

ФОТООТКЛИК СУБМИКРОННОГО КНИ-МОП-ТРАНЗИСТОРА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ПИКОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

А. В. Борздов, В. М. Борздов

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

На основе многочастичного метода Монте-Карло проведено моделирование отклика тока субмикронного МОП-транзистора со структурой кремний-на-изоляторе (КНИ-МОП-транзистора) на воздействие импульсов лазерного излучения пикосекундной длительности. Исследовано время затухания тока, а также динамика распределения сгенерированных излучением носителей заряда в канале транзистора.

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

PHOTORESPONSE OF DEEP SUBMICRON SOI MOSFET UNDER THE EFFECT OF PICOSECOND LASER IRRADIATION

A. V. Borzdov, V. M. Borzdov

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

The ensemble Monte Carlo simulation of submicron SOI MOSFET current response on the effect of picosecond laser pulses is carried out. The current decay time and the dynamics of generated charge carriers in the transistor channel are studied.

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

ВВЕДЕНИЕ

Кремниевые субмикронные интегральные МОП-транзисторы, в частности КНИ-МОП-транзисторы, являются перспективными для использования в качестве детекторов излучения видимого и инфракрасного диапазонов, а также в качестве фототранзисторов [1, 2]. Относительно недавно продемонстрировано использование глубоко субмикронных МОП-транзисторов в качестве детекторов излучения, работающих в режиме счета одиночных фотонов при комнатной температуре [3]. Важной самостоятельной задачей является также исследование воздействия лазерного излучения на характеристики и электрофизические параметры КНИ-МОП-транзисторов [4].

Для исследования рабочих характеристик фотодетекторов и фототранзисторов широкое применение к настоящему времени нашло численное самосогласованное моделирование на основе метода Монте-Карло [5, 6]. Преимуществом использования многочастичного метода Монте-Карло является возможность прослеживания траекторий движения носителей заряда в пространстве координат и импульсов при различных условиях, и расчет соответствующих функций распределения, плотностей заряда и напряженностей электрических полей, а также возможность непосредствен-

ного включения и учета различных процессов рассеяния и генерации носителей заряда в приборных структурах.

В настоящей работе проведено моделирование воздействия коротких импульсов лазерного излучения на величину тока в канале субмикронного КНИ-МОП-транзистора.

МОНТЕ-КАРЛО МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНЗИСТОРА

Объектом моделирования является КНИ-МОП-транзистор, аналогичный по структуре с исследованным в [3] в качестве однофотонного фотодетектора и рассмотренный нами ранее в [7, 8]. Размеры моделируемых областей транзистора следующие: длина канала равна 100 нм, его толщина – 50 нм, толщина подзатворного окисла – 5 нм, толщина скрытого окисла – 145 нм, толщина подложки – 200 нм. Уровень легирования канала акцепторной примесью равен 10^{21} м^{-3} . Температура моделирования – 300 К.

Предполагалось, что лазерное излучение с длиной волны 532 нм направлено перпендикулярно плоскости затвора транзистора и охватывает только область канала. Длительность лазерного импульса равна 1 пс.

В качестве модельного приближения мы полагали, что интенсивность импульса излучения постоянна во времени и равномерно распределена по площади затвора. При этом металлизация затвора считалась достаточно тонкой, и, как следствие, прозрачной для используемого излучения. Оптические характеристики Si и SiO₂ рассматривались в соответствии с данными из [9, 10]. Процессы переноса электронов и дырок моделировались аналогично работам [7, 8, 11].

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке приведены зависимости плотности тока в канале транзистора от времени для нескольких значений напряжения на стоке V_D при различных напряжениях на затворе V_G . Интенсивность излучения составляла $5 \cdot 10^{10} \text{ Вт/м}^2$. Для всех рассматриваемых напряжений на стоке процессы ударной ионизации в канале транзистора не существенны, и лавинное умножение носителей заряда можно не учитывать [7, 8]. Предполагается, что лазерное излучение включается в момент времени $t = 0$ и в течение 1 пс действует с постоянной интенсивностью. При этом до начала воздействия излучения моделирование проводилось в течение некоторого времени, достаточного для установления стационарного процесса переноса носителей заряда в канале транзистора.

Как видно из рисунка, после окончания воздействия излучения ($t > 1$ пс) время, за которое устанавливается стационарное темновое значение тока, сильно зависит от затворного напряжения и в меньшей степени от напряжения на стоке при заданном затворном напряжении. Как показали проведенные расчеты, определенный заряд сгенерированных излучением электронов и дырок сохраняется еще в течение достаточно большого времени после окончания действия излучения. Заметим, что сохранение заряда сгенерированных носителей в канале в течение значительного времени после спада фототока до темнового значения наблюдалось экспериментально и подтверждалось численным моделированием также в фотодиодах со структурой “металл-полупроводник-металл” и объяснялось эффектом динамического экранирования в электронно-дырочной плазме [5]. В случае рассматриваемого КНИ-МОП-

транзистора время затухания тока в канале в большей степени обусловлено более длительным процессом рассасывания заряда сгенерированных дырок, которые накапливаются у границы раздела подзатворный окисел–канал. Как следствие этого процесса и наблюдается достаточно сильная зависимость времени затухания тока от затворного напряжения ($\cong 220$ пс для $V_G = 0$ В и $\cong 40$ пс для $V_G = 1$ В).

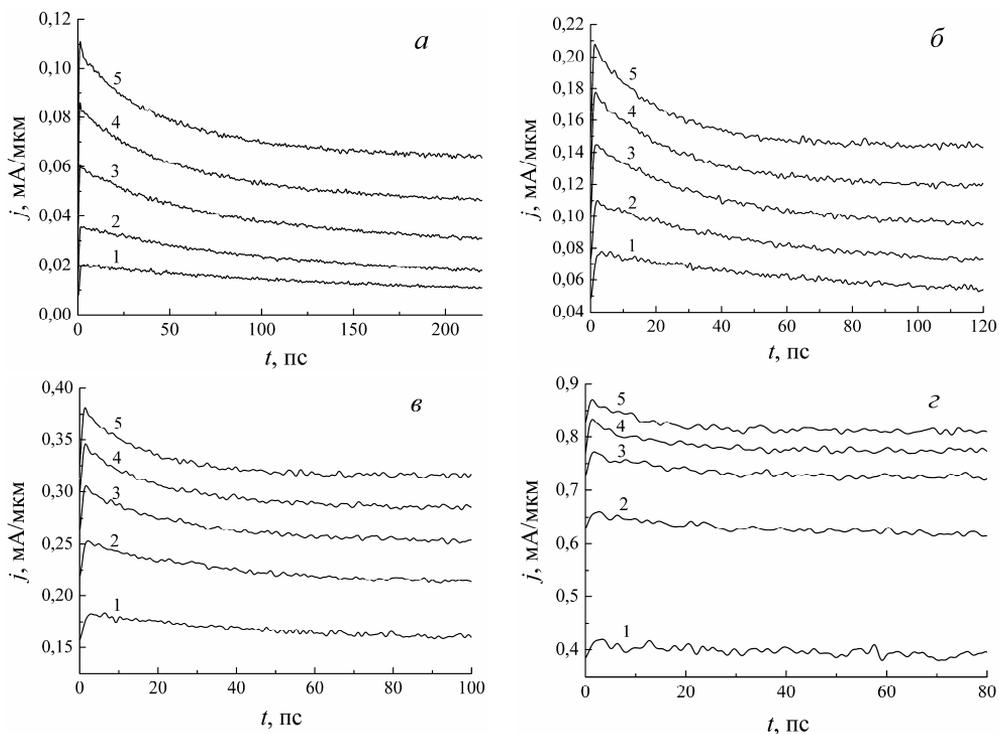


Рисунок – Зависимость плотности тока от времени: (а) – $V_G = 0$ В, (б) – $V_G = 0,25$ В, (в) – $V_G = 0,5$ В, (г) – $V_G = 1$ В. Кривые 1–5 соответствуют напряжению на стоке $V_D = 0,1$ В, 0,25 В, 0,5 В, 0,75 В и 1 В соответственно

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью численного моделирования на основе многочастичного метода Монте-Карло исследован фотоотклик субмикронного КНИ-МОП-транзистора при воздействии импульсов лазерного излучения интенсивностью $5 \cdot 10^{10}$ Вт/м² с длиной волны 532 нм и длительностью 1 пс. Результаты расчетов показали, что время затухания тока после воздействия излучения обусловлено в основном процессами рассасывания заряда дырок, накапливающихся у границы раздела подзатворный окисел–канал транзистора. Динамика перераспределения сгенерированного излучением заряда в значительной степени определяется режимом работы транзистора, в особенности – приложенным затворным напряжением.

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.
2. 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.
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.
5. Moglestue, C. Monte Carlo simulation of semiconductor devices / C. Moglestue. — Springer, 1993. — 334 p.
6. Shiri, D. Photoconductive response of strained silicon nanowires: A Monte Carlo study / D. Shiri, A. Verma, M.M. Khader // J. Appl. Phys. — 2014. — V. 115. — P. 133708-1–133708-9.
7. 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.
8. 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.
9. 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. — С. 985–1009.
10. 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.
11. Оценка эффективной пороговой энергии межзонной ударной ионизации в глубокосубмикронном кремниевом n-канальном МОП-транзисторе / В.М. Борздов [и др.] // Микроэлектроника. — 2014. — Т. 43, № 3. — С. 188–192.

ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ И $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$

О. М. Бородавченко¹, В. Д. Живулько¹, А. В. Мудрый¹, М. В. Якушев^{2,3},
М. А. Сулимов²

¹⁾ Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению, ул. П. Бровки, 19, 220072 Минск, Беларусь, e-mail: riyue@yandex.ru

²⁾ Институт физики металлов им. М. П. Михеева УрО РАН, ул. С. Ковалевской, 18, 620108 Екатеринбург, Россия

³⁾ Уральский федеральный университет, ул. Мира, 19, 620002 Екатеринбург, Россия

При криогенных температурах ~ 4.2 К исследована фотолюминесценция тонкопленочных солнечных элементов на основе прямозонных полупроводников $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ и $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$. На основании анализа характеристик полос люминесценции в ближней области спектров определены механизмы излучательной рекомбинации. Проведен сравнительный анализ оптических свойств базовых поглощающих слоев в солнечных элементах на основе $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ и $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$.

Ключевые слова: $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$; $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$; солнечные элементы; фотолюминесценция.