P. KORSHUNOV, YU.V. BOGATYREV, A.I. BELOUS, S.V. SHVEDOV, V.S. MALYSHEV, S. B. LASTOVSKY, V.I. KARAS, V.A. GURINOVICH

Abstract

The results of experimental research of radiation resistance of element base of 0,35 μm CMOS integrated circuits at influence of gamma-irradiation Co⁶⁰ are submitted. It is established, that there is a significant shift of CV-characteristics of test MOS-structures with thick oxide at the irradiation. CV-characteristics of MOS-structures ($d_{ox} = 7$ nm) practically have not changed at $D = 10^4$ Gy. It is revealed, that I-V characteristics (leakage currents) of «classical» *n*-MOSFETs have changed more

considerably at the irradiation, than characteristics of «ring» *n*-MOSFETs and «classical» *p*-MOSFETs. Correlation of radiation leakage currents of «classical» *n*-MOSFETs and parasitic *n*-MOSFETs has been found.

Литература

1. *Периенков В.С., Попов В.Д., Шальнов А.В.* Поверхностные радиационные эффекты в элементах интегральных микросхем. М., 1988.
2. *Ma T.P., Dressendorfer P.V.* Ionizing Radiation Effects in MOS Devices and Circuits. New York, 1989.
3. *Кориунов Ф.П., Богатырев Ю.В., Вавилов В.А.* Воздействие радиации на интегральные микросхемы. Минск, 1986.
4. *Никифоров А.Ю., Телец В.А., Чумаков А.И.* Радиационные эффекты в КМОП ИС. М., 1994.
5. *Claeys C., Simoen E.* Radiation Effects in Advanced Semiconductor Materials and Devices. Berlin, 2002.
6. *Чумаков А. И.* Действие космической радиации на интегральные схемы. М., 2004.
7. *Lacoe R.C.* // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2008. Vol. 55, N 4. P. 1903–1925.
8. *Никифоров А.Ю.* // Научная сессия МИФИ-2005. Том 1. С. 204–205.
9. *Прибыльский А.В.* // Сб.: Радиационная стойкость электронных систем, «Стойкость – 2001». 2001. Вып. 4. С. 57–58.
10. *Баранов В.В., Прибыльский А.В.* // Докл. БГУИР. 2003. Т. 1, №1. С. 102–106.