

УДК 621.382.2

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ФЛУКТУАЦИЙ ПЛОТНОСТИ ТОКА В КРЕМНИЕВОЙ ДИОДНОЙ СТРУКТУРЕ С УЧЕТОМ ПРОЦЕССОВ ГЕНЕРАЦИИ-РЕКОМБИНАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ

Борздов А. В.<sup>1</sup>, Борздов В. М.<sup>1</sup>, Буйновский Д. Н.<sup>1</sup>, Петлицкий А. Н.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет

<sup>2</sup>ОАО «Интеграл» – управляющая компания холдинга «Интеграл»

Минск, Республика Беларусь

**Аннотация.** 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. Времена генерации и рекомбинации электронов рассмотрены в качестве параметров. Рассчитана зависимость времени корреляции токовых флуктуаций от времени генерации при температуре кристаллической решетки 300 К.

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

## SIMULATION OF CURRENT DENSITY FLUCTUATIONS IN SILICON DIODE STRUCTURE WITH ACCOUNT OF ELECTRON GENERATION-RECOMBINATION PROCESSES

Borzdov A. V., Borzdov V. M., Buinovskiy D. N., Petlitskiy A. N.

<sup>1</sup>Belarusian State University Organization

<sup>2</sup>JSC “Integral” – Holding Management Company

Minsk, Republic of Belarus

**Abstract.** 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 assuming electron generation and recombination times as parameters. The dependence of current fluctuations correlation time versus the generation time has been calculated for the lattice temperature of 300 K.

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

Адрес для переписки: Борздов А. В., пр. Независимости, 4, г. Минск 220030, Республика Беларусь  
e-mail: BorzdovAV@bsu.by

Разработка и проектирование субмикронных интегральных приборных структур 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 наноэлектронике [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 данной работе проведено моделирование 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].

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

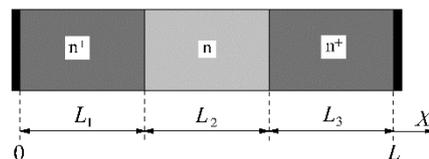


Рисунок 1 – Моделируемая диодная структура

Контакты металл-полупроводник рассматриваются как идеальные омические. Поскольку все области диодной структуры являются кремнием  $n$ -типа, то зарядом дырок при моделировании можно пренебречь за исключением заряда, кото-

рый генерируется в процессе ударной ионизации. Для электронов учитываются такие основные механизмы рассеяния, как рассеяние на фонах, ионизированной примеси и плазмонах, а также процесс ударной ионизации. Для дырок процедура моделирования включает рассеяние на фонах и ионизированной примеси.

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  $5 \cdot 10^{-15}$  с.

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  $\tau_r$  и среднее время их генерации с ловушки  $\tau_g$  [6]. В этом 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.

Для расчета шумовых характеристик диодной структуры время моделирования флуктуаций плотности тока составляет 1 нс. Времена генерации и рекомбинации полагаются постоянными во всех областях структуры. Время генерации  $\tau_g$  (среднее время нахождения электрона на ловушке) полагается меньшим времени рекомбинации  $\tau_r$ .

На рисунке 2 представлена зависимость времени корреляции токовых флуктуаций в структуре  $t_{cor}$  от времени генерации электронов  $\tau_g$  для напряжения между электродами, равного 1 В и времени рекомбинации  $\tau_r = 10^{-10}$  с. Время корреляции определяется как

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

где  $R(t)$  – автокорреляционная функция токовых флуктуаций [7].

Результаты моделирования флуктуаций плотности тока 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  $\tau_g$  происходит увеличение времени корреляции токовых флуктуаций. 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.

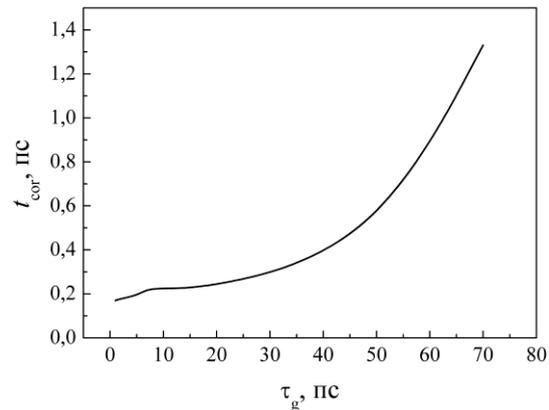


Рисунок 2 – Зависимость времени корреляции токовых флуктуаций  $t_{cor}$  от времени генерации  $\tau_g$

#### Литература

1. Борздов, В. М. Моделирование методом Монте-Карло приборных структур интегральной электроники / В. М. Борздов [и др.]. – Мн.: БГУ, 2007. – 175 с.
2. Hydrodynamic and Monte Carlo simulation of steady-state transport and noise in  $n^+-n-n^+$  submicrometer 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. 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. Microscopic analysis of generation-recombination noise in semiconductors under dc and time-varying electric fields / S. Perez [et al.] // *J. Appl. Phys.* – 2000. – V. 88, № 2. – P. 800–807.
7. 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. – V. 97. – P. 043709-1–043709-8.