

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОТОДЕТЕКТОРА
УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОПЕРЕХОДА
ОСУНТ / КРЕМНИЙ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР**

Е.А. Дронина, Н.Г. Ковальчук, А.Л. Данилюк, С.Л. Прищепа

*Учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики
и радиоэлектроники», Минск, Беларусь*

Аннотация. Исследованы электрические и оптические характеристики фотодетектора ультрафиолетового излучения на основе гетероперехода ОСУНТ/кремний в температурном диапазоне от 20К до 300К. Полученные результаты позволяют получить важное представление о количественной характеристике высоты барьера Шоттки между умеренно легированным кремнием и пленкой из ОСУНТ. Также подобное исследование необходимо для более глубокого понимания фундаментальных принципов работы разрабатываемых на их основе фотодетекторов и расширения их рабочих температур.

Ключевые слова: Тонкая пленка из одностенных углеродных нанотрубок; химическое парофазное осаждение; рамановская спектроскопия; барьер Шоттки; высота барьера Шоттки; фактор неидеальности; фотодетектор на основе ОСУНТ; фоточувствительность.

ELECTRICAL AND OPTICAL CHARACTERISTICS OF UV PHOTODETECTOR BASED ON SWCNT / SILICON HETEROJUNCTION IN A WIDE TEMPERATURE RANGE

L.A. Dronina, N.G. Kovalchuk, A.L. Danilyul, S.L. Prischepa
*Educational Institution "Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics",
Minsk, Belarus*

Abstract. The electrical and optical characteristics of the ultraviolet photodetector based on SWCNT/silicon heterojunction in the temperature range from 20K to 300K have been investigated. The results obtained provide important insights into the quantitative characterization of the Schottky barrier height between moderately doped silicon and SWCNT film. Also, such a study is necessary for a deeper understanding of the of the fundamental principles of operation of photodetectors developed on their basis and expansion of their operating temperatures.

Keywords: Single-walled carbon nanotube thin film; chemical vapor deposition; Raman spectroscopy; Schottky barrier; Schottky barrier height; ideality factor; SWCNT-based photodetector; responsivity.

Введение

Фотодетекторы являются критически важными компонентами в современных технологиях, с приложениями, варьирующимися от мониторинга окружающей среды до систем связи, визуализации и медицинской диагностики [1]. Способность обнаруживать свет и преобразовывать его в электрический сигнал является фундаментальным процессом, который привел к разработке различных устройств, включая видеокамеры, солнечные элементы и оптические датчики [2, 3]. За последние несколько десятилетий область фотодетектирования претерпела значительные изменения, вызванные достижениями в области материаловедения, приборостроения и появлением новых приложений, требующих более высокой производительности.

Большое внимание уделяется поиску и применению в фотодетекторах новых материалов, способных повысить чувствительность, скорость обработки информации и расширить диапазон длин волн оптоэлектронных устройств. С этой точки зрения большим потенциалом обладают углеродосодержащие материалы, в первую очередь графен и углеродные нанотрубки (УНТ). Они прозрачны в видимой части спектра, а также в ультрафиолетовом и ближнем красном диапазонах, обладают высокой проводимостью. Подвижность носителей заряда в них достигает рекордных значений. Все это делает их весьма привлекательными для использования в качестве верхнего электрода в барьерах Шоттки, которые хорошо пропускают свет и быстро доставляют фотогенерированные носители заряда к электрическим контактам [4]. В данной работе рассматриваются свойства фотодетектора, сформированного на основе гетероперехода кремний/ пленка одностенных углеродных нанотрубок (ОСУНТ) с металлическим типом проводимости.

Результаты

Образцы изготавливались путем осаждения пленки ОСУНТ толщиной 30 нм на подложку из слабо легированного кремния. Пленка выращивалась методом химического парофазного осаждения при атмосферном давлении [5]. Полученные пленки исследовались с помощью спектроскопии комбинационного рассеивания света и ИК-спектроскопии. Было установлено, что трубки являются одностенными,

со средним диаметром 1,08 нм. Гистограмма распределения диаметров ОСУНТ показана на рис. 1.

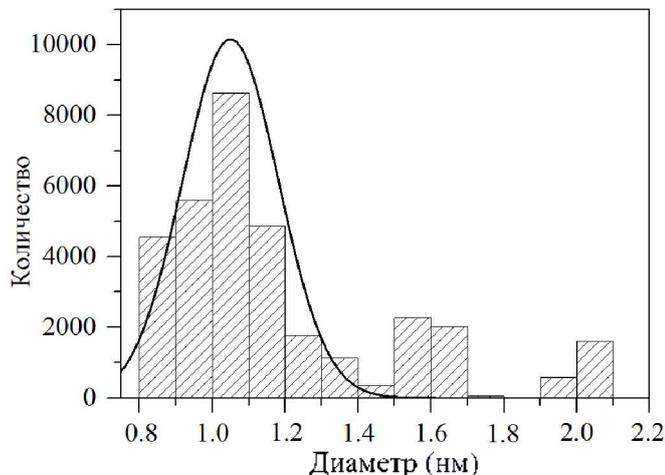


Рис. 1. Гистограмма распределения диаметров ОСУНТ (сплошная линия – распределение Гаусса)
Fig. 1. Histogram of SWCNTs diameter distribution (the solid line is for Gaussian fit)

Исследовались как темновые вольт-амперные характеристики (ВАХ) гетеропереходов ОСУНТ/Si, так и ВАХ при облучении длиной волны 375 нм. Измерения проводились в широком температурном диапазоне, от комнатной температуры до 10 К.

Из темновых ВАХ, в рамках модели термоэлектронной эмиссии, были получены значения высоты барьера Шоттки и коэффициента неидеальности, связанные с отклонением ВАХ от экспоненциального вида. Температурные зависимости этих параметров приведены на рис. 2.

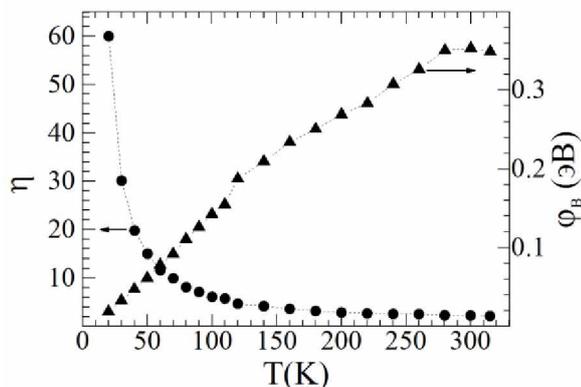


Рис. 2. Температурные зависимости коэффициента неидеальности и высоты барьера контактов Шоттки ОСУНТ/Si

Fig. 2. Temperature dependencies of the ideality coefficient and SWCNT/Si Schottky barrier height

Полученные зависимости свидетельствуют о наличии неоднородностей барьера с размерами меньше, чем ширина области пространственного заряда контакта (ОПЗ) [6, 7]. Действительно, наиболее вероятной физической причиной снижения барьера при низких температурах является наличие локальных барьеров малой высоты. С учетом того, что основным механизмом транспорта является термоэлектронная эмиссия, со снижением температуры малые барьеры начинают проявляться с большей вероятностью, чем высокие. В то же время рост коэффициента неидеальности свидетельствует о том, что при низких температурах, помимо термоэлектронной

эмиссии, необходимо рассматривать и другие механизмы транспорта, такие как дрейф и диффузия носителей заряда, в области обедненного слоя, рассеяние на оптических фонах, квантово-механическое отражение, туннелирование через барьер [8,9].

Полученные зависимости параметров гетероперехода отражались на его фотодетектирующих свойствах. Анализируя обратные ветви ВАХ при облучении, были определены значения фоточувствительности при разных температурах. Эта зависимость приведена на рисунке 3а. Данные относятся к максимальной используемой плотности мощности облучения, 192 мВт/см². При этом было установлено, что со снижением плотности мощности облучения фоточувствительность растет, и для плотностей мощности 13 мВт/см² она достигает 0,9 А/Вт при 200 К, рис. 3, б.

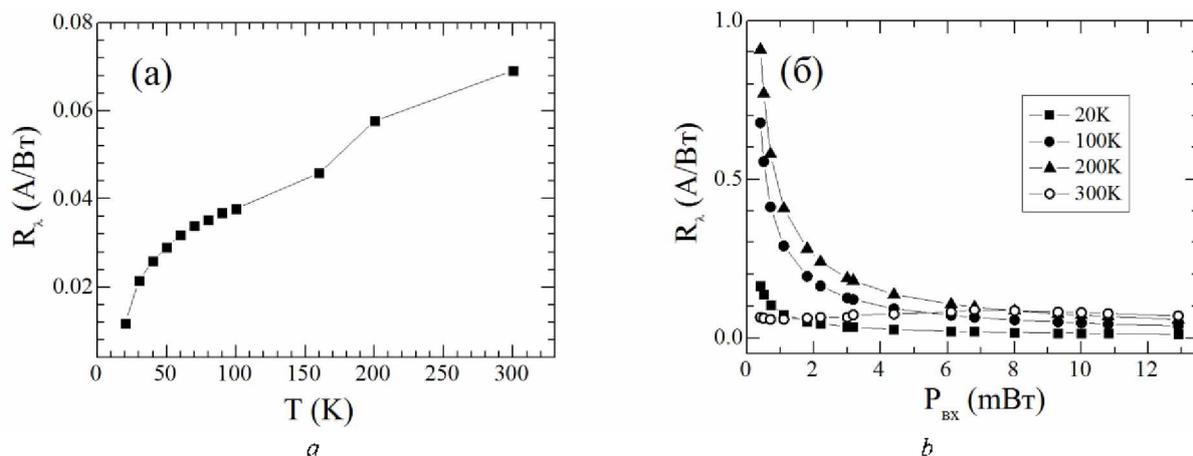


Рис. 3. Зависимость фоточувствительности гетероперехода ОСУНТ/Si от температуры (а) и мощности облучения (б)

Fig. 3. Responsivity of SWCNT/Si heterojunction as a function of temperature (a) and light power density (b)

Заключение

Выполнены исследования влияния температуры на параметры барьера Шоттки ОСУНТ/Si. Пленки ОСУНТ осаждались методом ХПО непосредственно на рабочее окно фотодетектора. Одностенность углеродных нанотрубок доказана методом спектроскопии комбинационного рассеяния света. Параметры барьера извлекались из анализа ВАХ, измеренных в диапазоне температур от 20 до 300 К. Полученные данные проанализированы в рамках теории термоэлектронной эмиссии. Установлено, что пространственные неоднородности барьера сильно влияют на параметры гетероперехода, оцененные в рамках термоэлектронной теории. На это указывает нелинейность температурных зависимостей как высоты барьера, так и фактора неидеальности. Последнее изменяется от 2,13 при комнатной температуре, что довольно типично для барьера Шоттки на основе SWCNT/Si SB, до 60 при $T = 20$ К. Такое поведение параметров при низких температурах объяснялось уменьшением роли термоэлектронной эмиссии и увеличением вклада других механизмов переноса тока в области низких температур. К таковым относятся дрейф, диффузия, туннелирование, рассеяние на оптических фонах и квантово-механическое надбарьерное отражение. Фоточувствительность сформированных фотодиодов зависела от температуры и мощности облучения. Она снижалась с понижением температуры и ростом мощности облучения. Полученное максимальное значение фоточувствительности в 0,9 А/Вт при малых мощностях облучения сравнимо с лучшими параметрами для фотодетекторов на основе ОСУНТ.

Список использованных источников / References

1. Fan P., Chettiar U.K., Cao L., Afshinmanesh F., Engheta N., Brongersma M.L. (2012) An Invisible Metal-Semiconductor Photodetector. *Nature Photonics*. 6, 380–385.
2. Fu X.W., Liao Z.M., Zhou Y.B., Wu H.C., Bie Y.Q., Xu J., et al. (2012) Graphene/ZnO Nanowire/Graphene Vertical Structure Based Fast-Response Ultraviolet Photodetector. *Applied Physics Letters*. 100 (22), 223114.
3. Wu S., Chen Y., Wang X., Jiao H., Zhao Q., Huang X. et al. (2022) Ultra-Sensitive Polarization-Resolved Black Phosphorus Homojunction Photodetector Defined by Ferroelectric Domains. *Nature Communications*. 13, 3198.
4. Scagliotti M., Salvato M., De Crescenzi M., Castrucci P., Kovalchuk N. G., Komissarov I. V. et al. (2019) 2D Carbon Material/Silicon Heterojunctions for Fast Response Self-Powered Photodetector. *International Journal of Nanoscience*. 18 (3&4), 1940088.
5. Dronina L. A., Kovalchuk N. G., Komissarov I. V., Danilyuk A. L., Labunov V. A., Lutsenko E. V., et al. (2025) Properties of Single-Walled Carbon Nanotube Film/Si Heterojunctions Fabricated In-Situ. *Applied Nanoscience*. 15, 2.
6. Werner J. H., Güttler H. H. (1991) Barrier Inhomogeneities at Schottky Contacts. *Journal of Applied Physics* 69 (3), 1522-1533.
7. Tung R. T. (1992) Electron Transport at Metal-Semiconductor Interfaces: General Theory. *Physical Review B* 45 (23), 13509-13523.
8. Sze S. M., Ng K. K. (2007) *Physics of Semiconductor Devices*. USA. John Wiley & Sons.
9. Kao K. C., Hwang W. (1981) *Electrical Transport in Solids*. England. Pergamon Press.

Сведения об авторах

Дронина Е.А., аспирант кафедры микро- и нанoeлектроники (МНЭ), учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» (БГУИР). lizadronina@yandex.by.
Ковальчук Н.Г., науч. сотр. НИЛ «Интегрированные микро- и наносистемы», БГУИР. n.kovalchuk@bsuir.by.
Данилюк А.Л. канд. физ.-мат. наук, доц., доц. кафедры МНЭ БГУИР. danilyuk@bsuir.by.
Прищепа С.Л., д-р физ.-мат. наук, проф., проф. кафедры защиты информации БГУИР. prischepa@bsuir.by

Information about the authors

Dronina L.A., Postgraduate Student at the Department of Micro and Nanoelectronics, Educational Institution "Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics" (BSUIR). elizadronina@yandex.by.
Kovalchuk N. G. Researcher of the Research Laboratory at the Department of Micro- and Nanoelectronics. e-mail. n.kovalchuk@bsuir.by.
Danilyuk A. L. Cand. of Sci., Associate Professor at the Department of Micro- and Nanoelectronics, BSUIR. danilyuk@bsuir.by.
Prischepa S. L. Dr. Hab., Professor, Professor of the Information Protection Department, BSUIR. prischepa@bsuir.by.