



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-7-55-62>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.382

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ТЯЖЕЛОЙ ЗАРЯЖЕННОЙ ЧАСТИЦЫ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИБОРНОЙ СТРУКТУРЫ *n*-МОП-ТРАНЗИСТОРА

ЛОВШЕНКО И.Ю., СТЕМПИЦКИЙ В.Р., ШАНДАРОВИЧ В.Т.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 4 сентября 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. Применение изделий микроэлектроники в условиях космического пространства возможно при обеспечении защиты от специальных внешних воздействующих факторов, в том числе радиационного воздействия. Для цифровых интегральных микросхем, изготовленных по субмикронным КМОП-технологическим процессам, наибольшее влияние оказывают радиационные эффекты, вызванные воздействием тяжелой заряженной частицы. Применение специальных средств проектирования при разработке микросхем двойного назначения, с повышенной устойчивостью к воздействию тяжелых заряженных частиц, позволяет предотвратить возникновение одиночных событий. Таким образом, применение современных программных продуктов приборно-технологического моделирования в микроэлектронике при разработке элементной базы радиационностойких микросхем космического назначения обеспечит сокращение сроков разработки новых изделий, а также позволит модернизировать (повысить эксплуатационные характеристики) уже существующие приборные и схмотехнические решения. В работе представлены результаты моделирования воздействия тяжелой заряженной частицы с величиной линейной передачи энергии, равной 1,81, 10,1, 18,8, 55,0 МэВ·см²/мг, соответствующей ионам азота ¹⁵N⁺⁴ с энергией $E = 1,87$ МэВ, аргона ⁴⁰Ar⁺¹² с энергией $E = 372$ МэВ, железа ⁵⁶Fe⁺¹⁵ с энергией $E = 523$ МэВ, ксенона ¹³¹Xe⁺³⁵ с энергией $E = 1217$ МэВ, на электрические характеристики приборной структуры *n*-МОП-транзистора. Показаны зависимости максимального тока стока I_C от траектории движения тяжелой заряженной частицы и температуры окружающей среды.

Ключевые слова: МОП-транзистор, ионизирующее излучение, одиночный сбой, линейная передача энергии.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Исследования выполняются при финансовой поддержке и в рамках решения задач государственной программы научных исследований «Фотоника, опто- и микроэлектроника» (задание 3.1.03).

Для цитирования. Ловшенко И.Ю., Стемпицкий В.Р., Шандарович В.Т. Моделирование воздействия тяжелой заряженной частицы на электрические характеристики приборной структуры *n*-МОП-транзистора. Доклады БГУИР. 2020; 18(7): 55-62.

MODELING THE IMPACTS OF HEAVY CHARGED PARTICLES ON ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF *n*-MOSFET DEVICE STRUCTURE

IVAN YU. LOVSHENKO, VIKTOR R. STEMPIITSKY, VERANIKA T. SHANDAROVICH

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 4 September 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. The use of microelectronic products in outer space is possible if protection is provided against special external influencing factors, including radiation effect. For digital integrated circuits manufactured using submicron CMOS processes, the greatest influence is exerted by radiation effects caused by exposure to a heavy charged particle. The use of special design tools in the development of dual-purpose microcircuits, with increased resistance to the impact of heavy charged particles, prevents single events from occurring. Thus, the use of modern software products for device and technological modeling in microelectronics when developing the element base of radiation-resistant microcircuits for space purposes will cut the time to develop new products and make it possible to modernize (improve performance) already existing device and circuitry solutions. The paper delivers the results of modeling the impacts of heavy charged particles with a magnitude of linear energy transfer equal to 1.81, 10.1, 18.8, 55.0 MeV·cm²/mg, corresponding to nitrogen ions ¹⁵N⁺⁴ with an energy $E = 1.87$ MeV; argon ⁴⁰Ar⁺¹² with an energy $E = 372$ MeV; ferrum ⁵⁶Fe⁺¹⁵ with an energy $E = 523$ MeV; xenon ¹³¹Xe⁺³⁵ with an energy $E = 1217$ MeV, on electrical characteristics of *n*-MOSFET device structure. The dependences of the maximum drain current I_C on the motion trajectory of a heavy charged particle and the ambient temperature are shown.

Keywords: MOSFET, ionization radiation, single error, linear energy transfer.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

Gratitude. The research is carried out with financial support and as part of state research program “Photonics, opto- and microelectronics” (Assignment 3.1.03).

For citation. Lovshenko I.Yu., Stempitsky V.R., Shandarovich V.T. Modeling the impacts of heavy charged particles on electrical characteristics of *n*-MOSFET device structure. Doklady BGUIR. 2020; 18(7): 55-62.

Введение

К основным факторам космического пространства (КП), способным наносить повреждения электронным устройствам космических аппаратов, относят [1]: ионизирующее излучение (ИИ); космическую плазму; тепловое излучение Солнца, планет и КП и т. д. В состав ИИ входят поток первичных (электроны, протоны, тяжелые заряженные частицы (ТЗЧ)) и вторичных (продукты ядерных превращений, связанные с первичными частицами) ядерных частиц. Ионизационные и ядерные потери энергии первичных и вторичных частиц в активных и пассивных областях полупроводниковых приборов (ПП) и интегральных микросхем (ИМС) в результате взаимодействия ИИ с радиоэлектронной аппаратурой космических аппаратов могут привести их к параметрическому отказу в результате накопления дозы ИИ, а также возникновению одиночных эффектов (ОЭ, англ. single event effects, SEE), например, одиночного сбоя (ОС, англ. Single Event Upset, SEU). ОС происходит, когда ТЗЧ попадают в ИМС, и характеризуется кратковременной сильной ионизацией вдоль трека частицы [2]. Рекомбинация индуцированных ионом дырок и электронов приводит к возникновению импульса тока и изменению состояния логического элемента. Величина ионизирующего заряда, достаточного для ОС, зависит от напряжений на электродах и линейной передачи энергии (ЛПЭ, англ. linear energy transfer, LET).

Разработчикам ИМС аэрокосмического и специального назначения необходимо исследовать механизмы воздействия радиации на элементно-компонентную базу (ЭКБ) и использовать конструктивно-технологические решения, которые одновременно снижают влияние воздействия радиации и могут быть реализованы в рамках полупроводниковой технологии [3, 4].

Структура МОП-транзистора

Типовая приборная структура n -МОП-транзистора представлена на рис. 1. В качестве подложки выступает кремний, легированный бором с концентрацией примеси $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Изоляция между элементами выполнена по STI-технологии. Области стока и истока сформированы с использованием ионной имплантации фосфора через маску. Максимальная концентрация примеси в областях стока и истока составляет $2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Глубина залегания сток-истоковых p - n -переходов равна 0,65 мкм. В качестве материала затвора используется поликремний. Контакты к областям стока, истока и подложки выполнены алюминием.

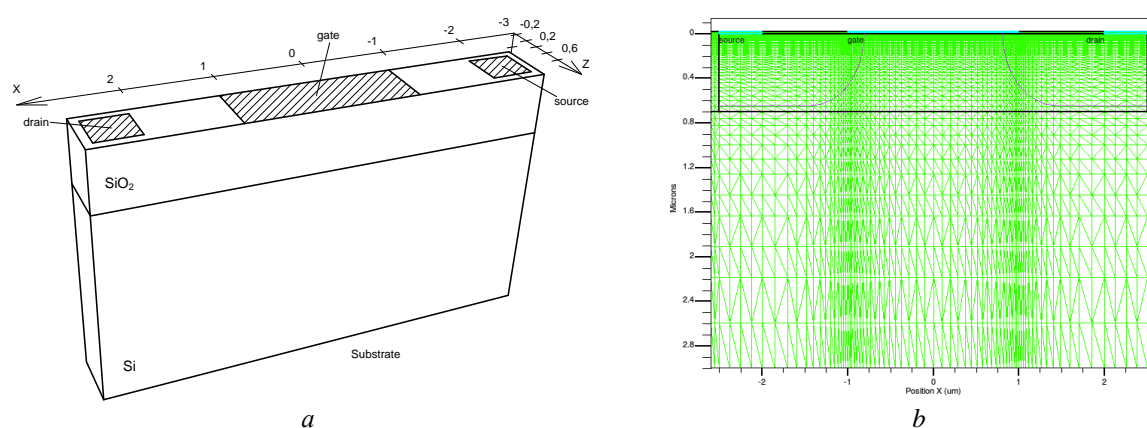


Рис. 1. Приборная структура n -канального МОП-транзистора (а) и ее сечение по координате $Z=0,25 \text{ мкм}$ (b)
Fig. 1. Device structure of n -channel MOS transistor (a) and its cross section along the coordinate $Z=0.25 \text{ }\mu\text{m}$ (b)

В табл. 1 представлены допустимые значения для основных конструктивных и технологических параметров исследуемой приборной структуры.

Таблица 1. Базовые параметры структуры n -МОП-транзистора
Table 1. Basic parameters of the structure of n -MOS transistor

Параметр Parameter	Допустимые значения Valid values		
	Мин. Min.	Ном. Nom.	Макс. Max.
Глубина оксида STI, мкм / STI oxide depth, μm	0,5	0,7	0,9
Ширина оксида STI, мкм / STI oxide width, μm	0,1	0,2	0,5
Толщина подзатворного оксида, нм / Gate oxide thickness, nm	11	13	15
Длина и ширина контактного окна к стоку и истоку, мкм / Length and width of contact window to drain and source, μm	0,3	0,5	0,7
Ширина окна при имплантации фосфора / Window width during phosphorus implantation	0,43	0,45	0,47
Длина затвора, мкм / Gate length, μm	1,0	2,0	3,0
Ширина затвора, мкм / Gate width, μm	0,5	1,5	2,5

Результаты и их обсуждение

Проведено моделирование воздействия ТЗЧ с ЛПЭ, равной 1,81, 10,1, 18,8, 55,0 МэВ·см²/мг, соответствующей ионам азота ¹⁵N⁺⁴ с энергией $E = 1,87$ МэВ, аргона ⁴⁰Ar⁺¹² с энергией $E = 372$ МэВ, железа ⁵⁶Fe⁺¹⁵ с энергией $E = 523$ МэВ, ксенона ¹³¹Xe⁺³⁵ с энергией $E = 1217$ МэВ, на электрические характеристики приборной структуры n -МОП-транзистора с использованием систем автоматизированного проектирования в микроэлектронике. Моделирование проводилось при значениях температуры окружающей среды 223, 303 и 383 К.

Исследовалось влияние траектории движения ТЗЧ, а именно углов α и β к нормали к поверхности n -МОП-транзистора в двух перпендикулярных плоскостях (рис. 2). Точкой входа является центр контакта к стоковой области (координаты точки – $x = 2,25$, $y = 0$, $z = 0,25$). В момент воздействия напряжение на затворе $V_3 = 1,2$ В, на стоке $V_C = 0,05$ В. ТЗЧ вызывает генерацию дополнительных носителей заряда (НЗ), которые являются причиной увеличения тока стока I_C . В дальнейшем происходит снижение величины тока стока I_C до первоначальной величины.

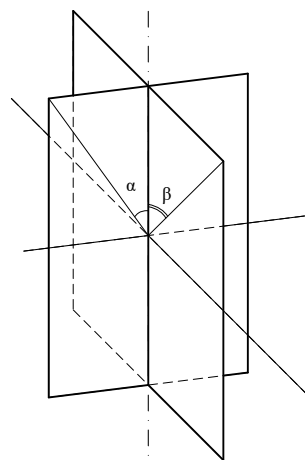


Рис. 2. Расположение углов α и β к нормали к поверхности n -МОП-транзистора
Fig. 2. Location of angles α and β to the normal to surface of the n -MOS transistor

На рис. 3 представлены зависимости тока стока I_C от времени моделирования при воздействии ТЗЧ с ЛПЭ, равной 1,81 МэВ·см²/мг, при температуре окружающей среды 303 К и вариации угла α . Угол β при расчетах равняется 0°.

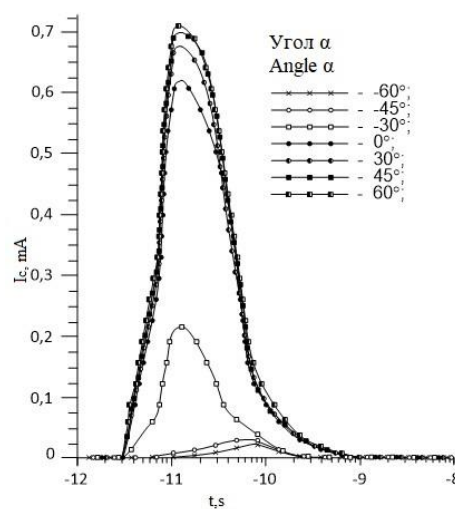


Рис. 3. Зависимости тока стока I_C от времени моделирования при воздействии ТЗЧ с ЛПЭ, равной 1,81 МэВ·см²/мг, при температуре 303 К и вариации угла α
Fig. 3. Dependences of the drain current I_D on simulation time under the action of heavy ions with LET equal to 1.81 MeV cm²/mg at temperature of 303 K and variation of the angle α

Результаты моделирования показали, что величина тока стока I_C , вызванного воздействием ТЗЧ, во много раз превышает номинальное значение. Так, при значении угла $\alpha = 0^\circ$ ток стока I_C увеличивается в 626,7 раз (с $9,9 \cdot 10^{-7}$ до $6,2 \cdot 10^{-4}$ А). Восстановление величины тока стока I_C до номинального значения происходит в момент времени $t = 5,8$ нс. С увеличением угла α происходит повышение отношения I_{Cmax} / I_{Cnom} (например, при $\alpha = 30^\circ$ отношение I_{Cmax} / I_{Cnom} равно 684,4; при $\alpha = 45^\circ$ $I_{Cmax} / I_{Cnom} = 715,9$; при $\alpha = 60^\circ$ $I_{Cmax} / I_{Cnom} = 707,3$). При этом время восстановления в меньшей степени зависит от угла α в диапазоне от 0 до 60° ($t = 5,4$ нс при $\alpha = 30^\circ$; $t = 6,7$ нс при $\alpha = 45^\circ$; $t = 5,2$ нс при $\alpha = 60^\circ$).

Угол β оказывает сильное влияние на величину пикового тока стока и время восстановления. Так, при углах $\alpha = 0^\circ$ и $\beta = 60^\circ$ ток стока I_C увеличивается в 22,2 раза (до значения $2,2 \cdot 10^{-5}$ А). Восстановление величины тока стока I_C до номинального значения происходит в момент времени $t = 7,72$ нс. При этом увеличение угла α практически не изменяет значения пикового тока стока, но приводит к повышению времени восстановления (при $\alpha = 30^\circ$ отношение I_{Cmax} / I_{Cnom} равно 19,97, $t = 7,66$ нс; при $\alpha = 45^\circ$ $I_{Cmax} / I_{Cnom} = 21,29$, $t = 7,44$ нс; при $\alpha = 60^\circ$ $I_{Cmax} / I_{Cnom} = 23,32$, $t = 6,27$ нс).

На рис. 4, а представлены зависимости тока стока I_C от времени моделирования при воздействии ТЗЧ с ЛПЭ, равной $1,81 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2/\text{мг}$, при разных температурах окружающей среды и угле $\alpha = 60^\circ$. На рис. 4, б представлено распределение скорости генерации носителей заряда вдоль трека прохождения частицы (303 К).

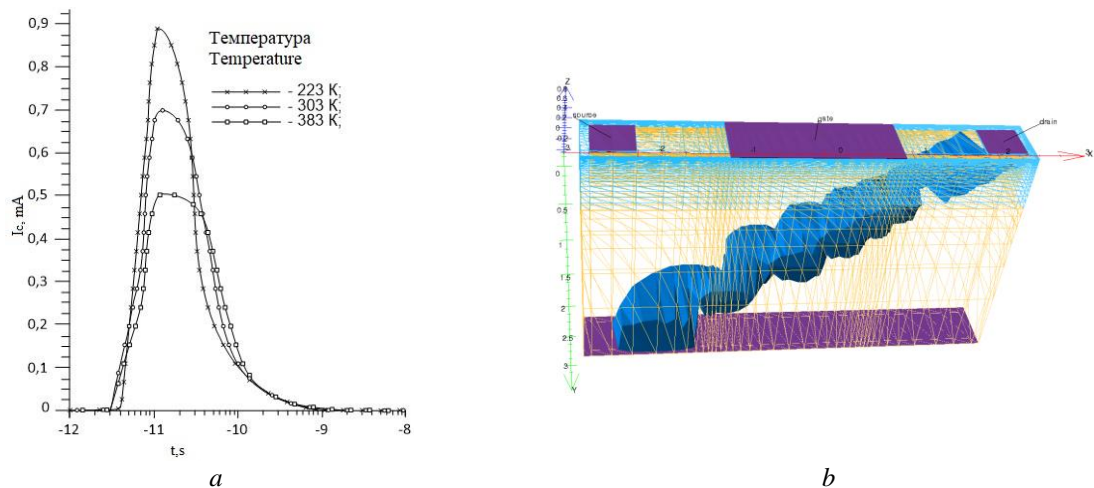


Рис. 4. Зависимости тока стока I_C от времени моделирования при воздействии ТЗЧ с ЛПЭ, равной $1,81 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2/\text{мг}$, при разных температурах и $\alpha = 60^\circ$ (а) и распределение скорости генерации носителей заряда вдоль трека прохождения частицы (б)

Fig. 4. Dependences of the drain current I_D on simulation time under the action of heavy ions with LET equal to $1.81 \text{ MeV cm}^2/\text{mg}$ at different temperatures and $\alpha = 60^\circ$ (a) and the distribution of generation rate of charge carriers along the particle path (b)

Показано, что величина тока стока I_C , вызванного воздействием ТЗЧ, при температурах выше 303 К изменяется примерно в одинаковое количество раз относительно номинального значения. Так, при температуре 303 К номинальный ток стока I_{Cnom} равен $9,9 \cdot 10^{-7}$ А, максимальный ток стока I_{Cmax} равен $7 \cdot 10^{-4}$ А ($I_{Cmax} / I_{Cnom} = 707,3$), при температуре 383 К – $7,2 \cdot 10^{-7}$ А и $5 \cdot 10^{-4}$ А соответственно ($I_{Cmax} / I_{Cnom} = 706,2$). При температурах ниже 303 К наблюдается существенное снижение отношения I_{Cmax} / I_{Cnom} (592,4 при температуре 223 К). Как и в случае с влиянием угла α , время восстановления значения тока стока до номинальной величины показывает относительно слабую зависимость от температуры ($t = 5,6$ нс при $T = 223$ К; $t = 5,1$ нс при $T = 303$ К; $t = 6,1$ нс при $T = 383$ К).

На рис. 5, а представлена зависимость отношения I_{Cmax} / I_{Cnom} от угла α (угол $\beta = 60^\circ$) при разных температурах. Показано, что качественно полученные посредством компьютерного моделирования зависимости совпадают и имеют наименьшее увеличение максимального тока стока I_C при $\alpha = 0^\circ$. При увеличении угла до значений $\alpha = 60^\circ$ или $\alpha = -60^\circ$ происходит повышение максимального тока стока и увеличение соотношения I_{Cmax} / I_{Cnom} на 1,2, 4,6 и 6,55 % для значений угла α , равного -30 , -45 и -60° соответственно, и на 2,5, 9,3 и 15,4 %

для значений угла α , равного 30, 45 и 60° соответственно. Данные значения справедливы практически для всего рассматриваемого температурного диапазона, кроме значения угла $\alpha = 60^\circ$. Так, соотношение $I_{C_{\max}} / I_{C_{\text{ном}}}$ при температуре 223 К увеличивается на 15,4 %, при температуре 303 К – на 19,9 % и при температуре 383 К – на 20,1 %.

На рис. 5, *b* представлена зависимость времени восстановления от угла α (угол $\beta = 60^\circ$) при разных температурах.

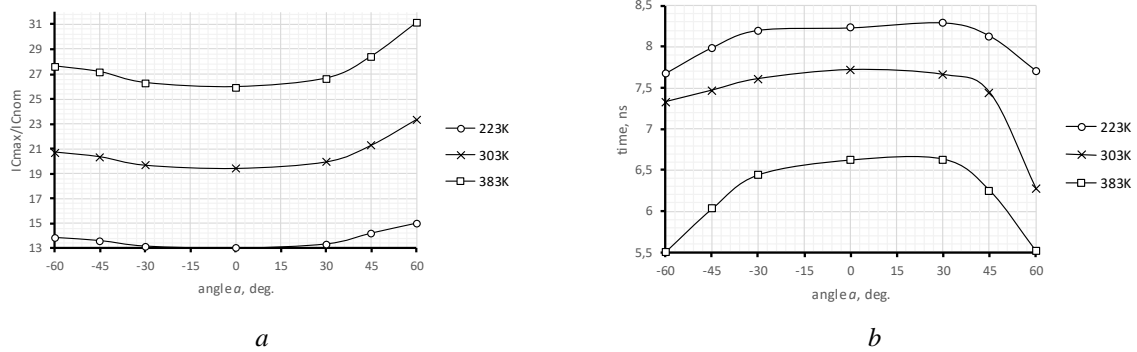


Рис. 5. Зависимость отношения $I_{C_{\max}} / I_{C_{\text{ном}}}$ (*a*) и времени восстановления (*b*) от угла α (угол $\beta = 60^\circ$) при разных температурах

Fig. 5. Dependence of the ratio $I_{D_{\max}} / I_{D_{\text{ном}}}$ (*a*) and recovery time (*b*) on the angle α (angle $\beta = 60^\circ$) at different temperatures

В отличие от соотношения $I_{C_{\max}} / I_{C_{\text{ном}}}$ зависимость времени восстановления от угла α демонстрирует более сложный характер. Показано, что с увеличением абсолютного значения угла α происходит снижение времени, необходимого для возврата приборной структуры МОП-транзистора в первоначальное состояние. При высокой и низкой температуре влияние этого абсолютного значения практически одинаково. Так, при температуре 383 К и угле α , равном -60 и 60° , время восстановления снижается на величину 1,11 и 1,1 нс соответственно, а при температуре 223 К – на величину 0,55 и 0,52 нс. Однако при температуре, близкой к 303 К, наибольшее влияние оказывает изменение угла в сторону канала транзистора (положительные значения угла α). Так, при угле α , равном -60 и 60° , время восстановления снижается на величину 0,39 и 1,45 нс соответственно (отличие в 3,7 раза).

На рис. 6, *a* представлены зависимости соотношения $I_{C_{\max}} / I_{C_{\text{ном}}}$, приведенного к значению при $\alpha = 0^\circ$, от угла α (температура $T = 303$ К, угол $\beta = 60^\circ$) для частиц, представленных ионами азота $^{15}\text{N}^{+4}$ с энергией $E = 1,87$ МэВ, аргона $^{40}\text{Ar}^{+12}$ с энергией $E = 372$ МэВ, железа $^{56}\text{Fe}^{+15}$ с энергией $E = 523$ МэВ и ксенона $^{131}\text{Xe}^{+35}$ с энергией $E = 1217$ МэВ. Указанным частицам соответствует величина линейной передачи энергии, равная 1,81, 10,1, 18,8 и 55,0 МэВ·см²/мг. Показано, что с повышением ЛПЭ частиц относительное увеличение соотношения $I_{C_{\max}} / I_{C_{\text{ном}}}$ при изменении угла α снижается. Так, для ионов азота $^{15}\text{N}^{+4}$, аргона $^{40}\text{Ar}^{+12}$ и железа $^{56}\text{Fe}^{+15}$ при угле $\alpha = 60^\circ$ соотношение увеличивается в среднем на 20 %, а для иона ксенона $^{131}\text{Xe}^{+35}$ – на 10,99 %. При этом сами значения соотношения $I_{C_{\max}} / I_{C_{\text{ном}}}$ пропорциональны значению ЛПЭ частицы: 23,3 (максимальный ток стока I_C равен $2,31 \cdot 10^{-5}$ А), 123,2 ($1,22 \cdot 10^{-4}$ А), 218,2 ($2,16 \cdot 10^{-4}$ А), 408,1 ($4,04 \cdot 10^{-4}$ А) в случае воздействия ионов азота, аргона, железа и ксенона соответственно. Также можно заметить, что при положительных значениях угла α его влияние на соотношение $I_{C_{\max}} / I_{C_{\text{ном}}}$ более чем в 3 раза (а для иона ксенона $^{131}\text{Xe}^{+35}$ в 20 раз) выше по сравнению с отрицательными значениями угла α .

На рис. 6, *b* представлены зависимости времени восстановления, приведенного к значению при $\alpha = 0^\circ$, от угла α (температура $T = 303$ К, угол $\beta = 60^\circ$) для частиц, представленных ионами азота $^{15}\text{N}^{+4}$ с энергией $E = 1,87$ МэВ, аргона $^{40}\text{Ar}^{+12}$ с энергией $E = 372$ МэВ, железа $^{56}\text{Fe}^{+15}$ с энергией $E = 523$ МэВ и ксенона $^{131}\text{Xe}^{+35}$ с энергией $E = 1217$ МэВ. Проводя анализ полученных результатов, трудно выявить закономерности в зависимости времени восстановления от ЛПЭ частиц.

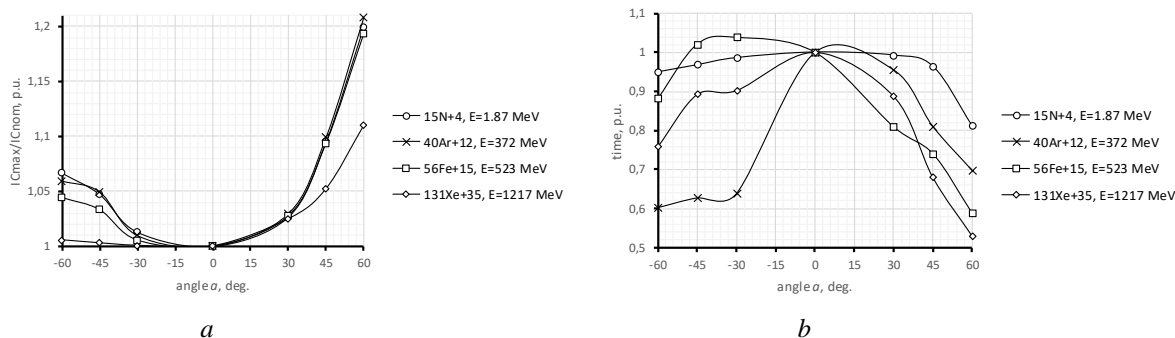


Рис. 6. Зависимость отношения I_{Cmax} / I_{Cnom} (a) и времени восстановления (b) от угла α (угол $\beta = 60^\circ$, температура $T = 303$ K) для разных частиц
Fig.6. Dependence of the ratio I_{Dmax} / I_{Dnom} (a) and recovery time (b) on the angle α (angle $\beta = 60^\circ$, temperature $T = 303$ K) for different particles

Заключение

Из анализа результатов моделирования воздействия ТЗЧ на приборную структуру n -МОП-транзистора можно сделать вывод, что величина тока стока I_C , вызванного воздействием ТЗЧ, во много раз превышает номинальное значение тока стока I_C (до 700 раз для иона азота $^{15}\text{N}^{+4}$ с энергией $E = 1,87$ МэВ) и имеет сильную зависимость от углов α и β , которые характеризуют траекторию движения частицы. При температурах выше 303 K отношение пикового тока стока к номинальному остается практически постоянным. При температурах ниже 303 K наблюдается существенное снижение отношения I_{Cmax} / I_{Cnom} (до 592,4 при температуре 223 K). Время восстановления в меньшей степени зависит от угла α в диапазоне от 0 до 60° ($t = 5,4$ нс при $\alpha = 30^\circ$; $t = 6,7$ нс при $\alpha = 45^\circ$; $t = 5,2$ нс при $\alpha = 60^\circ$) и температуры ($t = 5,6$ нс при $T = 223$ K; $t = 5,1$ нс при $T = 303$ K; $t = 6,1$ нс при $T = 383$ K), в большей степени зависит от угла β ($t = 5,8$ нс при $\beta = 0^\circ$; $t = 0,27$ нс при $\beta = 60^\circ$). Для остальных частиц (ионов аргона $^{40}\text{Ar}^{+12}$, железа $^{56}\text{Fe}^{+15}$ и ксенона $^{131}\text{Xe}^{+35}$) наблюдается качественное совпадение зависимостей, кроме случая со временем восстановления.

Список литературы

1. Таперо К.И. *Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах космического применения*. Москва: БИНОМ. Лаборатория знаний; 2012.
2. Чумаков А.И. *Действие космической радиации на интегральные схемы*. Москва: Радио и связь; 2004.
3. Белоус А.И. *Космическая электроника. В 2-х книгах*. Москва: Техносфера; 2015.
4. Анашин В.С. Проблемы обеспечения высоких сроков активного существования РЭА спутников связи. *Электросвязь*. 2009;(4):19-22.

References

1. Tapero K.I. [*Radiation effects in silicon integrated circuits for space applications*]. Moscow: BINOM. Laboratoriya znaniy; 2012. (In Russ.)
2. Chumakov A.I. [*Effect of space radiation on integrated circuits*]. Moscow: Radio i svyaz'; 2004. (In Russ.)
3. Belous A.I. [*Space electronics. In 2 volumes*]. Moscow: Tekhnosfera; 2015. (In Russ.)
4. Anashin V.S. [Problems of ensuring the long life of the radio electronic equipment for communication satellites]. *Elektrosvyaz'*. 2009;(4):19-22. (In Russ.)

Вклад авторов

Все авторы в равной степени внесли вклад в написание статьи.

Authors' contribution

All authors equally contributed to writing the article.

Сведения об авторах

Стемпичский В.Р., к.т.н., доцент, заместитель начальника научно-исследовательской части, научный руководитель лаборатории «Компьютерное проектирование микро- и нанoeлектронных систем» (НИЛ 4.4) НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Ловшенко И.Ю., заведующий научно-исследовательской лабораторией «Компьютерное проектирование микро- и нанoeлектронных систем» (НИЛ 4.4) НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Шандарович В.Т., аспирант кафедры микро- и нанoeлектроники, младший научный сотрудник научно-исследовательской лабораторией «Компьютерное проектирование микро- и нанoeлектронных систем» (НИЛ 4.4) НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-17-293-88-90;
+375-17-293-84-09;
e-mail: lovshenko@bsuir.by
Ловшенко Иван Юрьевич

Information about the authors

Stempitsky V.R., PhD., Associate Professor, Deputy Head of Research and Development Department Sc. Adviser of “CAD in Micro- and Nanoelectronics” (R&D Lab 4.4) of R&D Unit of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Lovshenko I.Yu., Head of the Research Laboratory “CAD in Micro- and Nanoelectronics” (R&D Lab 4.4) of R&D Unit of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Shandarovich V.T., PG student of Micro- and Nanoelectronics Department, Researcher of the Research Laboratory “CAD in Micro- and Nanoelectronics” (R&D Lab 4.4) of R&D Unit of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
тел. +375-17-293-88-90;
+375-17-293-84-09;
e-mail: lovshenko@bsuir.by
Lovshenko Ivan Yur'evich