

ТОКОПЕРЕНОС В ГЕТЕРОСТРУКТУРЕ ПЛЕНКА УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК НА КРЕМНИИ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ИК-ИЗЛУЧЕНИЕМ

А.А. Кураптова, А.Л. Данилюк

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
ул. П. Бровки 6, Минск 220013, Беларусь, anku21qwerty@gmail.com, danilyuk@bsuir.by

В данной работе представлены результаты компьютерного моделирования в программном пакете Comsol Multiphysics переноса заряда и протекания тока в гетероструктуре пленка одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ) n -типа проводимости толщиной 20 нм на кремниевой подложке n -типа проводимости под воздействием электромагнитного излучения мощностью 1 мВт в диапазоне длин волн λ от 750 до 1400 нм. В процессе моделирования было учтено наличие ловушек носителей заряда в объеме и на поверхности пленки, а также на границе раздела полупроводников, представляющих слой оксида кремния, формирующегося на поверхности кремниевой подложки. В результате моделирования было установлено, что в диапазоне длин волн 750-1100 нм ток протекал в направлении от поверхности пленки ОУНТ к основанию кремниевой подложки, а в диапазоне $\lambda=1125$ -1400 нм, а также при отсутствии излучения, от основания подложки к поверхности пленки ОУНТ. Полученные результаты могут способствовать разработке фотодетекторов в ближнем ИК-диапазоне.

Ключевые слова: компьютерное моделирование; углеродные нанотрубки; кремний; гетероструктура; пленка; инфракрасное излучение; датчик.

CURRENT TRANSFER IN A HETEROSTRUCTURE OF CARBON NANOTUBE FILM ON SILICON UNDER IR IRRADIATION

A.A. Kuraptsova, A.L. Danilyuk

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
6 P. Brovka Str., 220013 Minsk, Belarus, anku21qwerty@gmail.com, danilyuk@bsuir.by

This paper presents the results of computer modeling in the Comsol Multiphysics software package of charge transfer and current flow in a heterostructure of a film of single-walled carbon nanotubes (SWCNTs) of n -type conductivity with a thickness of 20 nm on a silicon substrate of n -type conductivity under the influence of electromagnetic radiation with a power of 1 mW in the wavelength range λ from 750 to 1400 nm. In the process of modeling, the presence of charge carrier traps in the volume and on the surface of the film, as well as at the interface of semiconductors, representing a layer of silicon oxide formed on the surface of the silicon substrate, was taken into account. As a result of the modeling, it was established that in the wavelength range of 750-1100 nm, the current flowed in the direction from the surface of the SWCNT film to the base of the silicon substrate, and in the range of $\lambda=1125$ -1400 nm, as well as in the absence of radiation, from the base of the substrate to the surface of the SWCNT film. The maximum difference in currents in the presence and absence of radiation 69,1 μ A was revealed at a wavelength $\lambda=1025$ nm. The results obtained can contribute to the development of photodetectors in the near IR range.

Keywords: computer modeling; carbon nanotubes; silicon; heterostructure; film; infrared radiation; sensor.

Введение

Инфракрасное излучение — это часть спектра солнечного излучения, которая непосредственно примыкает к красной части видимой области спектра. Отдельно выделяют ближнюю инфракрасную область спектра, 750-1400 нм [1].

На сегодняшний день ИК-технологии используются в приборах ночного видения, термографии, самонаведении, инфракрасных нагревателях, астрономии, спек-

троскопии, передаче данных, дистанционном управлении техникой, медицине, пищевой промышленности.

Углеродные нанотрубки (УНТ) привлекают все больший интерес в научных исследованиях благодаря возможности изменения их оптических, электрических и механических свойств. В зависимости от диаметра, длины, типа и ориентации трубок, УНТ могут использоваться в прозрачных электродах, ультрачувствительных фото-

детекторах, высокоэффективных солнечных элементах, светодиодах и т.д. [2].

Пленка ОУНТ представляет собой трехмерный образец толщиной обычно десятки нанометров, состоящий из переплетенной сетки нанотрубок, каждая из которых характеризуется своими свойствами, такими как диаметр, длина, хиральность и т.д. Однако пленку ОУНТ можно рассматривать, как целостный объект, что упрощает интерпретацию данных [2, 3].

В пленке ОУНТ в процессе формирования возникают различные ловушки носителей заряда. В основном они вызваны адсорбцией ионов кислорода O^- , что обеспечивает n-тип проводимости ОУНТ [2, 4, 5].

Материалы и методы исследования

Исследуемая гетероструктура представляла собой пленку ОУНТ n-типа проводимости толщиной 20 нм на кремниевой подложке также n-типа проводимости толщиной 1 мкм. Ранее было показано [6], что гетероструктура Si/ОУНТ при толщине пленки ОУНТ 20 нм оказалась наиболее чувствительной к падающему излучению 750 нм по сравнению с другими толщинами пленки. Моделирование было проведено с помощью программного пакета Comsol Multiphysics.

Мощность излучения, падающего на структуру перпендикулярно поверхности пленки ОУНТ, равнялась 1 мВт. Температура 300 К. Также задавался комплексный коэффициент преломления для кремния и пленки ОУНТ [7, 8]. Основные параметры полупроводников, использованных в моделировании, представлены в таблице 1. В процессе формирования пленки ОУНТ на кремнии образуется тонкий слой диоксида кремния SiO_2 , характеризующийся ловушечными состояниями донорного типа [9]. В моделируемой структуре они были представлены ловушками на границе раздела Si/ОУНТ плотностью 10^{14} см^{-2} и энергией 0.34 эВ, считая от дна зоны проводимости, вероятность захвата носителей заряда которыми задавалась через среднее эффективное сечения захвата равное $2.838 \cdot 10^{-12}$

см^2 . Вероятность захвата носителей заряда нейтральными ловушками в объеме и на поверхности пленки ОУНТ с энергией залегания 0.1 эВ ниже дна зоны проводимости [5] задавалась через среднее эффективное сечения захвата $1.913 \cdot 10^{-12} \text{ см}^2$. Также с использованием значений относительной диэлектрической проницаемости, эффективных масс носителей заряда в полупроводниках были рассчитаны значения тепловой скорости носителей заряда и эффективной плотности состояний в зоне проводимости и валентной зоне [10].

Табл. 1. Основные параметры полупроводников

	n-Si	n-ОУНТ
E_g , эВ	1.124	0.3
χ , эВ	4.05	4.2
ϵ	11.7	4.75
$\tau_{n,p}$, мкс	10	$4 \cdot 10^{-4}$
N_d , $1/\text{см}^3$	10^{16}	10^{18}
μ_n , $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	1450	56
μ_p , $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	500	56

Результаты и их обсуждение

В результате моделирования были получены зависимости тока I , протекающего между омическими контактами в основании кремниевой подложки и поверхности пленки ОУНТ толщиной 20 нм, от λ (рис. 1).

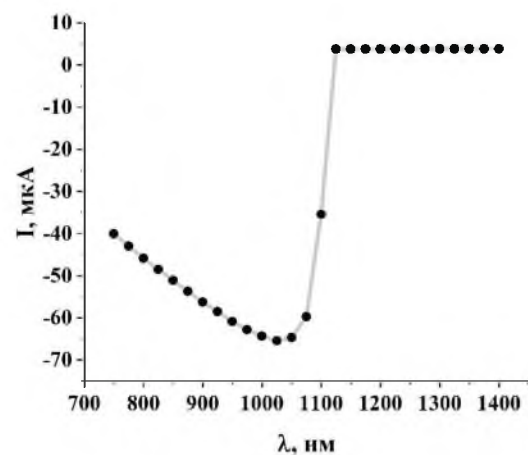


Рис. 1. Зависимость тока I от длины волны λ

Моделирование плотностей тока, протекающих в структуре, показало, что электрический ток протекает в структуре в направлении от основания кремниевой

подложки к поверхности пленки ОУНТ в условиях отсутствия падающего излучения и в диапазоне $\lambda=1125-1400$ нм. В условиях падающего излучения с длиной волны $\lambda=750-1100$ нм ток направлен от поверхности пленки к основанию кремниевой подложки. Как видно из рисунка 1, при длинах волны $\lambda=1100$ и 1125 нм происходит изменение направления тока I .

При отсутствии излучения внутренний ток I_0 между контактами был равен 3.63 мкА.

Максимальный ток при наличии излучения $I=-65.4$ мкА в диапазоне $\lambda=750-1100$ нм наблюдался при значении $\lambda=1025$ нм, монотонно уменьшаясь до $I=-40$ мкА при $\lambda=750$ нм и $I=-35.4$ мкА при $\lambda=1100$ нм. В диапазоне $\lambda=1125-1400$ нм наблюдалось монотонное увеличение I от 3.76 мкА при $\lambda=1125$ нм до 3.87 мкА при $\lambda=1400$ нм.

Разница $\Delta I=I-I_0$ между токами при наличии и отсутствии излучения в диапазоне $\lambda=1125-1400$ нм незначительна и монотонно возрастает от $\Delta I=0.13$ мкА при $\lambda=1125$ нм до 0.23 мкА при $\lambda=1400$ нм. В диапазоне $\lambda=750-1025$ нм максимальное значение $\Delta I=-63.1$ мкА наблюдается при $\lambda=1025$ нм и монотонно убывает до $\Delta I=-43.7$ мкА при $\lambda=750$ нм и до $\Delta I=-39.1$ мкА при $\lambda=1100$ нм.

Заключение

В результате моделирования токов, протекающих в гетероструктуре пленка ОУНТ на кремниевой подложке при падающем излучении в ближнем ИК диапазоне, была выявлена существенная зависимость тока I от длины волны λ в диапазоне $\lambda=750-1100$ нм и слабая зависимость I от λ в диапазоне $\lambda=1125-1400$ нм. Также было показано, что ток I при наличии излучения сравним с током I_0 при отсутствии излучения в диапазоне $\lambda=1125-1400$ нм, но значительно отличается в диапазоне $\lambda=750-1100$ нм, что позволяет сделать вывод о преобладании

вклада в формировании тока I фотоэлектрических процессов в кремниевой подложке над процессами в пленке ОУНТ.

Полученные результаты могут содействовать разработке полупроводниковых оптических устройств, работающих в ИК-диапазоне.

Библиографические ссылки

1. Матюшкин А.В., Колесник Т.А. Передача данных с помощью инфракрасного излучения. *Инновационные научные исследования* 2021; 2(14): 127-133.
2. Hu X., Hou P., Liu C., Cheng H. Carbon nanotube/silicon heterojunctions for photovoltaic applications. *Nano Materials Science* 2019; 1(3): 156-172.
3. Kumar R., Khan M.A., Anupama A.V., Krupanidhi S.B., Sahoo B. Infrared photodetectors based on multiwalled carbon nanotubes: Insights into the effect of nitrogen doping. *Applied Surface Science* 2021; 538: 148187-148197.
4. Algharagholy L.A. Defects in carbon nanotubes and their impact on the electronic transport properties. *Journal of Electronic Materials* 2019; 48(4): 2301-2306.
5. Zaumseil J. Luminescent Defects in Single-Walled Carbon Nanotubes for Applications. *Advanced Optical Materials* 2022; 10(2): 2101576-2101589.
6. Курапцова А.А., Данилюк А.Л. Спектрально-зарядовые свойства гетероструктуры пленка углеродных нанотрубок / кремний под воздействием инфракрасного излучения. В кн.: Бойправ О.В. [и др.], редкол. Матер. XXIII Междунар. науч.-техн. конф. «Технические средства защиты информации» (Минск, 08 апреля 2025 г.). Минск: БГУИР; 2025. С. 197-201.
7. Green M.A. Self-consistent optical parameters of intrinsic silicon at 300K including temperature coefficients. *Solar Energy Materials & Solar Cells* 2008; 92: 1305-1310.
8. Ermolaev G.A., Tsapenko A.P., Volkov V.S., Anisimov A.S., Gladush Y.G., Nasibulin A.G. Express determination of thickness and dielectric function of single-walled carbon nanotube films. *Applied Physics Letters* 2020; 116(23): 231103-231107.
9. Rodríguez-de Marcos L.V., Larruquet J.I., Méndez J.A., Aznárez J.A. Self-consistent optical constants of SiO₂ and Ta₂O₅ films. *Optical Materials Express* 2008; 6(11): 3622-3637.
10. Поклонский Н.А., Горбачук Н.И., Сягло А.И., Шпаковский С.В. Исследование переходных процессов в полупроводниковых структурах: пособие. Минск, БГУ; 2009. 105 с.