

Моделирование фотоотклика в кремниевых фотодиодах с p - n -переходом и pin -структурой

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

¹⁾ Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь,
e-mail: borzdov@bsu.by

²⁾ ОАО «Интеграл» – управляющая компания холдинга «Интеграл», Минск, Беларусь

Многочастичным методом Монте-Карло проведено моделирование фотоотклика в кремниевых фотодиодах с p - n -переходом и pin -структурой при воздействии пикосекундных импульсов излучения с длиной волны 532 нм. Рассмотрены диодные структуры с различной глубиной залегания p - n -перехода и различной толщиной нелегированной области pin -структуры.

Ключевые слова: метод Монте-Карло; фототок; кремниевый фотодиод.

Simulation of photoresponse in silicon photodiodes with p - n -junction and pin -structure

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

¹⁾ Belarusian State University, Minsk, Belarus, e-mail: borzdov@bsu.by

²⁾ JSC “Integral” – Holding Management Company, Minsk, Belarus

Ensemble Monte Carlo simulation of current photoresponse in silicon photodiodes with p - n -junction and pin -structure under the effect of picosecond pulses of irradiation at 532 nm wavelength has been performed. The diode structures with different p - n -junction depths and pin -structures with different thickness of undoped regions have been regarded.

Keywords: Monte Carlo simulation, photocurrent, silicon photodiode.

Введение

Кремниевые фотодиоды находят широкое применение в качестве преобразователей оптического излучения в электрические сигналы. Полупроводниковые фотодиоды могут использоваться как детекторы излучения видимого и инфракрасного диапазонов и работать как в обычном токовом режиме, так и в режиме счета фотонов [1, 2]. Интерес к кремниевым фотодиодам обусловлен, в частности, развитием и широким использованием кремниевой технологии в микроэлектронике и, соответственно, возможностью интеграции фотодиодов в различные микроэлектронные системы в рамках существующих технологий производства интегральных микросхем.

Численное моделирование электрических характеристик фотодиодов является важной задачей в рамках разработки и проектирования таких элементов с целью прогнозирования их рабочих характеристик, а также оптимизации конструктивно-технологических параметров элементов для получения желаемых характеристик. Для моделирования электрических характеристик интегральных субмикронных фотодиодов и фототранзисторов одним из наиболее перспективных методов является самосогласованное моделирование на основе многочастичного метода Монте-

Карло [3–6]. Метод Монте-Карло позволяет проводить моделирование процессов переноса носителей заряда в приборных полупроводниковых структурах с учетом всех значимых процессов рассеяния носителей заряда, а также процессов их генерации-рекомбинации. В случае диодов с p - n -переходом и pin -структурой, работающих в режиме обратного смещения, важным является учет процессов ударной ионизации, а также генерации носителей заряда путем межзонного туннелирования и генерации-рекомбинации через ловушки, обусловленной наличием дефектов в кристаллической решетке полупроводника [7, 8].

В настоящей работе представлены результаты численного моделирования отклика фототока на пикосекундные импульсы излучения видимого спектра в кремниевых фотодиодах с резким p - n -переходом и pin -структурой, работающих в режиме обратного смещения.

1. Модель фотодиода

Схематически структура моделируемого диода с pin -структурой представлена на рис. 1. Отличие диода с резким p - n -переходом от структуры, показанной на рис. 1, заключается в отсутствии нелегированного слоя i -Si. Излучение направлено перпендикулярно плоскости перехода и охватывает область между электродами длиной $L_c = 0,25$ мкм. Толщина структуры вглубь подложки $W_s = 0,5$ мкм. Концентрации донорной и акцепторной примесей в n - и p -областях при расчетах полагались равными 10^{24} м⁻³. Рассмотрены диоды с резким p - n -переходом и глубинами залегания перехода $W_{d1} = 50$ нм, 150 нм и 250 нм. Для диодов с pin -структурой рассмотрены симметричные структуры с $W_{d1} = W_{d2} = 50$ нм, 100 нм и 150 нм (толщины i -областей, соответственно, составляют 400 нм, 300 нм и 200 нм). Температура кристаллической решетки для моделирования задавалась равной 300 К.

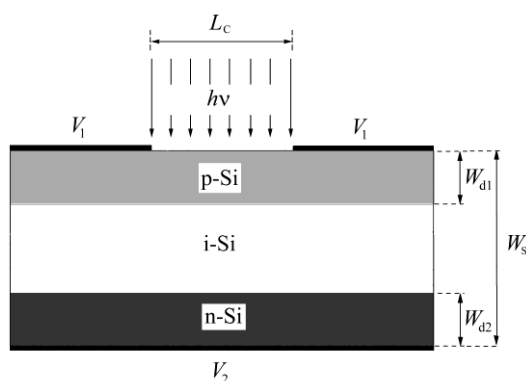


Рис. 1. Схематическое поперечное сечение pin -фотодиода

Расчет фототока в рассмотренных диодных структурах проводился в рамках самосогласованного двумерного моделирования методом частиц, основы которого изложены в [9]. Длина волны излучения составляет для всех расчетов 532 нм, интенсивность излучения – $5 \cdot 10^{10}$ Вт/м², длительность импульса – 1 пс. Излучение включается в момент времени $t = 1$ пс. В качестве модельного приближения полагалось, что интенсивность импульсов постоянна во времени и равномерна по площади поверхности диодной структуры.

При моделировании учитывались процессы рассеяния электронов и дырок на акустических и оптических фононах, плазмонах и ионизированной примеси. В процедуру моделирования включены процессы оптической генерации электронно-дырочных пар при собственном поглощении излучения с учетом процессов отражения от границ раздела материалов. Процесс ударной ионизации электронами и дырками учитывался как отдельный механизм рассеяния с генерацией электронно-дырочных пар. Процессы генерации-рекомбинации носителей заряда путем межзонного туннелирования и через ловушки были включены как механизмы генерации объемного заряда в соответствии с моделями, представленными в [7, 8, 10].

2. Результаты расчетов

На рис. 2 приведены зависимости отклика тока от времени на пикосекундные импульсы излучения в диодной структуре с p - n -переходом (а) и в диоде с pin -структурой (б) при обратном смещении $V_2 - V_1 = 5$ В.

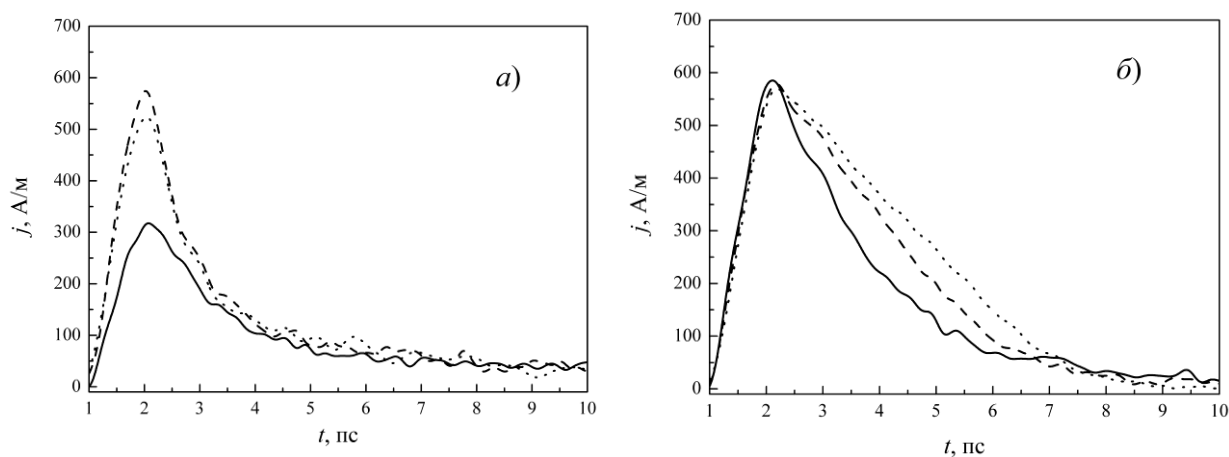


Рис. 2. Зависимости тока от времени в диоде с p - n -переходом (а) и диоде с pin -структурой (б) при обратном смещении 5 В

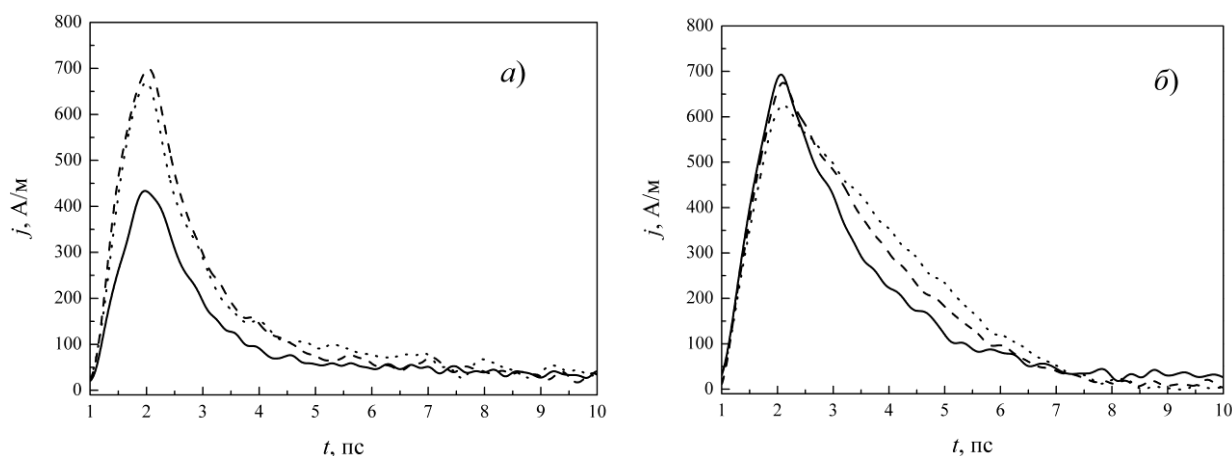


Рис. 3. Зависимости тока от времени в диоде с p - n -переходом (а) и диоде с pin -структурой (б) при обратном смещении 10 В

На рис. 2, *а* сплошная кривая соответствует диоду с глубиной залегания *p-n*-перехода $W_{d1} = 50$ нм, штриховая кривая – $W_{d1} = 150$ нм и пунктирная кривая – $W_{d1} = 250$ нм. На рис. 2, *б* сплошная кривая соответствует диоду с *pin*-структурой при $W_{d1} = W_{d2} = 150$ нм (толщина *i*-области $W_i = 200$ нм), штриховая кривая – $W_{d1} = W_{d2} = 100$ нм ($W_i = 300$ нм) и пунктирная кривая – $W_{d1} = W_{d2} = 50$ нм ($W_i = 400$ нм). На рис. 3 приведены те же зависимости тока от времени, что и на рис. 2, но при обратном смещении 10 В. Как видно из рисунков, для диодов с *p-n*-переходом пиковое значение фототока в значительной степени зависит от глубины залегания *p-n*-перехода. Для диодов с *pin*-структурой наблюдается более плавное затухание фототока после окончания воздействия импульса излучения, при этом с ростом толщины области с собственной проводимостью наблюдается увеличение линейности спада кривой фототока. Такое поведение обусловлено особенностями распределения электрических полей в структуре, а именно наличием области с почти постоянным электрическим полем в *pin*-структуре.

Заключение

С помощью численного самосогласованного моделирования на основе много-частичного метода Монте-Карло проведено моделирование отклика тока в фотодиодах с *p-n*-переходом и фотодиодах с *pin*-структурой при воздействии пикосекундных импульсов излучения с длиной волны 532 нм и интенсивностью $5 \cdot 10^{10}$ Вт/м². Установлены закономерности динамики затухания тока в данных структурах после окончания воздействия импульсов излучения.

Библиографические ссылки

1. Филачев А. М. Твердотельная фотоэлектроника. Фотодиоды. / А. М. Филачев, И. И. Таубкин, М. А. Трищенко. М. : Физматкнига, 2011.
2. Capasso F. Physics of avalanche photodiodes (In “Semiconductors and semimetals. Lightwave communication technology, vol 22, Part D. Photodetectors”) / ed. by R. K. Willardson and A. C. Beer. Orlando : Academic Press, 1985. Ch. 1.
3. Mogilestue C. Monte Carlo simulation of semiconductor devices: Springer; 1993.
4. Full-band Monte Carlo simulations of photo excitation in silicon diode structures / S. Aboud [et al.] // Semicond. Sci. Technol. 2004. Vol. 19. P. S301–S303.
5. 2D Monte Carlo simulation of silicon waveguide-based single-photon avalanche diode for visible wavelengths / S. Yanikgonul [et al.] // Optics Express. 2018. Vol. 26, iss. 12. P. 15232–15246.
6. Borzdov A. V. Monte Carlo simulation of picosecond laser irradiation photoresponse of deep submicron SOI MOSFET / A. V. Borzdov, V. M. Borzdov, V. V. Vyurkov // Proceedings of SPIE. 2022. Vol. 12157. P. 121570Y-1–121570Y-6.
7. A new analytical diode model including tunneling and avalanche breakdown / G. A. M. Hurkx [et al.] // IEEE Trans. Electron Devices. 1992. Vol. 39, iss. 9. P. 2090–2098.
8. Hurkx G. A. M. A new recombination model for device simulation including tunneling / G. A. M. Hurkx, D. B. M. Klaassen, M. P. G. Knuvers // IEEE Trans. Electron Devices. 1992. Vol. 39, iss. 2. P. 331–338.
9. Моделирование методом Монте-Карло приборных структур интегральной электроники. / В. М. Борздов [и др.]. Минск : БГУ, 2007.
10. Comparison of band-to-band tunneling models in Si and Si-Ge junctions / Y. Jiao [et al.] // Journal of Semiconductors. 2013. Vol. 34, iss. 9. P. 092002-1–092002-5.