

5. PID- and UVID-free n -type Solar Cells and Modules / Maciej K. [et al.] // Energy Procedia. –2016. – Vol. 92. – P. 609–616.
6. Барайшук, С. М. Снижение сезонных колебаний сопротивления растеканию тока заземляющих устройств применением смесей для стабилизации влажности грунта/ С. М. Барайшук, И. А. Павлович, М. И. Кахоцкий // Эпоха науки. – 2020. – №. 24. – С. 87–93.
7. Ташлыков И. С. и др. Композиционный состав и повреждение поверхности кремния при ионно-ассистированном нанесении тонких пленок. – 2009.
8. Surface Properties of Me/Si Structures Prepared by Means of Self-Ion Assisted Deposition / I. S Tashlykov [et al.] // Acta Physica Polonica A. No. 6. Proc. of the 8-th International Conference NEET 2013, Zakopane, Poland. – June 18–21. – 2013. –P. 1306–1309.
9. Исследование структур покрытия на основе Мо/кремниевой подложки для тонкопленочных ИК-излучателей / С. М. Барайшук [и др.] // Ученые записки физического факультета Московского университета. – Москва : МГУ им. М. В. Ломоносова, 2024. – N 1. – С. 2410601-1-2410601-7.
10. Causes, consequences, and treatments of induced degradation of solar PV: a comprehensive review./ Kazem, H. A. [et al.] // Arab Journal of Basic and Applied Sciences. – Vol. 31(1). –2014. – P. 177–191.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ШУМОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КРЕМНИЕВОЙ ДИОДНОЙ СТРУКТУРЫ С УЧЕТОМ ПРОЦЕССОВ ГЕНЕРАЦИИ-РЕКОМБИНАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ

А. В. Борздов¹, В. М. Борздов¹, А. Н. Петлицкий²

¹⁾ *Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030 Минск, Беларусь,
e-mail: borzdov@bsu.by*

²⁾ *ОАО «Интеграл» – управляющая компания холдинга «Интеграл», ул. Казинца, 121А, 220108 Минск*

Многочастичным методом Монте-Карло проведено моделирование флуктуаций плотности тока в кремниевой диодной n^+-n-n^+ -структуре при постоянном напряжении на электродах с учетом процессов генерации-рекомбинации электронов через ловушки. Процессы генерации-рекомбинации включены в процедуру моделирования в качестве дополнительного механизма рассеяния. Рассчитаны автокорреляционные функции и спектральная плотность токовых флуктуаций для нескольких различных значений времени генерации и рекомбинации электронов при температуре кристаллической решетки 300 К.

Ключевые слова: генерация-рекомбинация; кремниевая диодная структура; метод Монте-Карло; шумовые характеристики.

SIMULATION OF SILICON DIODE STRUCTURE NOISE CHARACTERISTICS WITH ACCOUNT OF ELECTRON GENERATION-RECOMBINATION PROCESSES

A. V. Borzdov¹, V. M. Borzdov¹, A. N. Petlitsky²

¹⁾ *Belarusian State University, Nezavisimosti av. 4, 220030 Minsk, Belarus*

²⁾ *JSC «Integral» – Holding Management Company, Kazintsa str. 121A, 220108 Minsk, Belarus
Corresponding author: V. M. Borzdov (borzdov@bsu.by)*

Ensemble Monte Carlo simulation of current density fluctuations in silicon $n^+ - n - n^+$ -diode structure has been performed for constant applied voltage with account of electron generation-recombination processes via traps. Generation-recombination processes have been included in the simulation procedure as an additional scattering mechanism. Autocorrelation and spectral density functions of the current fluctuations for some different values of electron generation and recombination times for the lattice temperature of 300 K have been calculated.

Key words: generation-recombination; silicon diode structure; Monte Carlo method; noise characteristics.

ВВЕДЕНИЕ

Разработка и проектирование субмикронных интегральных приборных структур зачастую требует предварительного численного моделирования их электрических характеристик. Многочастичный метод Монте-Карло, как имитационный метод моделирования процессов переноса носителей заряда в полупроводниках и полупроводниковых приборных структурах, является одним из наиболее эффективных методов приборного моделирования в микро- и нанoeлектронике [1]. Одним из преимуществ метода Монте-Карло является возможность включения в процедуру моделирования важных физических процессов и явлений, таких, как различные процессы рассеяния носителей заряда, процессы их генерации и рекомбинации, эффекты размерного квантования и др., которые определяют электрофизические свойства, а также электрические и шумовые характеристики полупроводниковых приборов и приборных структур.

В настоящей работе представлены результаты моделирования флуктуаций плотности тока в субмикронной кремниевой диодной $n^+ - n - n^+$ -структуре. Подобного рода полупроводниковые диодные структуры часто рассматриваются в качестве тестовых при моделировании шумовых характеристик, поскольку являются прототипами каналов кремниевых интегральных МОП-транзисторов [2, 3], а также активно исследуются ввиду возможности их использования в качестве генераторов колебаний СВЧ и терагерцового диапазонов [4, 5].

ДИОДНАЯ СТРУКТУРА И МЕТОД МОДЕЛИРОВАНИЯ

Сечение моделируемой диодной структуры схематически представлено на рис. 1. Рассматривается симметричная диодная структура с контактными n^+ -областями длиной $L_1 = L_3 = 100$ нм и уровнем легирования донорной примесью 10^{24} м^{-3} , а n -область, называемая каналом диода, имеет длину $L_2 = 100$ нм и уровень легирования 10^{22} м^{-3} . Моделирование проводится для температуры кристаллической решетки кремния $T = 300$ К. Легирующая примесь при данной температуре полагается полностью ионизированной.

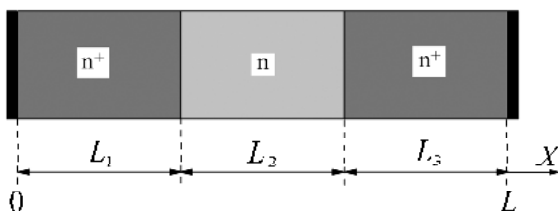


Рис. 1. Моделируемая диодная структура

Контакты металл-полупроводник рассматриваются как идеальные омические, т. е. считается, что со стороны кремния в некоторой приграничной области поддерживается квазиравновесное состояние для носителей заряда. В таком случае при моделировании переноса частицы, достигающие контакта металл-полупроводник со сторо-

ны полупроводника, свободно покидают область моделирования. Металлический контакт при этом постоянно инжектирует определенное число носителей заряда, необходимое для поддержания квазиравновесного состояния в этой приграничной области. Инжектируемые частицы имеют максвелловское распределение по импульсам. Поскольку все области диодной структуры являются кремнием *n*-типа, то зарядом дырок при моделировании мы пренебрегаем за исключением заряда, который генерируется в процессе ударной ионизации. Для электронов учитываются такие основные механизмы рассеяния, как рассеяние на фононах, ионизированной примеси и плазмонах, а также процесс ударной ионизации. Для дырок процедура моделирования включает рассеяние на фононах и ионизированной примеси.

Процессы генерации-рекомбинации электронов через ловушки включены в качестве дополнительного механизма рассеяния в процедуру моделирования методом Монте-Карло с помощью таких величин, как среднее время рекомбинации носителей заряда τ_r и среднее время их генерации с ловушки τ_g [6]. В таком случае величина $1/\tau_r$ есть интенсивность рассеяния электрона с захватом на ловушку. В случае захвата электрона на ловушку разыгрывается время его нахождения на уровне ловушки t_l в соответствии с формулой $t_l = -\tau_g \ln r$, где r – случайное число, равномерно распределенное на интервале (0, 1). При этом полагается, что пока электрон находится на уровне ловушки, его скорость равна нулю, а его пространственные координаты не изменяются. При генерации электрона с уровня ловушки в зону проводимости его состояние разыгрывается исходя из равновесного максвелловского распределения по импульсам.

Моделирование проводится на основе самосогласованного подхода с решением одномерного уравнения Пуассона. Количество моделируемых частиц в ансамбле составляет порядка 25000. Время коррекции электрического поля для самосогласованной процедуры составляет 5×10^{-15} с.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для расчета шумовых характеристик диодной структуры временной интервал моделирования составляет 1 нс. Времена генерации и рекомбинации полагаются постоянными во всех областях структуры. Также время генерации τ_g (среднее время нахождения электрона на ловушке) полагается значительно меньшим времени рекомбинации τ_r .

Автокорреляционные функции токовых флуктуаций $R(t)$ определяются следующим образом [7, 8]:

$$R(t) = \langle \delta I(0) \delta I(t) \rangle, \quad (1)$$

где $\delta I(t) = I(t) - \langle I \rangle$ – флуктуации плотности тока I . Усреднение в (1) проводится по времени.

Спектральная плотность токовых флуктуаций S определяется на основании рассчитанных автокорреляционных функций (1) с помощью следующего выражения [7, 8]:

$$S(f) = 4 \int_0^{\infty} C(t) \cos(2\pi f t) dt. \quad (2)$$

На рис. 2, *а* представлены рассчитанные автокорреляционные функции флуктуаций плотности тока в диодной структуре для напряжения между электродами, равного 1 В. На рис. 2, *б* представлены спектральные плотности флуктуаций для этого же

значения напряжения. Сплошные кривые соответствуют результатам моделирования без учета процессов генерации-рекомбинации. Штриховые кривые соответствуют результатам, полученным для $\tau_r = 10^{-10}$ с и $\tau_g = 10^{-12}$ с, а пунктирные кривые – $\tau_r = 10^{-10}$ с и $\tau_g = 10^{-11}$ с.

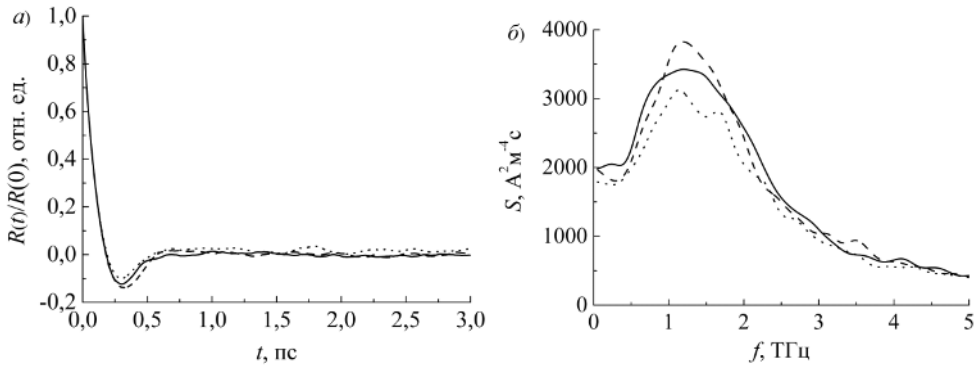


Рис. 2. Автокорреляционные функции флуктуаций плотности тока в диодной структуре (а) и спектральные плотности флуктуаций в зависимости от частоты f (б)

Рассчитанное время корреляции флуктуаций плотности тока, определяемое как:

$$t_{\text{cor}} = R^{-1}(0) \int_0^{\infty} R(t) dt, \quad (3)$$

в случае, когда процессы генерации-рекомбинации не учитываются, составляет $t_{\text{cor}} = 0,168$ пс. В случае учета процессов генерации-рекомбинации с параметром $\tau_r = 10^{-10}$ с при $\tau_g = 10^{-12}$ с t_{cor} составляет 0,170 пс, а при $\tau_g = 10^{-11}$ с t_{cor} увеличивается до 0,250 пс. Спектральная плотность токовых флуктуаций для первых двух случаев имеет один максимум при значении $f \approx 1,3$ ТГц а для $\tau_g = 10^{-11}$ с – два различных максимума для $f \approx 1,2$ и 1,8 ТГц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты расчетов автокорреляционных функций токовых флуктуаций в диодной $n^+ - n - n^+$ -структуре при постоянном смещении на электродах с учетом процессов генерации-рекомбинации электронов через ловушки, включенных в процедуру моделирования процессов переноса многочастичным методом Монте-Карло в качестве дополнительного механизма рассеяния, показали, в частности, что при увеличении времени генерации электронов с ловушек τ_g происходит увеличение времени корреляции токовых флуктуаций. Также учет процессов генерации-рекомбинации электронов с различными значениями параметров времени генерации τ_g и рекомбинации τ_r влияет на форму и положение максимумов спектральной плотности токовых флуктуаций в структуре. Таким образом, включение процессов генерации-рекомбинации в качестве дополнительного механизма рассеяния носителей заряда в процедуру многочастичного метода Монте-Карло является важным при моделировании шумовых характеристик субмикронных полупроводниковых приборных структур.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Борздов, В. М. Моделирование методом Монте-Карло приборных структур интегральной электроники / В.М. Борздов [и др.]. – Мн.: БГУ, 2007. – 175 с.
2. Starikov, E. Hydrodynamic and Monte Carlo simulation of steady-state transport and noise in n^+-n-n^+ submicrometre silicon structures / E. Starikov [et al.] // Semicond. Sci. Technol. – 1996. – № 11. – P. 865–872.
3. Muscato, O. Electro-thermal behaviour of a sub-micron silicon diode / O. Muscato, V. Di Stefano // Semicond. Sci. Technol. – 2013. – №. 28. – P. 1–10.
4. Varani, L. Numerical modeling of TeraHertz electronic devices / L. Varani [et al.] // J. Comput. Electron. – 2006. – №. 5. – P. 71–77.
5. Persano Adorno, D. Monte Carlo simulation of harmonic generation in GaAs structures operating under large-signal conditions / D. Persano Adorno, M. C. Capizzo, M. Zarcone // J. Comput. Electron. – 2007. – №. 6. – P. 27–30.
6. Perez, S. Microscopic analysis of generation-recombination noise in semiconductors under dc and time-varying electric fields / S. Perez [et al.] // J. Appl. Phys. – 2000. – Vol. 88, № 2. – P. 800–807.
7. Martin, M. J. Analysis of current fluctuations in silicon pn^+ and p^+n homojunctions / M. J. Martin, J. E. Velazques, D. Pardo // J. Appl. Phys. – 1996. – Vol. 79, № 9. – P. 6975–6981.
8. Reklaitis, A. Monte Carlo investigation of current voltage and avalanche noise in GaN double-drift impact diodes / A. Reklaitis, L. Reggiani // J. Appl. Phys. – 2005. – Vol. 97. – P. 043709-1–043709-8.

МОРФОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТИ, ОПТИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИХ ПЛЕНОК

Н. А. Босак¹, М. В. Бушинский², А. Н. Чобот²,
Л. В. Баран³, В. В. Малютина-Бронская⁴, И. А. Таратын⁵

¹⁾ Институт физики имени Б.И. Степанова НАН Беларуси, пр. Независимости, 68-2,
220072, Минск, Беларусь, e-mail: n.bosak@ifanbel.bas-net.by

²⁾ ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», ул. Петруся Бровки 19,
220072, Минск, Беларусь, e-mail: bushinsky@physics.by

³⁾ Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, Минск, Беларусь, e-mail: baran@bsu.by

⁴⁾ ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника», пр. Независимости, 68,
220072, Минск, Беларусь, e-mail: malyutina@oelt.basnet.by

⁵⁾ Белорусский национальный технический университет, пр. Независимости, 65,
220013, Минск, Беларусь, e-mail: mnt@bntu.by

Методом высокочастотного импульсно-периодического $f \sim 10\text{--}12$ кГц воздействия лазерного излучения с длиной волны $\lambda = 1,064$ мкм и плотностью мощности $q = 33$ МВт/см² на пьезокерамику ЦТС-19 (цирконат-титанат свинца) при давлении в вакуумной камере $p = 2,2 \times 10^{-2}$ мм рт. ст. получены наноструктурированные тонкие пленки на кремниевой и стеклянной подложках. Изучена морфология поверхности тонких пьезокермических пленок с помощью атомно-силовой микроскопии. Исследованы спектры пропускания пленок в видимой, ближней и средней ИК-области. Проведен анализ электрофизических свойств структуры ЦТС-19/Si на кремниевой подложке.

Ключевые слова: высокочастотное лазерное воздействие; структура тонких пленок; спектры пропускания и отражения; электрофизические характеристики.