

Физика конденсированного состояния

Научная статья

УДК 537.9

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.18401>

МЕМРИСТОРНЫЙ ЭФФЕКТ В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ НИТЕВИДНЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ НИТРИДА ГАЛЛИЯ НА КРЕМНИИ


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. Проведены экспериментальные и теоретические исследования диодных гетероструктур на основе нитевидных нанокристаллов GaN, синтезированных на кремнии. Измерения вольтамперных характеристик показали закономерность их поведения, характерную для обращенных диодов, в диапазоне от -3 до $+3$ В, и появление петли гистерезиса при больших смещениях. Впервые было показано, что в таких структурах может наблюдаться эффект резистивного переключения биполярного типа. Продemonстрирована способность соответствующих мемристормых ячеек сохранять свое состояние в течение не менее 65 ч при нормальных условиях, а также выдерживать продолжительные циклы считывания без потери информации.

Ключевые слова: мемристормый эффект, резистивное переключение, нитрид галлия, нитевидные нанокристаллы, кремний

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. Мемристормый 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. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.18401>

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.18401>


MEMRISTOR EFFECT IN HETEROSTRUCTURES BASED ON GALLIUM NITRIDE NANOWIRES ON SILICON

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 this work, experimental and theoretical studies of diode heterostructures based on GaN nanowires synthesized on silicon have been carried out. Current-voltage measurements showed the typical backward diode behavior in the range from -3 to $+3$ V and the appearance

of a hysteresis loop at greater biases. It was shown for the first time that the effect of bipolar resistive switching could be observed in such structures. The ability of the corresponding memristor cells to remain their state for a long time (not less than 65 hrs) under normal conditions, as well as to bear long read cycles without loss of information were demonstrated.

Keywords: memristor effect, resistive switching, gallium nitride, nanowires, silicon

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., Memristor effect in heterostructures based on gallium nitride nanowires on silicon, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 18 (4) (2025) 9–20. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.18401>

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

Введение

Текущее развитие информационных технологий, в частности искусственного интеллекта, требует повышения производительности вычислительных систем и, как следствие, энергозатрат на их работу. В настоящее время научным сообществом активно исследуются пути решения проблем, связанных с плотностью размещения транзисторов в интегральных схемах, а также снижением их энергопотребления. Как известно, физический предел интеграции будет практически достигнут в ближайшие годы [1], дальнейший же прогресс возможен либо путем оптимизации существующей архитектуры, либо через внедрение новых архитектур и методов.

Одним из подходов к преодолению препятствий на пути прогресса является перенос вычислений в память. Такой подход получил название In-Memory-Computing (IMC) и обладает рядом преимуществ, позволяя минимизировать как временную, так и энергетическую составляющую общения процессора с памятью. В свою очередь, многообещающий вариант — это использование резистивной памяти с произвольным доступом (RRAM), в основе которой лежит пассивный элемент — мемристор (*англ.* memory + resistor (память + сопротивление)) [2]. Ключевая особенность мемристоров состоит в способности изменять и «запоминать» свое сопротивление в зависимости от приложенного ранее электрического напряжения. Сегодня мемристорный эффект зафиксирован в различных системах материалов, например оксидах металлов (включая многослойные системы) [3, 4], перовскитах [5], двумерных материалах [6], органических соединениях [7] и полупроводниковых гетероструктурах [8].

Среди полупроводниковых материалов отдельного внимания заслуживает нитрид галлия GaN, поскольку на его основе создаются и выпускаются современные компоненты силовой, опто- и СВЧ-электроники. В контексте мемристорных элементов в последние годы GaN также служит объектом интенсивных исследований [9 – 11]. Вместе с тем реализация GaN в виде нитевидных нанокристаллов (ННК), а не планарных слоев, с одной стороны, обеспечивает высокое кристаллическое качество наноструктур, а с другой — способствует созданию полупроводниковых устройств наномасштабного уровня. Кроме того, ННК GaN высокого кристаллического совершенства можно синтезировать прямо на кремнии Si, без использования буферных слоев [12 – 15], что немаловажно для интеграции с доступной и развитой современной кремниевой технологией.

В данной работе представлены результаты исследований, впервые демонстрирующие наличие мемристорного эффекта в туннельной гетероструктуре GaN ННК/Si.

Синтез и подготовка структур

Нитевидные нанокристаллы нитрида галлия были выращены на кремниевых подложках *p*-типа проводимости методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) с использованием источника газообразного азота индуктивно-связанной плазмы, а также



эффузионной ячейки галлия, установленных в систему Veeco GEN III. Подготовка кремниевых пластин и процесс формирования защитного оксидного слоя осуществлялись с помощью модифицированного метода Ширази [16]. Далее оксид удалялся в ростовой камере с помощью термического отжига до температуры $800 - 850^\circ\text{C}$ в течение получаса в условиях сверхвысокого вакуума, с образованием реконструкции поверхности Si(111) 7×7 , подтверждающей ее высокую чистоту. После этого проводилась нитридизация поверхности кремния при температуре 550°C в потоке активированной плазмы азота (скорость — 10 мл/мин) и установленной мощности источника 500 Вт. Затем при той же температуре поверхность ростовой пластины покрывалась моноатомным слоем алюминия, который при последующей подаче азота превращался в слой нитрида алюминия (AlN) и формировал селективную маску для синтеза ННК GaN. При этом на поверхности AlN происходит формирование галлий-полярного слоя GaN, который затем превращается в срастающийся островковый слой, а синтез ННК осуществляется в местах соединений отдельных доменов слоя нитрида алюминия [17].

Дальнейший рост ННК GaN осуществлялся при температуре 850°C . Важно отметить, что использование маски из AlN выбрано не случайно. В процессе осаждения слоя алюминия на поверхность эпитаксиальной пластины происходит частичная диффузия осажденного материала, что приводит к образованию сильнолегированной приповерхностной области p -типа в кремнии. В свою очередь, для обеспечения проводимости n -типа нитевидных нанокристаллов, в процессе их роста они дополнительно легировались кремнием. В совокупности это позволяет уменьшить толщину области пространственного заряда на интерфейсе GaN/Si и усилить влияние туннельных процессов на условия протекания тока в данной структуре.

Изучение морфологии синтезированных структур было проведено с использованием сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Zeiss Supra 25 (рис. 1, *a*, *b*). ННК имеют типичную для данного режима роста коническую форму, которая уширяется по мере удаления от ростовой подложки. На полученных СЭМ-изображениях, помимо массива ННК, отмечается наличие сетчатого паразитного слоя галлий-полярного GaN,

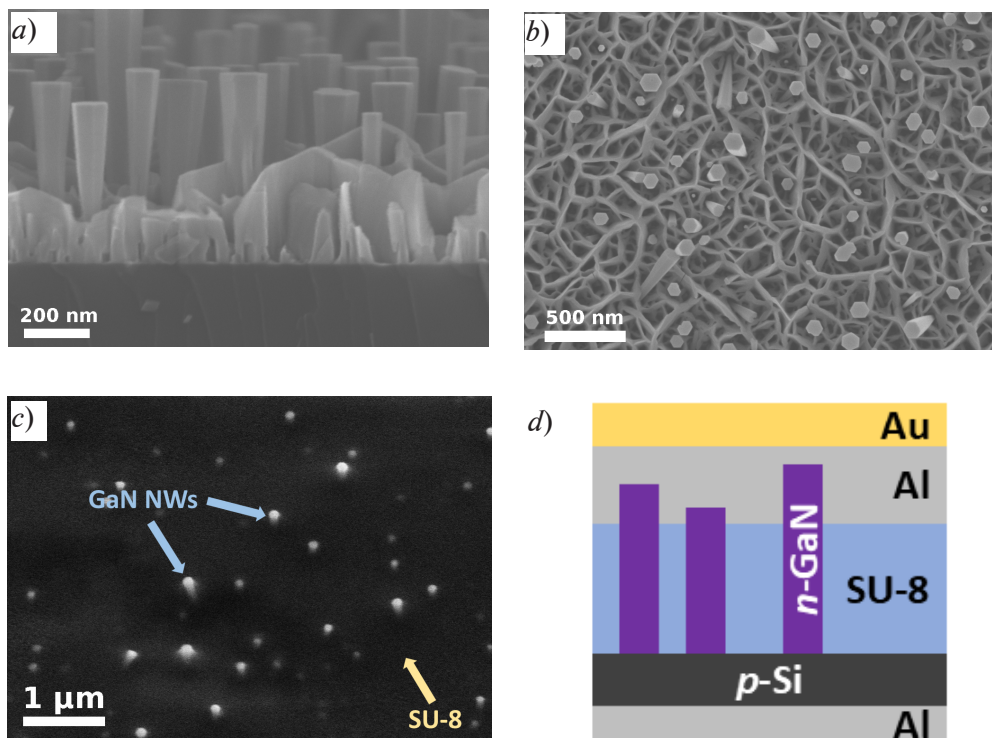


Рис. 1. СЭМ-изображения синтезированной структуры n -GaN ННК / p -Si (*a* – *c*) и схематическое изображение этой структуры после полного цикла постростовой обработки (*d*); *a* – поперечный скол, *b* – вид сверху, *c* – вид под 45° после травления SU-8 в кислородной плазме

расположенного между отдельными ННК, что является типичным для синтеза с использованием маски из AlN. Высота ННК составила до 700 нм при разбросе среднего диаметра от 50 до 150 нм. Оценка поверхностной плотности ННК составила величину порядка 10 мкм^{-2} .

Следующий этап работы был посвящен изготовлению экспериментальных образцов на основе синтезированных эпитаксиальных структур. После нанесения тонкой алюминиевой пленки на тыльную сторону кремниевой подложки (нижний контакт) образец обрабатывали в установке быстрого термического отжига Jipelec JetFirst 100 при температуре 300°C в течение 10 мин в атмосфере азота. Далее пространство между ННК заполнялось при помощи пипетки-дозатора фотоотверждаемой эпоксидной смолой SU-8 с последующим центрифугированием, УФ-экспонированием и окончательным запеканием при температуре 250°C . Для высвобождения вершин ННК от SU-8 (для последующего формирования омического контакта с ННК) проводили частичное травление структуры в кислородной плазме с использованием установки PiNK Plasma system V15-G (400 Вт, 60 sccm, 15 мин). Верхний контакт был выполнен в виде массива круглых мез Al/Au диаметром 100 мкм, полученных с помощью метода лазерной литографии и вакуумного осаждения. Общая толщина контакта составила 250 нм. Для обоих контактов металлизация наносилась в установке термического напыления Auto 500 BOC Edwards. Непосредственно перед загрузкой в камеру соответствующие поверхности в каждом случае обрабатывались растворами плавиковой и соляной кислот (для кремния и нитрида галлия соответственно) с целью удаления поверхностного оксида. Результаты постростового процесса представлены на рис. 1, *c*, *d*.

Результаты и обсуждение

Первым этапом характеризации изготовленных образцов мез были измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ), которые проводились при комнатной температуре на специализированной зондовой станции. Положительный полюс прецизионного источника-измерителя Keithley 2401 прикладывали к нижнему контакту (*p*-Si), а отрицательный — к верхнему (*n*-GaN). Сначала на структуру подавались относительно небольшие напряжения с постепенным расширением диапазона (рис. 2), при этом измерения проводили в циклическом режиме со следующей направленностью:

$$-U \rightarrow 0 \rightarrow +U \rightarrow 0 \rightarrow -U. \quad (1)$$

Как видно на графиках рис. 2, *a*, в диапазоне от -3 до $+3$ В вид ВАХ соответствует поведению обращенного диода, когда обратная ветвь открывается раньше, чем прямая. Это свидетельствует о том, что степени легирования слоев, образующих *p* – *n*-переход, подобраны так, что дно зоны проводимости нитрида галлия в равновесном состоянии находится примерно на одном энергетическом уровне с потолком валентной зоны кремния [18].

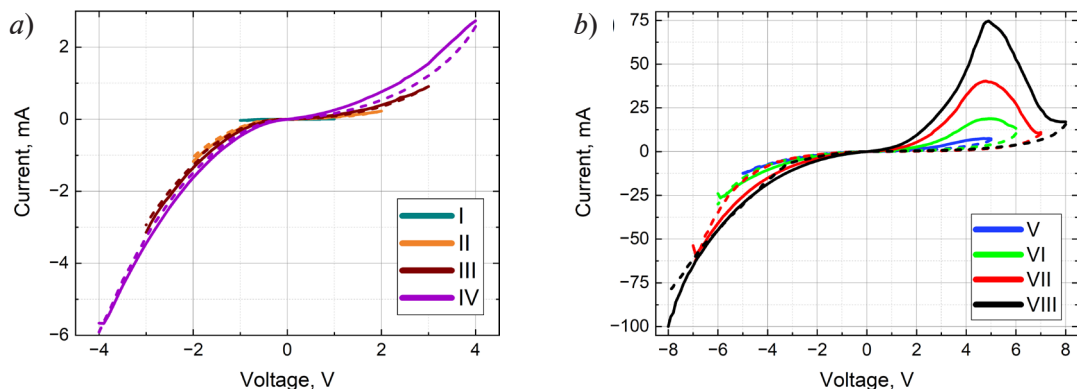


Рис. 2. Графики шестнадцати ВАХ, измеренных в режиме (1) (сплошные линии) и в обратном направлении ($+U \rightarrow -U$) (пунктиры) одной из мез изготовленной структуры.

Цветные кривые отражают результаты I – IV (*a*) и V – VIII (*b*) измерений



При дальнейшем повышении прикладываемого напряжения (сверх 5 В) отмечается появление участка отрицательного дифференциального сопротивления, а также гистерезиса при прямом ($-U \rightarrow +U$) и обратном ($+U \rightarrow -U$) направлениях смещения (рис. 2, *b*).

Для получения более полной картины аналогичный эксперимент был проведен на пяти других мезах (порядковые номера C2R5 – C2R9). В данном случае (рис. 3) измерительный цикл с началом и окончанием при нулевом напряжении состоял из четырех последовательных участков, совокупно охватывающих диапазон от -8 до $+8$ В. Как следует из рис. 3, все мезы проявляют гистерезисы, при этом графики ВАХ хорошо соответствуют друг другу во всем рассматриваемом диапазоне. Гистерезис в области положительных напряжений наблюдался только после предварительного обратного смещения структур (шаги 1 и 2), что согласуется с ВАХ в режиме (1) (сплошные линии на рис. 2, *b*). На основании этих результатов, а также аналогичных вольтамперных характеристик других мез (здесь не представлены), можно сделать вывод, что подача на структуру напряжения обратной полярности в течение порядка 10 с (это время измерения ВАХ в диапазоне от 0 до -8 В) в последующем приводит к значительному росту прямого тока относительно этой же структуры, что эквивалентно процедуре записи в ячейку памяти. В свою очередь подача прямого смещения, эквивалентного шагу 4, нивелирует этот эффект, переводя структуру в исходное состояние с меньшей проводимостью (см. рис. 2, *b* и 3). Данное явление повторяется, и структуру можно многократно переводить из одного стабильного состояния в другое, прикладывая напряжение нужной полярности (прямое смещение – стирание, обратное – запись).

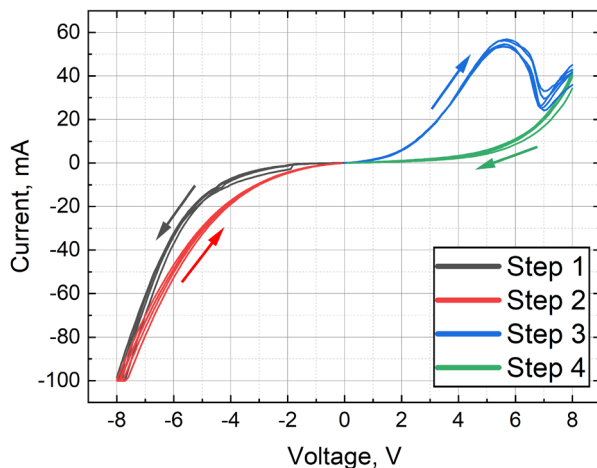


Рис. 3. Суперпозиция циклических ВАХ, полученных в режиме измерения $0 \text{ В} \rightarrow -8 \text{ В} \rightarrow 0 \text{ В} \rightarrow +8 \text{ В} \rightarrow 0 \text{ В}$ для пяти различных мез (их порядковые номера C2R5 – C2R9)

имеет малый радиус). При этом уровни, для которых волновая функция в значительной степени локализована внутри слоя, будут образовывать ловушки для носителей заряда с длительным временем жизни. Такие уровни не будут участвовать в транспорте носителей заряда, но могут косвенно влиять на процесс переноса заряда, инициируемый кулоновскими силами. Как мы полагаем, именно указанные состояния в исследуемой структуре ответственны за появление особенностей на кривых вольтамперных характеристик.

На рис. 4 представлены зонные диаграммы исследуемых структур, соответствующие различным шагам измерения ВАХ, отмеченных на рис. 3. Первоначально зонная структура исследуемой системы (см. рис. 4, *a*) соответствует некоторому распределению носителей заряда на изолированных центрах широкозонного интерфейсного слоя (на рис. 4 не представлен), которое определяется процедурой эпитаксиального синтеза и, предположительно, близко к равновесному вследствие высокой температуры роста. Зонная структура системы при этом будет соответствовать зонной структуре интерфейса GaN/Si с учетом статических поправок, вызванных наличием локальных механических деформаций ввиду

Мы полагаем, что физическая природа такого поведения исследуемых структур тесно связана с особенностями синтеза ННК. Алюминий, галлий, азот и кремний – это представители разных групп таблицы Менделеева и способны образовывать большое количество различных соединений, включая широкозонные полупроводники. Таким образом, в процессе синтеза структуры между подложкой и ННК GaN возможно образование тонких слоев нитрида кремния, силицидов и других соединений, наличие которых может влиять на процесс транспорта носителей заряда между нитридом галлия и кремнием. Широкозонные слои обладают важной особенностью – возможным наличием зарядовых центров, энергетические уровни которых расположены глубоко в запрещенной зоне материала и описываются высоколокализованной волновой функцией (электронная орбиталь

разницы постоянных кристаллической решетки GaN и Si, а также наличием заряда в нитриде галлия, индуцированного в результате пьезоэффекта. При подаче отрицательного напряжения (см. рис. 4, *b*) на полупроводниковую структуру (I шаг, согласно рис. 3) может сложиться ситуация, когда с обеих сторон изолированных центров окажутся в непосредственной близости состояния непрерывного спектра (разрешенные зоны нитрида галлия и кремния); а это обеспечит возможность туннелирования носителей через такие центры по механизму Пула – Френкеля [19], т.е. уменьшения времени жизни состояний и их перезарядки до установления локального равновесия, отвечающего данному уровню смещения – происходит «запись» состояния. При снятии приложенного напряжения (см. II шаг на рис. 3) снова происходит изоляция носителей на глубоких центрах, при этом измененное распределение носителей заряда на центрах обеспечивает изменение кулоновского поля и, как следствие, искажается зонная структура всего гетероинтерфейса (см. рис. 4, *c*), что влияет на равновесную концентрацию свободных носителей заряда в GaN и Si вблизи интерфейса и приводит к изменению условий их туннелирования и рекомбинации. В исследуемой нами полупроводниковой структуре изменение заряда изолированных центров соответствует увеличению силы тока при прямом смещении (см. шаг 3 на рис. 3), что в совокупности с ожидаемыми уровнями легирования GaN (порядка 10^{19} см^{-3}) и Si (порядка 10^{20} см^{-3}) дает основание полагать, что энергетические уровни локализованных центров в запрещенной зоне расположены ниже уровня Ферми, а процедура их «записи» при подаче отрицательного смещения приводит к росту положительного заряда и сближению значений высоты потенциального барьера вблизи интерфейса для электронов в GaN и дырок в Si, т.е. росту произведения равновесных концентраций. Дальнейшее увеличение прямого смещения обеспечивает открывание диодной структуры (рис. 4, *d*), что приводит к значительному росту концентрации свободных носителей заряда вблизи интерфейса и перезарядке изолированных центров либо через процесс рекомбинации Шокли – Рида – Холла с участием свободных носителей, заброшенных в разрешенную зону широкозонного интерфейсного слоя между GaN и Si, либо через захват носителей на иные энергетические уровни в запрещенной зоне данного слоя и их последующую рекомбинацию с носителями, расположенными на изолированных центрах. Таким образом происходит операция «стирания» состояния. Важно при этом отметить, что подача напряжения ниже пороговых значений (порога туннелирования носителей по механизму Пула – Френкеля или порога активации механизма рекомбинации Шокли – Рида – Холла) не будет приводить к изменению распределения заряда на изолированных центрах и тем самым не будет трансформировать состояние системы. В нашем случае такая ситуация экспериментально наблюдается; это можно видеть на рис. 2, *a*: на ВАХ в диапазоне от -3 до $+3$ В отсутствует гистерезис.

Полученные результаты целесообразно сопоставить с литературными данными. Например, интерфейсный тип переключения в мемристорах упоминается в книге [20]. В работах [21, 22] наблюдается резистивное переключение в структурах металл/перовскит, зависящее от полярности прикладываемого напряжения. При этом авторы объясняют данный эффект в рамках модели с ловушечными состояниями на интерфейсе. В статьях [23, 24] исследуются мемристорные структуры, в основе работы которых лежат зарядовые ловушки. Встречаются также теоретические исследования резистивного переключения в мемристорах на базе интерфейсной ловушечной модели [25]. Таким образом, мы считаем возможным, что в исследуемых образцах имеет место резистивное переключение биполярного типа (переключение состояний выполняется напряжением различной полярности). Насколько нам известно, для гетероструктур GaN ННК/Si данный эффект установлен впервые.

На следующем этапе исследований анализировались мемристорные свойства рассматриваемых гетероструктур. С учетом того, что запись логической единицы (или низкоомного состояния, *англ.* Low Resistive State (LRS)) осуществляется напряжением обратной полярности, мы подали смещение -8 В в течение 10 с на одну из мез (с порядковым номером C2R4), ранее не задействованной в измерениях. Затем структура была отключена от внешней цепи и оставлена на 65 ч без каких-либо воздействий. По истечении указанного времени к ней вновь подсоединили токосъемные зонды и провели серию считываний ее сопротивления из 738 циклов при помощи вспомогательной обвязки (рис. 5, *a*).

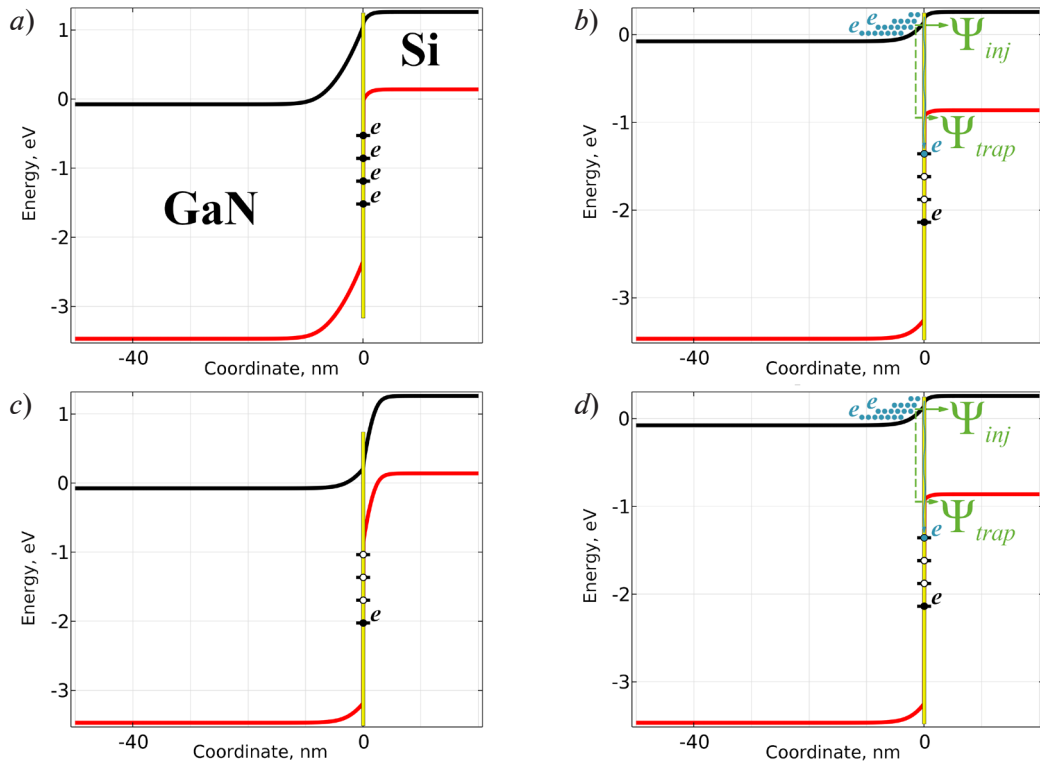


Рис. 4. Зонные диаграммы, поясняющие наблюдаемый эффект в исследуемых структурах на примере цикла запись-стирание: изначальное состояние $U = 0$ (a), запись $0 \rightarrow -U$ (b), запись $-U \rightarrow 0$ (c), стирание $0 \rightarrow +U$ (d); Ψ_{tun} , Ψ_{inj} , Ψ_{trap} – волновые функции туннелирования, состояний системы после инжекции и захвата электронов (e) в ловушки, соответственно

Считывание проводили прямоугольными импульсами напряжением $+0,5$ В с частотой $0,1$ Гц (длительность импульсов составляла 1 мс). Ток, проходящий через структуру, преобразовывался при помощи трансимпедансного усилителя (ТА на рис. 5) в напряжение, которое регистрировалось осциллографом. Первые 198 циклов показания напряжения на выходе ТА записывались каждые 10 с, следующие 60 циклов – каждую минуту и последние 480 циклов – каждые 10 мин. Результаты измерений представлены на рис. 5, b.

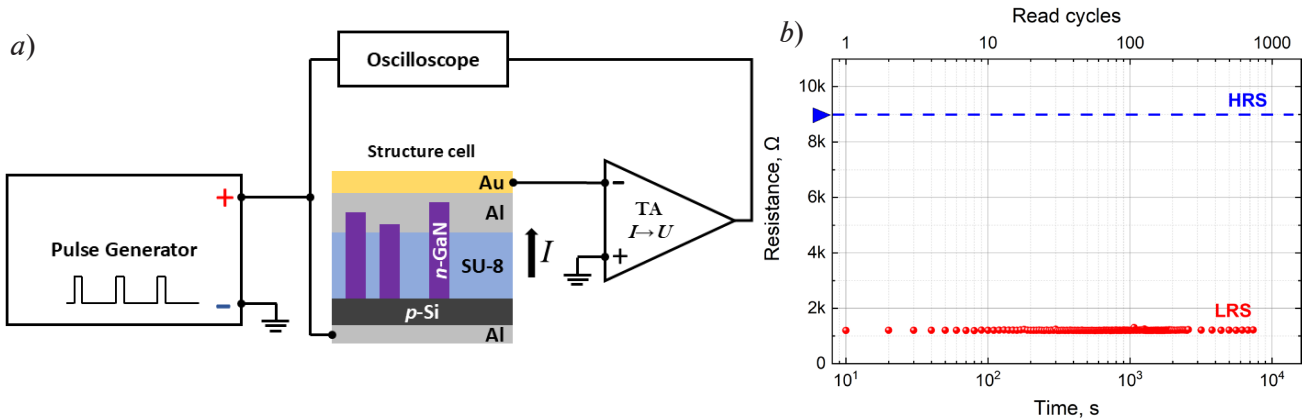


Рис. 5. Исследование мемристорных свойств ячейки C2R4 через 65 ч после записи в нее логической единицы: a – схематичное изображение измерительной цепи, b – временная развертка последовательных импульсных считываний сопротивления напряжением $V_{read} = 0,5$ В с частотой $0,1$ Гц;

HRS, LRS – высоко- и низкоомное состояния, которые соответствуют уровням логического нуля и единицы соответственно

Поскольку в изначальных условиях структурные ячейки находятся в высокоомном состоянии (*англ.* High Resistive State (HRS)), или состоянии логического нуля, то перед процедурой записи логической единицы была получена прямая ветвь ВАХ для значений напряжения до 5 В. По этой зависимости для напряжения считывания было найдено значение сопротивления, соответствующее HRS-состоянию, оно составило 9 кОм (отмечено синей линией на рис. 5, *b*).

Как видно, на протяжении всего времени считываний значение сопротивления ячейки практически не претерпевает изменений и находится на уровне 1,2 кОм, что более чем в 7 раз ниже относительно HRS-состояния. После этого эксперимента на ячейку было подано продолжительное прямое смещение +8 В, в результате чего она была возвращена в первоначальное высокоомное состояние. Контроль возврата в исходное состояние выполнен путем повторного измерения ВАХ, а также через ее сопоставление с аналогичной характеристикой, полученной до записи логической единицы в ячейку. Таким образом, исследуемые структуры демонстрируют способность запоминать и хранить логическую переменную.

Заключение

В работе проведены исследования гетероструктур нитевидных нанокристаллов (ННК) *n*-GaN/*p*-Si, синтезированных методом молекулярно-пучковой эпитаксии с использованием алюминиевой затравки для инициации роста ННК. К массивам вертикально ориентированных ННК методами постростовой обработки сформированы омические контакты в виде круглых мез-площадок диаметром 100 мкм. По результатам вольтамперных измерений в циклических режимах впервые обнаружено, что в соответствующих структурах наблюдается эффект биполярного резистивного переключения, а также продемонстрирована их способность в течение довольно длительного времени (не менее 65 ч) сохранять низкоомное состояние с последующей серией многократного считывания (738 циклов) без потери данных.

Таким образом, гетероструктуры нитевидных нанокристаллов *n*-GaN/*p*-Si способны проявлять мемристорные свойства, которые, как мы полагаем, обусловлены наличием в области гетероинтерфейса управляемых зарядовых центров, влияющих на проводимость системы за счет полевых эффектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Li H., Li Q., Li Y., et al. Experimental breakthroughs on 2D transistors: Approaching the theoretical limit // *Advanced Functional Materials*. 2024. Vol. 34. No. 38. P. 2402474.
2. Chua L. Memristor – the missing circuit element // *IEEE Transactions on Circuit Theory*. 1971. Vol. 18. No. 5. Pp. 507–519.
3. Mohammad B., Jaoude M. A., Kumar V., Al Homouz D. M., Nahla H. A., Al-Qutayri M., Christoforou N. State of the art of metal oxide memristor devices // *Nanotechnology Reviews*. 2016. Vol. 5. No. 3. Pp. 311–329.
4. Mikhaylov A., Belov A., Korolev D., et al. Multilayer metal-oxide memristive device with stabilized resistive switching // *Advanced Materials Technologies*. 2020. Vol. 5. No. 1. P. 1900607.
5. Xiao X., Hu J., Tang S., Yan K., Gao B., Chen H., Zou D. Recent advances in halide perovskite memristors: Materials, structures, mechanisms, and applications // *Advanced Materials Technologies*. 2020. Vol. 5. No. 6. P. 1900914.
6. Duan H., Cheng S., Qin L., Zhang X., Xie B., Zhang Y., Jie W. Low-power memristor based on two-dimensional materials // *The Journal of Physical Chemistry Letters*. 2022. Vol. 13. No. 31. Pp. 7130–7138.
7. Kim M.-H., Park H.-L., Kim M.-H., Jang J., Bae J.-H., Kang I.M., Lee S.-H. Fluoropolymer-based organic memristor with multifunctionality for flexible neural network system // *npj Flexible Electronics*. 2021. Vol. 5. No. 1. P. 34.
8. Song W., Yu H., Li X., Fang R., Zhu W., Zhang L. Electric-controlled resistive switching and different synaptic behaviors in *p*⁺-Si/*n*-ZnO heterojunction memristor // *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2023. Vol. 70. No. 4. Pp. 1648–1652.



9. Khan M. U., Furqan C. M., Kim J., et al. Asymmetric GaN/ZnO engineered resistive memory device for electronic synapses // *ACS Applied Electronic Materials*. 2022. Vol. 4. No. 1. Pp. 297–307.
10. Dragoman M., Tiginyanu I., Dragoman D., Dinescu A., Braniste T., Ciobanu V. Learning mechanisms in memristor networks based on GaN nanomembranes // *Journal of Applied Physics*. 2018. Vol. 124. No. 15. P. 152110.
11. Liu M., Lu S., Jia Y., Zang H., Jiang K., Sun X., Li D. AlScN/*n*-GaN ferroelectric memristors with controllable on/off ratios and reversible bipolar resistive switching characteristics // *IEEE Electron Device Letters*. 2024. Vol. 45. No. 3. Pp. 356–359.
12. 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.
13. Bolshakov A. D., Mozharov A. M., Sapunov G. A., Shtrom I. V., Sibirev N. V., Fedorov V. V., Ubyivovk E. V., Tchernycheva M., Cirlin G. E., Mukhin I. S. Dopant-stimulated growth of GaN nanotube-like nanostructures on Si(111) by molecular beam epitaxy // *Beilstein Journal of Nanotechnology*. 2018. Vol. 9. No. 1. Pp. 146–154.
14. Mozharov A., Bolshakov A., Cirlin G., Mukhin I. Numerical modeling of photovoltaic efficiency of *n*-type GaN nanowires on *p*-type Si heterojunction // *Physica Status Solidi – Rapid Research Letters*. 2015. Vol. 9. No. 9. Pp. 507–510.
15. Fedorov V. V., Bolshakov A. D., Kirilenko D. A., Mozharov A. M., Sitnikova A. A., Sapunov G. A., Dvoretckaia L. N., Shtrom I. V., Cirlin G. E., Mukhin I. S. Droplet epitaxy mediated growth of GaN nanostructures on Si (111) via plasma-assisted molecular beam epitaxy // *CrystEngComm*. 2018. Vol. 20. No. 24. Pp. 3370–3380.
16. Kern W. The evolution of silicon wafer cleaning technology // *Journal of The Electrochemical Society*. 1990. Vol. 137. No. 6. Pp. 1887–1892.
17. Brubaker M. D., Duff S. M., Harvey T. E., Blanchard P. T., Roshko A., Sanders A. W., Sanford N. A., Bertness K. A. Polarity-controlled GaN/AlN nucleation layers for selective-area growth of GaN nanowire arrays on Si(111) substrates by molecular beam epitaxy // *Crystal Growth & Design*. 2016. Vol. 16. No. 2. Pp. 596–604.
18. Барыкин Д. А., Шугуров К. Ю., Можаров А. М., Мухин И. С. Численное моделирование туннельного эффекта в гетероструктуре нитрида галлия на кремнии // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки*. 2024. Т. 17. № 3. С. 46–56.
19. Frenkel J. On pre-breakdown phenomena in insulators and electronic semi-conductors // *Physical Review*. 1938. Vol. 54. No. 8. Pp. 647–648.
20. Ielmini D., Waser R. (Eds.) Resistive switching: From fundamentals of nanoionic redox processes to memristive device applications. 1st edition. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., 2016. 784 p.
21. Sawa A., Fujii T., Kawasaki M., Tokura Y. Hysteretic current–voltage characteristics and resistance switching at a rectifying Ti/Pr_{0.7}Ca_{0.3}MnO₃ interface // *Applied Physics Letters*. 2004. Vol. 85. No. 18. Pp. 4073–4075.
22. Fujii T., Kawasaki M., Sawa A., Akoh H., Kawazoe Y., Tokura Y. Hysteretic current–voltage characteristics and resistance switching at an epitaxial oxide Schottky junction SrRuO₃/SrTi_{0.99}Nb_{0.01}O₃ // *Applied Physics Letters*. 2005. Vol. 86. No. 1. P. 012107.
23. Yoon J. H., Song S. J., Yoo I., Seok J. Y., Yoon K. J., Kwon D. E., Park T. H., Hwang C. S. Highly uniform, electroforming-free, and self-rectifying resistive memory in the Pt/Ta₂O₅/HfO_{2-x}/TiN structure // *Advanced Functional Materials*. 2014. Vol. 24. No. 32. Pp. 5086–5095.
24. Park T., Kim J., Kwon Y. J., Kim H. J., Yim S. P., Shin D. H., Kim Y. R., Kim H. J., Hwang C. S. Au-nanodots embedded self-rectifying analog charge trap memristor with modified bias voltage application method for stable multi-bit hardware-based neural network // *Advanced Materials Technologies*. 2025. Vol. 10. No. 3. P. 2400965.
25. Tian Y., Jiang L., Zhang X., Zhang G., Zhu Q. Trap-assisted transition between Schottky emission and Fowler–Nordheim tunneling in the interfacial-memristor based on Bi₂S₃ nano-networks // *AIP Advances*. 2018. Vol. 8. No. 3. P. 035105.

REFERENCES

1. Li H., Li Q., Li Y., et al., Experimental breakthroughs on 2D transistors: Approaching the theoretical limit, *Adv. Funct. Mater.* 34 (38) (2024) 2402474.
2. Chua L., Memristor – the missing circuit element, *IEEE Trans. Circuit Theory.* 18 (5) (1971) 507–519.
3. Mohammad B., Jaoude M. A., Kumar V., et al., State of the art of metal oxide memristor devices, *Nanotechnol. Rev.* 5 (3) (2016) 311–329.
4. Mikhaylov A., Belov A., Korolev D., et al., Multilayer metal-oxide memristive device with stabilized resistive switching, *Adv. Mater. Technol.* 5 (1) (2020) 1900607.
5. Xiao X., Hu J., Tang S., et al., Recent advances in halide perovskite memristors: Materials, structures, mechanisms, and applications, *Adv. Mater. Technol.* 5 (6) (2020) 1900914.
6. Duan H., Cheng S., Qin L., et al., Low-power memristor based on two-dimensional materials, *J. Phys. Chem. Lett.* 13 (31) (2022) 7130–7138.
7. Kim M.-H., Park H.-L., Kim M.-H., et al., Fluoropolymer-based organic memristor with multifunctionality for flexible neural network system, *npj Flex.* 5 (1) (2021) 34.
8. Song W., Yu H., Li X., et al., Electric-controlled resistive switching and different synaptic behaviors in p^+ -Si/ n -ZnO heterojunction memristor, *IEEE Trans. Electron Dev.* 70 (4) (2023) 1648–1652.
9. Khan M. U., Furqan C. M., Kim J., et al., Asymmetric GaN/ZnO engineered resistive memory device for electronic synapses, *ACS Appl. Electron. Mater.* 44 (1) (2022) 297–307.
10. Dragoman M., Tiginyanu I., Dragoman D., et al., Learning mechanisms in memristor networks based on GaN nanomembranes, *J. Appl. Phys.* 124 (15) (2018) 152110.
11. Liu M., Lu S., Jia Y., et al., AlScN/ n -GaN ferroelectric memristors with controllable on/off ratios and reversible bipolar resistive switching characteristics, *IEEE Electron Device Lett.* 45 (3) (2024) 356–359.
12. 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.
13. Bolshakov A. D., Mozharov A. M., Sapunov G. A., et al., Dopant-stimulated growth of GaN nanotube-like nanostructures on Si(111) by molecular beam epitaxy, *Beilstein J. Nanotechnol.* 9 (1) (2018) 146–154.
14. Mozharov A., Bolshakov A., Cirilin G., Mukhin I., Numerical modeling of photovoltaic efficiency of n -type GaN nanowires on p -type Si heterojunction, *Phys. Status Solidi – Rapid Res. Lett.* 9 (9) (2015) 507–510.
15. Fedorov V. V., Bolshakov A. D., Kirilenko D. A., et al., Droplet epitaxy mediated growth of GaN nanostructures on Si (111) via plasma-assisted molecular beam epitaxy, *CrystEngComm.* 20 (24) (2018) 3370–3380.
16. Kern W., The evolution of silicon wafer cleaning technology, *J. Electrochem. Soc.* 137(6) (1990) 1887–1892.
17. Brubaker M. D., Duff S. M., Harvey T. E., et al., Polarity-controlled GaN/AlN nucleation layers for selective-area growth of GaN nanowire arrays on Si(111) substrates by molecular beam epitaxy, *Cryst. Growth Des.* 16 (2) (2016) 596–604.
18. Barykin D., Shugurov K., Mozharov A., Mukhin I., Numerical simulation of the tunnel effect in the gallium nitride heterostructure on silicon, *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics.* 17 (3) (2024) 46–56 (in Russian).
19. Frenkel J., On pre-breakdown phenomena in insulators and electronic semi-conductors, *Phys. Rev.* 54 (8) (1938) 647–648.
20. Ielmini D., Waser R. (Eds.), Resistive switching: From fundamentals of nanoionic redox processes to memristive device applications; 1st edition, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., Weinheim, Germany, 2016.
21. Sawa A., Fujii T., Kawasaki M., Tokura Y., Hysteretic current–voltage characteristics and resistance switching at a rectifying $\text{TiPr}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$ interface, *Appl. Phys. Lett.* 85 (18) (2004) 4073–4075.



22. Fujii T., Kawasaki M., Sawa A., et al., Hysteretic current–voltage characteristics and resistance switching at an epitaxial oxide Schottky junction $\text{SrRuO}_3/\text{SrTi}_{0.99}\text{Nb}_{0.01}\text{O}_3$, Appl. Phys. Lett. 86 (1) (2005) 012107.
23. Yoon J. H., Song S. J., Yoo I., et al., Highly uniform, electroforming-free, and self-rectifying resistive memory in the $\text{Pt}/\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{HfO}_{2-x}/\text{TiN}$ structure, Adv. Funct. Mater. 24 (32) (2014) 5086–5095.
24. Park T., Kim J., Kwon Y. J., et al., Au-nanodots embedded self-rectifying analog charge trap memristor with modified bias voltage application method for stable multi-bit hardware-based neural network, Adv. Mater. Technol. 10 (3) (2025) 2400965.
25. Tian Y., Jiang L., Zhang X., et al., Trap-assisted transition between Schottky emission and Fowler–Nordheim tunneling in the interfacial-memristor based on Bi_2S_3 nano-networks, AIP Adv. 8 (3) (2018) 035105.

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

194021, 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

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

kaveev@mail.ioffe.ru

ORCID: 0000-0002-3640-677X

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 18.04.2025. Одобрена после рецензирования 16.07.2025.
Принята 16.07.2025.*

Received 18.04.2025. Approved after reviewing 16.07.2025. Accepted 16.07.2025.