

ISSN 1561-2430 (Print)
ISSN 2524-2415 (Online)
УДК 621.382.3
<https://doi.org/10.29235/1561-2430-2019-55-4-498-504>

Поступила в редакцию 29.08.2019
Received 29.08.2019

Д. А. Огородников, С. Б. Ластовский, Ю. В. Богатырев

*Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси
по материаловедению, Минск, Беларусь*

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАКОПЛЕНИЯ ЗАРЯДА В ОБЛУЧЕННЫХ МОП/КНИ-ТРАНЗИСТОРАХ

Аннотация. С помощью программного комплекса Silvaco проведен расчет накопления встроенного в окисел заряда у границы раздела кремний – скрытый окисел в *n*-канальных МОП/КНИ-транзисторах в зависимости от их геометрических параметров и электрических режимов при воздействии ионизирующего излучения. Показано, что наиболее «жестким» является режим, при котором во время облучения на сток и исток подается напряжение +5 В, а на подложку, затвор и запитку канала – 0 В. При этом величину накопленного заряда удается существенно снизить, прикладывая к подложке отрицательное смещение и уменьшая толщину слоя захороненного окисла. Полученные результаты компьютерного моделирования могут быть использованы испытателями электронных компонентов для предварительной оценки стойкости МОП/КНИ-приборов к накопленной дозе ионизирующего излучения.

Ключевые слова: ионизирующее излучение, МОП/КНИ-транзистор, радиационная стойкость, моделирование, встроенный заряд

Для цитирования. Огородников, Д. А. Моделирование накопления заряда в облученных МОП/КНИ-транзисторах / Д. А. Огородников, С. Б. Ластовский, Ю. В. Богатырев // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-мат. наук. – 2019. – Т. 55, № 4. – С. 498–504. <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2019-55-4-498-504>

D. A. Ogorodnikov, S. B. Lastovskii, Yu. V. Bogatyrev

Scientific-Practical Materials Research Centre of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

SIMULATING OF CHARGE BUILD-UP IN IRRADIATED MOS/SOI TRANSISTORS

Abstract. The charge build-up in the interface of silicon / buried oxide in *n*-channel MOS/SOI transistors depending on their geometric parameters and electrical modes during ionizing irradiation is calculated with the use of the software Silvaco. It is shown that the electrical mode is most “harsh”, when during irradiation the voltage of +5 V is applied to drain and source electrodes and 0 V is applied to substrate, gate and channel feeding. The amount of the built-up charge can be substantially reduced by applying a negative bias to the substrate and by decreasing the thickness of the buried oxide layer.

Keywords: ionizing radiation, MOS/SOI transistor, radiation hardness, simulating, interface charge

For citation. Ogorodnikov D. A., Lastovskii S. B., Bogatyrev Yu. V. Simulating of charge build-up in irradiated MOS/SOI transistors. *Vestsi Natsyianal'nai akademii navuk Belarusi. Seryia fizika-matematychnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Mathematics series*, 2019, vol. 55, no. 4, pp. 498–504 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2019-55-4-498-504>

Введение. Технология «кремний на изоляторе» (КНИ) перспективна для производства МОП (металл-окисел-полупроводник) интегральных схем с повышенной радиационной стойкостью к воздействию импульсной радиации [1, 2]. Однако в случае стационарного облучения значительную проблему создает наличие у КНИ-структур границы раздела полупроводник – скрытый окисел. При этом образуется паразитный транзистор, у которого подзатворным диэлектриком служит скрытый окисел, а затвором – изолированная подложка. Накопление радиационно-индуцированного заряда в изолирующем окисле ведет к образованию проводящего канала паразитного транзистора на обратной стороне кремниевой пленки. Эффективность накопления заряда в окисле существенно зависит от электрического режима при облучении и параметров транзисторных структур. По величине этого заряда можно судить о стойкости *n*-канальных МОП/КНИ-транзисторов к эффектам накопленной дозы. Ранее в [3–5] экспериментально исследовалось влияние различных электрических режимов на радиационное изменение параметров

МОП/КНИ-транзисторов. Показано, что наилучший электрический режим может по-разному проявляться при облучении приборов с различными конструктивными характеристиками. При этом следует отметить, что в экспериментах не учитывались эффекты отжига радиационно-индуцированного заряда в окисле. Например, в работе [5] измерения параметров МОП/КНИ-транзисторов проводились через несколько часов после облучения, что отразилось на монотонности полученных дозовых зависимостей.

Целью настоящей работы является моделирование распределения встроенного в окисел заряда у границы раздела кремний – скрытый окисел в *n*-канальных МОП/КНИ-транзисторах в зависимости от их геометрических параметров и электрических режимов при воздействии ионизирующего излучения.

Методика исследований. Объектами моделирования являлись тестовые МОП/КНИ-транзисторы с каналом *n*-типа. С помощью программного комплекса Silvaco [6] была создана двумерная модель полностью обедненного МОП/КНИ-транзистора. В первоначальной модели толщина эпитаксиальной пленки кремния составляла $d_{\text{Si}} = 0,2$ мкм, скрытого окисла $d_{\text{SiO}_2} = 0,4$ мкм, а длина канала $L = 0,6$ мкм при наличии запитки канала. В ходе дальнейших расчетов толщина пленки кремния варьировалась в пределах $d_{\text{Si}} = 0,1\text{--}0,3$ мкм, скрытого окисла $d_{\text{SiO}_2} = 0,15\text{--}0,5$ мкм и длина канала – $L = 0,1\text{--}1,23$ мкм. В программном модуле VictoryDevice было проведено моделирование воздействия на тестовые структуры рентгеновских квантов с энергией 10 кэВ при мощности поглощенной дозы 1 рад/с. После этого из полученных в ходе расчетов структур, подвергшихся воздействию излучения, было извлечено распределение заряда Q вблизи границы раздела кремний – скрытый окисел. Накопленная доза для всех образцов составляла 10^5 рад. Облучение проводилось в четырех электрических режимах:

- 0V – напряжение на подложке, стоке, затворе, истоке $U_{\text{sub}}, U_s, U_g, U_d = 0$;
- ON – $U_g = 5$ В, $U_{\text{sub}}, U_s, U_d = 0$;
- TG – $U_s, U_d = 5$ В, $U_{\text{sub}}, U_g = 0$;
- TG_Sub – $U_s, U_d = 5$ В, $U_{\text{sub}} = 0\text{--}5$ В, $U_g = 0$.

Во всех исследованных режимах смещение на запитку канала не подавалось.

Результаты моделирования. В современных МОП/КНИ-транзисторах подзатворные окислы довольно тонкие (<10 нм), так что при облучении они не испытывают существенной деградации в связи с нейтрализацией положительного накопленного заряда электронами, туннелирующими из внешних слоев [2]. При моделировании будем рассматривать накопление заряда только в слое скрытого окисла у границы раздела со слоем активного кремния, так как там захват дырок на ловушках приводит к снижению порогового напряжения паразитного транзистора и радиационной стойкости.

На рис. 1 приведены результаты моделирования распределения вертикальной составляющей напряженности электрического поля E_y (а) и заряда Q (б) на глубине 5 нм в захороненном окисле вдоль границы раздела пленка кремния – слой скрытого окисла в моделях МОП/КНИ-транзисторов. Эти транзисторы были облучены рентгеновскими квантами до дозы 10^5 рад в различных электрических режимах. Рассматривались структуры с $d_{\text{Si}} = 0,2$ мкм, $d_{\text{SiO}_2} = 0,4$ мкм и $L = 0,6$ мкм.

Данные, представленные на рис. 1, а, показывают, что в разных электрических режимах распределение вертикальной составляющей напряженности поля значительно отличается. Распределение этой составляющей напряженности поля в режиме 0V без подачи смещения практически совпадает с распределением в «конденсаторном» режиме ON. Напряженность электрических полей в захороненном окисле в этих случаях является низкой, так как они создаются встроенными потенциалами между стоком или истоком *n*-типа и подложкой *p*-типа. В режиме облучения TG (Transmission Gate) величины вертикальной составляющей напряженности поля в центральной части структуры минимальны. При таких условиях индуцированные излучением дырки перемещаются в область с минимальным потенциалом – в приповерхностную область слоя скрытого окисла, а электрическое поле значительно способствует этому процессу. Дырки в указанной области вызывают сдвиг порогового напряжения паразитного транзистора, что уменьшает стойкость прибора. В режимах 0V и ON напряженности полей значительно выше.

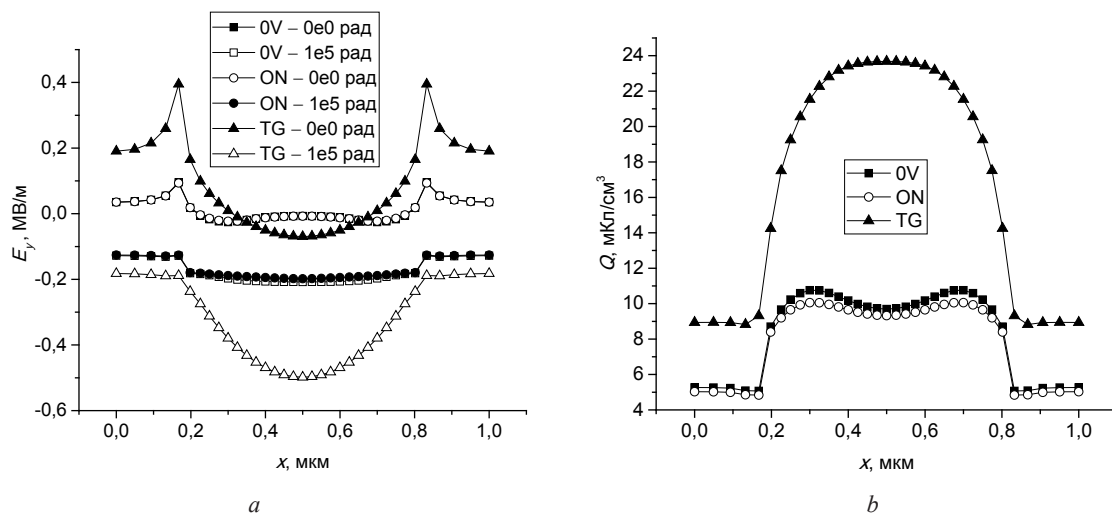


Рис. 1. Распределение вертикальной составляющей напряженности электрического поля до и после облучения в разных режимах (а) и заряда после облучения в разных режимах (b)

Fig. 1. Distribution of the vertical component of the electric field intensity before and after irradiation in different modes (a) and charge distribution after irradiation in different modes (b)

Таким образом, после облучения зависимости не претерпели качественных значительных изменений, несмотря на то, что из-за увеличения количества захваченных зарядов величина напряженности поля значительно снизилась.

На рисунке 1, b показаны распределения заряда в разных режимах после облучения до дозы 10^5 рад. Если сравнить эти графики с изображенными на рис. 1, a, то можно увидеть, что имеется обратная зависимость между захваченным зарядом и вертикальной составляющей напряженности поля.

Во всех режимах облучения максимальное значение Q достигается в центральной ($x = 0,2$ – $0,8$ мкм) области структуры, а под карманами стока (0 – $0,2$ мкм) и истока ($0,8$ – $1,0$ мкм) оно заметно уменьшается. Также примечателен симметричный вид полученных зависимостей $Q(x)$ относительно прямой, параллельной оси ординат и проходящей через точку $x = 0,5$ мкм, что обусловлено симметрией как самой транзисторной структуры, так и эквипотенциальных линий электрических полей при исследуемых режимах испытаний.

Полученные результаты согласуются с экспериментальными данными, так как наиболее «жестким» для n -канальных МОП/КНИ-транзисторов является режим TG, при котором во время облучения на сток и исток подается напряжение +5 В, а на подложку, затвор и запитку канала – 0 В [4]. При этом электрическое поле в захороненном окисле способствует накоплению избыточного положительного заряда у границы раздела с пленкой кремния и, следовательно, снижению порогового напряжения паразитного транзистора. Уменьшение влияния электрического поля в этом случае достигается подачей на подложку определенного отрицательного смещения U_{sub} [7], что соответствует режиму облучения TG_Sub.

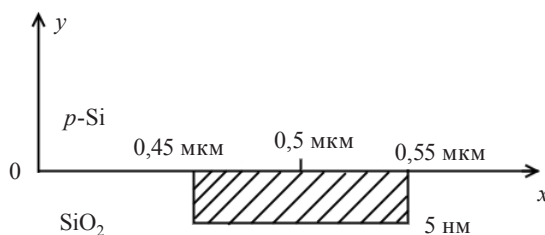


Рис. 2. Схематичное изображение области скрытого окисла, в которой отслеживалось изменение заряда

Fig. 2. Schematic representation of a buried oxide area where the charge alteration was tracked

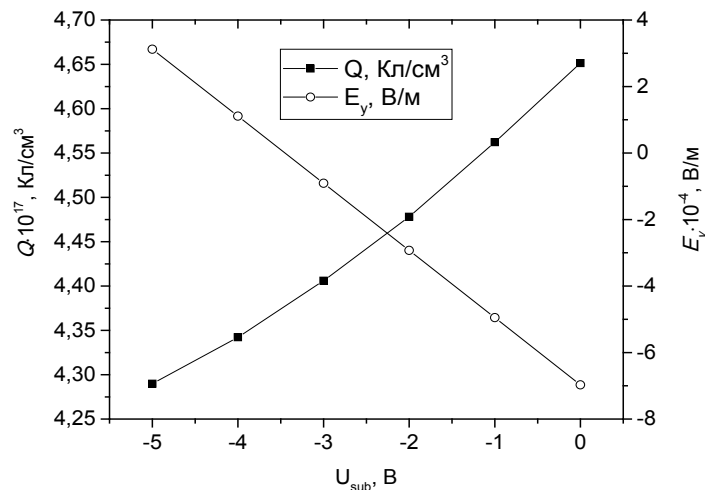


Рис. 3. Зависимости изменения заряда и напряженности поля при разных значениях смещения на подложке в процессе облучения

Fig. 3. Dependences of charge and field intensity alterations at different bias values on the substrate during irradiation

Симметричный вид кривых $Q(x)$ и $E_y(x)$ на рис. 1 позволяет упростить задачу моделирования и рассматривать не распределение заряда вдоль границы раздела пленка кремния – слой скрытого окисла, а только его изменение в приповерхностной центральной области скрытого слоя окисла кремния. На рис. 2 штриховкой обозначена область в центральной приповерхностной части скрытого окисла, в которой накопленный заряд интегрировался по площади.

Зависимости $Q(U_{sub})$ и $E_y(U_{sub})$ в режиме облучения TG_Sub при разных смещениях на подложке приведены на рис. 3 для тех же транзисторных структур, что и на рис. 1. В этом случае величина напряженности электрического поля определялась в конкретной точке структуры с координатами $x = 0,5$ мкм, $y = 0,205$ мкм. Заряд суммировался в области, показанной на рис. 2.

Из рис. 3 видно, что с возрастанием величины отрицательного смещения на подложке значение Q уменьшается, а E_y увеличивается, т. е. эффективность захвата заряда зависит от распределения и величины напряженности электрического поля в транзисторной структуре. Следовательно, величина накопленного заряда должна зависеть и от геометрических размеров транзистора.

Известно [8], что изменение определенных геометрических параметров транзистора приводит к изменению его радиационной стойкости, поэтому далее рассмотрим влияние изменения L , d_{Si} и d_{SiO_2} на накопление заряда в центральной части приповерхностной области структуры в электрических режимах облучения TG и TG_Sub. На рис. 4 показаны зависимости значения Q при разных значениях смещения на подложке в процессе облучения от длины канала L (рис. 4, a), толщин пленки кремния d_{Si} (рис. 4, b) и скрытого окисла d_{SiO_2} (рис. 4, c). В каждом случае изменялся лишь один параметр из трех. Зависимости $Q(L)$ имеют немонотонный вид; на этих кривых (см. рис. 4, a) наблюдается максимум при $L \sim 0,5$ мкм, где величина захваченного заряда наиболее высока. С уменьшением длины канала от 0,4 до 0,1 мкм снижается не только значение Q , но и положительный эффект отрицательного смещения на подложке транзисторных структур в процессе облучения. Также на стойкости положительно сказывается увеличение длины канала до величин свыше 1 мкм.

При увеличении толщины пленки активного кремния значение накопленного заряда уменьшается (см. рис. 4, b). При изменении этого параметра эффективность режима с подачей отрицательного смещения на подложку не снижается. Однако изменение Q выражено слабее, чем в предыдущем случае, и составило около 20 % при уменьшении толщины слоя активного кремния с 0,3 до 0,1 мкм.

Гораздо более значительные изменения в накопленном заряде обнаруживаются при уменьшении толщины скрытого окисла (см. рис. 4, c), что согласуется с результатами, полученными в работе [8]. При снижении толщины слоя скрытого окисла с 0,55 до 0,15 мкм Q уменьшается

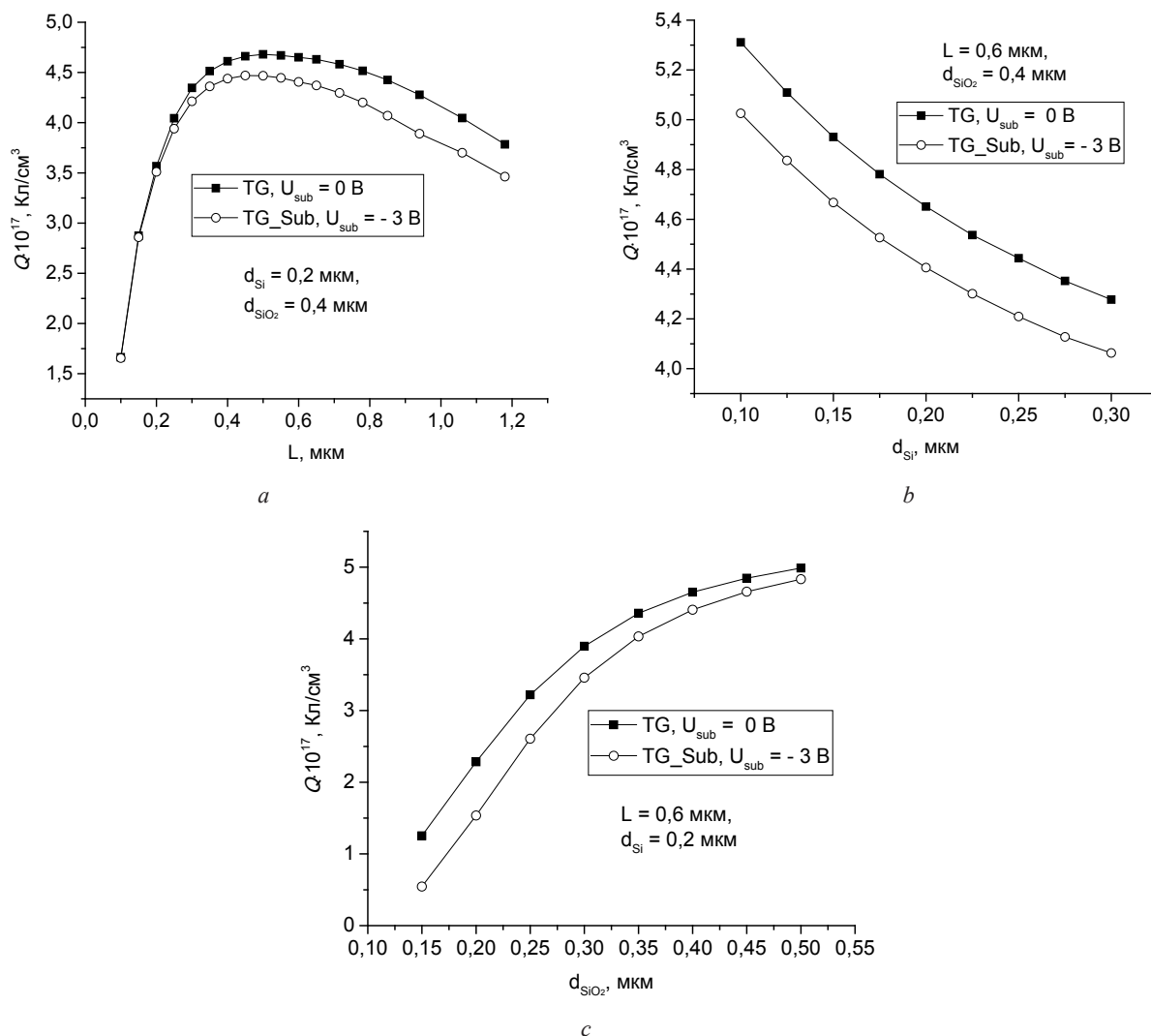


Рис. 4. Зависимость значения поверхностного заряда в точке $x = 0,5$ мкм при разных значениях смещения на подложке в процессе облучения от длины канала L (a), толщины пленки кремния d_{Si} (b) и скрытого окисла d_{SiO_2} (c)

Fig. 4. Dependence of the surface charge values at the point $x = 0.5 \mu\text{m}$ at different bias values on the substrate during irradiation from the channel length L (a), thickness of the silicon film d_{Si} (b) and buried oxide d_{SiO_2} (c)

в ~ 4 раза для $U_{\text{sub}} = 0$ В и в ~ 9 раз для $U_{\text{sub}} = -3$ В, что значительно превышает изменения в случае варьирования длины канала и толщины пленки активного кремния.

Обсуждение результатов моделирования. Общая картина радиационного дефектообразования в МОП-приборах описана в различных литературных источниках [1, 2, 9, 10]. При поглощении ионизирующего излучения материалом вещества происходит генерация электронно-дырочных пар. Часть этих образовавшихся электронов и дырок рекомбинирует друг с другом, но количество оставшихся пар зависит от природы источника ионизирующего излучения, а также напряженности электрических полей. Подвижность электронов в SiO_2 ($\sim 20 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$) намного выше подвижности дырок ($\sim 10^{-5} \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$) [9], поэтому первые быстро покидают окисел, а вторые перемещаются в области окисла с минимальным потенциалом, следуя линиям электрического поля [11]. Дырки под действием поля могут достигать границы раздела пленка кремния – скрытый окисел, где они захватываются ловушками и выступают как дополнительное положительное напряжение, приложенное к затвору паразитного транзистора. Вследствие этого пороговое напряжение паразитного транзистора испытывает существенный сдвиг в сторону отрицательных значений, что в свою очередь приводит к увеличению токов утечки рабочего n -канального транзистора и негативно сказывается на радиационной стойкости.

В силу перечисленных факторов на стойкость МОП/КНИ-транзистора к ионизирующему излучению очень сильное влияние оказывают как электрические режимы во время облучения, так и геометрические размеры структуры транзистора.

Следует отметить, что в настоящей работе при моделировании радиационных эффектов в МОП/КНИ-транзисторах не учитывался заряд быстрых поверхностных состояний на границе раздела кремний – скрытый окисел. Это обусловлено тем, что в приборах современных МОП (в том числе и КНИ) технологий при дозах до 1 Мрад (SiO_2) накопление поверхностных состояний незначительно [12]. В работе [13] также было обнаружено, что генерация дополнительных состояний на границах раздела Si-SiO_2 в КНИ-структурах отсутствует при облучении их электронами (энергия 2,5 МэВ) и гамма-квантами (энергия 662 кэВ).

Заключение. С помощью программного комплекса Silvaco проведены расчеты накопления встроенного в окисел заряда у границы раздела кремний – скрытый окисел в тестовых n -канальных МОП/КНИ-транзисторах при разных геометрических параметрах и электрических режимах в ходе облучения. Показано, что наиболее «жестким» является режим TG, при котором во время облучения на сток и исток подается напряжение +5 В, а на подложку, затвор и запитку канала – 0 В. При этом величину накопленного заряда удастся существенно снизить, прикладывая к подложке отрицательное смещение и уменьшая толщину слоя захороненного окисла транзисторных структур. Также определенное влияние на стойкость оказывает изменение толщины пленки активного кремния и длины канала, причем зависимости изменения величины накопленного заряда Q от варьирования длины канала имеют немонотонный вид и не оказывают столь значительного влияния на радиационную стойкость, как уменьшение толщины слоя скрытого окисла.

Полученные результаты компьютерного моделирования могут быть использованы испытателями электронных компонентов для предварительной оценки стойкости МОП/КНИ-приборов к накопленной дозе ионизирующего излучения, а также будут полезны для разработчиков радиационно-стойких интегральных МОП-схем на основе КНИ-структур.

Список использованных источников

1. Коршунов, Ф. П. Воздействие радиации на интегральные микросхемы / Ф. П. Коршунов, Ю. В. Богатырев, В. А. Вавилов. – Минск: Наука и техника, 1986. – 254 с.
2. Таперо, К. И. Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах космического применения / К. И. Таперо, В. Н. Улимов, А. М. Членов. – М.: БИНОМ, Лаб. знаний, 2012. – 304 с.
3. Worst-Case Bias During Total Dose Irradiation of SOI Transistors / V. Ferlet-Cavrois [et al.] // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 2000. – Vol. 47, № 6. – P. 2183–2188. <https://doi.org/10.1109/23.903751>
4. Flament, O. Bias Dependence of FD Transistor Response to TotalDose Irradiation / O. Flament, A. Torres, V. Ferlet-Cavrois // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 2003. – Vol. 50, № 6. – P. 2316–2321. <https://doi.org/10.1109/tns.2003.822594>
5. Сравнение различных вариантов топологии КНИ/МОП-транзисторов для проектирования радиационно-стойких ИС / М. С. Горбунов [и др.] // Вопр. атомной науки и техники. Сер. Физика радиац. воздействия на радиоэлектрон. аппаратуру. – 2010. – Вып. 1. – С. 39–43.
6. SILVACO International. ATLAS User's Manual. Device Simulation Software [Electronic Resource]. – Mode of access: <http://www.silvaco.com>. – Date of access: 13.03.2018.
7. Влияние гамма-излучения на МОП/КНИ-транзисторы / Ю. В. Богатырев [и др.] // Докл. БГУИР. – 2016. – № 3 (97). – С. 75–80.
8. Impact of technology scaling in SOI back-channel total dose tolerance. A 2-D numerical study using self-consistent oxide code / J.-L. Leray [et al.] // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 2000. – Vol. 47, № 3. – P. 620–627. <https://doi.org/10.1109/23.856489>
9. Ma, T. P. Ionizing radiation effects in MOS devices and circuits / T. P. Ma, P. V. Dressendorfer. – New York: John Wiley and Sons, 1989. – P. 179.
10. Lacoé, R. CMOS scaling, design principles and hardening-by-design methodologies / R. Lacoé // IEEE NSREC. Short Course. – 2003. – P. II-1–II-142.
11. Correlation Between Co-60 and X-Ray Radiation-Induced Charge Buildup in Silicon-on-Insulator Buried Oxides / J. R. Schwank [et al.] // Trans. Nucl. Sci. – 2000. – Vol. 47, № 6. – P. 2175–2182. <https://doi.org/10.1109/23.903750>
12. Зебрев, Г. И. Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах высокой степени интеграции / Г. И. Зебрев. – М.: НИЯУ МИФИ, 2010. – 148 с.
13. Накопление заряда в диэлектрике и состояния на границах структур кремний-на-изоляторе при облучении электронами и гамма-квантами / Д. В. Николаев [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2003. – Т. 37, вып. 4. – С. 443–449.

References

1. Korshunov F. P., Bogatyrev Yu. V., Vavilov V. A. *The Influence of Radiation on Integrated Circuits*. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1986. 254 p. (in Russian).
2. Tapero K. I., Ulimov V. N., Chlenov A. M. *Radiation Effects in Silicon Integrated Circuits for Space Applications*. Moscow, BINOM, Laboratoriya znaniy Publ., 2012. 304 p. (in Russian).
3. Ferlet-Cavrois V., Colladant T., Paillet P., Leray J. L., Musseau O., Schwank J. R., Shaneyfelt M. R., Pelloie J. L., du Port de Poncharra J. Worst-Case Bias During Total Dose Irradiation of SOI Transistors. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2000, vol. 47, no. 6, pp. 2183–2188. <https://doi.org/10.1109/23.903751>
4. Flament O., Torres A., Ferlet-Cavrois V. Bias Dependence of FD Transistor Response to TotalDose Irradiation. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2003, vol. 50, no. 6, pp. 2316–2321. <https://doi.org/10.1109/tns.2003.822594>
5. Gorbunov M. S., Zebrev G. I., Osipenko P. N., Vasilegin B. V., Il'yaguev V. N. Comparison of different variants of the topology design of MOS transistors for the design of radiation-hardened ICs. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Seriya Fizika radiatsionnogo vozdeistviya na radioelektronnyuyu apparaturu* [Problems of atomic science and technology, «Physics of radiation effects on electronic equipment»], 2010, no. 1, pp. 39–43 (in Russian).
6. *SILVACO International. ATLAS User's Manual. Device Simulation Software*. Available at: <http://www.silvaco.com>. (accessed 13 March 2018).
7. Bogatyrev Yu. V., Lastovskii S. B., Soroka S. A., Shvedov S. V., Ogorodnikov D. A. The effect of X-ray radiation on MOS / SOI transistors. *Doklady BGUIR*, 2016, no. 3 (97), pp. 75–80 (in Russian).
8. Leray J.-L., Paillet P., Ferlet-Cavrois V., Tavernier C., Belhaddad K., Penzin O. Impact of technology scaling in SOI back-channel total dose tolerance. A 2-D numerical study using self-consistent oxide code. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2000, vol. 47, no. 3, pp. 620–627. <https://doi.org/10.1109/23.856489>
9. Ma T. P., Dressendorfer P. V. *Ionizing Radiation Effects in MOS Devices and Circuits*. New York, John Wiley and Sons, 1989, pp. 179.
10. Lacoé R. CMOS scaling, design principles and hardening-by-design methodologies. *IEEE NSREC. Short Course*, 2003, pp. II-1–II-142.
11. Schwank J. R., Shaneyfelt M. R., Dodd P. E., Ferlet-Cavrois V., Loemker R. A., Winokur P. S., Fleetwood D. M., Paillet P., Leray J.-L., Draper B. L., Witczak S. C., Riewe L. C. Correlation Between Co-60 and X-Ray Radiation-Induced Charge Buildup in Silicon-on-Insulator Buried Oxides. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2000, vol. 47, no. 6, pp. 2175–2182. <https://doi.org/10.1109/23.903750>
12. Zebrev G. I. *Radiation Effects in High Integration Silicon Integrated Circuits*. Moscow, National Research Nuclear University MEPhI, 2010. 148 p. (in Russian).
13. Nikolaev D. V., Antonova I. V., Naumova O. V., Popov V. P., Smagulova S. A. Charge accumulation in oxide and interface states of silicon-on-insulator structures after irradiation by electrons and γ -rays. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov = Semiconductors*, 2003, vol. 37, no. 4, pp. 426–432. <https://doi.org/10.1134/1.1568462>

Информация об авторах

Огородников Дмитрий Александрович – младший научный сотрудник, ГНПО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению» (ул. П. Бровки, 19, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: ogorodnikov@ifftp.bas-net.by

Ластовский Станислав Брониславович – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией радиационных воздействий, ГНПО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению» (ул. П. Бровки, 19, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: lastov@physics.by

Богатырев Юрий Владимирович – доктор технических наук, главный научный сотрудник, ГНПО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению» (ул. П. Бровки, 19, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: bogat@ifftp.bas-net.by

Information about the authors

Dmitriy A. Ogorodnikov – Junior Researcher, SSPA “Scientific-Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus” (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ogorodnikov@ifftp.bas-net.by

Stanislav B. Lastovskii – Ph. D. (Physics and Mathematics), Head of the Laboratory of Radiation Effects, SSPA “Scientific-Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus” (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lastov@physics.by

Yuriy V. Bogatyrev – Dr. Sc. (Engineering), Chief Researcher, SSPA “Scientific-Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus” (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: bogat@ifftp.bas-net.by