


Физика конденсированного состояния

Научная статья

УДК 537.9

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.19101>


ЭФФЕКТ РЕЗИСТИВНОГО ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ n -GaN/ p -Si

К. Ю. Шугуров¹ , А. М. Можаров¹,
А. К. Кавеев², В. В. Федоров^{3, 1}

¹ Академический университет им. Ж. И. Алфёрова РАН, Санкт-Петербург, Россия;

² Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия;

³ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

 shugurov17@mail.ru

Аннотация. В работе представлены результаты исследования мемристорных гетероструктур на основе нитевидных нанокристаллов (ННК) n -GaN на кремниевой подложке p -Si, синтезированных методом молекулярно-пучковой эпитаксии с разными интерфейсными слоями: нитридов кремния и алюминия (SiN и AlN). Установлено, что в зависимости от способа подготовки интерфейса меняется полярность записываемого напряжения. Кроме того, по данным емкостных измерений обнаружено, что после операции записи логического состояния емкость структуры при использовании слоя SiN снижается, тогда как для слоя AlN емкость повышается (с отличием в поведении ее релаксации).

Ключевые слова: нитрид галлия, нитевидные нанокристаллы, мемристорный эффект, резистивное переключение, кремний, водородная пассивация

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-79-01279, <https://rscf.ru/project/23-79-01279/>).


Для цитирования: Шугуров К. Ю., Можаров А. М., Кавеев А. К., Федоров В. В. Эффект резистивного переключения в гетероструктурах n -GaN/ p -Si // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2026. Т. 19. № 1. С. 9–18. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.19101>

Статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Original article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.19101>

THE RESISTIVE SWITCHING EFFECT IN THE n -GaN/ p -Si HETEROSTRUCTURES

K. Yu. Shugurov¹ , A. M. Mozharov¹,
A. K. Kaveev², V. V. Fedorov^{3, 1}

¹ Alferov University of RAS, St. Petersburg, Russia;

² Ioffe Institute of RAS, St. Petersburg, Russia;

³ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

 shugurov17@mail.ru

Abstract. In the paper, the findings of study the memristor based on n -GaN nanowires synthesized on silicon by the molecular beam epitaxy with SiN and AlN interface layers have

been presented. The polarity inversion of writing voltage was found to depend on the interface preparation method. In addition, it was discovered by the capacitive measurements that after the logical state write operation, the structure capacitance decreased when using the SiN layer while it increased when using the AlN one. In this case, a difference was observed in the behavior of the subsequent relaxation of the capacitance.

Keywords: gallium nitride, nanowire, memristor effect, resistive switching, silicon, hydrogen passivation

Funding: The reported study was funded by Russian Science Foundation (Project No. 23-79-01279, <https://rscf.ru/project/23-79-01279/>).

For citation: Shugurov K. Yu., Mozharov A. M., Kaveev A. K., Fedorov V. V., The resistive switching effect in the *n*-GaN/*p*-Si heterostructures, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 19 (1) (2026) 9–18. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.19101>

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение

Развитие и совершенствование полупроводниковых приборов сопровождается их постепенной миниатюризацией. Это позволяет создавать более производительные и быстродействующие устройства как в интегральном исполнении, так и в виде дискретных элементов. Физические ограничения, накладываемые на существующие коммерческие полупроводниковые архитектуры, можно преодолевать внедрением новых подходов, в частности применением систем с пониженной размерностью. Так, например, использование 2D-материалов позволяет уже в обозримом будущем расширить границы микроэлектронных технологий [1]. Наряду с двумерными материалами большой практический интерес представляют и квазиодномерные структуры, к которым относятся нитевидные нанокристаллы (ННК). Комбинация геометрических особенностей ННК и материальных свойств перспективных полупроводников, таких как нитрид галлия GaN, делает возможным создание электронных компонентов с более совершенными приборными характеристиками [2 – 4]. С другой стороны, поскольку кремний Si остается основообразующим материалом полупроводниковой промышленности, интеграция с ним ННК GaN также открывает широкие возможности для приборных решений [5 – 8].

В то же время среди электронных компонентов отдельного внимания заслуживают мемристоры, на основе которых сегодня реализуются элементы быстродействующей памяти нового поколения (*англ.* Resistive Rapid-Access Memory – RRAM) [9] и нейроморфные процессоры [10], позволяющие существенно повысить производительность вычислений. При этом одним из распространенных физических явлений, имеющих место в некоторых видах мемристоров, выступает туннельный эффект [11 – 13]. В нашей недавней работе [14] было впервые продемонстрировано резистивное переключение биполярного типа в туннельных гетероструктурах GaN ННК/Si, что позволяет создавать мемристорные ячейки на такой системе материалов.

Представленные в данной статье результаты направлены на дальнейшее развитие этой тематики и отражают исследования электрофизических характеристик соответствующих гетероструктур.

Синтез и подготовка структур

Массивы вертикально ориентированных ННК GaN были синтезированы на кремнии по самоиндуцированному механизму в установке молекулярно-пучковой эпитаксии Veeco GEN III с плазменным азотным источником. В отличие от механизма пар-жидкость-кристалл, данный подход позволяет избежать встраивания в кристаллическую решетку ННК посторонних атомов от капель-затравок, которые могут негативно сказываться на характеристиках электронных устройств [15]. Всего было получено две группы структур (I и II), которые различаются способом подготовки интерфейсного слоя.

Кремниевые подложки проходили предварительную обработку, описанную в статье [16], с дальнейшим термическим удалением оксидного слоя с поверхности в ростовой камере при температуре 850°C в течение 30 мин. Далее для I группы структур поверхность подвергали процессу нитридации потоком атомарного азота от источника мощностью 500 Вт; после этого сразу же инициировался рост ННК. Для II группы после сгона оксида, на поверхность наносился атомарный слой алюминия с последующей подачей атомарного азота. Использование затравки из нитрида алюминия AlN, с одной стороны, предотвращает реакцию металлического галлия с кремнием, а с другой – позволяет улучшить однородность нуклеации и ориентацию ННК нитрида галлия на поверхности подложки [17]. В обоих случаях рост ННК GaN проводился при температуре 850°C; при этом на протяжении всего процесса дополнительным потоком кремния обеспечивалось легирование для получения ННК *n*-типа проводимости.

Изображения синтезированных структур, полученные методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), представлены на рис. 1, *a*, *b*. Далее выполнялась постростовая подготовка образцов по аналогии с проведенной процедурой в работе [14] для формирования контактных мез. В результате были получены структуры, схематичное изображение которых приведено на рис. 1, *c*. В качестве электрической изоляции верхнего Au/Al-контакта от подложки использовался эпоксидный фотоотверждаемый полимер SU-8, наносимый посредством центрифугирования.

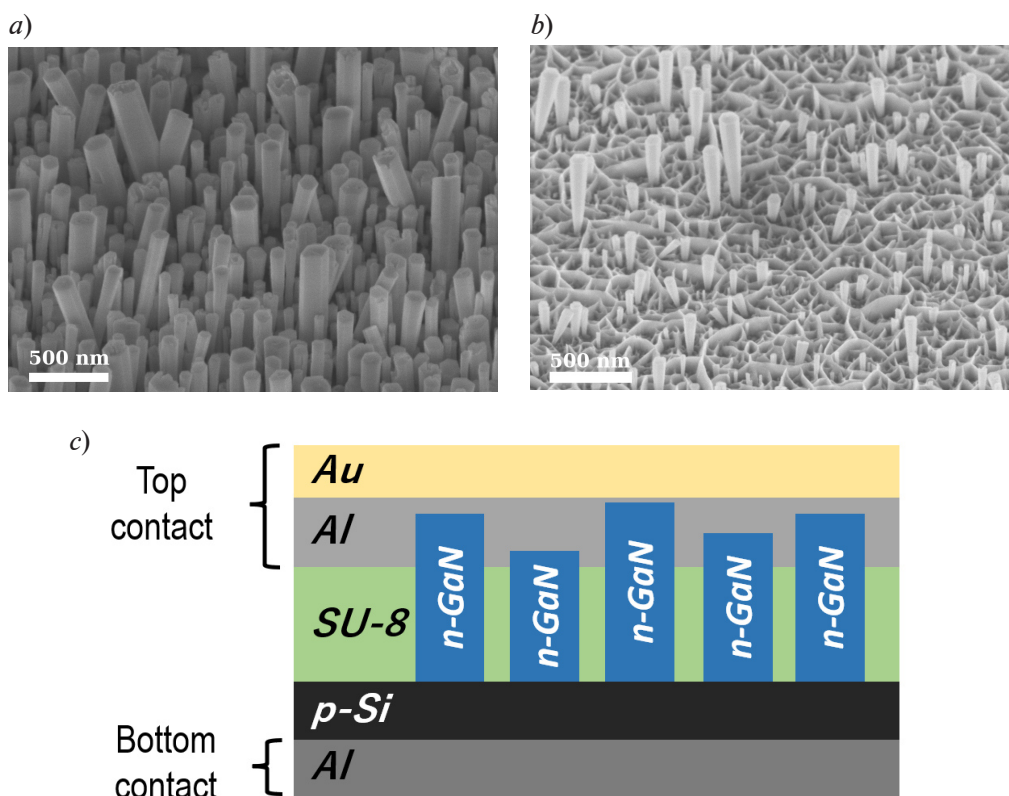


Рис. 1. СЭМ-изображения синтезированных структур *n*-GaN ННК/*p*-Si, полученных с помощью SiN (*a*) и AlN (*b*) затравок (изображения сняты под углом 45°); *c* – схематический вид изготовленных структур после постростовой обработки (указаны верхний (Top) и нижний (Bottom) контакты)

Результаты и их обсуждение

В предыдущей работе [14] мы выдвинули предположение, что резистивное переключение в исследуемых структурах возникает благодаря наличию в области перехода p -Si/ n -GaN зарядовых центров, которые, вероятно, расположены в широкозонном тонком интерфейсном слое нитрида алюминия и могут локализовывать на себе носители после цикла подачи на структуру определенного напряжения. Чтобы досконально проанализировать причины возникновения наблюдаемого эффекта, мы провели эксперимент, в ходе которого структуры с AlN-затравкой подвергали обработке в водородной плазме перед нанесением слоя SU-8. Как было показано нами ранее [18], такая обработка обеспечивает снижение концентрации энергетических ловушек вблизи интерфейса, что влияет на процесс рекомбинации через него носителей заряда. Таким образом, были основания полагать, что и в этом случае обработка приведет к снижению и перераспределению плотности энергетических состояний (зарядовых центров) на соответствующем гетероинтерфейсе. Процесс осуществляли в установке плазмохимического осаждения Oxford PlasmaLab System 100 при температуре 250°C и мощности 20 Вт в течение 5 мин.

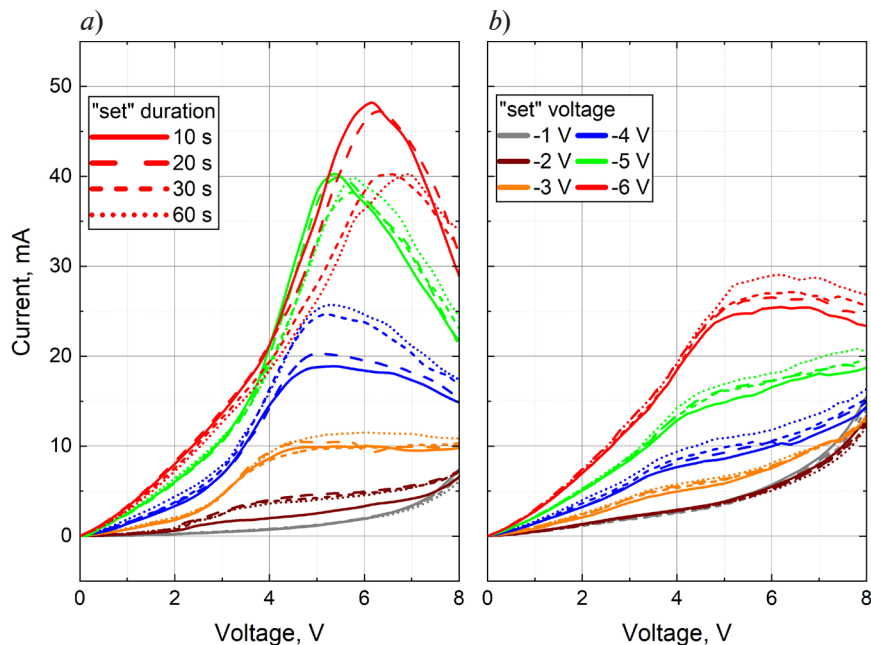


Рис. 2. Последовательные серии вольтамперных характеристик структур n -GaN ННК/ p -Si с AlN-затравкой при разных временах и напряжениях записи до (a) и после (b) обработки структур в водородной плазме

На рис. 2 представлены вольтамперные характеристики (ВАХ), полученные сразу после операции записи в структурную мезу (ячейку) состояния логической единицы. Положительное напряжение от источника питания прикладывалось к кремниевой подложке. Запись же состояния проводилась подачей напряжения V_s от -1 до -6 В в течение 10 – 60 с. Измерения проводили последовательными циклами: $0 \text{ В} \rightarrow +8 \text{ В} \rightarrow 0 \text{ В}$; первое измерение соответствовало режиму записи $\{-1 \text{ В}, 10 \text{ с}\}$, второе – $\{-1 \text{ В}, 20 \text{ с}\}$ и т.д. Ветви ВАХ, снятые в обратном направлении, не приведены на графиках рис. 2 из соображений читаемости остальной информации. Их типичное поведение представлено на рис. 3 (шаг 4 для AlN-интерфейса).

Как видно на рис. 2, для значения $V_s = -1$ В в обоих случаях (рис. 2, a и b) не наблюдается каких-либо значимых относительных изменений, зависящих от длительности записи, причем эта особенность сохраняется для обработанной структуры и при $V_s = -2$ В. При последующем повышении записываемого напряжения, амплитуды токов постепенно нарастают, и в диапазоне от 0 до 3 В (а для V_s , изменяющегося от -6 до $+4$ В) поведение образцов практически идентично. При этом для образца, обработанного в плазме, в целом уровни токов оказываются ниже и без выраженной «пиковой» формы, характерной

для необработанных структур при относительно высоких напряжениях записи (-5 В и менее). Для этих же напряжений можно также отметить, что длительность записи по-разному влияет на динамику ВАХ. Если в случае обработанного образца увеличение времени записи (для рассмотренных напряжений записи) приводит к постепенному смещению уровней токов в сторону больших значений, то для структуры без обработки в какой-то момент эта тенденция нарушается.

Полученные данные указывают на влияние процедуры обработки структуры в водородной плазме в сторону ослабления эффекта записи в ячейку. Следовательно, операции записи/стирания связаны с процессами зарядки/перезарядки состояний на интерфейсе GaN/Si и можно предположить, что проявление мемристорных свойств системы будет зависеть от способа подготовки интерфейса к синтезу ННК нитрида галлия.

Ранее нами было проведено исследование диодных свойств гетероструктур слабо легированных ННК нитрида галлия на кремниевых подложках при использовании различных способов подготовки интерфейса [19]. Согласно полученным результатам, наибольшее различие вида ВАХ и уровней тока наблюдалось между образцами с интерфейсом нитрида алюминия и интерфейсами, полученными при различных способах нитридации поверхности кремния. По этой причине именно данный вид интерфейса был выбран для дальнейшего исследования мемристорных свойств и проведения сравнения между структурами. По указанной в работе методике подготовки образцов были синтезированы массивы ННК (см. рис. 1, а), которые, как и в случае структуры I, подвергались дополнительному высокому легированию потоком кремния на всем протяжении процесса синтеза.

На рис. 3 изображены типичные ВАХ, полученные для образцов с различным способом подготовки интерфейса. Измерения проводились в циклическом режиме с началом и окончанием приложенного напряжения, равного 0 В.

Представленные зависимости наглядно демонстрируют появление гистерезиса также и для структур с подслоем SiN. Это, в свою очередь, согласуется с предположением, что наблюдаемый эффект резистивного переключения вызван наличием в области гетерограницы глубоких зарядовых центров (с большим временем жизни) ввиду наличия тонкой широкозонной прослойки. Сравнение же показывает, что для SiN-интерфейса форма ВАХ оказывается менее динамичной, в частности, на кривой ВАХ не наблюдается характерного пика, как в случае AlN-затравки. Кроме того, рассматриваемые структуры

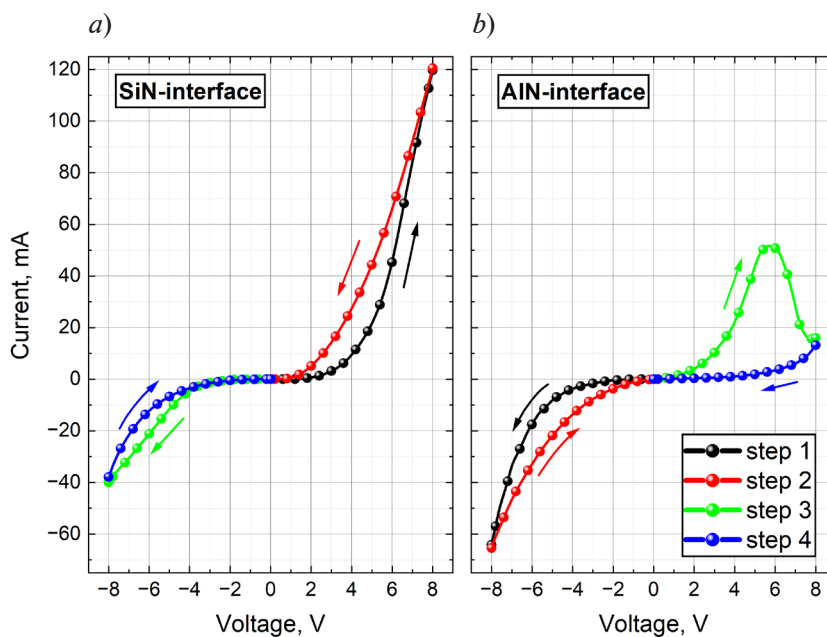


Рис. 3. Типичные ВАХ, полученные для рассматриваемых гетероструктур n -GaN ННК/ p -Si двумя способами подготовки интерфейсного слоя: SiN (а) и AlN (b)

различаются режимами записи в ячейку логического состояния: для AlN-интерфейса запись (см. шаг 1 и/или 2 на рис. 3) проводится обратным смещением, тогда как для SiN — прямым. Этот факт может говорить о различном изначальном распределении заряда в области p - n -перехода ввиду различия типов интерфейсов.

На следующем этапе исследований была проведена серия емкостных измерений. При помощи прецизионного RLC-метра Keysight E4980, в четырехзондовом режиме на структуры подавался импульс записывающего напряжения длительностью 60 с и амплитудой 6 В, после которого в режиме реального времени регистрировалась емкостная релаксация. Измерения выполнялись на частоте 1 МГц, с амплитудой тестового сигнала 50 мВ.

Полученные результаты представлены на рис. 4. Видно, что для обоих типов структур подача импульса напряжения приводит к изменению их емкости относительно

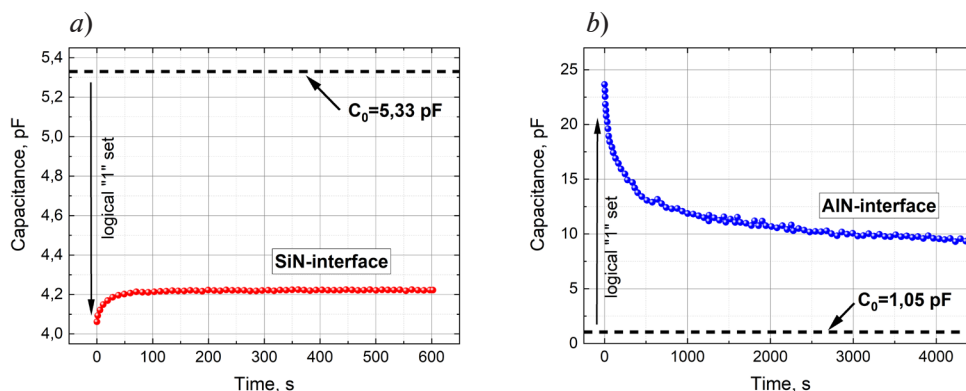


Рис. 4. Временные зависимости релаксации емкости структур после подачи записывающего импульса для интерфейсов SiN (a) и AlN (b).

Пунктирные линии показывают емкости структур до записи

первоначального значения C_0 до процедуры записи. Изменение емкости после снятия внешнего напряжения свидетельствует о некотором изменении конфигурации заряда в структурах, в области p - n -перехода. Учитывая различие образцов по способу подготовки интерфейса GaN ННК/Si (при прочих равных параметрах синтеза и постростовой обработки), резонно предположить, что именно интерфейсный слой является причиной резистивного переключения в исследуемых структурах. Отметим, что подача записывающего импульса (6 В, 60 с) в случае интерфейса SiN вызывает снижение емкости в 1,3 раза, в то время как для интерфейса AlN емкость, напротив, возрастает более чем в 20 раз относительно C_0 . Отметим также различную динамику кривых. Для структур со слоем SiN емкость релаксирует до постоянного значения (оно отличается от C_0) за время около 1 мин, а в варианте с AlN-затравкой постепенный спад емкости наблюдается даже по прошествии 1,5 ч. Тем не менее, обе гетероструктуры демонстрируют мемристорный эффект.

Если провести сравнение с другими типами мемристоров, то можно выделить особенность, характерную только для исследуемых образцов. Как правило, считывание состояния ячейки проводится путем измерения ее сопротивления ненулевым постоянным напряжением. В данном случае, помимо этого метода, можно определять это состояние путем считывания емкости, подавая при этом переменный сигнал амплитудой всего в несколько десятков милливольт при нулевом постоянном смещении.

Заключение

В данной работе исследованы две группы гетероструктур n -GaN ННК/ p -Si, которые различались способом подготовки интерфейсного слоя. Полученные ВАХ в диапазоне от -8 до $+8$ В продемонстрировали наличие эффекта резистивного переключения биполярного типа как для интерфейса нитрида кремния SiN, так и для интерфейса нитрида алюминия AlN; при этом было обнаружено, что записывающие напряжения у рассматриваемых структур имеют противоположные знаки. Обработка в плазме водорода образцов со слоем нитрида алюминия привела в целом к относительному снижению проводимости



при подаче импульса напряжения в диапазоне от 3 до 8 В. Емкостные исследования обеих групп структур выявили разнонаправленное изменение емкости ячеек после подачи на них импульса записывающего напряжения, причем для вариации с SiN-интерфейсом наблюдалась релаксация емкости до постоянного значения, отличного от первоначального, которая наступает за временной интервал около 1 мин. Совокупность полученных данных позволяет сделать вывод о том, что мемристорный эффект, наблюдаемый в структурах, обусловлен наличием глубоких зарядовых центров в области широкозонного интерфейсного слоя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Liu A., Zhang X., Liu Z., et al. The roadmap of 2D materials and devices toward chips // *Nano-Micro Letters*. 2024. Vol. 16. No. 1. P. 119.
2. Yildirim M. A., Teker K. Transport characteristics of gallium nitride nanowire field-effect transistor (GaN-NWFET) for high temperature electronics // *Nano*. 2020. Vol. 16. December 02. P. 2150021.
3. Li W., Brubaker M. D., Spann B. T., Bertness K. A., Fay P. GaN nanowire MOSFET with near-ideal subthreshold slope // *IEEE Electron Device Letters*. 2018. Vol. 39. No. 2. Pp. 184–187.
4. Shugurov K. Y., Mozharov A. M., Fedorov V. V., Blokhin S. A., Neplokh V. V., Mukhin I. S. Extremely high frequency Schottky diodes based on single GaN nanowires // *Nanotechnology*. 2023. Vol. 34. No. 24. P. 245204.
5. Zhou B., Li J., Dong X., Yao L. GaN nanowires/Si photocathodes for CO₂ reduction towards solar fuels and chemicals: advances, challenges, and prospects // *Science China Chemistry*. 2023. Vol. 66. No. 3. Pp. 739–754.
6. Anbarasan N., Sadhasivam S., Jeganathan K. Ultrasensitive self-powered heterojunction ultraviolet photodetector of *p*-GaN nanowires on Si by halide chemical vapour deposition // *Nanotechnology*. 2023. Vol. 34. No. 13. P. 135201.
7. Dvoretckaia L., Gridchin V., Mozharov A., Maksimova A., Dragunova A., Melnichenko I., Mitin D., Vinogradov A., Mukhin I., Cirilin G. Light-emitting diodes based on InGaN/GaN nanowires on microsphere-lithography-patterned Si substrates // *Nanomaterials*. 2022. Vol. 12. No. 12. P. 1993.
8. You S., Geens K., Borga M., et al. Vertical GaN devices: Process and reliability // *Microelectronics Reliability*. 2021. Vol. 126. November. P. 114218.
9. Wang C., Shi G., Qiao F., Lin R., Wu S., Hu Z. Research progress in architecture and application of RRAM with computing-in-memory // *Nanoscale Advances*. 2023. Vol. 5. No. 6. Pp. 1559–1573.
10. Duan X., Cao Z., Gao K., Yan W., Sun S., Zhou G., Wu Z., Ren F., Sun B. Memristor-based neuromorphic chips // *Advanced Materials*. 2024. Vol. 36. No. 14. P. 2310704.
11. Zou T., Heo S., Byeon G., Yoo S., Kim M., Reo Y., Kim S., Liu A., Noh Y.-Y. Two-dimensional tunneling memristor with thin-film heterostructure for low-power logic-in-memory complementary metal-oxide semiconductor // *ACS Nano*. 2024. Vol. 18. No. 21. Pp. 13849–13857.
12. Thomas A., Niehörster S., Fabretti S., Shephard N., Kuschel O., Küpper K., Wollschläger J., Krzysteczko P., Chicca E. Tunnel junction based memristors as artificial synapses // *Frontiers in Neuroscience*. 2015. Vol. 9. 07 July. P. 00241.
13. Kim D. J., Lu H., Ryu S., Bark C.-W., Eom C.-B., Tsybmal E. Y., Gruverman A. Ferroelectric tunnel memristor // *Nano Letters*. 2012. Vol. 12. No. 11. Pp. 5697–5702.
14. Шугуров К. Ю., Можаров А. М., Кавеев А. К., Фёдоров В. В. Мемристорный эффект в гетероструктурах на основе нитевидных нанокристаллов нитрида галлия на кремнии // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки*. 2025. Т. 18. № 4. С. 9–20.
15. Hemesath E. R., Schreiber D. K., Gulsoy E. B., Kisielowski C. F., Petford-Long A. K., Voorhees P. W., Lauhon L. J. Catalyst incorporation at defects during nanowire growth // *Nano Letters*. 2012. Vol. 12. No. 1. Pp. 167–171.
16. Kern W. The evolution of silicon wafer cleaning technology // *Journal of The Electrochemical Society*. 1990. Vol. 137. No. 6. Pp. 1887–1892.
17. Songmuang R., Landré O., Daudin B. From nucleation to growth of catalyst-free GaN nanowires on thin AlN buffer layer // *Applied Physics Letters*. 2007. Vol. 91. No. 25. P. 251902.
18. Shugurov K. Y., Mozharov A. M., Bolshakov A. D., et al. Hydrogen passivation of the *n*-GaN nanowire/*p*-Si heterointerface // *Nanotechnology*. 2020. Vol. 31. No. 24. P. 244003.

19. **Bolshakov A. D., Fedorov V. V., Shugurov K. Y., Mozharov A. M., Sapunov G. A., Shtrom I. V., Mukhin M. S., Uvarov A. V., Cirlin G. E., Mukhin I. S.** Effects of the surface preparation and buffer layer on the morphology, electronic and optical properties of the GaN nanowires on Si // *Nanotechnology*. 2019. Vol. 30. No. 39. P. 395602.

REFERENCES

1. **Liu A., Zhang X., Liu Z., et al.**, The roadmap of 2D materials and devices toward chips, *Nano-Micro Lett.* 16 (1) (2024) 119.
2. **Yildirim M. A., Teker K.**, Transport characteristics of gallium nitride nanowire field-effect transistor (GaN-NWFET) for high temperature electronics, *Nano*. 16 (Dec. 02) (2020) 2150021.
3. **Li W., Brubaker M. D., Spann B. T., et al.**, GaN nanowire MOSFET with near-ideal subthreshold slope, *IEEE Electron Device Lett.* 39 (2) (2018) 184–187.
4. **Shugurov K. Y., Mozharov A. M., Fedorov V. V., et al.**, Extremely high frequency Schottky diodes based on single GaN nanowires, *Nanotechnol.* 34 (24) (2023) 245204.
5. **Zhou B., Li J., Dong X., Yao L.**, GaN nanowires/Si photocathodes for CO₂ reduction towards solar fuels and chemicals: Advances, challenges, and prospects, *Sci. China Chem.* 66 (3) (2023) 739–754.
6. **Anbarasan N., Sadhasivam S., Jeganathan K.**, Ultrasensitive self-powered heterojunction ultraviolet photodetector of *p*-GaN nanowires on Si by halide chemical vapour deposition, *Nanotechnol.* 34 (13) (2023) 135201.
7. **Dvoretckaia L., Gridchin V., Mozharov A., et al.**, Light-emitting diodes based on InGaN/GaN nanowires on microsphere-lithography-patterned Si substrates, *Nanomater.* 12 (12) (2022) 1993.
8. **You S., Geens K., Borga M., et al.**, Vertical GaN devices: Process and reliability, *Microelectron. Reliab.* 126 (Nov) (2021) 114218.
9. **Wang C., Shi G., Qiao F., et al.**, Research progress in architecture and application of RRAM with computing-in-memory, *Nanoscale Adv.* 5 (6) (2023) 1559–1573.
10. **Duan X., Cao Z., Gao K., et al.**, Memristor-based neuromorphic chips, *Adv. Mater.* 36 (14) (2024) 2310704.
11. **Zou T., Heo S., Byeon G., et al.**, Two-dimensional tunneling memtransistor with thin-film heterostructure for low-power logic-in-memory complementary metal-oxide semiconductor, *ACS Nano*. 18(21) (2024) 13849–13857.
12. **Thomas A., Niehörster S., Fabretti S., et al.**, Tunnel junction based memristors as artificial synapses, *Frontiers in Neuroscience*. 9 (07 July) (2015) 00241.
13. **Kim D. J., Lu H., Ryu S., et al.**, Ferroelectric tunnel memristor, *Nano Lett.* 12 (11) (2012) 5697–5702.
14. **Shugurov K. Yu., Mozharov A. M., Kaveyev A. K., Fedorov V. V.**, Memristor effect in heterostructures based on nanowires of gallium nitride on silicon, *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics*. 18 (4) (2025) 9–20 (in Russian).
15. **Hemesath E. R., Schreiber D. K., Gulsoy E. B., et al.**, Catalyst incorporation at defects during nanowire growth, *Nano Lett.* 12 (1) (2012) 167–171.
16. **Kern W.**, The evolution of silicon wafer cleaning technology, *J. Electrochem. Soc.* 137 (6) (1990) 1887–1892.
17. **Songmuang R., Landré O., Daudin B.**, From nucleation to growth of catalyst-free GaN nanowires on thin AlN buffer layer, *Appl. Phys. Lett.* 91 (25) (2007) 251902.
18. **Shugurov K. Y., Mozharov A. M., Bolshakov A. D., et al.**, Hydrogen passivation of the *n*-GaN nanowire/*p*-Si heterointerface, *Nanotechnol.* 31 (24) (2020) 244003.
19. **Bolshakov A. D., Fedorov V. V., Shugurov K. Y., et al.**, Effects of the surface preparation and buffer layer on the morphology, electronic and optical properties of the GaN nanowires on Si, *Nanotechnol.* 30 (39) (2019) 395602.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ШУГУРОВ Константин Юрьевич – кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник лаборатории возобновляемых источников энергии Академического университета имени Ж. И. Алфёрова РАН, Санкт-Петербург, Россия.

194021, Россия, Санкт-Петербург, ул. Хлопина, 8, к. 3

shugurov17@mail.ru

ORCID: 0000-0001-8973-3187

МОЖАРОВ Алексей Михайлович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории возобновляемых источников энергии Академического университета имени Ж. И. Алфёрова РАН, Санкт-Петербург, Россия.

194021, Россия, Санкт-Петербург, ул. Хлопина, 8, к. 3

mozharov@spbau.ru

ORCID: 0000-0002-8661-4083

КАВЕЕВ Андрей Камильевич – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории мощных полупроводниковых приборов Физико-технического института имени А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия.

194021, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26

kaveev@mail.ioffe.ru

ORCID: 0000-0002-3640-677X

ФЕДОРОВ Владимир Викторович – кандидат физико-математических наук, заведующий научно-исследовательской лабораторией Института электроники и телекоммуникаций Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, старший научный сотрудник лаборатории возобновляемых источников энергии Академического университета имени Ж. И. Алфёрова РАН, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

fedorov_vv@spbstu.ru

ORCID: 0000-0001-5547-9387

THE AUTHORS

SHUGUROV Konstantin Yu.

Alferov University, RAS

8/3 Khlopin St., St. Petersburg, 194021, Russia

shugurov17@mail.ru

ORCID: 0000-0001-8973-3187

MOZHAROV Alexey M.

Alferov University, RAS

8/3 Khlopin St., St. Petersburg, 194021, Russia

mozharov@spbau.ru

ORCID: 0000-0002-8661-4083

KAVEEV Andrey K.

Ioffe Institute, RAS;

Alferov University, RAS

26 Polytekhnicheskaya St., St. Petersburg, 194021, Russia

kaveev@mail.ioffe.ru

FEDOROV Vladimir V.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University;

Alferov University, RAS

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia

fedorov_vv@spbstu.ru

ORCID: 0000-0001-5547-9387

*Статья поступила в редакцию 11.05.2025. Одобрена после рецензирования 05.09.2025.
Принята 05.09.2025.*

Received 11.05.2025. Approved after reviewing 05.09.2025. Accepted 05.09.2025.