

Исследование зависимости электрических свойств кремниевых нанонитей от проводимости кремниевой пластины

Д.М. Русаков^{1,*}, Д.В. Гусев^{1,†}, К.А. Гончар^{1,2,‡}, А.С. Ильин¹, А.С. Воронцов¹

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д.1, стр. 2

²Институт биологического приборостроения РАН
Россия, 142290, Московская область, Пущино, ул. Институтская, д. 7
(Поступила в редакцию 06.11.2024; подписана в печать 19.12.2024)

В последние годы кремниевые нанонити (КНН) привлекают значительное внимание исследователей благодаря своим уникальным электрическим и оптическим свойствам, которые делают их перспективными для применения в различных областях, включая нанoeлектронику и сенсоры. Настоящая работа представляет собой углубленное и систематическое исследование КНН, синтезированных из кристаллических пластин с сопротивлениями 10–20 Ом·см и 1–5 мОм·см, с целью детального анализа их электрических свойств. Основное внимание уделяется вольт-амперным характеристикам (ВАХ), частотной зависимости проводимости и исследованию импеданса. Эти методы позволяют выявить ключевые аспекты, определяющие поведение наноструктур, и установить взаимосвязь между характеристиками кристаллической пластины и электрофизическими свойствами материала. Полученные результаты показывают значительные изменения в поведении проводимости при снижении сопротивления кристаллической пластины, что может свидетельствовать об улучшении электрофизических характеристик КНН. Вольт-амперные характеристики образца с сопротивлением 1–5 мОм·см для обеих конфигураций (планарной и сэндвич), а также сэндвич конфигурация образца с сопротивлением 10–20 Ом·см демонстрируют отчетливое диодоподобное поведение, что можно объяснить формированием потенциальных барьеров на границе между слоями. Механизм прыжковой проводимости оказывается доминирующим для всех образцов.

PACS: PACS: 73.63.-b.

УДК: 537.31

Ключевые слова: кремниевые нанонити, металл-стимулированное химическое травление, импедансная спектроскопия, вольт-амперные характеристики, структурные и электрические характеристики.

ВВЕДЕНИЕ

В современной научной области наноматериалов исследование электрических свойств низкоразмерных полупроводниковых систем привлекает значительное внимание, особенно в контексте кремниевых наноструктур. Кремниевые нанонити (КНН) представляют собой перспективные объекты для разработки различных электронных устройств, включая биосенсоры для детектирования бактерий и вирусов [1–6], микроэлектроды, суперконденсаторы [7, 8] и солнечные элементы [9, 10], благодаря своим уникальным электронным и оптическим свойствам. Особый интерес представляет исследование электрических характеристик [11], вертикально ориентированных КНН с целью их применения в микро- и нанoeлектронике.

В предыдущей работе [12] были исследованы образцы КНН на кристаллических пластинах с высоким сопротивлением и было выявлено, что такие образцы демонстрируют определенные закономерности в поведении вольт-амперных характеристик и частотной зависимости проводимости на переменном токе. В данной работе анализ продолжается с использованием образцов с существенно меньшим сопротивлением кристал-

лической пластины. Основная гипотеза заключается в том, что уменьшение сопротивления кристаллической пластины приведет к значительным изменениям электрических характеристик нанонитей, в частности вольт-амперных характеристик и импеданса. Ожидается, что это окажет влияние на механизмы переноса заряда, такие как прыжковая проводимость, и на взаимодействие носителей заряда с поверхностью нанонитей.

Целью данной работы является исследование влияния сопротивления кристаллической пластины на электрические свойства КНН, включая вольт-амперные характеристики и частотную зависимость проводимости.

1. МЕТОДИКИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОБРАЗЦОВ И ИЗМЕРЕНИЙ

КНН были получены методом металл-стимулированного химического травления (МСХТ) пластины c-Si p-типа проводимости с кристаллографической ориентацией (100) и удельным сопротивлением 10–20 Ом·см (образец SiNW1) и 1–5 мОм·см (образец SiNW2). Предварительно пластину c-Si очищали от возможных загрязнений путем промывания в ацетоне и изопропанолe в ультразвуковой ванне, а затем в 5М HF для снятия оксида. После этого пластину c-Si погружали в раствор 0.01 М AuCl₃ и 5М HF в соотношении 1:1 по объёму на 15 с, в результате

* rusakov.dm20@physics.msu.ru

† gusevdm@my.msu.ru

‡ k.a.gonchar@gmail.com

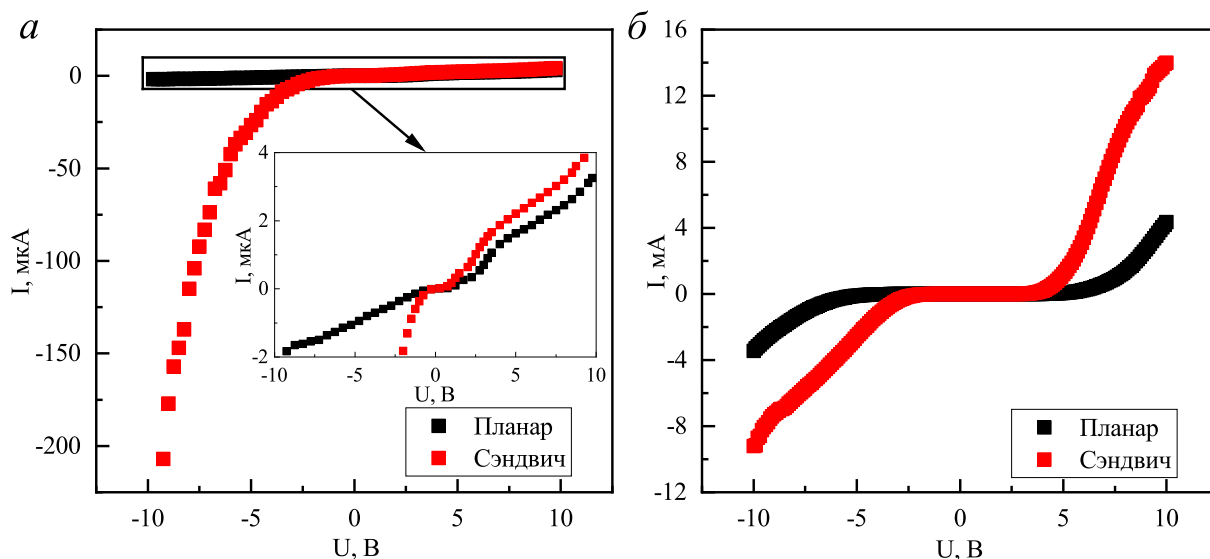


Рис. 1. ВАХ: а — образца SiNW1, б — образца SiNW2

чего поверхность с-Si покрывалась золотыми наночастицами. Далее пластину с-Si, покрытую золотом, помещали в раствор 5М HF и 30% перекиси водорода в соотношении 10:1 по объёму, где и происходило травление в местах, покрытых золотыми наночастицами. Затем для удаления золотых наночастиц образец помещали в царскую водку (раствор азотной (HNO₃) и соляной (HCl) кислот в соотношении 3:1 по объёму) на 5 мин. Получение КНН происходило при комнатной температуре.

На образцы напылялись алюминиевые контакты размером 1.5×3.4 мм на расстоянии 1.2 мм. Напыление алюминиевых контактов проводилось методом термического напыления на установке ВУП-5. Контакты были нанесены двух типов. Для исследования проводимости в поперечном относительно нанонитей направлении были напылены контакты на поверхности нанонитей. Использование этой конфигурации контактов будет в дальнейшем называться планарной конфигурацией. Для исследования проводимости в продольном относительно нанонитей направлении были нанесены контакты также на кремниевую кристаллическую пластину. Исследование продольной проводимости при этом проводилось путем приложения напряжения между контактом на поверхности нанонитей и контактом на кремниевой кристаллической пластине. Использование этой конфигурации контактов будет называться сэндвич-конфигурацией.

Исследование электрических характеристик КНН осуществлялось при помощи двух ключевых методов: измерения импеданса и вольт-амперных характеристик. Для проведения измерений на переменном токе использовался импеданс-анализатор HP 4192A, работающий в широком диапазоне частот от 10 Гц до 13 МГц. Амплитуда подаваемого переменного напряжения со-

ставляла 0.05 В. Измерения на постоянном токе проводились с помощью пикоамперметр-источника Keithley 6487. При измерении вольт-амперной характеристики напряжение изменялось от -10 В до 10 В с шагом 0.25 В. Увеличение напряжения и измерение производились каждые 2 с.

2. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

2.1. Вольт-амперные характеристики

На рис. 1 представлены вольт-амперные характеристики (ВАХ) образцов КНН с высоким сопротивлением (SiNW1) и низким сопротивлением (SiNW2) кристаллической пластины в планарной и сэндвич-конфигурациях. Для сэндвич-конфигурации образца SiNW1 вольт-амперная характеристика имеет несимметричный вид и выпрямляющий характер, схожий с диодной вольт-амперной характеристикой, в отличие от планарной конфигурации, имеющей линейный вид.

В отличие от образца SiNW1, ВАХ образца SiNW2 демонстрируют более выраженные нелинейные свойства. Как в планарной, так и в сэндвич-конфигурации образца SiNW2 наблюдается линейное поведение при низких напряжениях и резкое возрастание в области больших напряжений, что соответствует биполярному диоду. При этом заметно, что в планарной конфигурации требуется большее напряжение для переключения, чем в сэндвич-конфигурации.

Данное диодоподобное поведение можно объяснить образованием потенциальных барьеров на границе между нанонитями и кристаллической пластиной [13]. Также возможно формирование барьера в результате взаимодействия молекул, адсорбированных на поверх-

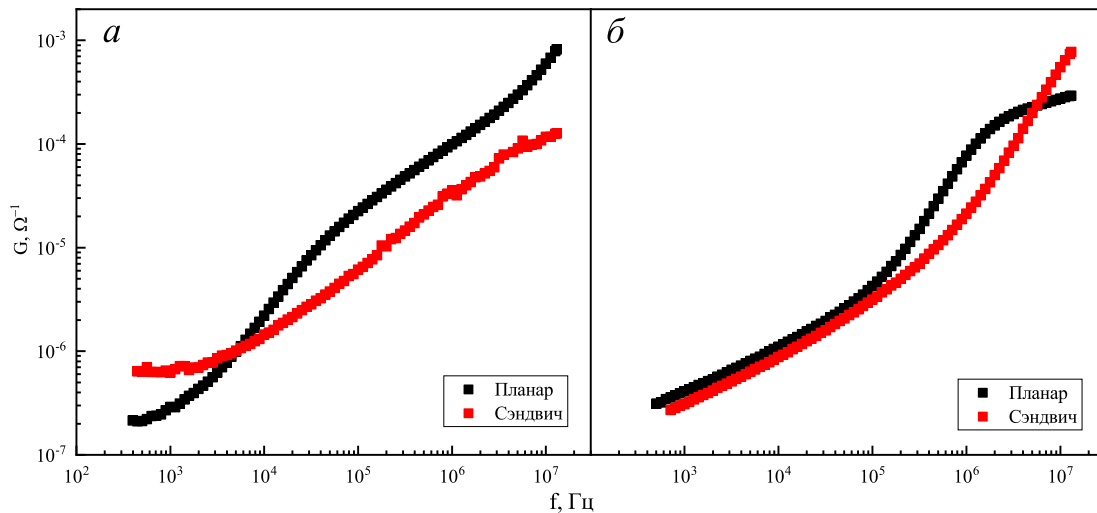


Рис. 2. Частотная зависимость проводимости: *a* — образца SiNW1, *б* — образца SiNW2

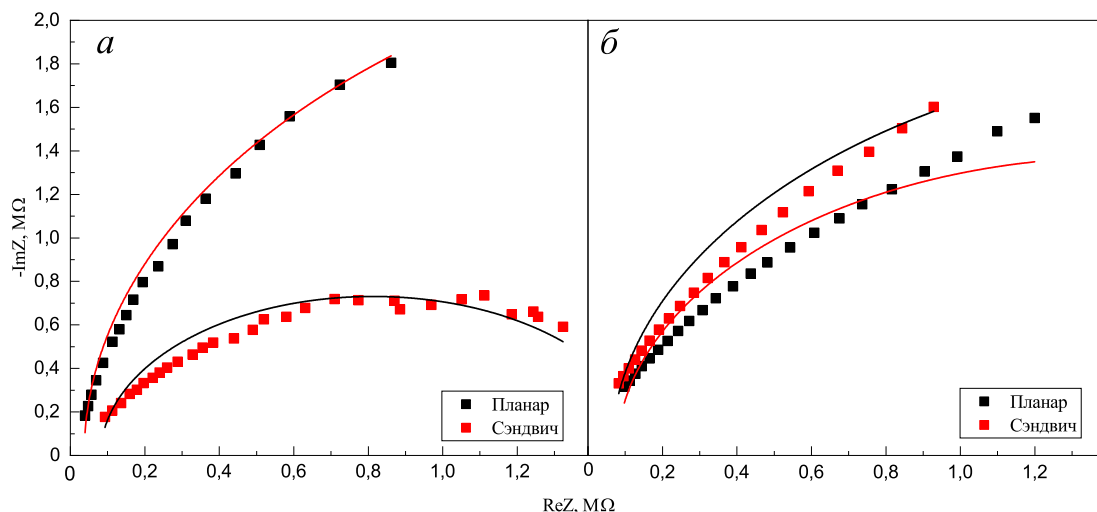


Рис. 3. Нодографы импеданса КНН с *a* — высоким сопротивлением и *б* — низким сопротивлением. Линиями на графиках показаны аппроксимации экспериментальных результатов эквивалентной схемой

ности нанонитей, с носителями заряда, что приводит к захвату и рекомбинации носителей заряда.

2.2. Частотная зависимость проводимости

Для выявления различий в механизмах переноса заряда в планарной и сэндвич-конфигурациях были проведены исследования проводимости на переменном токе. На рис. 2 приведена частотная зависимость проводимости в планарной и сэндвич-конфигурациях для образцов SiNW1 и SiNW2.

Частотная зависимость проводимости для обоих образцов аппроксимируется степенным законом для

прыжковой проводимости:

$$\sigma(\omega) = \sigma_0 + A\omega^s,$$

где σ_0 — базовая электропроводность, A, s — постоянные, ω — угловая частота переменного тока.

Для образца SiNW2 (рис. 2, б) в обеих конфигурациях коэффициент s на низких частотах остается практически постоянным, что указывает на доминирующий механизм прыжковой проводимости. В высокочастотном диапазоне наблюдается увеличение проводимости. В случае сэндвич-конфигурации образца SiNW1 проявляет прыжковую проводимость почти на всем диапазоне частот, в отличие от планарной конфигурации, которая проявляет подобное поведение в диапазоне высоких частот.

2.3. Импедансная спектроскопия

На рис. 3 представлены годографы импеданса для исследованных образцов. Для образца SiNW1 годографы импеданса имеют форму четверти окружности, что соответствует эквивалентной схеме параллельного RC-контура с последовательно подключенным резистором r . Для образца SiNW2 годографы также соответствуют этой модели, как и их эквивалентные схемы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе было проведено сравнительное исследование электрических свойств КНН на кристаллических пластинах с сопротивлениями 10–20 Ом·см и 1–5 мОм·см. Результаты показали, что снижение сопротивления исходной кристаллической пластины оказывает значительное влияние на электрические характеристики КНН. В частности, вольт-амперные характеристики в планарной конфигурации демонстрируют линейное поведение при низких напряжениях, однако при увеличении напряжения наблюдается диодоподоб-

ный эффект, что обусловлено формированием потенциальных барьеров на границе между нанонитями и кристаллической подложкой.

Частотные зависимости проводимости указывают на доминирование прыжкового механизма переноса заряда на низких частотах, который был выявлен как в планарной, так и в сэндвич-конфигурациях. Для образцов с сопротивлением кристаллической пластины 1–5 мОм·см отмечено увеличение проводимости в высокочастотном диапазоне, что связано с изменениями в механизмах переноса заряда и усилением взаимодействия между нанонитями и кристаллической пластиной.

Импедансные исследования показали, что годографы импеданса образцов соответствуют эквивалентной схеме параллельного RC-контура с последовательно подключенным резистором.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-72-10062, <https://rscf.ru/project/22-72-10062/> на оборудовании ЦКП МГУ им. М. В. Ломоносова.

-
- [1] *Gongalsky M.B., Tsurikova U.A., Samsonova J.V. et al. // Results in Materials. 6. 100084 (2020).*
- [2] *Gonchar K.A., Agafilushkina S.N., Moiseev D.V. et al. // Mater. Res. Express. 7. 035002 (2020).*
- [3] *Nazarovskaia D.A., Domnin P.A., Gyuppenen O.D. et al. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 87 (Suppl. 1). S41 (2023).*
- [4] *Li H., Li D., Chen H. et al. // Sensors. 23, N 15. 6808 (2023).*
- [5] *Yang F., Zhang G.J. // Reviews in Analytical Chemistry. 33, N 2. 95 (2014).*
- [6] *Гагарина А.Ю., Богословская Л.С., Халугарова К. и др. // Учен. зап. физ. фак-та Моск. ун-та. 4. 2241402 (2022).*
- [7] *Zhang C., Tian S., Li L. et al. // Journal of Materials Science: Materials in Electronics. 30. 8763 (2019).*
- [8] *Song J., Bazant M.Z. // Journal of The Electrochemical Society. 160, N 1. A15 (2013).*
- [9] *Kato S., Kurokawa Y., Gotoh K., Soga T. // Applied Sciences (Switzerland). 9, N 5 818 (2019).*
- [10] *Ombaba M.M., Karaagac H., Polat K.G., Islam M.S. // Photodetectors: Materials, Devices and Applications. 87 (2016).*
- [11] *Ruffo R., Hong S.S., Chan C.K. et al. // Journal of Physical Chemistry C. 113, N 26. 11390 (2009).*
- [12] *Rusakov D.M., Gusev D.V., Tsiniiaikin I.I. et al. // Materials Research Innovations. 28, N 7. 563 (2024).*
- [13] *Иванов П.А., Грехов И.В., Коньков О.И. и др. // Физика и техника полупроводников. 10. 1427 (2011).*

Study of the Dependence of Electrical Properties of SiNWs on the Conductivity of a Silicon Wafer

D.M. Rusakov^{1,a}, D.V. Gusev^{1,b}, K.A. Gonchar^{1,2,c}, A.S. Ilin¹, A.S. Vorontsov¹

¹*Department of General Physics and Molecular Electronics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia*

²*Institute of Biological Instrument Engineering of the Russian Academy of Sciences Pushchino, Moscow Region, 142290, Russia*

E-mail: ^arusakov.dm20@physics.msu.ru, ^bgusevdo@my.msu.ru, ^ck.a.gonchar@gmail.com

In recent years, silicon nanowires (SiNWs) have gained significant attention due to their unique electrical and optical properties, making them promising for applications in various fields, including nanoelectronics and sensors. This study presents a comprehensive analysis of SiNWs synthesized from crystalline wafers with resistances of 10–20 Ω·cm and 1–5 mΩ·cm, focusing on their electrical properties. Special attention is given to current-voltage characteristics (I-V curves), frequency-dependent conductivity, and impedance spectroscopy. These methods enable the identification of key factors influencing the behavior of nanostructures and reveal correlations between the properties of crystalline wafers

and the electrical characteristics of the material. The results show significant changes in conductivity as the wafer resistance decreases, indicating improved electrical performance of the SiNWs. The I-V characteristics of samples with 1–5 m Ω -cm resistance in both planar and sandwich configurations, as well as the sandwich configuration of the 10–20 Ω -cm sample, exhibit distinct diode-like behavior, which can be attributed to potential barrier formation at the layer interfaces. Hopping conduction is found to be the dominant mechanism across all samples.

PACS: 73.63.-b.

Keywords: silicon nanowires, metal-assisted chemical etching, impedance spectroscopy, current-voltage characteristics, structural and electrical properties.

Received 06 November 2024.

Сведения об авторах

1. Русаков Даниил Максимович — студент; e-mail: ruskov.dm20@physics.msu.ru.
2. Гусев Дмитрий Владимирович — студент; e-mail: gusevdm@my.msu.ru.
3. Гончар Кирилл Александрович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: k.a.gonchar@gmail.com.
4. Ильин Александр Сергеевич — канд. физ.-мат. наук, доцент; e-mail: as.ilin@physics.msu.ru.
5. Воронцов Александр Сергеевич — канд. физ.-мат. наук, доцент; e-mail: as.vorontsov@physics.msu.ru.