

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СУБМИКРОННЫХ ДИОДНЫХ СТРУКТУР

А. В. Борздов¹, В. М. Борздов¹, П. В. Кучинский²

¹Белорусский государственный университет

Минск, Беларусь

e-mail: borzdov@bsu.by

²НИИ ПФП им. А. Н. Севченко БГУ

Минск, Беларусь

e-mail: niipfp@bsu.by

Проведено моделирование электрических характеристик субмикронного кремниевого диода со структурой $n^+ - n - n^+$ многочастичным методом Монте-Карло. Рассмотрен вопрос влияния ударной ионизации на электрические характеристики диода.

Ключевые слова: диод; численное моделирование; метод Монте-Карло.

MONTE CARLO NUMERICAL SIMULATION OF SEMICONDUCTOR SUBMICRON DIODE STRUCTURES

A. V. Borzdov¹, V. M. Borzdov¹, P. V. Kuchinsky²

¹Belarusian State University

Minsk, Belarus

²A. N. Sevchenko IAPP of BSU

Minsk, Belarus

Ensemble Monte Carlo simulation of electric characteristics of submicron silicon diode with $n^+ - n - n^+$ structure is performed. The influence of impact ionization process on the diode electric characteristics is investigated.

Keywords: diode; numerical simulation; Monte Carlo method.

В настоящее время разработка и проектирование субмикронных приборных структур интегральной электроники невозможны без проведения этапа численного моделирования их характеристик. Многочастичный метод Монте-Карло как имитационный метод моделирования процессов переноса носителей заряда в полупроводниках и полупроводниковых приборных структурах – один из наиболее эффективных методов приборного моделирования в микро- и нанoeлектронике [1, 2]. Важнейшее преимущество метода – возможность включения в алгоритм моделирования всех основных физических процессов и явлений, таких как различные процессы рассеяния носителей заряда, эффекты размерного квантования и др., которые определяют электрофизические свойства моделируемых полупроводниковых материалов и структур. Также

данный метод позволяет при необходимости включать в общий алгоритм моделирования расчеты реальной зонной структуры полупроводника.

В настоящей работе представлены результаты моделирования переноса электронов и дырок в субмикронном кремниевом диоде со структурой $n^+ - n - n^+$. Подобного рода полупроводниковые диодные структуры часто рассматриваются в качестве тестовых при моделировании шумовых характеристик, поскольку являются прототипами каналов кремниевых интегральных МОП-транзисторов [3–5], а также активно исследуются ввиду возможности их использования в качестве генераторов колебаний СВЧ и терагерцевого диапазона [6, 7].

Сечение моделируемого диода схематически представлено на рис. 1. Контактные n^+ -области длиной $L_1 = L_3 = 100$ нм, которые условно называют катодом и анодом, полагаются легированными до уровня 10^{25} м^{-3} , а n -область, называемая каналом диода, имеет длину $L_2 = 100$ нм и уровень легирования 10^{22} м^{-3} [8]. Моделирование проводилось для температуры $T = 300$ К. Переходы $n^+ - n$ полагаются резкими, а легирующая примесь — полностью ионизированной. Для определенности будем считать n^+ -область слева на рис. 1 катодом, а n^+ -область справа — анодом. Также положим, что положительное напряжение прикладывается к аноду относительно катода.

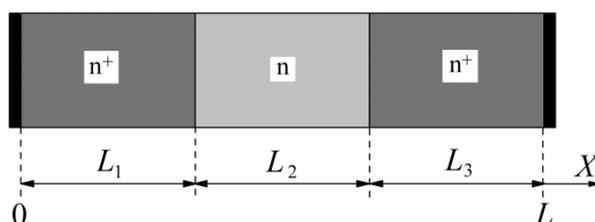


Рис. 1. Структура моделируемого диода

В рассматриваемом случае полагается, что поперечные размеры диода гораздо больше его длины, равной $L = L_1 + L_2 + L_3$, поэтому электрическое поле и электростатический потенциал в любой плоскости, перпендикулярной оси X , можно считать неизменными (краевые эффекты не учитываются). Соответственно этому для расчета электростатического потенциала и напряженности поля в структуре решается одномерное уравнение Пуассона с соответствующими граничными условиями Дирихле. При этом расчет проводится в рамках самосогласованного моделирования, которое включает решение одномерного уравнения Пуассона вместе с моделированием переноса носителей заряда многочастичным методом Монте-Карло. Основные аспекты, касающиеся самосогласованного подхода к моделированию на основе метода Монте-Карло, содержатся, например, в [1, 2, 9]. Учитывая сделанные выше предположения, в многочастичном методе Монте-Карло достаточно проследить изменение во времени только одной пространственной координаты носителей заряда вдоль канала структуры. В то же время в пространстве импульсов необходимо определять все три компоненты импульсов частиц.

Контакты металл-полупроводник для катода и анода рассматриваются как идеальные омические, т. е. считается, что со стороны кремния в некоторой приграничной области поддерживается квазиравновесное состояние для обоих типов носителей заряда. В таком случае при моделировании переноса частицы, достигающие контакта металл-полупроводник со стороны 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 в расчетах учитывается процесс ударной ионизации, процедура Монте-Карло включает моделирование процессов переноса обоих типов носителей заряда – электронов и дырок. Электронный перенос в зоне проводимости кремния моделируется в X и L долинах, а дырок – в валентной зоне с включением процессов переноса в зоне тяжелых и легких дырок, а также спин-отщепленной зоне с учетом эффекта непараболичности и анизотропии законов дисперсии. При этом учитываются основные наиболее значимые механизмы рассеяния носителей заряда аналогично МОП-транзисторным структурам [10, 11]. Процесс ударной ионизации электронами рассматривался в рамках модели Келдыша с мягким порогом [12]. Ударная ионизация дырками не учитывалась, поскольку дырки в данной структуре не являются основными носителями, и пороговая энергия ударной ионизации для них выше, чем для электронов.

На рис. 2 представлены рассчитанные зависимости электростатического потенциала u и напряженности электрического поля F в зависимости от координаты вдоль канала диода x для значений приложенного к аноду напряжения от $V = 0,5$ В до $V = 2,5$ В с шагом $0,5$ В.

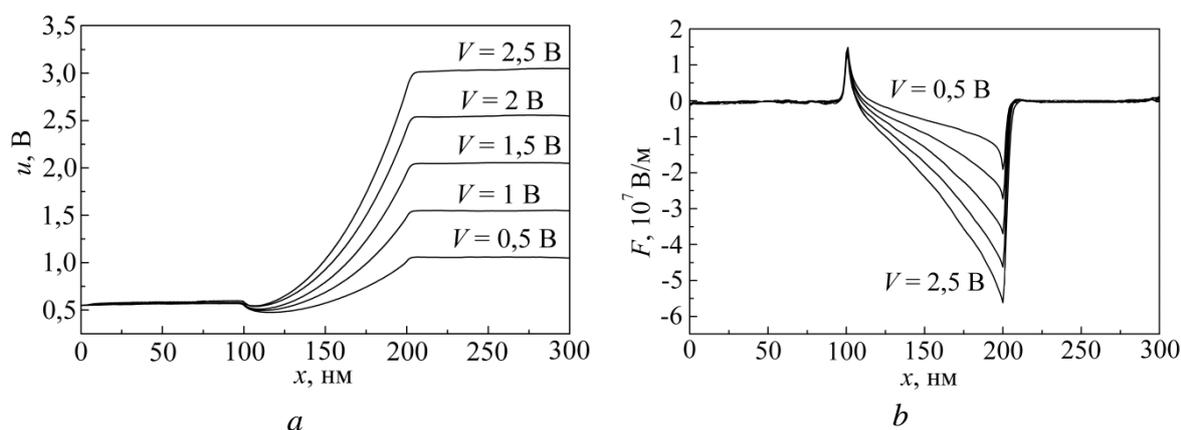


Рис. 2. Зависимость электростатического потенциала u (а) и напряженности электрического поля F (б) от координаты вдоль канала диода x для различных значений приложенного к электродам напряжения

На рис. 3 представлены рассчитанные зависимости дрейфовой скорости электронов v и их средней кинетической энергии E от координаты вдоль канала x при напряжении на аноде $V = 2,5$ В. Как можно видеть из рис. 3, а и рис. 3, б, дрейфовая скорость электронов достигает максимума ближе к первому переходу $n^+ - n$, в то время как ближе ко второму переходу $n - n^+$ наблюдается спад величины дрейфовой скорости. Максимум же энергии электронов наблюдается фактически на границе второго перехода. Данный эффект можно объяснить тем, что в области с высокой энергией важную роль начинают играть процессы рассеяния на междолинных фононах с переходом из долины X в долину L , приводящие к увеличению заселенности долины L . Также необходимо отметить, что для данной короткоканальной структуры не наблюдается выхода дрейфовой скорости электронов в канале на насыщение (в отличие от диодов с более длинными каналами) [3].

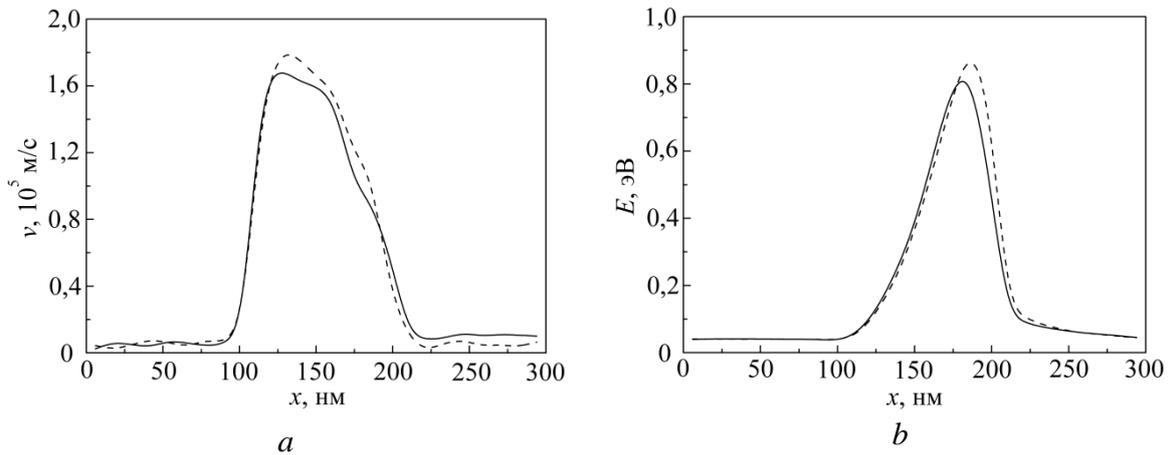


Рис. 3. Зависимость дрейфовой скорости электронов v (a) и их средней кинетической энергии E (b) от координаты вдоль канала диода x . Сплошная кривая – с учетом ударной ионизации, штриховая – без учета ударной ионизации

Для рассматриваемой структуры максимум абсолютной величины напряженности электрического поля наблюдается вблизи второго перехода $n - n^+$ (рис. 2, b), соответственно, наибольшая интенсивность ударной ионизации имеет место в этой области. Как видно из рис. 3, a, процесс ударной ионизации приводит к еще большему уменьшению величины дрейфовой скорости электронов в n -области структуры, а также уменьшению среднего значения их кинетической энергии в области второго перехода $n - n^+$ (рис. 3, b).

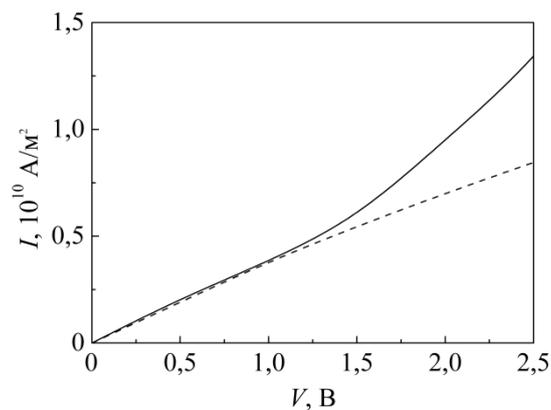


Рис. 4. Зависимость плотности тока в диоде I от напряжения на аноде V . Сплошная кривая – с учетом ударной ионизации, штриховая – без учета ударной ионизации

Результаты моделирования также показывают важность учета процесса ударной ионизации при расчете электрических характеристик $n^+ - n - n^+$ диодов. Это хорошо видно на рис. 4, на котором приведена зависимость плотности тока в диоде от приложенного между электродами напряжения, рассчитанная с учетом и без учета процесса ударной ионизации.

Таким образом, в данной работе проведено самосогласованное моделирование многочастичным методом Монте-Карло электрофизических характеристик субмикронного кремниевого диода со структурой $n^+ - n - n^+$ и исследовано влияние процесса

ударной ионизации на эти характеристики. Показано, что учет процесса ударной ионизации имеет важное значение для адекватного моделирования процессов переноса носителей заряда в такого рода диодных структурах и корректного расчета их вольт-амперных характеристик.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Jacoboni C., Lugli P. The Monte Carlo Method for Semiconductor Device Simulation. Wien ; N. Y. : Springer-Verlag, 1989.
2. Моделирование методом Монте-Карло приборных структур интегральной электроники / В. М. Борздов [и др.]. Минск : БГУ, 2007.
3. One-dimensional Monte Carlo analysis of electron transport in submicrometre silicon structures / M. J. Martin [et al.] // *Semicond. Sci. Technol.* 1994. № 9. P. 1316–1323.
4. 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.
5. Numerical modeling of TeraHertz electronic devices / L. Varani [et al.]. // *J. Comput. Electron.* 2006. № 5. P. 71–77.
6. Muscato O., Di Stefano V. Electro-thermal behaviour of a sub-micron silicon diode // *Semicond. Sci. Technol.* 2013. № 28. P. 1–10.
7. Persano Adorno D., Capizzo M. C., Zarcone M. Monte Carlo simulation of harmonic generation in GaAs structures operating under large-signal conditions // *J. Comput. Electron.* 2007. № 6. P. 27–30.
8. Muscato O., Di Stefano V. Electrothermal Monte Carlo validation of a hydrodynamic model for sub-micron silicon devices // *J. of Physics : Conference Series.* 2009. Vol. 193. P. 1–4.
9. Хокни Р., Иствуд Дж. Численное моделирование методом частиц : пер. с англ. М. : Мир, 1987.
10. Оценка эффективной пороговой энергии межзонной ударной ионизации в глубоко-субмикронном кремниевом n -канальном МОП-транзисторе. *Микроэлектроника* / В. М. Борздов [и др.]. 2014. Т. 43, № 3. С. 188–192.
11. Borzdov A. V., Borzdov V. M., V'yurkov V. V. Monte Carlo simulation of hot electron transport in deep submicron SOI MOSFET // *Proceedings of SPIE.* 2014. Vol. 9440. P. 944013-1–944013-7.
12. Ridley B. K. Soft-threshold lucky drift theory of impact ionization in semiconductors. *Semicond. Sci. Technol.* 1987. № 22. P. 116–122.