По результатам измерения параметров микросхемы после облучения дозой 500 крад (образцы № 1 и № 2) и 600 крад (образцы № 3 и № 4) установлено: значение параметра  $\Delta T_1$  увеличилось на 0,6–1,2 °С и максимальное значение составляет 2 °С при норме ±8 °С; значение параметра  $K_{U1}$  увеличилось на 0,1 мВ/В и максимальное значение составляет 0,23 мВ/В при норме ±0,6 мВ/В; значение параметра  $R_{BbIX}$  увеличилось на 5–72 Ом и максимальное значение составляет 233 Ом при норме 900 Ом; значение параметра  $I_{CC}$  незначительно уменьшилось на 1–2 мкА.

Таким образом, микросхема датчика температуры устойчива к воздействию гамма-излучения дозой 500 крад в нормальных условиях.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследований воздействия гамма-излучения Co<sup>60</sup> на различные электронные компоненты установлено:

1. В СБИС СОЗУ 1635РУ2У величина статического тока потребления в режиме хранения  $I_{\rm CCS}$  не возрастает в диапазоне доз  $D = 10^5 - 10^6$  рад и не выходит за допустимую норму. Контроль функционирования и значений других параметров подтверждает их соответствие ТУ.

2. В СБИС СОЗУ 1669РА035 величина тока потребления  $I_{CCS}$  остается в пределах ТУ при дозах до  $(1,5-2,5)\cdot 10^6$  рад. Остальные параметры не выходили за установленные нормы, и функционального отказа не наблюдалось до  $D = 1\cdot 10^6$  рад.

3. Основные параметры мощных *n*-канальных МОПТ IFP830 остаются в пределах ТУ до  $D = 10^6$  рад.

4. Микросхема аналогового датчика температуры устойчива к воздействию гамма-излучения дозой 500 крад в нормальных условиях.

5. Достаточно высокая радиационная стойкость исследованных электронных компонентов позволяет рекомендовать их для использования в аппаратуре авиационной и космической техники.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

- Чумаков, А.И. Действие космической радиации на интегральные схемы / А.И. Чумаков. М.: Радио и связь, 2004. 320 с.
- Белоус, А.И. Космическая электроника. Кн. 2 / А.И. Белоус, В.А. Солодуха, С.В. Шведов. М.: Техносфера, 2015. 488 с.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСОВ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПИКОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ НА ТОК СТОКА ГЛУБОКОСУБМИКРОННОГО КНИ-МОП-ТРАНЗИСТОРА

### А. В. Борздов, В. М. Борздов

Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030 Минск, Беларусь, e-mail: borzdov@bsu.by

Многочастичным методом Монте-Карло проведено моделирование фототока глубокосубмикронного КНИ-МОП-транзистора с длиной канала 50 нм при воздействии импульсов лазерного излучения пикосекундной длительности с длинами волн 532 и 650 нм. Исследован отклик тока стока транзистора на импульсы лазерного излучения.

Ключевые слова: КНИ-МОП-транзистор; метод Монте-Карло; фототок.

# SIMULATION OF THE EFFECT OF PICOSECOND LASER PULSES ON THE DRAIN CURRENT OF DEEP SUBMICRON SOI MOSFET

### A. V. Borzdov, V. M. Borzdov

Belarusian State University, Nezavisimosti av. 4, 220030 Minsk, Belarus Corresponding author: V. M. Borzdov (borzdov@bsu.by)

Ensemble Monte Carlo simulation of photocurrent in deep submicron SOI MOSFET with 50 nm channel length under the effect of 532 and 650 nm wavelength picosecond laser pulses is performed. The drain current response on the pulsed laser irradiation is studied.

Key words: SOI MOSFET; Monte Carlo method; photocurrent.

## введение

Кремниевые субмикронные КНИ-МОП-транзисторы являются перспективными для использования в качестве детекторов излучения видимого и инфракрасного диапазонов, работающих как в обычном режиме, так и в режиме счета одиночных фотонов [1–3]. В связи с этим интерес представляют, как теоретические, так и экспериментальные исследования воздействия излучения высокой интенсивности видимого и инфракрасного диапазонов, в частности лазерного, на электрические характеристики и электрофизические параметры КНИ-МОП-транзисторов [4, 5].

Для исследования рабочих характеристик фотодетекторов и фототранзисторов весьма эффективным и нашедшим к настоящему моменту широкое применение является численное самосогласованное моделирование на основе многочастичного метода Монте-Карло [6, 7]. Данный метод является мощным средством для моделирования процессов переноса носителей заряда в полупроводниковых приборных структурах и позволяет рассчитывать электрофизические параметры и электрические характеристики с учетом различных сложных физических процессов и эффектов. Важным для расчета электрических характеристик КНИ-МОП-транзисторов является, в частности, учет всех значимых процессов рассеяния носителей заряда, а также механизмов их генерации и рекомбинации.

В данной работе приведены результаты моделирования фототока КНИ-МОПтранзистора с длиной канала 50 нм при воздействии импульсов лазерного излучения видимого диапазона спектра.

## МОДЕЛЬ КНИ-МОП-ТРАНЗИСТОРА

Схематически структура моделируемого КНИ-МОП-транзистора представлена на рисунке 1 [8, 9]. Размеры моделируемых областей транзистора следующие: длина канала равна  $L_{\rm G} = 100$  нм, его толщина —  $W_{\rm c} = 50$  нм, толщина подзатворного окисла (Gate SiO<sub>2</sub>) — 5 нм, толщина скрытого окисла —  $W_{\rm b} = 145$  нм, толщина подложки –  $W_{\rm sub} = 200$  нм. Размеры областей истока (Sourse) и стока (Drain) составляют

 $L_{\rm S} = L_{\rm D} = 50$  нм. Уровень легирования канала акцепторной примесью равен  $10^{21}$  м<sup>-3</sup>. Температура моделирования — 300 К.



Рисунок 1. – Схематическое сечение

моделируемого КНИ-МОП-транзистора

Для рассматриваемого транзистора используется так называемое двумерное моделирование методом частиц [7]. Предполагается, что лазерное излучение направлено перпендикулярно плоскости затвора транзистора и охватывает только область канала. Длительность лазерного импульса равна 1 пс. Также предполагается, что интенсивность импульса излучения постоянна во времени и одинакова по всей площади затвора. При этом металлизация затвора считается достаточно тонкой, и, как следствие, практически прозрачной для используемо-

го излучения. Оптические характеристики Si и SiO<sub>2</sub> взяты из работ [10, 11]. Перенос электронов и дырок моделировался с учетом процессов рассеяния на оптических и акустических фононах, ионизированной примеси, а также процессов оптической генерации и ударной ионизации.

## РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 2 приведены зависимости плотности тока стока от времени для нескольких значений напряжения на стоке  $V_D$  для двух длин волн излучения: 532 нм (рисунок 2, *a*) и 650 нм (рисунок 2, *б*). Во всех случаях напряжения на затворе  $V_G$ . и подложке  $V_{sub}$  равны нулю. Интенсивность излучения составляет  $5 \cdot 10^{10}$  Вт/м<sup>2</sup>. Предполагается, что лазерное излучение включается в момент времени t = 1 пс. Рассматривается воздействие одиночного импульса излучения длительностью 1 пс. До начала воздействия излучения устанавливается стационарный режим работы транзистора при заданных напряжениях на электродах.



Рисунок 2.–Зависимость плотности тока от времени: (*a*)–длина волны излучения 532 нм, ( $\delta$ )–650 нм. Кривые 1–4 соответствуют напряжению на стоке  $V_{\rm D}$  = 0,25 B, 0,5 B, 0,75 B и 1 B соответственно

В целом характер процесса затухания тока в рассмотренном транзисторе с длиной канала 50 нм аналогичен таковому в КНИ-МОП-транзисторах с аналогичной структурой, но с большей длиной канала [12]. На графиках видно, что максимальное время после окончания воздействия излучения, за которое устанавливается стационарное значение тока, составляет порядка 50 пс при наименьшем значении напряжения стока и уменьшается с ростом напряжения на стоке. Как показали проведенные расчеты, определенный заряд сгенерированных излучением электронов и дырок сохраняется в течение некоторого времени после окончания действия излучения, что можно объяснить эффектом динамического экранирования в электронно-дырочной плазме [5]. Для рассматриваемого КНИ-МОП-транзистора с длиной канала 50 нм, как и для аналогичных транзисторов с большей длиной канала, время затухания тока в большей степени определяется более длительным процессом рассасывания заряда сгенерированных дырок, которые накапливаются у границы раздела подзатворный окисел-канал.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Путем численного моделирования на основе многочастичного метода Монте-Карло исследован фототок в канале глубокосубмикронного КНИ-МОП-транзистора с длиной канала 50 нм при воздействии пикосекундного импульса лазерного излучения интенсивностью  $5 \cdot 10^{10}$  Вт/м<sup>2</sup> с длиной волны 532 нм и 650 нм. Результаты расчетов позволяют заключить, что время затухания тока после воздействия излучения обусловлено процессами, происходящими в электронно-дырочной плазме у границы раздела подзатворный окисел-канал транзистора. Процессы перераспределения сгенерированного излучением заряда сильно зависят также от режимов работы транзистора.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

- 1. Infrared detection with silicon nano-field-effect transistors / K. Nishiguchi [et al.] // Appl. Phys. Lett. 2007. V. 82. P. 223108-1-223108-3.
- Photoresponse of silicon with asymmetric area contacts / M. Golam Rabbani [et al.] // Semicond. Sci. Technol. – 2017. – V. 32. – P. 1–6.
- 3. Single-photon detection by a simple silicon-on-insulator metal-oxide-semiconductor field-effect transistor / W. Du [et al.] // Jpn. J. Appl. Phys. 2012. V. 51. P. 06FE01-1-06FE01-4.
- Abraham, G.K. Light dependence of SOI MOSFET with nonuniform doping profile / G.K. Abraham, B.B. Pal, R.U. Khan // IEEE Trans. Electron Devices. – 2000. – V. 47, № 7. – P. 1469–1471.
- Direct measurement of transient pulses induced by laser and heavy ion irradiation in deca-nanometer devices / V. Ferlet-Cavrois [et al.] // IEEE Trans. Electron Devices. – 2005. – V. 52, № 6. – P. 2104–2113.
- 6. Moglestue, C. Monte Carlo simulation of semiconductor devices / C. Moglestue. Springer, 1993. 334 p.
- Hockney, R.W. Computer simulations using particles / R.W. Hockney, J.W. Eastwood McGraw-Hill, New York, 1981. – 640 p.
- Borzdov, A.V. Monte Carlo simulation of hot electron transport in deep submicron SOI MOSFET / A.V. Borzdov, V.M. Borzdov, V.V. V'yurkov // Proc. SPIE. – 2014. – V. 9440. – P. 944013-1–944013-7.
- Борздов, А.В. Численное моделирование электрических характеристик глубокосубмикронного МОП-транзистора со структурой "кремний-на-изоляторе" / А.В. Борздов, В.М. Борздов, Н.Н. Дорожкин // Приборы и методы измерений. – 2016. – Т. 7, № 2. – С. 161–168.
- Aspnes, D.E. Dielectric functions and optical parameters of Si, Ge, GaP, GaAs, GaSb, InP, InAs, and InSb from 1.5 to 6.0 eV / D.E. Aspnes, A.A. Studna // Phys. Rev. B. – 1983. – V. 27, № 2. – C. 985–1009.
- Wang, H. Absorption coefficients of crystalline silicon at wavelengths from 500 nm to 1000 nm / H. Wang, X. Liu, Z.M. Zhang // Int. J. Thermophys. – 2013. – V. 34. – P. 213–225.
- Monte Carlo simulation of pulsed laser irradiation effect on electrical characteristics of submicron SOI MOSFET / A.V. Borzdov, V.M. Borzdov // Interaction of Radiation with Solids: Proceedings of the 13th International conference, Minsk, Belarus, September 30–October 3, 2019 / ed.: V. V. Uglov [et al.]. – Minsk : BSU, 2019. – P. 23–25.