

СЕКЦИЯ «КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ И СИСТЕМ»

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОТОТОКА В КРЕМНИЕВЫХ ФОТОДИОДАХ С 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

С помощью многочастичного метода Монте-Карло проведено моделирование тока в кремниевых фотодиодах с pin-структурой при обратном смещении и воздействии пикосекундных импульсов излучения с длиной волны 532 и 650 нм. Рассмотрены диодные структуры с различной толщиной нелегированной области.

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

ВВЕДЕНИЕ

Полупроводниковые фотодиоды широко применяются в качестве преобразователей оптического излучения в электрические сигналы. Кремниевые 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].

Численное моделирование электрических характеристик фотодиодов является важной задачей в рамках разработки и проектирования таких элементов с целью прогнозирования их рабочих 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 оптической генерации и лавинного умножения. В представленной работе проведено численное моделирование отклика тока на пикосекундные импульсы излучения видимого спектра в кремниевых фотодиодах с pin-структурой, работающих в режиме обратного смещения.

МОДЕЛЬ ФОТОДИОДА

Схематически структура моделируемого фотодиода с pin-структурой представлена на рис. 1. Излучение направлено нормально к поверхности

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 [9, 10].

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

На рис. 2 приведены зависимости отклика плотности тока от времени на пикосекундные импульсы излучения с длиной волны 532 нм (рис. 2а) и 650 нм (рис. 2б) в диоде с рin-структурой при обратном смещении $V_2 - V_1 = -10$ В.

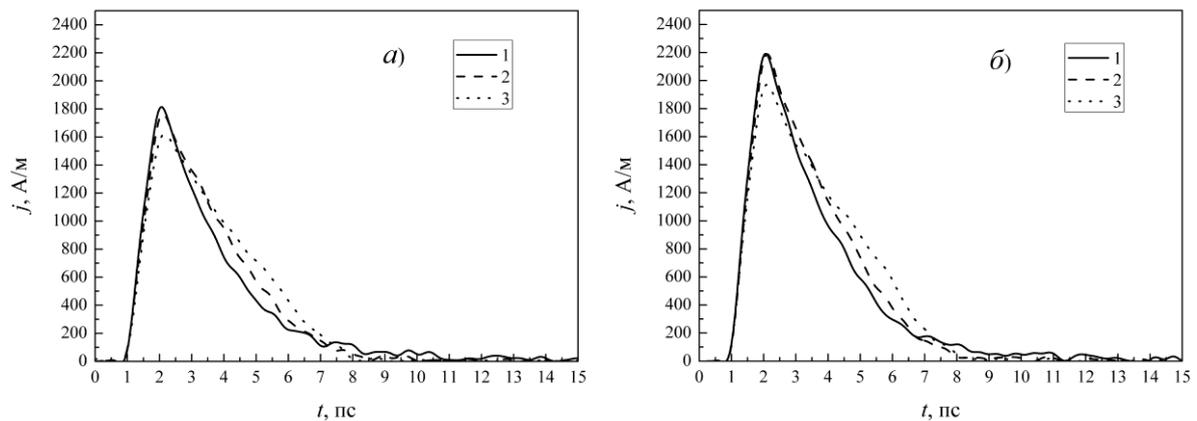


Рис. 2. Зависимости плотности тока от времени в диоде с рin-структурой при обратном смещении -10 В

На рис. 2 кривые 1 соответствуют диоду с рin-структурой при $W_{d1} = W_{d2} = 150$ нм (толщина i-области $W_i = 200$ нм), кривые 2 – $W_{d1} = W_{d2} = 100$ нм ($W_i = 300$ нм) и кривые 3 – $W_{d1} = W_{d2} = 50$ нм ($W_i = 400$ нм). Как видно из рисунков, для диодов с большей толщиной i-области наблюдается меньшее значение пикового значения тока и немного более медленное его затухание после окончания воздействия импульса излучения. Такое поведение можно объяснить тем, что с увеличением толщины i-области уменьшается напряженность электрического поля в ней, что, в свою очередь, приводит к уменьшению значения фототока. Также для рассмотренных условий отражения излучения (все падающее излучение поглощается в рабочей области прибора) величины фототоков получаются меньше при поглощении излучения с длиной волны 532 нм, нежели 650 нм. Связано это, предположительно, с тем, что при поглощении фотонов с длиной волны 532 нм средняя энергия сгенерированных электронно-дырочных пар в среднем оказывается выше, и в этом случае увеличивается интенсивность процессов рассеяния носителей заряда,

прежде всего на фонах, приводящих к междолинным переходам для электронов и межзонным для дырок. Последнее, в свою очередь, приводит к уменьшению подвижности носителей заряда.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью численного самосогласованного моделирования на основе многочастичного метода Монте-Карло проведено моделирование фототока в кремниевых фотодиодах с *pin*-структурой при воздействии пикосекундных импульсов излучения с длиной волны 532 и 650 нм и интенсивностью $5 \cdot 10^{10}$ Вт/м². Установлены закономерности динамики затухания тока в фотодиодах после окончания воздействия импульсов излучения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Филачев А. М., Таубкин И. И., Трищенко М. А. Твердотельная фотоэлектроника. Фотодиоды // М.: Физматкнига, 2011. С. 448.
2. Modern methods of detecting single photons and their application in quantum communications / Koziy A. A., Losev A. V., Zavodilenko V. V. [et al.] // Quantum Electronics. 2021. Vol. 51, No. 8. P. 655–669. DOI: 10.1070/QEL17566
3. *Moglestue C.* Monte Carlo simulation of semiconductor devices // Wien: Springer, 2013. P. 334.
4. Full-band Monte Carlo simulations of photo excitation in silicon diode structures / Aboud S., Saraniti M., Goodnick S. [et al.] // Semicond. Sci. Technol. 2004. Vol. 19. P. S301–S303. DOI: 10.1088/0268-1242/19/4/101
5. *Yanikgonul S., Leong V., Ong J. R.* 2D Monte Carlo simulation of silicon waveguide-based single-photon avalanche diode for visible wavelengths // Optics Express. 2018. Vol. 26, No. 12. P. 15232–15246. DOI: 10.1364/OE.26.015232
6. *Borzdov A. V., Borzdov V. M., Vyurkov V. V.* Monte Carlo simulation of picosecond laser irradiation photoresponse of deep submicron SOI MOSFET // Proc. SPIE. 2022. Vol. 12157. P. 121570Y-1–121570Y-6. DOI: 10.1117/12.2624174
7. *Борздов В. М., Жевняк О. Г., Комаров Ф. Ф., Галенчик В. О.* Моделирование методом Монте-Карло приборных структур интегральной электроники // Минск: БГУ, 2007. С. 175.
8. *Wang H., Liu X., Zhang Z. M.* Absorption coefficients of crystalline silicon at wavelengths from 500 nm to 1000 nm // International Journal of Thermophysics. 2013. Vol. 34, P. 213–225. DOI: 10.1007/s10765-013-1414-2
9. Impact ionization model for full band Monte Carlo simulation / Kamakura Y., Mizuno H., Yamaji M. [et al.] // Journal of Applied Physics. 1994. Vol. 75, No. 7. P. 3500–3507. DOI: 10.1063/1.356112
10. A model of impact ionization due to the primary hole in silicon for a full band Monte Carlo simulation / Kunikiyo T., Takenaka M., Morifuji M. [et al.] // Journal of Applied Physics. 1996. Vol. 79, No. 10. P. 7718–7725. DOI: 10.1063/1.362375