

- Международная юбилейная научно-практическая конференция, посвященная 90-летию Гомельского государственного университета имени Франциска Скорины (Гомель, 19–20 ноября 2020 г.) : материалы : в 3 ч. Ч. 3 / Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины ; редкол. : С. А. Хахомов (гл. ред.) [и др.]. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2020. – С. 147–151.
5. Барайшук, С. М., В. Ф. Гременок, В. В. Тульев, И. С. Ташлыков. Изучение поверхности структур металл/кремний, приготовленных ионно-ассистированным нанесением покрытий. ФХОМ 1 (2011): 66.
6. Нгуен Т. Д., Занько А. И., Голосов Д. А. и др. Влияние отжига на структурно-фазовые и электрофизические свойства пленок оксида ванадия. Доклады БГУИР. 2021; 19(3):22–30.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКЛИКА ТОКА КРЕМНИЕВОГО ФОТОДИОДА С p - n -ПЕРЕХОДОМ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ ИМПУЛЬСОВ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

А. В. Борздов¹, В. М. Борздов¹, Д. Н. Буйновский¹, 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 тока кремниевого фотодиода с p - n -переходом при воздействии импульсов излучения видимого диапазона пикосекундной длительности. Исследован отклик тока диода на импульсы лазерного излучения с длиной волны 532 нм и интенсивностью 5×10^{10} Вт/м².

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

SIMULATION OF CURRENT RESPONSE OF SILICON PHOTODIODE WITH p - n -JUNCTION ON THE EFFECT OF PULSED LASER IRRADIATION

A. V. Borzdov¹, V. M. Borzdov¹, D. N. Buinouski¹, 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 in silicon photodiode with p - n -junction under the effect of picosecond pulses of irradiation of visible spectrum has been performed. The diode current response on the pulses of laser radiation with 532 nm wavelength and $5 \cdot 10^{10}$ W/m² intensity has been studied.

Key words: silicon photodiode; Monte Carlo method; photocurrent.

ВВЕДЕНИЕ

Кремниевые фотодиоды, в том числе и лавинные, к настоящему времени нашли широкое применение в качестве преобразователей оптических сигналов в электрические. Полупроводниковые фотодиоды могут использоваться в качестве детекторов излучения видимого и инфракрасного диапазонов и работать как в обычном токовом режиме, так и в режиме счета фотонов [1, 2]. Большой интерес к кремниевым фото-

диодам обусловлен, в частности, широким развитием кремниевой технологии в современной микро- и нанoeлектронике, и, соответственно, возможностью интеграции таких элементов в различные микроэлектронные системы в рамках этой технологии производства интегральных микросхем.

Численное моделирование работы фотодиодов является на сегодняшний день актуальной задачей в связи с необходимостью прогнозирования электрических характеристик приборов с заданными конструктивно-технологическими параметрами, а также для оптимизации этих параметров с целью получения желаемых характеристик. Для исследования рабочих характеристик фотодиодов весьма эффективным методом является численное самосогласованное моделирование на основе многочастичного метода Монте-Карло [3–5]. Данный метод является мощным средством для моделирования процессов переноса носителей заряда в полупроводниковых приборных структурах и позволяет рассчитывать электрофизические параметры и электрические характеристики с учетом всех значимых процессов рассеяния носителей заряда, а также механизмов их генерации и рекомбинации. Для адекватного моделирования работы диодов при обратном смещении необходим учет физических процессов, приводящих к генерации носителей заряда в области пространственного заряда р-п-перехода. Для субмикронных приборных структур и значительных уровней легирования их рабочих областей существенным является учет процессов генерации носителей заряда, обусловленных межзонным туннелированием и лавинным умножением вследствие ударной ионизации. Также вследствие наличия дефектов в реальной кристаллической структуре кремния значительное влияние на рабочие характеристики диода может оказывать процесс генерации-рекомбинации носителей заряда через ловушки [6, 7].

В настоящей работе представлены результаты численного моделирования отклика тока кремниевое фотодиода с р-п-переходом при обратном смещении на пикосекундные импульсы лазерного излучения видимого диапазона.

МОДЕЛЬ ДИОДА С *р-п*-ПЕРЕХОДОМ

Схематически структура исследуемого диода представлена на рисунке 1. Размеры моделируемых областей приборной структуры следующие: расстояние между электродами $L_c = 0.35$ мкм, толщина структуры – $W_s = 0.5$ мкм. Размеры электродов полагались равными 0.1 мкм. Уровни легирования *р*- и *п*- областей акцепторной и донорной примесью соответственно, приняты равными 10^{24} м⁻³. Температура кристаллической решетки кремния при моделировании – 300 К.

Рассматриваемая диодная структура моделируется самосогласованно в рамках двумерного моделирования методом частиц, общие принципы которого изложены в [8]. Топология диода такова, что лазерное излучение направлено вдоль плоскости р-п-перехода и охватывает только область между электродами. Длительность лазерного импульса равна 1 пс. Также предполагается, что интенсив-

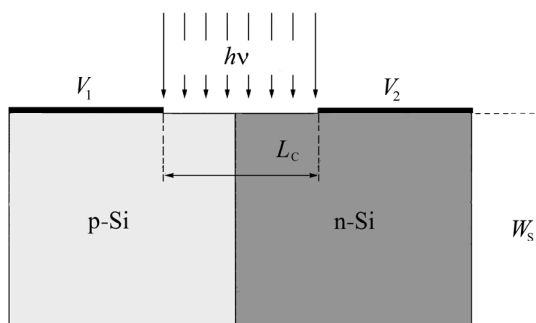


Рисунок 1. Схематическое поперечное сечение моделируемого диода

ность импульса излучения постоянна во времени и однородна в пространстве. Перенос электронов и дырок моделировался с учетом процессов рассеяния на оптических и акустических фононах, ионизированной примеси, плазмонах, а также процессов оптической генерации и ударной ионизации. Также в численную модель переноса были включены процессы генерации-рекомбинации в соответствии с моделями, описанными в [6, 7, 9].

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 2 приведены зависимости плотности тока диода от времени при облучении одиночным пикосекундным импульсом лазерного излучения для нескольких значений обратного напряжения между электродами, а именно 5, 7 и 10 В. Длина волны излучения составляет 532 нм. Интенсивность излучения – $5 \cdot 10^{10}$ Вт/м². Предполагается, что лазерное излучение включается в момент времени $t = 1$ пс. До начала воздействия излучения устанавливался стационарный режим переноса носителей заряда в диоде при заданном обратном смещении на электродах с величиной обратного тока, равной значению темнового тока.

Из рисунка 2 следует, что для рассматриваемой структуры время затухания фототока после окончания воздействия излучения, за которое устанавливается темновое значение тока, составляет порядка 3 пс. С ростом обратного смещения в рассматриваемом диапазоне напряжений время затухания тока незначительно уменьшается, что связано с увеличением напряженности поля и скорейшей экстракцией носителей заряда из области пространственного заряда. Как показали проведенные расчеты, скорость затухания тока после воздействия излучения в диодах с p - n -переходом при обратном смещении выше, чем в кремниевых диодных структурах металл-полупроводник-металл, рассмотренных нами ранее в [10], и существенно выше, чем в детекторах на основе субмикронных КНИ-МОП-транзисторов, рассмотренных в [11].

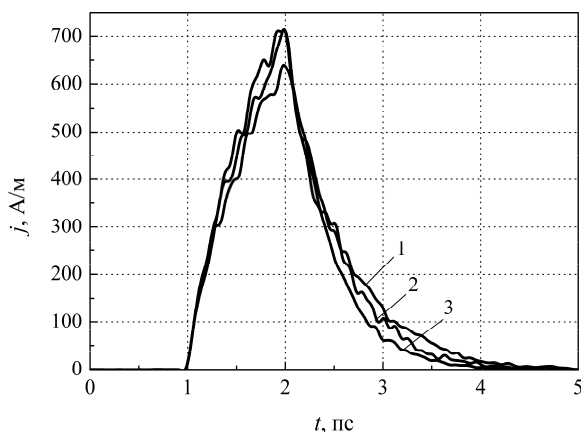


Рисунок 2. Зависимость плотности тока диода от времени при обратном смещении и облучении пикосекундным импульсом с длиной волны 532 нм.

Кривая 1 соответствует величине обратного смещения 5 В, кривая 2 – 7 В, кривая 3 – 10 В.

Объяснить это можно тем, что в области пространственного заряда p - n -перехода, при заданном расстоянии между электродами и для рассмотренного диапазона напряжений устанавливается достаточно высокая напряженность электрического поля, способствующая скорейшей экстракции сгенерированных носителей заряда из рабочей области прибора. При этом следует отметить, что для рассмотренных уровней легирования и напряжений на электродах не наблюдается значительного лавинного умножения носителей заряда вследствие ударной ионизации, что в других условиях могло бы привести к пробое p - n -перехода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью численного моделирования на основе многочастичного метода Монте-Карло исследован отклик тока кремниевого фотодиода с p - n -переходом при воздействии пикосекундного импульса лазерного излучения интенсивностью $5 \cdot 10^{10}$ Вт/м² с длиной волны 532 нм. Результаты расчетов позволяют заключить, что меньшее время затухания тока по сравнению с такими фоточувствительными структурами, как фотодетекторы на основе кремниевых структур металл-полупроводник-металл и КНИ-МОП-транзисторов, обусловлено наличием достаточно сильного электрического поля в области пространственного заряда p - n -перехода и невысоким уровнем лавинного умножения электронов и дырок при заданных уровнях легирования рабочих областей и величинах обратного смещения на электродах диода.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Филачев, А. М. Твердотельная фотоэлектроника. Фотодиоды / А. М. Филачев, И. И. Таубкин, М. А. Трищенко. – М.: Физматкнига, 2011. – 448 с.
2. Capasso, F. Physics of avalanche photodiodes / F. Capasso: 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. I. – P. 2–168.
3. Mogilestue, C. Monte Carlo simulation of semiconductor devices / C. Mogilestue. – Springer, 1993. – 334 p.
4. Full-band Monte Carlo simulations of photo excitation in silicon diode structures / S. Aboud [et al.] // Semicond. Sci. Technol. — 2004. — V. 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. — V. 26, № 12. — P. 15232–15246.
6. A new analytical diode model including tunneling and avalanche breakdown / G.A.M. Hurkx [et al.] // IEEE Trans. Electron Devices. — 1992. — V. 39, № 9. — P. 2090–2098.
7. 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. — V. 39, № 2. — P. 331–338.
8. Hockney, R. W. Computer simulations using particles / R. W. Hockney, J. W. Eastwood — McGraw-Hill, New York, 1981. — 640 p.
9. Jiao, Y. Comparison of band-to-band tunneling models in Si and Si-Ge junctions / Y. Jiao [et al.] // Journal of Semiconductors. — 2013. — V. 34, № 9. — P. 092002-1–092002-5.
10. Моделирование методом Монте-Карло кремниевого фотодетектора со структурой металл-полупроводник-металл / А.В. Борздов, В.М. Борздов // Взаимодействие излучений с твердым телом (ВИТТ-2021): матер. 14-й Междунар. конф., посвящ. 100-летию Белорус. гос. ун-та, Минск, Беларусь, 21—24 сент. 2021 г. / редкол.: В.В. Углов (гл. ред.) [и др.]. — Минск: БГУ, 2021. — С. 23–25.
11. 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 // Proc. SPIE. — 2022. — V. 12157. — P. 121570Y-1–121570Y-6.