

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.11.9>

УДК: 620.3

СПЕКТРАЛЬНЫЙ ОТКЛИК ЕДИНИЧНОЙ НАНОПРОВОЛОКИ ZnO

М.В. Евстафьева¹, А.В. Зотов¹, А.В. Иржак^{1,2}, В.В. Коледов²,
А.П. Орлов², А.В. Прокунин², С.В. Фон Гратовски², П.В. Лега²,
И.И. Мусабилов³, Д.А. Винник⁴, В.И. Корепанов¹

¹ Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН
142432, Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 6

² Институт радиоэлектроники им. В.А. Котельникова РАН
125009, Москва, ул. Моховая, 11, корп.7

³ Институт проблем сверхпластичности металлов РАН
450001, Уфа, ул. Степана Халтурина, 39

⁴ Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д.9.

Статья поступила в редакцию 18 ноября 2024 г

Аннотация. Миниатюризация приборов на одномерных полупроводниковых нанокристаллах актуальна для высокочастотных приложений, фотоники, различных датчиков. Оксид цинка, один из активно изучаемых для таких целей материалов, может быть получен несколькими технологиями. Из них газофазное осаждение отличается низкой степенью дефектности получаемых структур. Целью данной работы было изготовление тестового прибора на единичном нанокристалле ZnO методами наноманипулирования и изучение его спектрального отклика в диапазоне от ближнего ИК до УФ. Поскольку одно из перспективных применений ZnO – датчики на УФ излучение, задачей было проверить селективность отклика на диапазон длин волн ниже 400 нм.

Ключевые слова: наноманипулирование, ZnO, полупроводники, датчики.

Финансирование: Министерство науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения 075-15-2024-560 от 25.04.2024

Автор для переписки: Корепанов Виталий Игоревич, korepanov@iptm.ru

Введение

ZnO активно изучается как материал для высокочастотных приложений [1], диодов [2], УФ и газовых датчиков [3,4,5], УФ лазеров [6,7] и ряда других применений.

Одномерные наноструктуры ZnO могут быть получены как единичные бездислокационные монокристаллы, и для миниатюризации электронных компонент приборы на таких структурах представляют особый интерес. Одна из ключевых проблем в изготовлении таких структур – манипуляция такими нанокристаллами и интеграция их в электрические микроприборы.

Традиционный подход к изготовлению приборов на единичных наностержнях выглядит следующим образом [8]: на первом этапе выращивается массив наностержней. Затем наностержни отделяются от массива, например, ультразвуковой обработкой, и переносятся на подложку. Следующим шагом делаются электрические контакты методом литографии или сфокусированным ионным пучком (СИП). Основной недостаток такого подхода – это контакт наностержней с химическими реагентами, которые могут необратимо изменить их характеристики.

Целями нашей работы было изготовление наноприбора на единичной нанопроволоке ZnO при помощи технологии наноманипуляции, а также изучение спектрального отклика единичного монокристалла ZnO в диапазоне от ближнего ИК до УФ.

1. Эксперимент.

Массивы одномерных наностержней ZnO на кремниевых подложках были получены методом химического осаждения из газовой фазы. Методика синтеза подробно была описана ранее в [9]. Вкратце, осаждение проводилось

в двухзонном кварцевом реакторе, в одной из зон которого испарялся цинк, в другой он реагировал с кислородом и осаждался на подложки. Полученные в таком методе наностержни оксида цинка представляют собой высокочистые монокристаллы с малым содержанием точечных дефектов. Для настоящей работы важно также, что стержни ориентированы перпендикулярно подложке.

3D-манипуляция нанопроводами ZnO проводилась в вакуумной камере двухлучевой системы SEM/FIB, оснащенной двумя наноманипуляторами Kleiniek. Для разработки прототипов NWFET использовались ионно-лучевое химическое осаждение из газовой фазы платины на вольфрамовых микроглах и прямой захват нанопроводов нанопинцетом с памятью формы для 3D-наноманипуляции. Нанопинцеты для экспериментов были разработаны на основе аморфных/кристаллических сплавов с памятью формы Ti_2NiCu , как описано в [10]. Термоупругий мартенситный переход из высокотемпературного аустенитного состояния в низкотемпературное мартенситное состояние обеспечивает контролируемый изгиб актуатора и обратимое закрытие/открытие зазора нанопинцетом. В поликристаллическом сплаве Ti_2NiCu это происходит при температурах от 46 до 52 °C, под действием электрического тока от 0 до 5 мА.

Для изучения влияния излучения различной длины волны на сенсорные свойства структуры исследовали спектральную зависимость, используя в качестве источника света спектрофотометр (BR-D590, Biobase). Образец помещали в кюветный отсек и облучали монохроматическим светом с требуемой длиной волны (от 190 до 1100 нм). При этом через наностержень пропускался фиксированный ток (1 μ A) и записывалось напряжение.

2. Обсуждение результатов

Выбранные образцы представляли собой поликристаллическую плёнку с массивом упорядоченных наностержней ZnO длиной около 10 мкм и диаметром 250-300 нм, а также отдельные длинные нанопроволоки длиной более 100 мкм и диаметром 700-800 нм (Рис. 1). Одна длинная

нанопроволока ZnO была перемещена с помощью 3D-манипуляционной системы на подложку Si/SiO₂ с нанесенными встречно-штыревыми платиновыми электродами.

На рис. 2 показано электронно-микроскопическое изображение отдельной нанопроволоки ZnO, расположенной на паре встречно-штыревых платиновых электродов.

Вольт-амперная характеристика такой структуры приведена на рис. 3. Её линейный вид позволяет сделать вывод о хорошем качестве контактов к нанопроволоке.

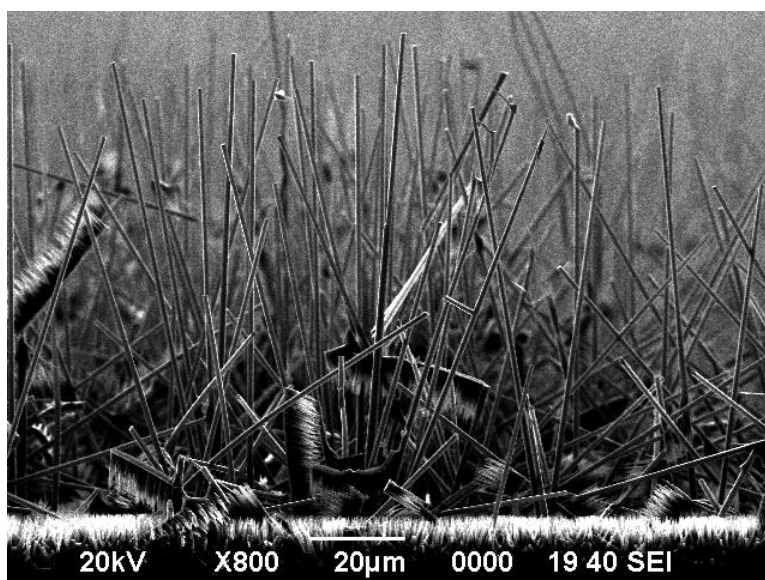


Рис. 1. Изображение образца наностержней ZnO в сканирующем электронном микроскопе.

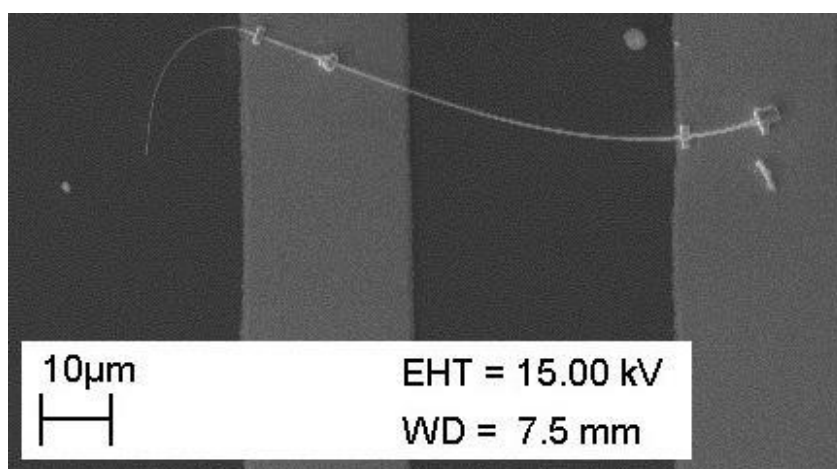


Рис. 2. Электронно-микроскопическое изображение отдельной нанопроволоки ZnO, расположенной на паре встречно-штыревых платиновых электродов.

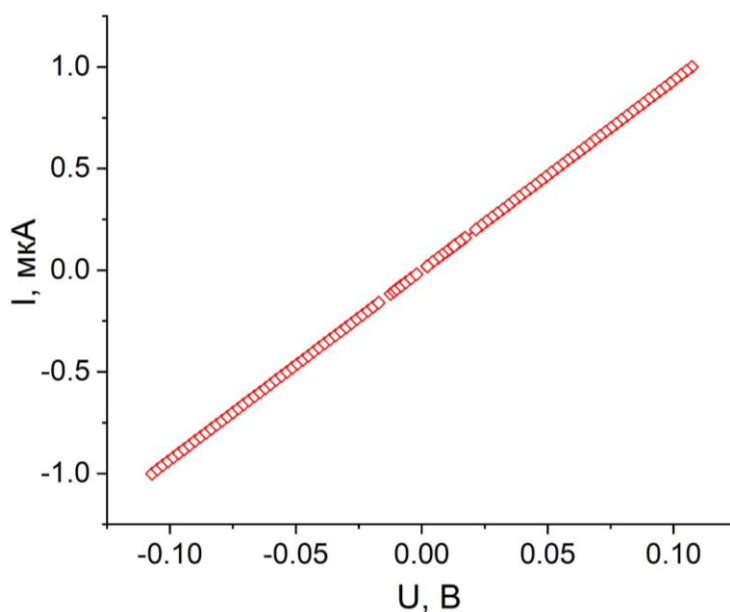


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика структуры на основе одиночной нанопроволоки ZnO.

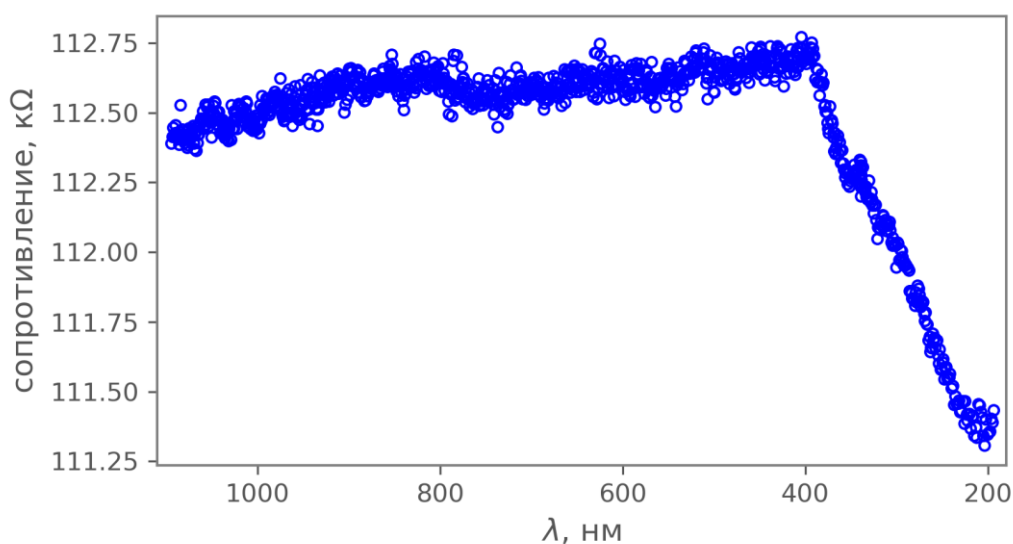


Рис. 4. Спектральная чувствительность одиночной нанопроволоки ZnO.

На рис. 4 представлена спектральная чувствительность сенсора на одиночной нанопроволоке. Из этой зависимости видно, что сенсор на основе одиночной нанопроволоки ZnO избирательно реагирует на весь диапазон УФ-излучения. УФ-излучение принято делить на 3 диапазона. УФ-С (200...280) нм, УФ-В (280...315) нм и УФ-А (315...400) нм. Таким образом, максимальное воздействие на сенсор на основе нанопроволок ZnO

приходится на диапазон С ультрафиолетового излучения. Видимое излучение не влияет на проводимость одиночной нанопроволоки ZnO.

Заключение

По технологии наноманипулирования изготовлена тестовая структура на единичной нанопроволоке ZnO. Получена спектральная зависимость влияния излучения разных длин волн на сенсорные свойства структуры на одиночной нанопроволоке ZnO. Показано, что на проводимость структуры влияет только УФ-излучение во всех диапазонах, причем максимальный эффект оказывает излучение УФ-С-диапазона.

Финансирование: Работа была поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения 075-15-2024-560 от 25.04.2024.

Литература

1. Н.И. Ползикова, С.Г. Алексеев, В.А. Лузанов, and А.О. Раевский, “Резонансная спиновая накачка в акустическом СВЧ-резонаторе со структурой ZnO-ГТГ-ЖИГ/Pt,” // Изв. РАН. Сер. физ., vol. 83, no. 7, pp. 910–913, 2019, <http://dx.doi.org/10.1134/S0367676519070329>.
2. V. Vasanthi, N. Sivanantham, L. Saathvika, and N. Gopalakrishnan, “Metal oxide charge transport materials for light emitting diodes - An overview,” // Materials Science in Semiconductor Processing, vol. 165, p. 107679, Oct. 2023, <http://dx.doi.org/10.1016/j.mssp.2023.107679>.
3. B. Yang, N. V. Myung, and T. Tran, “1D Metal Oxide Semiconductor Materials for Chemiresistive Gas Sensors: A Review,” // Adv Elect Materials, vol. 7, no. 9, p. 2100271, Sep. 2021, <http://dx.doi.org/10.1002/aelm.202100271>.
4. D. Nunes et al., “Metal oxide nanostructures for sensor applications,” // Semicond. Sci. Technol., vol. 34, no. 4, p. 043001, Apr. 2019, <http://dx.doi.org/10.1088/1361-6641/ab011e>.

5. Y. Zou, Y. Zhang, Y. Hu, and H. Gu, “Ultraviolet Detectors Based on Wide Bandgap Semiconductor Nanowire: A Review,” // *Sensors*, vol. 18, no. 7, p. 2072, Jun. 2018, <http://dx.doi.org/10.3390/s18072072>.
6. H. Palneedi et al., “Laser Irradiation of Metal Oxide Films and Nanostructures: Applications and Advances,” // *Advanced Materials*, vol. 30, no. 14, p. 1705148, Apr. 2018, <http://dx.doi.org/10.1002/adma.201705148>.
7. A.N. Gruzintsev, A.N. Red’kin, Z.I. Makovei, E.E. Yakimov, and C. Barthou, “Random lasing in vertical ZnO nanorods,” // *Semiconductors*, vol. 41, no. 6, pp. 708–712, 2007, <http://dx.doi.org/10.1134/S1063782607060188>.
8. M.A. Khaderbad et al., “Electrical actuation and readout in a nanoelectromechanical resonator based on a laterally suspended zinc oxide nanowire,” // *Nanotechnology*, vol. 23, no. 2, p. 025501, Jan. 2012, <http://dx.doi.org/10.1088/0957-4484/23/2/025501>.
9. А. Редькин, М. Рыжова, Е. Якимов, and А. Грузинцев, “Упорядоченные массивы наностержней оксида цинка на кремниевых подложках,” // *Физика и техника полупроводников*, vol. 47, no. 2, p. 216, 2013.
10. P. Lega et al., “Composite Materials Based on Shape-Memory Ti₂NiCu Alloy for Frontier Micro- and Nanomechanical Applications,” // *Adv Eng Mater*, vol. 19, no. 8, p. 1700154, Aug. 2017, <http://dx.doi.org/10.1002/adem.201700154>.

Для цитирования:

Евстафьева М.В., Зотов А.В., Иржак А.В., Коледов В.В., Орлов А.П., Прокунин А.В., Фон Гратовски С.В., Лега П.В., Мусабилов И.И., Винник Д.А., Корепанов В.И. Спектральный отклик единичной нанопроволоки ZnO. // *Журнал радиоэлектроники*. 2024. – № 11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.11.9>