

# Оценка влияния конструктивно-технологических параметров на чувствительность nМОП-дозиметра на базе КМОП-технологии

А.Т. Бекенова, Е.А. Артамонова, А.Ю. Красюков

Национальный исследовательский университет «МИЭТ», jane\_art22@mail.ru

**Аннотация** — С использованием средств TCAD проведена оценка влияния радиационного воздействия в диапазоне доз 20кРад – 1000кРад и толщины подзатворного окисла на сдвиг порогового напряжения и чувствительность nМОП-дозиметра на базе КМОП-технологии с изоляцией LOCOS, в котором роль подзатворного окисла выполняет толстый изолирующий слой (FOXFET). Модель FOXFET сформирована в TCAD посредством моделирования КМОП-технологического маршрута с проектными нормами 0.6 мкм. Результаты моделирования показали, что чувствительность падает с ростом дозы облучения, наибольший спад наблюдается при малых дозах до 50 кРад, при дальнейшем увеличении дозы вплоть до 1000кРад наблюдается плавное снижение, которое можно объяснить постепенным насыщением ловушек в окисле зарядом. Существенный рост чувствительности прибора наблюдается с ростом толщины окисла. С помощью моделирования также рассчитаны зависимости чувствительности дозиметра от режимов формирования локального окисла.

**Ключевые слова** — МОП-транзистор, моделирование, TCAD, дозиметр радиации, электрические характеристики.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Дозиметры радиации на основе МОП-технологии получили широкое распространение в космической сфере, ядерной промышленности, медицине и других областях благодаря низкому энергопотреблению, компактности, совместимости с периферийной электроникой [1]-[5].

Принцип работы такого дозиметра основан на эффекте смещения порогового напряжения МОП-транзистора при облучении, который связан с накоплением в подзатворном окисле заряда, индуцированного в процессе облучения и захваченного ловушками в окисле и на границе раздела окисел-полупроводник. Смещение растёт с ростом толщины подзатворного окисла [6]-[7].

Чувствительность дозиметра излучения определяется как отношение относительного сдвига порогового напряжения к дозе облучения:

$$S = \frac{\Delta VT}{D} = \frac{VT - VT_0}{D},$$

где  $\Delta VT$  – относительный сдвиг порогового напряжения,  $VT$  – пороговое напряжение при дозе облучения  $D$ ,  $VT_0$  – пороговое напряжение до облучения.

Формирование МОП-дозиметров в стандартном КМОП-процессе снижает стоимость производственного процесса, улучшает его воспроизводимость, а также позволяет интегрировать их на одном кристалле с периферийными схемами.

Однако, для достижения высокой чувствительности нужны окислы достаточно больших толщин вплоть до нескольких микрометров [8]-[11], что существенно превышает толщины подзатворного окисла в стандартных КМОП-процессах. В ряде работ предложены варианты формирования дозиметра радиации на основе КМОП-процесса. Так, в работах [12]-[14] представлены структуры дозиметров радиации на основе МОП-транзистора с плавающим затвором, формирование избыточного заряда в котором при облучении приводит к заметному смещению порогового напряжения и повышению чувствительности дозиметров. В работах [15]-[18], дозиметры формируются на основе КНИ-КМОП-процесса, в них в качестве чувствительного элемента используется слой скрытого окисла.

В [1] предложен высокочувствительный дозиметр гамма-излучения на базе МОП-транзистора с толстым подзатворным оксидом, интегрированный в стандартный КМОП-маршрут с LOCOS-изоляцией. Сечение такого транзистора показано на рис.1. Толстый слой локального окисла играет роль подзатворного диэлектрика, что способствует повышению чувствительности дозиметра. При такой конструкции транзистор является высоковольтным, рабочие напряжения составляют десятки вольт.

По сравнению со стандартным КМОП-процессом для создания стоков-истоков FOXFET вместо p+-областей используются области слаболегированных p-карманов с n+-контактными областями. Эти области имеют большее пробивное напряжение, что позволяет подавать на высоковольтный FOXFET большие напряжения.

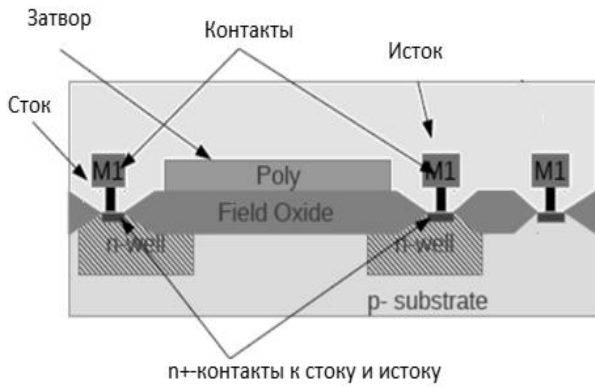


Рис. 1. Сечение FOXFET

В [1] используется КМОП процесс с проектными нормами 0.6 мкм. Толщина подзатворного оксида 15 нм, толщина LOCOS-изоляции  $T_{ox}$  для разных процессов составляет 400 нм и 600 нм. Предложенная конструкция была взята за основу для исследования зависимости чувствительности дозиметра радиации от толщины слоя локального окисления и режимов его формирования.

## II. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ДОЗИМЕТРА РАДИАЦИИ НА ОСНОВЕ FOXFET ОТ ЕГО КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

На основе стандартного КМОП-маршрута с проектными нормами 0.6 мкм с изоляцией LOCOS был сформирован упрощенный маршрут создания FOXFET и проведено технологическое моделирование средствами пакета Sentaurus TCAD. Иллюстрация маршрута создания КМОП-совместимого дозиметра FOXFET приведена на рис. 2.

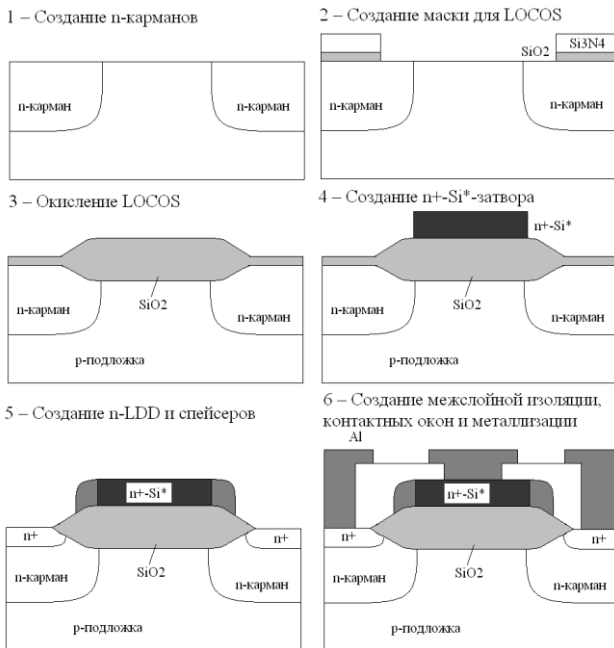


Рис. 2. Иллюстрация маршрута создания КМОП-совместимого дозиметра FOXFET

Итоговая 2D-модель транзистора с  $T_{ox}=650$  нм и его основные сечения показаны на рис. 3: тип затвора –  $n^+-Si^*$ , длина затвора – 10 мкм, глубина залегания карманов – 3 мкм.

Для расчета вольт-амперных характеристик FOXFET с учетом облучения в слое LOCOS задавалось распределение ловушек. При моделировании транзистора без воздействия радиационного облучения ловушки в окисле оставались пустые. Для моделирования радиационного воздействия задавалась модель захвата заряда в ловушки, рассчитывающая накопление заряда в ловушках при заданной дозе облучения при  $V_{си}=0.1$  В и  $V_{зи}=0$ . На рис. 4 приведено распределение захваченного ловушками положительного заряда в слое окисла в вертикальном сечении затвора при дозе облучения 200 кРад; максимумы концентраций захваченного заряда приходятся на границы раздела окисел-кремний и окисел-поликремний.

На рис. 5 приведены проходные вольт-амперные характеристики FOXFET до и после облучения с дозами от 200 до 1000 кРад для процесса с толщиной локального окисла 650 нм. Наблюдается смещение порогового напряжения в область отрицательных значений при облучении, которое растет с ростом дозы облучения, что объясняется накоплением при облучении положительного заряда на ловушках в слое окисла.

Относительный сдвиг порогового напряжения по модулю после облучения с дозами 20-150 кРад и 200-1000 кРад при  $T_{ox}=400$  нм и 650 нм приведены на рис. 6 и 7. Пороговое напряжение измерялось при уровне тока  $10^{-9}$  А/мкм, до облучения  $V_{T0}=1.1$  В для  $T_{ox}=400$  нм и 2.1 В и для  $T_{ox}=650$  нм.

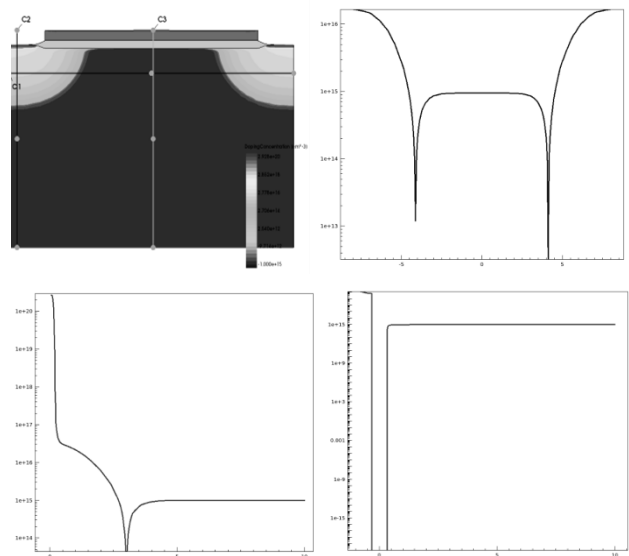
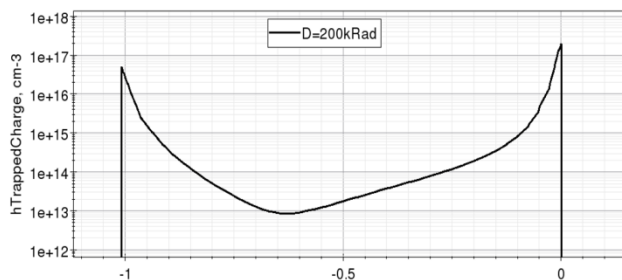


Рис. 3. Итоговая 2D-модель FOXFET (верхний левый) и его 1D-сечения: горизонтальное - C1 (верхний правый), вертикальное по стоку - C2 (нижний левый), вертикальное по затвору - C3 (нижний правый)

Из рис. 6-7 можно сделать вывод, что относительный сдвиг порогового напряжения растет с увеличением дозы облучения, однако насыщение зарядом ловушек в окисле при больших дозах облучения (более 700 кРад) приводит к насыщению роста.



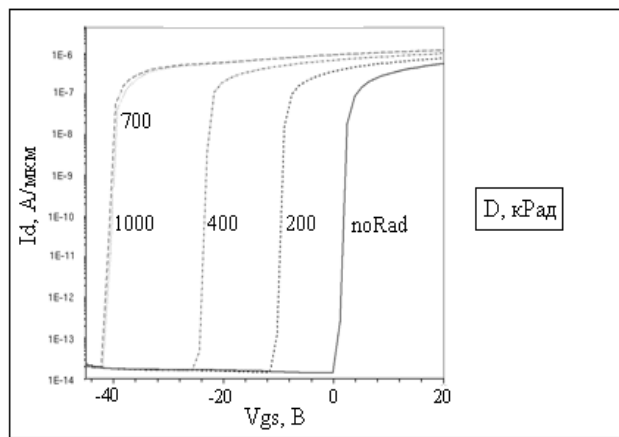
**Рис. 4.** Распределение положительного заряда, захваченного ловушками в слое окисла. Вертикальное сечение по центру затвора: при  $x=-1$  граница окисел-поликремний, при  $x=0$  граница окисел-кремний

Как и ожидалось, относительный сдвиг порогового напряжения после облучения также растет с ростом толщины слоя локального окисла, что обусловлено большей концентрацией ловушек для положительного заряда в более толстых слоях окисла (рис. 6 и 7). Разница особенно заметна при больших дозах облучения и составляет для  $T_{ox}=400$  нм и 650 нм: 1.1 В при 20 кРад, 14 В при 200 кРад и 27 В при 1000 кРад.

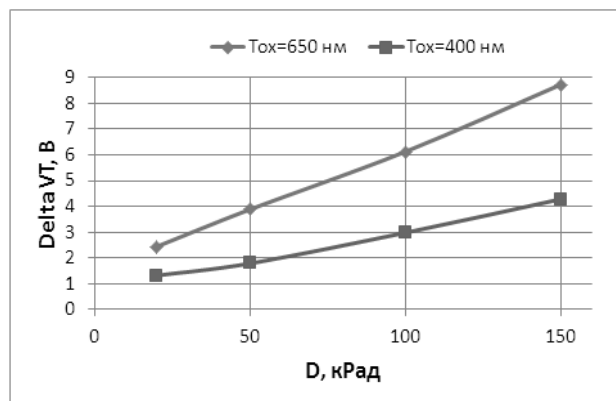
На рис. 8 и 9 приведены зависимости чувствительности дозиметра от дозы облучения в диапазоне 20 – 150 кРад и 200 – 1000 кРад соответственно. Чувствительность падает с ростом дозы облучения, наибольший спад наблюдается при малых дозах до 50 кРад, дальнейшее плавное падение связано, как и в случае с относительным сдвигом порогового напряжения, с насыщением ловушек в окисле зарядом при больших дозах облучения.

Дополнительно были рассчитаны зависимости чувствительности дозиметра от режимов формирования толстого подзатворного окисла (рис. 10 и 11). Время и температура локального окисления варьировалась таким образом, чтобы обеспечить толщины локального окисла в диапазоне от 400 до 650 нм, используемые в реальном технологическом маршруте КМОП с проектными нормами 0.6 мкм.

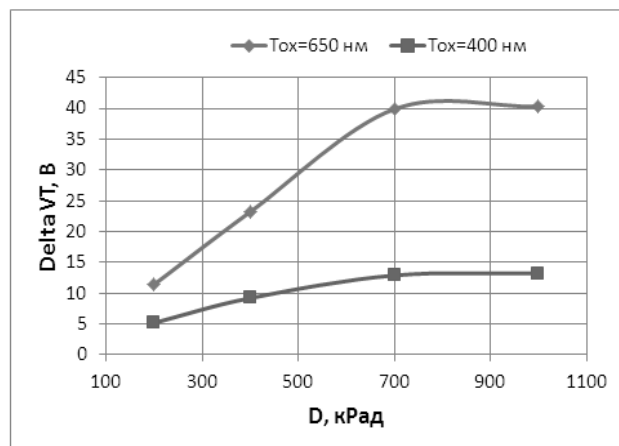
Рис. 10 и 11 демонстрируют существенный рост чувствительности с увеличением температуры и времени локального окисления, наибольший рост наблюдается при относительно небольших дозах облучения 200-700 кРад.



**Рис. 5.** Сток-затворные характеристики FOXFET до и после облучения с дозами от 200кРад до 1000 кРад, толщина слоя LOCOS  $T_{ox}=650$  нм



**Рис. 6.** Относительный сдвиг порогового напряжения после облучения с дозами от 20 до 150 кРад при  $T_{ox}=400$  нм и 650 нм



**Рис. 7.** Относительный сдвиг порогового напряжения после облучения с дозами от 200 до 1000 кРад при  $T_{ox}=400$  нм и 650 нм

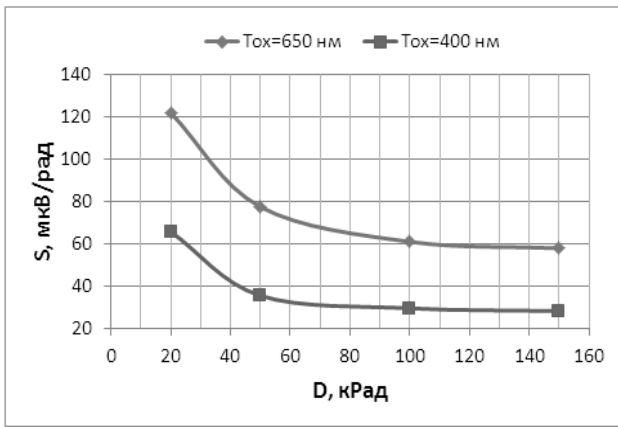


Рис. 8. Зависимость чувствительности дозиметра от дозы облучения в диапазоне 20 - 150 кРад при  $T_{ox} = 400$  нм и 650 нм

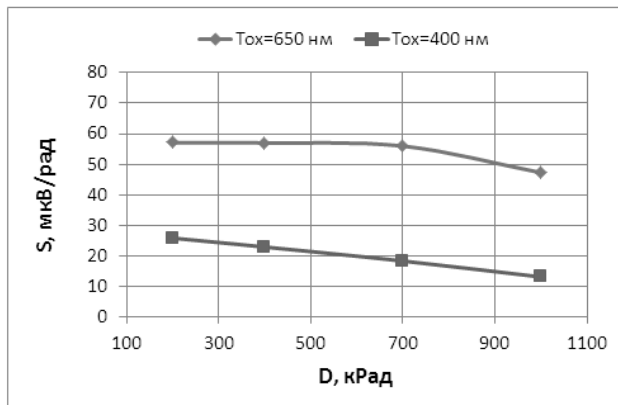


Рис. 9. Зависимость чувствительности дозиметра от дозы облучения в диапазоне 200 - 1000 кРад при  $T_{ox} = 400$  нм и 650 нм

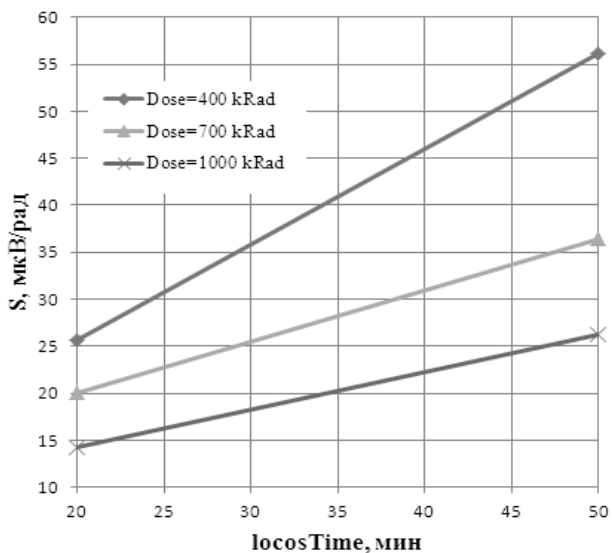


Рис. 10. Зависимость чувствительности дозиметра от времени локального окисления при  $T = 900^{\circ}C$

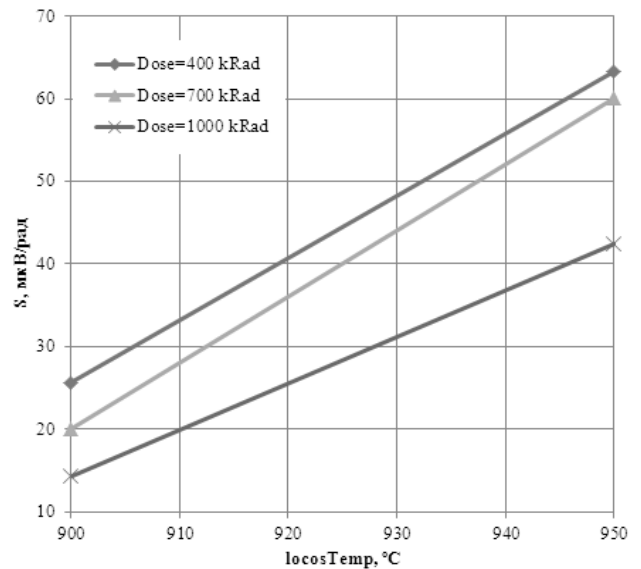


Рис. 11. Зависимость чувствительности дозиметра от температуры окисления при  $t = 20$  мин

Из расчетов (рис. 8-11) можно сделать следующие выводы:

- относительный сдвиг порогового напряжения растет с увеличением дозы облучения: сначала наблюдается существенный рост, но при дозах более 700 кРад наблюдается насыщение роста, связанное с ограниченным количеством ловушек в оксиде и их полным заполнением;
- для повышения чувствительности дозиметра FOXFET предпочтительно использовать технологический процесс с толщиной локального окисла  $T_{ox} = 650$  нм; в этом случае можно достичь чувствительности от 47 до 122 мкВ/Рад, в то время как при  $T_{ox} = 400$  нм чувствительность варьируется от 13 до 66 мкВ/Рад в диапазоне доз от 20 до 1000 кРад.
- чувствительность падает с ростом дозы облучения, наибольший спад наблюдается при малых дозах до 50 кРад.

Построены зависимости чувствительности дозиметра FOXFET от температуры и времени локального окисления для КМОП-технологического маршрута с проектными нормами 0.6 мкм.

### III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Дозиметры радиации на основе КМОП-технологии получили широкое распространение в различных областях благодаря низкому энергопотреблению, малой занимаемой площади, низкой стоимости. Кроме того, совместимость маршрута изготовления такого дозиметра со стандартным КМОП-маршрутом позволяет изготавливать дозиметры и обрабатывающие схемы в едином технологическом процессе на одном кристалле.

За последние десятилетия исследователи предлагали разные варианты МОП- дозиметров, в

которых в качестве чувствительного элемента использовались доступные для технологии слои окисла с толщинами от нескольких сот нанометров до нескольких микрометров. Подзатворный окисел, доступный в любом МОП-процессе, имеет существенно меньшие толщины, и не позволяет создавать высокочувствительные дозиметры.

В работе представлены результаты исследования средствами приборно-технологического моделирования Sentaurus TCAD влияния конструктивно-технологических параметров на чувствительность дозиметра радиации на базе КМОП-технологии с проектными нормами 0.6 мкм и LOCOS-изоляцией. Данная технология хорошо отработана и доступна на отечественных предприятиях микроэлектроники. В качестве подзатворного окисла использовался слой локального окисла с толщинами от 400 до 650 нм.

Результаты показали, что относительный сдвиг порогового напряжения существенно растет с увеличением дозы облучения при дозах 20-700 кРад, однако при более высоких дозах наблюдается прекращение роста, которое можно объяснить ограниченным количеством ловушек в окисле и их насыщением зарядом при больших дозах облучения.

Также чувствительность дозиметра растет с ростом толщины подзатворного окисла. Так КМОП-дозиметр с чувствительностью от 47 до 122 мкВ/Рад для доз в диапазоне от 20 до 1000 кРад может быть получен при толщине локального слоя окисла 650 нм.

При этом с ростом дозы облучения чувствительность падает, что особенно заметно при малых дозах облучения - до 50 кРад.

Также представлены полученные с помощью приборно-технологического моделирования зависимости чувствительности дозиметра FOXFET от температуры и времени локального окисления для КМОП-технологического маршрута с проектными нормами 0.6 мкм и изоляцией LOCOS.

#### ЛИТЕРАТУРА

[1] J. Lipovetzky, M. A. Garcia-Inza, S. Carbonetto, M. J. Carra, E. Redin, L. Sambuco Salomone, and A. Faigon, "Field oxide n-channel MOS dosimeters fabricated in CMOS processes," *IEEE Trans. on Nuclear Science*, vol. 60, no. 6, pp. 4683–4691, 2013.

[2] A. B. Rosenfeld, "MOSFET dosimetry on modern radiation oncology modalities," *Rad. Prot. Dos.*, vol. 101, no. 1-4, pp. 393–398, 2002.

[3] R. Ramaseshan, K. Kohli, T. Zhang, T. Lam, B. Norlinger, A. Hallil, and M. Islam, "Performance characteristics of a microMOSFET as an in vivo dosimeter in radiation therapy," *Phys. Med. Biol.*, vol. 49, no. 17, p. 4031, 2004.

[4] D. Ryazantsev, E. Kuznetsov, "Local Heating of Integrated MOSFET Dosimeter for Annealing Charge", *Proceeding of Universities. Electronics*, p.582-597, 2019.

[5] E. Garcia Moreno, R. Picos, E. Isern, M. Roca, S. Bota, and K. Suenaga, "Radiation sensor compatible with standard CMOS technology," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 56, no. 5, pp. 2910–2915, Oct. 2009.

[6] T. Oldham and F. McLean, "Total ionizing dose effects in MOS oxides and devices," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 50, no. 3, pp. 483–499, Jun. 2003.

[7] A. Holmes-Siedle and L. Adams, *Handbook of Radiation Effects*. Oxford, U.K.: Oxford Univ. Press, 1993.

[8] A. Holmes-Siedle, F. Ravotti, and M. Glaser, "The dosimetric performance of RADFETs in radiation test beams," in *Proc. IEEE Radiation Effects Data Workshop*, 2007, pp. 42–57.

[9] G. Ristić, N. Vasović, and A. Jakšić, "The fixed oxide trap modelling during isothermal and isochronal annealing of irradiated RADFETs," *J. Physics D: Appl. Phys.*, vol. 45, no. 30, p. 305101, 2012.

[10] M. Pejovic, M. Pejovic, and A. Jaksic, "Contribution of fixed oxide traps to sensitivity of pMOS dosimeters during gamma ray irradiation and annealing at room and elevated temperature," *Sens. Actuators A, Phys.*, 2011.

[11] A. Haran and A. Jaksic, "The role of fixed and switching traps in long-term fading of implanted and unimplanted gate oxide RADFETs," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 52, no. 6, pp. 2570–2577, Dec. 2005.

[12] N. Tarr, K. Shortt, Y. Wang, and I. Thomson, "A sensitive, temperature-compensated, zero-bias floating gate MOSFET dosimeter," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 51, no. 3, pp. 1277–1282, Jun. 2004.

[13] Y. Wang, N. Tarr, K. Shortt, and I. Thomson, "A sensitive floating gate MOSFET gamma ray dosimeter," in *Proc. IEEE Sensors*, 2003, vol. 2, pp. 1271–1276.

[14] Y. Wang, Y. Wang, G. Tarr, and K. Iniewski, "A temperature, supply voltage compensated floating-gate MOS dosimeter using extractor," in *Proc. 5th Int. Workshop System-on-Chip for Real-Time Applications*, 2005, pp. 176–179.

[15] A. Haran and A. Jaksic, "The role of fixed and switching traps in long-term fading of implanted and unimplanted gate oxide RADFETs," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 52, no. 6, pp. 2570–2577, Dec. 2005.

[16] J. R. Schwank, M. R. Shaneyfelt, B. L. Draper, and P. E. Dodd, "BUSFET—A radiation-hardened SOI transistor," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 46, no. 6, pp. 1809–1816, Dec. 1999.

[17] M.R. Shaneyfelt, T.A. Hill, T.M. Gurreri, J.R. Schwank, R. S. Flores, P.E. Dodd, S.M. Dalton, A. Robinson, "An Embeddable SOI Radiation Sensor", *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol.56, no.6, 2009.

[18] J. Lipovetzky, M. A. Garcia-Inza, S. Carbonetto, M. J. Carra, E. Redin, L. Sambuco Salomone, and A. Faigon, "Field oxide n-channel mos dosimeters fabricated in cmos processes," *IEEE Trans. on Nuclear Science*, vol. 60, no. 6, pp. 4683–4691, 2013.

# TCAD Study of Responsivity of n-channel MOS Dosimeter Fabricated in CMOS Processes

A. T. Bekenova, E. A. Artamonova, A. Yu. Krasukov

National Research University of Electronic Technology, jane\_art22@mail.ru

**Abstract** — Radiation MOS dosimeters fabricated in standard CMOS processes are widely used in various fields due to low power consumption, small sizes, low cost. Also, integrating the readout electronics and control circuits with the dosimeters on a single chip is possible [1]-[5]. The responsivity of a MOS transistor to total doses of ionizing radiation caused by the positive oxide charge accumulated in the oxide increases with the gate oxide thickness  $T_{ox}$  [6]-[7]. In order to achieve high responsivities, the dosimeters are usually built with oxide thicknesses from several hundreds of nanometers to few micrometers [8]-[11]. These oxides are much thicker than the regular gate oxides available in standard CMOS process.

Over the past decades researchers have proposed the variants of MOS dosimeters fabricated in standard CMOS processes [12]-[18]. In this work we present the results of TCAD study of the VT shift and sensitivity of n-channel MOS dosimeter fabricated in standard CMOS process with LOCOS isolation – FOXFET [1]. Thick field oxide thickness  $T_{ox}$  in FOXFET acts as the gate oxide for the sensor. Two CMOS processes were considered with oxide thicknesses 400 nm and 650 nm.

The results show that VT shift grows significantly with an increase of the radiation dose from 20 to 700 kRad– up to 40  $\mu\text{V}/\text{Rad}$  for  $T_{ox}=650$  nm and 12  $\mu\text{V}/\text{Rad}$  for  $T_{ox}=400$  nm. However, growth stops at higher doses due to oxide charge saturation with the dose.

Responsivity decreases with the radiation dose, the greatest decline is observed at low doses up to 50 kRad. At the same time, responsivity of the dosimeter increases with a field oxide layer thickness. Thus, a CMOS dosimeter with a sensitivity of 47 to 122  $\mu\text{V}/\text{Rad}$  for doses in the range of 20 to 1000 kRad can be obtained for the process with  $T_{ox}=650$  nm, and two times less for  $T_{ox}=400$  nm. Additionally, the dependences of FOXFET responsivity on local oxidation modes for 0.6  $\mu\text{m}$  CMOS process with LOCOS isolation were obtained by technological and device modeling.

**Keywords** — MOSFET, simulation, TCAD, radiation sensor, electrical specifications.

## REFERENCES

- [1] J. Lipovetzky, M. A. Garcia-Inza, S. Carbonetto, M. J. Carra, E. Redin, L. Sambuco Salomone, and A. Faigon, "Field oxide n-channel MOS dosimeters fabricated in CMOS processes," *IEEE Trans. on Nuclear Science*, vol. 60, no. 6, pp. 4683–4691, 2013.
- [2] A. B. Rosenfeld, "MOSFET dosimetry on modern radiation oncology modalities," *Rad. Prot. Dos.*, vol. 101, no. 1-4, pp. 393–398, 2002.
- [3] R. Ramaseshan, K. Kohli, T. Zhang, T. Lam, B. Norlinger, A. Hallil, and M. Islam, "Performance characteristics of a microMOSFET as an in vivo dosimeter in radiation therapy," *Phys. Med. Biol.*, vol. 49, no. 17, p. 4031, 2004.
- [4] D. Ryazantsev, E. Kuznetsov, "Local Heating of Integrated MOSFET Dosimeter for Annealing Charge", *Proceeding of Universities. Electronics*, p.582-597, 2019.
- [5] E. Garcia Moreno, R. Picos, E. Isern, M. Roca, S. Bota, and K. Suenaga, "Radiation sensor compatible with standard CMOS technology," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 56, no. 5, pp. 2910–2915, Oct. 2009.
- [6] T. Oldham and F. McLean, "Total ionizing dose effects in MOS oxides and devices," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 50, no. 3, pp. 483–499, Jun.2003.
- [7] A. Holmes-Siedle and L. Adams, *Handbook of Radiation Effects*. Oxford, U.K.: Oxford Univ. Press, 1993.
- [8] A. Holmes-Siedle, F. Ravotti, and M. Glaser, "The dosimetric performance of RADFETs in radiation test beams," in *Proc. IEEE RadiationEffects Data Workshop*, 2007, pp. 42–57.
- [9] G. Ristić, N. Vasović, and A. Jakšić, "The fixed oxide trap modelling during isothermal and isochronal annealing of irradiated RADFETs," *J. Physics D: Appl. Phys.*, vol. 45, no. 30, p. 305101, 2012.
- [10] M. Pejovic, M. Pejovic, and A. Jaksic, "Contribution of fixed oxide traps to sensitivity of pMOS dosimeters during gamma ray irradiation and annealing at room and elevated temperature," *Sens. Actuators A, Phys.*, 2011.
- [11] A. Haran and A. Jaksic, "The role of fixed and switching traps in long-term fading of implanted and unimplanted gate oxide RADFETs," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 52, no. 6, pp. 2570–2577, Dec. 2005.
- [12] N. Tarr, K. Shortt, Y. Wang, and I. Thomson, "A sensitive, temperature-compensated, zero-bias floating gate MOSFET dosimeter," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 51, no. 3, pp. 1277–1282, Jun. 2004.
- [13] Y. Wang, N. Tarr, K. Shortt, and I. Thomson, "Asensitive floating gate MOSFET gamma ray dosimeter," in *Proc. IEEE Sensors*, 2003, vol. 2, pp. 1271–1276.
- [14] Y. Wang, Y. Wang, G. Tarr, and K. Iniewski, "A temperature, supply voltage compensated floating-gate MOS dosimeter using extractor," in *Proc. 5th Int. Workshop System-on-Chip for Real-Time Applications*, 2005, pp. 176–179.
- [15] A. Haran and A. Jaksic, "The role of fixed and switching traps in long-term fading of implanted and unimplanted gate oxide RADFETs," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 52, no. 6, pp. 2570–2577, Dec. 2005.
- [16] J. R. Schwank, M. R. Shaneyfelt, B. L. Draper, and P. E. Dodd, "BUSFET—A radiation-hardened SOI transistor," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 46, no. 6, pp. 1809–1816, Dec. 1999.
- [17] M.R. Shaneyfelt, T.A. Hill, T.M. Gurrieri, J.R. Schwank, R. S. Flores, P.E. Dodd, S.M. Dalton, A. Robinson, "An Embeddable SOI Radiation Sensor", *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol.56, no.6, 2009.
- [18] J. Lipovetzky, M. A. Garcia-Inza, S. Carbonetto, M. J. Carra, E. Redin, L. Sambuco Salomone, and A. Faigon, "Field oxide n-channel mos dosimeters fabricated in cmos processes," *IEEE Trans. on Nuclear Science*, vol. 60, no. 6, pp. 4683–4691, 2013.