

ВЛИЯНИЕ ПРОНИКАЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА С ИЗОЛИРОВАННЫМ ЗАТВОРОМ

И.Ю. Ловшенко, Ю.П. Снитовский, В.Р. Стемпицкий
*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
ул. П. Бровки 6, 220013 Минск, Беларусь, lovshenko@bsuir.by*

Представлены результаты моделирования эксплуатационных характеристик приборных структур биполярного транзистора с изолированным затвором (БТИЗ), сформированного в стандартном кремнии и по технологии «Кремний на изоляторе» (КНИ), с учетом воздействия потоков электронов с энергией $E_E = 4$ МэВ, нейтронов с энергией $E_N = 1.5$ МэВ и протонов с энергией $E_P = 2$ МэВ. Рассмотрены особенности функционирования различных конструктивных решений БТИЗ. Определены зависимости отклонения основных параметров БТИЗ (пороговое напряжение, максимальный ток коллектора, время включения и выключения) от величины флюенса электронов, нейтронов и протонов.

Ключевые слова: биполярный транзистор с изолированным затвором; технология изготовления; статические и динамические характеристики; проникающее излучение; радиационная стойкость.

INFLUENCE OF PENETRATING RADIATION ON THE CHARACTERISTICS OF A IN-SULATED GATE BIPOLAR TRANSISTOR

I.Yu. Lovshenko, Yu.P. Snitovsky, V.R. Stempitsky
*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
6 P. Brovki Str., 220013 Minsk, Belarus, lovshenko@bsuir.by*

The results of the operational characteristics of the insulated gate bipolar transistor (IGBT) device structures simulation formed using standard silicon and using the Silicon on Insulator (SOI) technology, taking into account the effect of electron fluxes with an energy of $E_E = 4$ MeV, neutrons with energy $E_N = 1.5$ MeV and protons with energy $E_P = 2$ MeV was presented. The features of the functioning of various design solutions of the IGBT are considered. Dependences of the deviation of the main parameters of the IGBT (threshold voltage, maximum collector current, turn-on and turn-off times) on the fluence of electrons, neutrons and protons have been determined.

Keywords: insulated gate bipolar transistor; manufacturing technology; static and dynamic characteristics; penetrating radiation; radiation hardness.

Введение

Среди современных приборов силовой электроники доминирующее положение занимают два типа приборов: мощные полевые транзисторы и биполярные транзисторы с изолированным затвором (БТИЗ, англ. Isolated Gate Bipolar Transistor, IGBT), а также различные интегрированные структуры на их основе. БТИЗ благодаря наличию уникальных для данного класса приборов функциональных характеристик, которые сочетают положительные свойства мощных полевых и биполярных транзисторов, стал в последнее десятилетие широко используемым силовым устройством. БТИЗ представляет со-

бой повторяющийся массив ячеек, расположенных в соответствии с топологическим макетом, обеспечивающим большое соотношение сторон канала.

Требования создания новых перспективных конструктивных решений мощных полупроводниковых приборов стимулируют исследования и внедрения новых конструкций, технологических процессов изготовления и материалов структурных элементов. Совершенствование структур БТИЗ направлено на повышение их быстродействия, предельных коммутируемых токов и напряжений. При применении в качестве элементной базы современных объектов космической и ядерной

техники БТИЗ подвергается воздействию ионизирующих излучений, основными из которых является гамма-излучение (γ), нейтронное (n), электронное (e), протонное (p) [1].

При воздействии потока частиц на приборные структуры микроэлектроники возможны два основных механизма: ионизация и повреждения, вызванные в результате упругого рассеяния первичных частиц, а также фрагментов, образующихся в ядерных реакциях (неупругое рассеяние) падающих протонов или нейтронов на ядрах мишени (эффекты смещений). Ионизация в данной работе не рассматривается. Нейтроны, протоны, альфа-частицы, тяжелые ионы и фотоны очень высоких энергий вызывают эффекты смещений: изменяется расположение атомов в кристаллической решетке и увеличивается количество центров рекомбинации (дефектов), уменьшая концентрацию свободных носителей заряда и ухудшая эксплуатационные характеристики приборных структур. Наиболее чувствительными к эффектам смещений параметрами объемного материала являются время жизни и диффузионная длина неосновных носителей заряда, подвижность и концентрация носителей заряда [2]. Величина проявления эффектов смещений зависит от типа излучения частиц, общей дозы, потока и энергии излучения, температуры окружающей среды, рабочего напряжения, фактического состояния устройства в момент облучения и т.д.

Таким образом, в работе представлены результаты оценки процессов деградации электрических характеристик приборных структур БТИЗ под влиянием потока электронов, нейтронов и протонов посредством компьютерного моделирования.

Исследуемые структуры

В качестве исследуемых структур выбраны две традиционно изготавливаемые конструкции БТИЗ – стандартная NPT на объемном кремнии [3] (далее структу-

ра 1), с вертикальным канавочным затвором (структура 2), а также горизонтальная конструкция, сформированного на КНИ-подложке (структура 3).

Ранее, в рамках исследований, описанных в [4-6] посредством компьютерного моделирования, выполнен анализ и оптимизация статических и динамических характеристик структуры 1 (рис. 1а) в зависимости от технологических параметров ее формирования. Толщина эпитаксиального слоя составила 141 мкм, а толщина p^+ -коллекторного слоя – 17 мкм.

На рис. 1б представлена структура 2, практически полностью вытеснившая стандартную структуру затвора – это БТИЗ с вертикальным расположением канала в p -области (англ. Trench-IGBT). К недостаткам можно отнести наличие высокой емкости затвора, что сказывается на быстродействии.

Представленная на рис. 1в структура БТИЗ на КНИ разработана на основе анализа конструктивных решений, описанных в [7-9]. База транзистора представляет собой пленку кремния, расположенную на изоляционном материале. Большая плотность тока в БТИЗ структурах достигается с помощью сформированного n -кармана истока, увеличивающего ток базы биполярного транзистора в БТИЗ. Затворы могут управлять каналами МОП-транзисторов. Вертикальные размеры n -дрейфовой области увеличены для повышения плотности тока без роста величины падения.

Результаты и их обсуждение

В [10] показано, что существует комбинация значений флюенса и энергии частиц при котором воздействие оказывается равным. Предположено, что флюенс электронов F_E с энергией $E_E = 4$ МэВ вызовет в приборной структуре такие же дефекты смещения, как флюенс нейтронов $F_N = 0.302 \cdot F_E$ с энергией $E_N = 1.5$ МэВ или флюенс $F_P = 1.1 \cdot 10^{-4} \cdot F_E$ с энергией $E_P = 2.0$ МэВ.

В предыдущей работе [11] выполнена

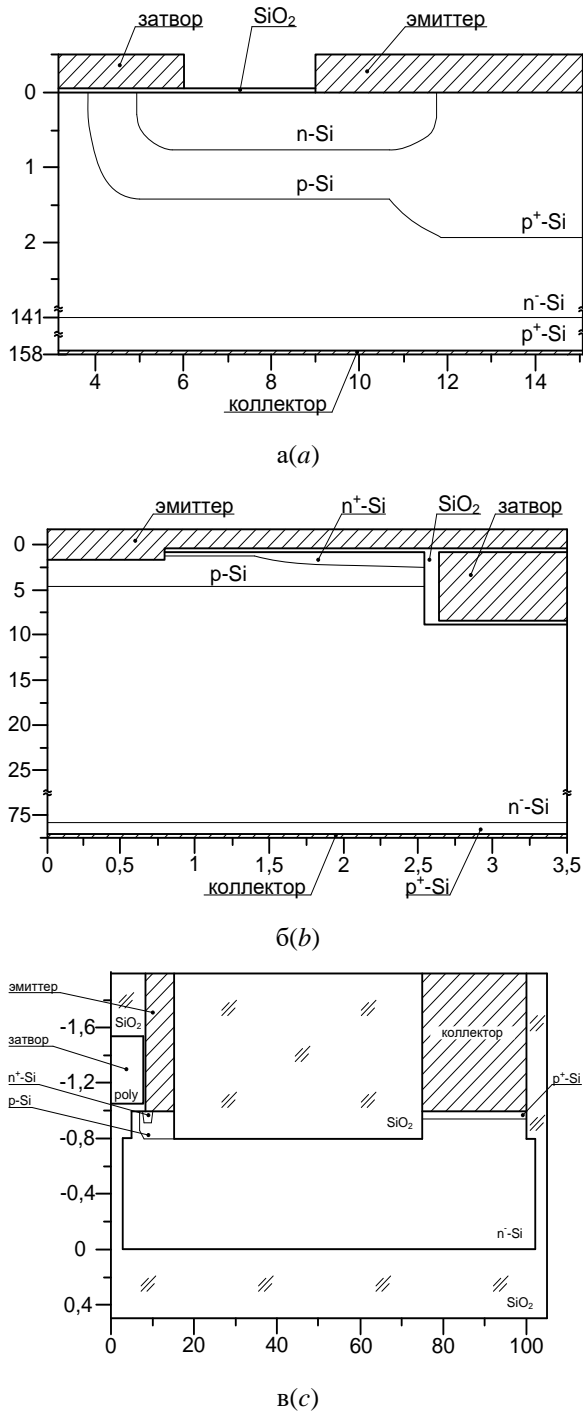


Рис. 1. NPT БТИЗ на объемном кремнии (а), канавочного БТИЗ (б), горизонтального однозатворного БТИЗ, сформированного по технологии «кремний на изоляторе» (в)
Fig. 1. NPT IGBT on bulk silicon (a), trench IGBT (b), horizontal one-gate IGBT, formed by the "silicon on insulator" technology (c)

проверка данного утверждения для p -канального полевого транзистора с управляющим p - n -переходом при воздействии флюенса электронов $F_E = 6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ с энергией $E_E = 4 \text{ МэВ}$, флюенса нейтронов

$F_N = 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ с энергией $E_N = 1.5 \text{ МэВ}$ и флюенса протонов $F_P = 6.6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ с энергией $E_P = 2 \text{ МэВ}$.

Моделирование технологического маршрута формирования и электрических характеристик приборных структур выполнялось с использованием программного комплекса компании Silvaco.

Проведено моделирование воздействия потока электронов и нейтронов на эксплуатационные характеристики приборных структур. Результат отклонения эксплуатационных характеристик от состояния устройства без воздействия (принято за единицу) для структуры 3 при изменении величины флюенса электронов с энергией $E_E = 4 \text{ МэВ}$ и нейтронов с энергией $E_N = 1.5 \text{ МэВ}$ при температуре $T = 303 \text{ К}$ представлены на рис. 2.

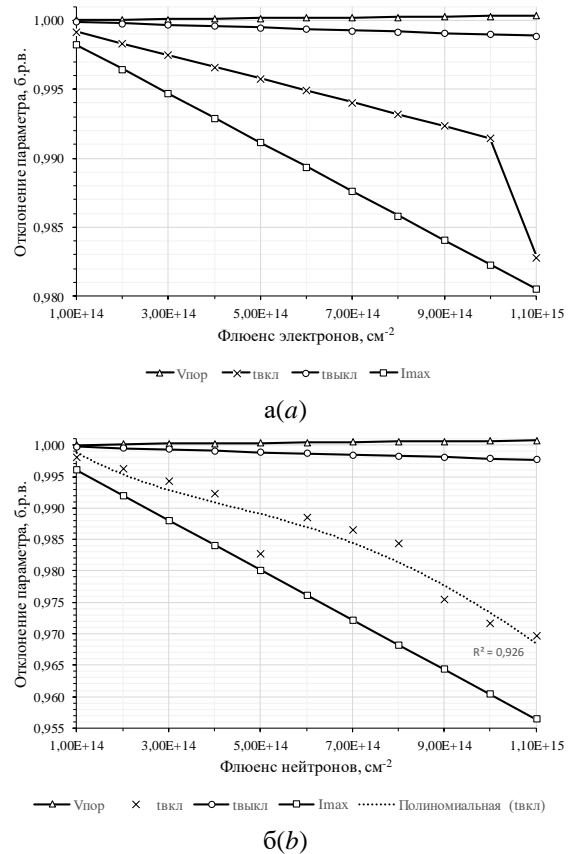


Рис. 2. Зависимости отклонения параметров структуры 3 от величины флюенса электронов (а) и нейтронов (б)
Fig. 2. Deviation of the parameters of structure 3 with a change in the fluence of electrons (a) and neutrons (b)

Показано, что увеличение флюенса

приводит к незначительному повышению величины порогового напряжения (не более чем на 0.03 % и 0.07 % для потока электронов и нейтронов соответственно), снижению величины тока стока (на 2.9 % и 4.4 %) и времени выключения (на 0.11 % и 0.23 %). Стоит отметить нелинейность зависимости времени включения (пунктирная линия на рис. 2б), которая объясняется методикой его определения (разность между $0.9 \cdot I_{Kmax}$ и $0.1 \cdot I_{Kmax}$).

На рис. 3 представлены зависимости отклонения эксплуатационных характеристик для структуры 1 при изменении величины флюенса протонов с энергией $E_p = 2$ МэВ при температуре $T = 303$ К.

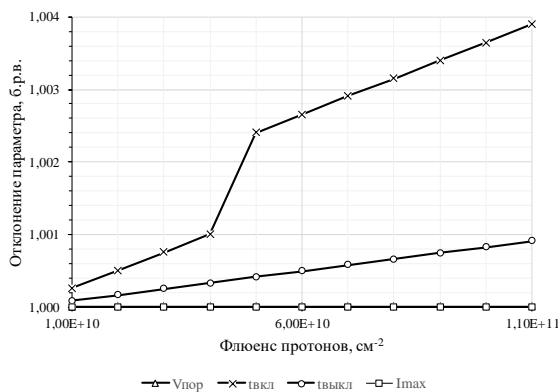
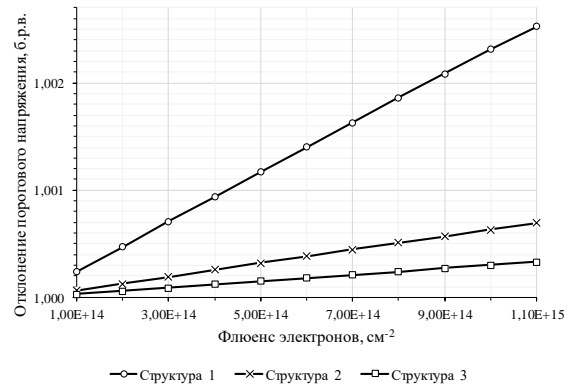


Рис. 3. Зависимости отклонения параметров структуры 1 от величины флюенса протонов
Fig. 3. Deviation of the parameters of structure 1 with a change in the proton fluence

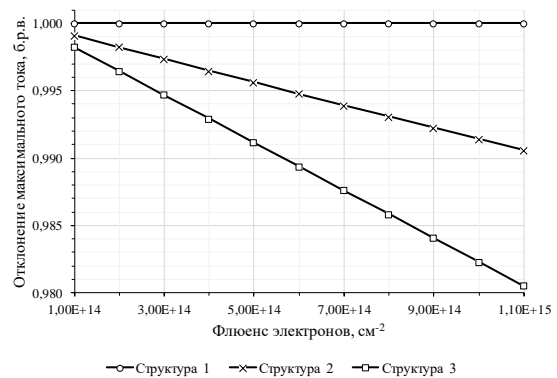
Показано, что для структуры 1 поток протонов с энергией $E_p = 2$ МэВ практически не оказывает влияние на величины порогового напряжения и максимального тока коллектора. При этом изменяются динамические характеристики устройства: время включения увеличивается на 0.39 %, время выключения – на 0.09 %.

На рис. 4 представлена зависимость отклонения величины порогового напряжения и максимального тока коллектора приборных структур 1-3 от значения флюенса электронов.

Установлено, что структура 1, для которой поток электронов оказывает наибольшее влияние на величину порогового напряжения (изменяется на 0.25 %), имеет слабую зависимость максимального



а(а)



б(б)

Рис. 4. Зависимость отклонения величины порогового напряжения (а) и максимального тока коллектора (б) приборных структур 1-3 от значения флюенса электронов с энергией $E_E = 4$ МэВ
Fig. 4. Deviation of the threshold voltage (a) and the maximum collector current (b) of device structures 1-3 with a change in the value of the fluence of electrons with energy $E_E = 4$ MeV

тока стока от флюенса электронов (≈ 1).

Заключение

Посредством компьютерного моделирования установлено отклонение эксплуатационных характеристик стандартной конструкции БТИЗ на объемном кремнии, БТИЗ с вертикальным канавочным затвором и горизонтальной конструкции БТИЗ, сформированного на КНИ-подложке. Параметрами, наиболее подверженных изменениям, являются величина максимального тока коллектора (до 4.4 % для структуры 2 и потока нейтронов) и время включения (до 9.1 % для структуры 2 и потока нейтронов).

В отличие от ранее проведенных исследований наблюдается разный отклик на воздействие потока электронов

$F_E = 6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ с энергией $E_E = 4 \text{ МэВ}$,
флюенса нейтронов $F_N = 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ с
энергией $E_N = 1.5 \text{ МэВ}$ и флюенса прото-
нов $F_P = 6.6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ с энергией
 $E_P = 2 \text{ МэВ}$.

Благодарность

Исследования выполняются при фи-
нансовой поддержке и в рамках решения
задач государственной программы науч-
ных исследований «Фотоника и электро-
ника для инноваций» (задание 3.04).

Библиографические ссылки

1. Кулаков В.М., Ладыгин Е.А., Шаховцов В.И. Действие проникающей радиации на изделия электронной техники. Москва: Сов. Радио; 1980. 224 с.
2. Allam E.E., Inguibert C., Meulenberg A., Jorio A., Zorkani I. Gamma non-ionizing energy loss: Comparison with the damage factor in silicon devices. *Journal of Applied Physics* 2018; 123 (095703): 1-5.
3. Khanna V.K. The Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT). Theory and Design. New Jersey: IEEE Press-Wiley Interscience; 2003. 627 p.
4. Ловшенко И.Ю., Стемпицкий В.Р., Турцевич А.С., Шелибак И. Проектирование IGBT-прибора высокого быстродействия. *Доклады БГУИР* 2013; (4): 10-15.
5. Ловшенко И.Ю., Стемпицкий В.Р., Турцевич А.С., Шелибак И. Комплементарная методология формирования IGBT структуры с высоким напряжением пробоя. *Электроника-Инфо* 2013; (3): 23-26.
6. Artamonov A.M., Nelayev V.V., Shelibak I.M. Technology design of IGBT. In Proc. XI Int. Conf. on the Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (23-25 February 2011), Polyana-Svalyava. Lviv: Institute of Electrical and Electronics Engineers; 2011. P. 8-9.
7. Kawahara H., Hower P.L. Lateral insulated gate bipolar transistor. US Patent US 2010/0032713 A1.
8. Taki M., Kawakami M., Hayakawa K. Lateral SOI semiconducting devices and manufacturing method thereof. US Patent 7,943,957 B2.
9. Nakagawa A., Yasuhara N. High breakdown voltage semiconductor device. US Patent 5,241,210.
10. Dvornikov O.V., Tchekhovski V.A., Diatlov V.L., Bogatyrev Yu.V., Lastovski S.B. Forecasting of bipolar integrated circuits hardness for various kinds of penetrating radiations. In 23rd Proc. Int. Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology" (8-14 September 2013), Sevastopol. Sevastopol: Institute of Electrical and Electronics Engineers; 2013. P. 925-926.

11. Lovshenko I.Yu., Khanko V.T., Stempitsky V.R. Radiation influence on electrical characteristics of complementary junction field-effect transistors exploited at low temperatures. *J. Materials Physics and Mechanics* 2018; 39(1): 92-101.

References

1. Kulakov V.M., Ladygin E.A., Shahovcov V.I. Dejstvie pronikajushhej radiacii na izdelija jel-ektronnoj tehniki [The effect of penetrating radiation on electronic devices]. Moscow: Sov. Radio; 1980. 224 p. (In Russian)
2. Allam E.E., Inguibert C., Meulenberg A., Jorio A., Zorkani I. Gamma non-ionizing energy loss: Comparison with the damage factor in silicon devices. *Journal of Applied Physics* 2018; 123 (095703): 1-5.
3. Khanna V.K. The Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT). Theory and Design. New Jersey: IEEE Press-Wiley Interscience; 2003. 627 p.
4. Lovshenko I.Yu., Stempitsky V.R., Turtsevich A.S., Shelibak I. Proektirovanie IGBT-pribora vy-sokogo bystrodejstvija. [Design of High-Speed IGBT Device]. *Doklady BGUIR*. 2013;(4): 10-15. (In Russian)
5. Lovshenko I.Yu., Stempitsky V.R., Turtsevich A.S., Shelibak I. Komplementarnaja metodologija formirovanija IGBT struktury s vysokim naprjazheniem proboja. [Complementary Methodology for Forming a High Breakdown Voltage IGBT Structure]. *Jelektronika-Info* 2013; (3): 23-26. (In Russ.)
6. Artamonov A.M., Nelayev V.V., Shelibak I.M. Technology design of IGBT. In Proc. XI Int. Conf. on the Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (23-25 February 2011), Polyana-Svalyava. Lviv: Institute of Electrical and Electronics Engineers; 2011. P. 8-9.
7. Kawahara H., Hower P.L. Lateral insulated gate bipolar transistor. US Patent US 2010/0032713 A1.
8. Taki M., Kawakami M., Hayakawa K. Lateral SOI semiconducting devices and manufacturing method thereof. US Patent 7,943,957 B2.
9. Nakagawa A., Yasuhara N. High breakdown voltage semiconductor device. US Patent 5,241,210.
10. Dvornikov O.V., Tchekhovski V.A., Diatlov V.L., Bogatyrev Yu.V., Lastovski S.B. Forecasting of bipolar integrated circuits hardness for various kinds of penetrating radiations. In 23rd Proc. Int. Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology" (8-14 September 2013), Sevastopol. Sevastopol: Institute of Electrical and Electronics Engineers; 2013. P. 925-926.
11. Lovshenko I.Yu., Khanko V.T., Stempitsky V.R. Radiation influence on electrical characteristics of complementary junction field-effect transistors exploited at low temperatures. *J. Materials Physics and Mechanics* 2018; 39(1): 92-101.