

Математическое моделирование физических процессов

Научная статья

УДК 537.9

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.17305>

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУННЕЛЬНОГО ЭФФЕКТА В ГЕТЕРОСТРУКТУРЕ НИТРИДА ГАЛЛИЯ НА КРЕМНИИ

Д. А. Барыкин^{1, 2} ✉, К. Ю. Шугуров¹, А. М. Можаров¹, И. С. Мухин²

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

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

Санкт-Петербург, Россия

✉ d.a.barykin02@mail.ru

Аннотация. В работе выполнено численное моделирование туннельного эффекта в системе *n*-GaN на кремнии Si *p*-типа проводимости. Получены вариации зонных диаграмм, вольтамперных характеристик и частот отсечки соответствующих диодных гетероструктур в зависимости от уровней легирования GaN и Si. Установлены значения концентраций легирующей примеси для реализации режимов обращенного и туннельного диодов. В режиме туннельного диода наибольшая плотность туннельного тока и предельная частота генерации составили 24,6 кА/см² и 17 ГГц, соответственно.

Ключевые слова: моделирование туннельного эффекта, нитрид галлия, кремний, нитевидный нанокристалл, туннельный диод

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-01279 (<https://rscf.ru/project/23-79-01279/>).

Для цитирования: 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. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.17305>

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.17305>

NUMERICAL SIMULATION OF THE TUNNEL EFFECT IN THE GALLIUM NITRIDE HETEROSTRUCTURE ON SILICON

D. A. Barykin^{1, 2} ✉, K. Yu. Shugurov¹, A. M. Mozharov¹, I. S. Mukhin²

¹ Alferov University, St. Petersburg, Russia;

² Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

✉ d.a.barykin02@mail.ru

Abstract. In this study, a numerical simulation of the tunnel effect in the *n*-GaN/*p*-Si heterostructure has been performed. Variations of band diagrams, current-voltage characteristics and cutoff frequencies of the diode heterostructures under study were obtained depending on the doping levels of GaN and Si. The dopant concentration values were found for implementing backward and tunnel diode modes. In the tunnel diode mode, the peak current density and maximal generation frequency were 24.6 kA/cm² and 17 GHz, respectively.

Keywords: tunnel effect simulation, gallium nitride, silicon, nanowire, tunnel diode

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

For citation: Barykin D. A., Shugurov K. Yu., Mozharov A. M., Mukhin I. S., 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. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.17305>

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

Введение

За последние 70 лет были разработаны различные полупроводниковые приборы СВЧ-диапазона, в частности, $p-i-n$ -диоды, диоды Шоттки, Ганна, а также туннельные и обращенные диоды, работа которых основана на эффекте туннелирования. Данный класс элементов занимает важную нишу, поскольку широко используется в цепях детектирования, смешения, усиления и генерации высокочастотных сигналов.

На текущий момент диоды с туннельным эффектом преимущественно изготавливаются на основе арсенида галлия (GaAs) и германия (Ge), крайне редко – на основе кремния (Si). Использование узкозонных полупроводников (германий) в первую очередь обусловлено тем, что для таких материалов характерна более высокая вероятность туннелирования носителей [1], что повышает эффективность работы прибора. Однако, с другой стороны, из-за малой ширины запрещенной зоны наблюдается температурная нестабильность его характеристик, несмотря на тот факт, что туннельные диоды в этом плане менее чувствительны, чем, например, быстродействующие $p-i-n$ -диоды или диоды Шоттки. Использование кремния, безусловно, целесообразно с экономической и технологической точек зрения, но для непрямозонных полупроводников, к которым также относится и германий, межзонный туннельный ток значительно ограничен вследствие закона сохранения импульса, что сильно сужает потенциал компонентов на базе этих материалов [2]. По сравнению с кремниевыми туннельными диодами, материалы на основе элементов III – V групп (например, GaAs) могут обеспечить гораздо более высокое отношение пикового тока к току впадины ввиду их прямозонной природы, низких значений эффективных масс туннелирования и возможности использования различных вариаций гетероструктур на их основе [3]. При этом арсенид галлия обладает низкой теплопроводностью, характеризуется достаточно сложной технологией фабрикации и, как следствие, высокой стоимостью производства. Кроме того, получение n -GaAs с концентрацией примеси свыше $2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ представляет собой сложную технологическую задачу [4].

Учет вышеописанных негативных особенностей стимулирует продолжение активных исследований в данной области: подыскиваются новые системы материалов, в частности интегрированных с кремниевой платформой [5 – 7].

Перспективной системой материалов считаются гетероструктуры нитрида галлия на кремнии (GaN/Si), которые позволяют совместить преимущества GaN (широкозонный материал, прямозонная структура, высокая термическая, химическая и радиационная стойкость) с развитостью и доступностью кремниевой технологии. Однако эти полупроводники плохо совместимы из-за существенного рассогласования по параметру кристаллической решетки и коэффициенту теплового расширения.

Альтернативным подходом может служить использование нитевидных нанокристаллов (*англ.* nanowires (*NWs*)), главное преимущество которых состоит в высоком кристаллическом совершенстве, практически вне зависимости от выбора ростовой подложки, что значительно расширяет возможности интеграции GaN с другими материалами. Более того, исследования GaN *NWs* показывают, что такие объекты хорошо подходят для создания широкого класса компонентов, например, полевых транзисторов в так называемой конфигурации кольцевого затвора (“gate-all-around”) или структуры ядро – оболочка (“core-shell”) [8, 9], диодов Шоттки [10], фотодиодов [11], пьезогенераторов [12].

Помимо высокого кристаллического качества, применение GaN *NWs*, в том числе в приборах с туннельным эффектом, оправдано еще рядом важных преимуществ:

низкая электрическая емкость структуры ввиду малых поперечных размеров *NW* [10], не превышающих, как правило, 100 – 200 нм (для туннельных переходов характерны относительно высокие значения емкости, что вызвано малой шириной области пространственного заряда);

способность одиночных GaN *NWs* коммутировать токи плотностью до 2 MA/cm² [13], что востребовано для создания сильноточных туннельных приборов [14];

возможность синтеза GaN *NWs* с уровнем легирования вплоть до 10²⁰ см⁻³ [15], что позволяет управлять диапазоном рабочих частот и выходными характеристиками структур;

возможность работы электронных компонентов в неблагоприятных условиях и агрессивных средах, благодаря материальным свойствам GaN;

большая величина отношения площади поверхности к объему вследствие высокого значения аспектного соотношения, характерного для *NWs*, что способствует эффективно-му отводу тепла [16].

Значимый потенциал *NWs* и развитие методов их синтеза привлекли внимание многих исследователей, и создание диодов с туннельным эффектом на их основе стало предметом активных разработок на протяжении последних лет, где были рассмотрены *NWs* InAs/InSb, InAs/GaSb, GaAsSb, InGaAs [7, 17 – 20]. Однако сам туннельный эффект в системе GaN *NW*/Si до сих пор остается неизученным.

Данная работа посвящена теоретическому изучению эффекта туннелирования в гетеро-структуре GaN *NW* на кремнии.

Описание модели

Моделирование туннельного эффекта проводилось для системы *n*-GaN/*p*-Si с использованием пакета численного моделирования COMSOL Multiphysics. Поскольку типичный диаметр GaN *NW* составляет 100 – 200 нм, а характерная толщина области пространственного заряда (ОПЗ) в туннельных диодах составляет около 10 нм, можно утверждать, что распределение электрического поля будет в основном направлено поперек гетероинтерфейса и почти не зависеть от положения в плоскости в пределах *NW* (рис. 1). По этой причине для проведения расчета была выбрана одномерная модель системы.

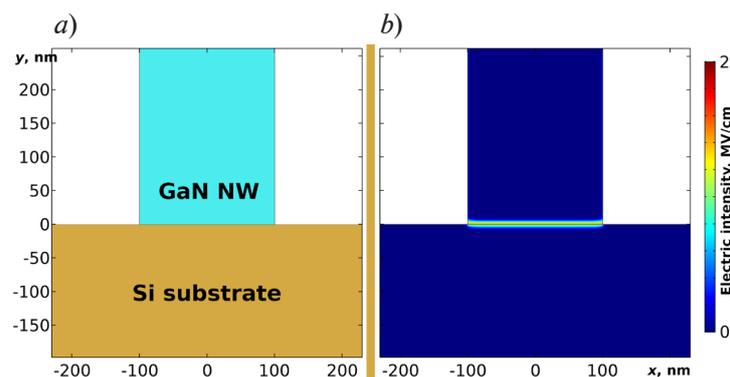


Рис. 1. Схематическая модель системы GaN *NW*/Si (a) и распределение напряженности электростатического поля на гетероинтерфейсе *n*-GaN *NW*/*p*-Si при $n = p = 10^{19}$ см⁻³ (b) (использован программный пакет COMSOL Multiphysics)

Численное моделирование проводилось в рамках модели Русброека [21] с учетом статистики Ферми – Дирака для носителей заряда. Параметры полупроводниковых материалов взяты из монографии [22]. Для корректного описания термоэмиссионного тока в кремнии был учтен процесс рекомбинации носителей по механизму Шокли – Рида – Холла. Расчет туннельного тока проводился в рамках нелокальной модели туннелирования [23] с использованием следующего выражения:

$$J_t = \frac{eK\sqrt{m_e m_h}}{2\pi^2 \hbar^3} \int_{E_C}^{E_V} T(E) [F_C(E) - F_V(E)] dE, \quad (1)$$

где E – полная энергия носителя заряда; E_C, E_V – энергии дна зоны проводимости в n -слое и потолка валентной зоны в p -слое, соответственно; T – вероятность межзонного туннелирования носителей; F_C, F_V – вероятности нахождения электрона с энергией E в зоне проводимости n -слоя и валентной зоне p -слоя, соответственно; K – кинетическая энергия теплового движения носителей заряда; m_e, m_h – эффективные массы электронов и дырок, соответственно; e – заряд электрона; \hbar – постоянная Планка ($\hbar = h/2\pi$).

Вероятность туннелирования рассчитывалась в приближения Вентцеля – Крамерса – Бриллюэна с усредненным волновым вектором \mathbf{k} для электронов и дырок:

$$T \approx \exp \left[-2 \int_{x_1}^{x_2} |k(x)| dx \right], \quad (2)$$

$$k = \frac{k_e k_h}{\sqrt{k_e^2 + k_h^2}}, \quad (3)$$

$$k_e = \sqrt{\frac{2m_e}{\hbar^2} (E_C - E)}, \quad (4)$$

$$k_h = \sqrt{\frac{2m_h}{\hbar^2} (E - E_V)}, \quad (5)$$

Величины x_1 и x_2 представляют собой границы энергетического барьера для электронов с полной энергией E и определяются условием равенств $E = E_C$ и $E = E_V$, соответственно.

При синтезе *NWs* полупроводниковые слои в области гетероперехода оказываются напряженными вследствие рассогласования с подложкой по параметру решетки и коэффициенту теплового расширения. Однако в случае нитрида галлия на кремнии, можно получить *NWs*, в которых слои у основания будут полностью релаксированными за счет образования ультратонких интерфейсных слоев (менее 2 нм) [24 – 26]. Поэтому указанный эффект не учитывался в рамках текущего расчета.

Результаты и их обсуждение

В качестве варьируемых параметров в расчете выступали уровни легирования Si и GaN. Для кремния диапазон этих значений составил $(1 - 10) \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, что соответствует концентрации примеси в коммерческих сильнолегированных подложках. Для GaN этот параметр изменялся в более широких пределах: $(5 - 1000) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, что обусловлено, с одной стороны, фоновым легированием синтезируемых *NWs*, а с другой – верхней границей легирования *NWs* при помощи кремния, в соответствии с литературными источниками [15].

На рис. 2 представлены зонные диаграммы без смещения по напряжению для трех структурных конфигураций. При этом первая (рис. 2, а) и третья (рис. 2, с) соответствуют минимальным и максимальным пределам рассматриваемых концентраций легирующей примеси. Видно, что в случае максимальных концентраций происходит перекрытие валентной зоны Si и зоны проводимости GaN (см. рис. 2, с).

Такая картина характерна для туннельных диодов, когда небольшое смещение в любую сторону будет сопровождаться активным туннелированием носителей, поскольку для электронов в зоне проводимости нитрида галлия станут доступны уровни в валентной зоне кремния (прямое смещение) с такой же энергией и наоборот (обратное смещение). Минимальная ширина барьера при этом составляет около 3 нм.

Для минимальных уровней легирования (см. рис. 2, а) GaN оказывается невырожденным и перекрытия зон не происходит, следовательно туннельный ток при околонулевых

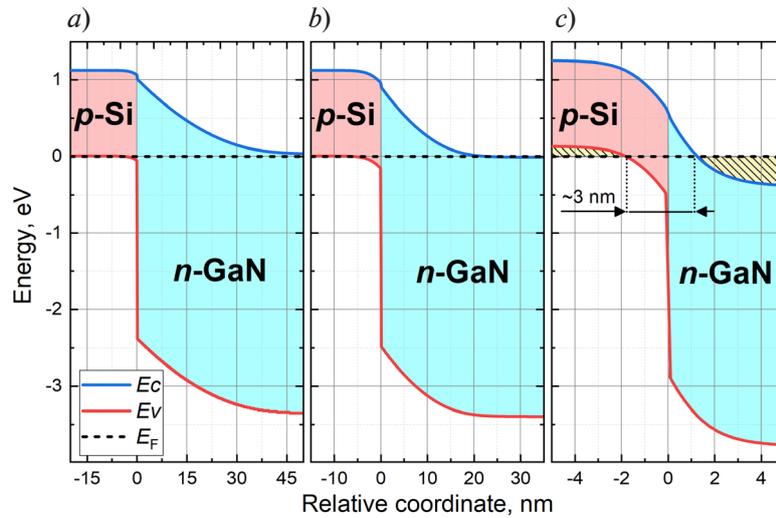


Рис. 2. Зонные диаграммы структур n -GaN/ p -Si для различных конфигураций легирования, см^{-3} : $n = 5 \cdot 10^{17}$, $p = 1 \cdot 10^{19}$ (a); $n = 2 \cdot 10^{18}$, $p = 1 \cdot 10^{19}$ (b); $n = p = 1 \cdot 10^{20}$ (c). Заштрихованная область на рис. 2,с отвечает заполнению дырками в Si и электронами в GaN. За начала отсчета по горизонтальным осям приняты границы раздела слоев, по вертикальным – уровень Ферми E_F для электронов

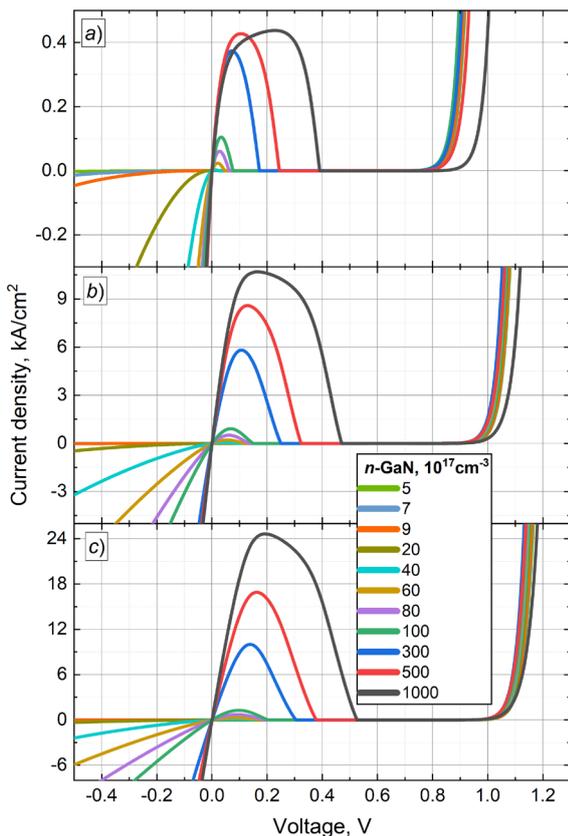


Рис. 3. Рассчитанные вольтамперные характеристики для различных уровней легирования n -GaN (см. легенду) и кремния p , 10^{19} см^{-3} : 1 (a), 5 (b), 10 (c)

смещениях будет отсутствовать. Кроме того, в равновесном состоянии ширина барьера составляет примерно 40 нм, поэтому активное туннелирование станет возможным только в случае значительных обратных смещений, обеспечивающих уменьшение ширины барьера. В целом такая картина свойственна обычным выпрямительным p - n -диодам.

На рис. 2,б можно наблюдать некоторую промежуточную ситуацию, когда потолок валентной зоны Si будет совпадать с дном зоны проводимости GaN. В такой конфигурации прямое смещение структуры будет сопровождаться нарастанием диффузионного тока, а небольшое обратное смещение приведет к появлению туннельного тока. Высота барьера для электронов, движущихся из нитрида галлия в кремний по зоне проводимости, согласно диаграмме, примерно равна ширине запрещенной зоны кремния, а значит структура начнет хорошо проводить ток при напряжениях около +1 В. Обратное смещение будет характеризоваться двумя факторами: увеличением зоны перекрытия и снижением ширины барьера, что в совокупности вызовет резкое нарастание туннельного тока. В результате проводимость структуры в обратном направлении окажется значительно выше, чем в прямом, для диапазона напряжений порядка ± 1 В. Такое поведение относится к обращенным диодам, у которых вольтамперная характеристика (ВАХ) является инвертированной, по сравнению с классическим видом.

Полученные серии ВАХ структур приведены на рис. 3. Видно, что на графиках наблюдаются характерные максимумы, после которых рост напряжения сопровождается

снижением тока. Данный участок называется областью отрицательного дифференциального сопротивления (ОДС) и является отличительной особенностью туннельных диодов. Наличие максимума соответствует ситуации, когда перекрытие валентной зоны кремния выше уровня Ферми и зоны проводимости нитрида галлия ниже уровня Ферми достигает максимального значения. Наибольшее расчетное значение максимальной (пиковой) плотности тока в составило $24,6 \text{ кА/см}^2$ (см. рис. 3,с) при напряжении 190 мВ (для $n = p = 10^{20} \text{ см}^{-3}$).

Этот результат сопоставим с экспериментальными, а также теоретическими [27] данными для диодных структур (в том числе с *NWs*) на основе GaAs [28 – 30], Ge/Si [31], Si [32] и GaSb/InAsSb [33], где пиковая плотность тока лежит в пределах от единиц до десятков кА/см².

Позиции максимумов как по току, так и по напряжению смещаются в сторону нуля по мере уменьшения уровня легирования GaN, так как это приводит к меньшему перекрытию зон. По той же причине напряжение раствора (напряжение, при котором ток через туннельный диод второй раз достигает максимума) смещается в сторону меньших значений. Отметим, что напряжение раствора в нашем случае слабо зависит от концентрации примеси в нитриде галлия в диапазоне $(5 - 500) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, однако достаточно чувствительно к легированию кремния.

В силу того, что моделирование не учитывало дефекты на интерфейсе GaN/Si, на ВАХ после области отрицательного дифференциального сопротивления присутствует горизонтальный участок с нулевым током. В реальных диодных структурах ток во «впадине» не достигает нуля, так как в отсутствие зоны перекрытия соответствующие носители имеют возможность проходить под барьером по энергетическим уровням дефектов. Вследствие этого форма впадины скругляется. В системе GaN *NW*/Si эффективно повлиять на плотность дефектов на гетероинтерфейсе можно при помощи водородной пассивации, что было нами продемонстрировано ранее [34].

С учетом того, что для подобного типа приборов характерна работа на высоких частотах, нами были вычислены зависимости частоты отсечки (для туннельных диодов – предельной частоты генерации) структур от уровня легирования нитрида галлия (рис. 4). Туннельные диоды, как правило, работают на участке ОДС вольтамперной характеристики, следовательно предельная частота работы будет определяться из условия отрицательности действительной части комплексного сопротивления диода [35].

Можно показать, что в таком случае выражение для частоты отсечки f_{cutoff} запишется в следующем виде:

$$f_{cutoff} = \frac{1}{2\pi |R_{min}| C_j}, \quad (6)$$

где $|R_{min}|$ – модуль минимального сопротивления на участке ОДС, C_j – емкость *p-n*-перехода.

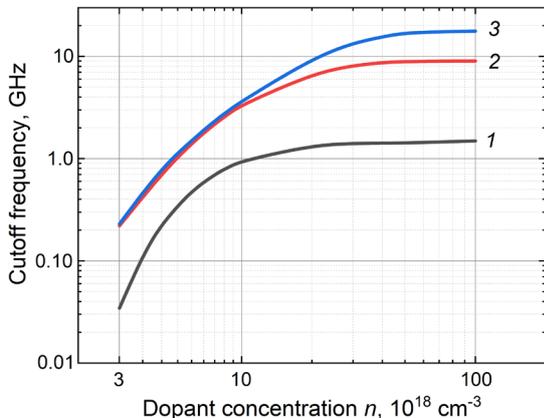


Рис. 4. Рассчитанные зависимости предельной частоты генерации структуры от уровня легирования *n*-GaN для различных уровней легирования *p*-кремния, 10^{19} см^{-3} : 1 (1), 5 (2), 10 (3)

Отметим здесь, что на самом деле в выражении (6) фигурирует дифференциальное сопротивление в соответствующей области, которое не является постоянной величиной. Использование же его минимального значения $|R_{min}|$ – общепринятое.

Анализ данных на рис. 4 показывает, что повышение концентрации легирующей примеси как в GaN, так и в Si сопровождается нелинейным смещением отсечки в более высокочастотную область. При этом потолок частоты отсечки находится в районе 17 ГГц, что соответствует практически предельным уровням легирования GaN и Si. Даже если технологически станет возможным дальнейшее увеличение концентрации, то это все равно не приведет к значимому расширению рабочего частотного диапазона.

Важно также отметить, что для концентраций легирующей примеси в кремнии между $1 \cdot 10^{19}$ и $5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ частота отсечки увеличивается в несколько раз. В то же время кривые для $p = 5 \cdot 10^{19}$ и $1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ различаются в гораздо меньшей степени. В совокупности с данными для ВАХ можно сделать вывод, что для реализации туннельных диодов с высокой плотностью тока в пике, а также с высоким быстродействием следует выбирать уровень легирования нитрида галлия и кремния не ниже $3 \cdot 10^{19}$ и $5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, соответственно.

Заключение

В настоящей работе проведено численное моделирование туннельного эффекта в гетероструктуре $n\text{-GaN NW}/p\text{-Si}$ в широком диапазоне уровней легирования (в одномерном приближении).

Установлено, что режим обращенного диода будет реализовываться при концентрации легирующей примеси около $2 \cdot 10^{18}$ и $1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ для GaN и Si, соответственно, в то время как для туннельных диодов следует выбирать концентрации не менее $3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ для GaN и $5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ для Si.

По данным вольтамперных характеристик расчетное максимальное значение плотности туннельного тока составило $24,6 \text{ кА/см}^2$, что хорошо согласуется с экспериментальными результатами исследования структур на базе GaAs и Ge как основных промышленных материалов для приборов с туннельным эффектом. Частотный анализ генерации структуры привел к заключению, что ее предельная частота для туннельных диодов системы GaN/Si находится на уровне 17 ГГц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hopkins J. B. Microwave backward diodes in InAs // Solid-State Electronics. 1970. Vol. 13. No. 5. Pp. 697–705.
2. Tabe M., Tan H. N., Mizuno T., Muruganathan M., Anh L. T., Mizuta H., Nuryadi R., Moraru D. Atomistic nature in band-to-band tunneling in two-dimensional silicon pn tunnel diodes // Applied Physics Letters. 2016. Vol. 108. No. 9. P. 093502.
3. Li Q., Han Y., Lu X., Lau K. M. GaAs-InGaAs-GaAs fin-array tunnel diodes on (001) Si substrates with room-temperature peak-to-valley current ratio of 5.4 // IEEE Electron Device Letters. 2016. Vol. 37. No. 1. Pp. 24–27.
4. Калиновский В. С., Малеев Н. А., Контрош Е. В., Васильев А. П., Прудченко К. К., Толкачев И. А., Малевская А. В., Устинов В. М. Туннельные диоды $n^{++}\text{-GaAs}:(\delta\text{-Si})/p^{++}\text{-Al}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{As}:(\text{C})$ для соединительных элементов многпереходных лазерных фотопреобразователей // Письма в Журнал технической физики. 2024. Т. 50. № 7. С. 39–42.
5. Jia R., Huang Q., Huang R. Vertical SnS_2/Si heterostructure for tunnel diodes // Science China Information Sciences. 2019. Vol. 63. No. 2. P. 122401.
6. Zhu Y., Lv H., Zhang Y., Jia Z., Sun J., Lyu Z., Lu B. MoS_2/Si tunnel diodes based on comprehensive transfer technique // Chinese Physics B. 2023. Vol. 32. No. 1. P. 018501.
7. Anandan D., Hsu C.-W., Chang E. Y. Growth of III–V antimonide heterostructure nanowires on silicon substrate for Esaki tunnel diode // Materials Science Forum. 2022. Vol. 1055. March. Pp. 1–6.
8. Ajitha D., Lakshmi K. N. V. S., Lakshmi B. K. Nanowire transistors: A next step for the low-power digital technology // IETE Journal of Research. 2021. Vol. 69. No. 11. Pp. 1–17.
9. Im K.-S., Reddy M. S. P., Caulmilone R., Theodorou C. G., Ghibaudo G., Cristoloveanu S., Lee J.-H. Low-frequency noise characteristics of GaN nanowire gate-all-around transistors with/without 2-DEG channel // IEEE Transactions on Electron Devices. 2019. Vol. 66. No. 3. Pp. 1243–1248.
10. Шугуров К. Ю., Можаров А. М., Сапунов Г. А., Фёдоров В. В., Моисеев Э. И., Блохин С. А., Кузьменков А. Г., Мухин И. С. Сверхвысокочастотные диоды Шоттки на основе одиночных нитевидных нанокристаллов GaN // Письма в Журнал технической физики. 2022. Т. 48. № 15. С. 22–25.
11. Han S., Noh S., Kim J.-W., Lee C.-R., Lee S.-K., Kim J. S. Stretchable inorganic GaN-nanowire photosensor with high photocurrent and photoresponsivity // ACS Applied Materials & Interfaces. 2021. Vol. 13. No. 19. Pp. 22728–22737.

12. **Jamond N., Chrétien P., Houzé F., et al.** Piezo-generator integrating a vertical array of GaN nanowires // *Nanotechnology*. 2016. Vol. 27. No. 32. P. 325403.
13. **Shugurov K., Mozharov A., Sapunov G., Fedorov V., Tchernycheva M., Mukhin I.** Single GaN nanowires for extremely high current commutation // *Physica Status Solidi (RRL) – Rapid Research Letters*. 2021. Vol.15. No. 4. P. 2000590.
14. **Zhang H., Xue J., Sun Z., et al.** 1039 kA/cm² peak tunneling current density in GaN-based resonant tunneling diode with a peak-to-valley current ratio of 1.23 at room temperature on sapphire substrate // *Applied Physics Letters*. 2021. Vol. 119. No. 15. P. 153506.
15. **Fang Z., Robin E., Rozas-Jiménez E., Cros A., Donatini F., Mollard N., Pernot J., Daudin B.** Si donor incorporation in GaN nanowires // *Nano Letters*. 2015. Vol. 15. No. 10. Pp. 6794–6801.
16. **Léonard F.** Reduced Joule heating in nanowires // *Applied Physics Letters*. 2011. Vol. 98. No. 10. P. 103101.
17. **Takahashi T., Kawaguchi K., Sato M., Suhara M., Okamoto N.** Highly sensitive *p*-GaAsSb/*n*-InAs nanowire backward diodes for low-power microwaves // *Proceedings of the 49th European Solid-State Device Research Conference (ESSDERC)*. 23–26 September, 2019. Cracow, Poland. 2019. Pp. 214–217.
18. **Shao Y., Pala M., Esseni D., del Alamo J. A.** Scaling of GaSb/InAs vertical nanowire Esaki diodes down to sub-10-nm diameter // *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2022. Vol. 69. No. 4. Pp. 2188–2195.
19. **Anabestani H., Shazzad R., Fattah M. F. A., Therrien J., Ban D.** Review on GaAsSb nanowire potentials for future 1D heterostructures: Properties and applications // *Materials Today Communications*. 2021. Vol. 28. September. P. 102542.
20. **Yoshida A., Gamo H., Motohisa J., Tomioka K.** Creation of unexplored tunnel junction by heterogeneous integration of InGaAs nanowires on germanium // *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12. 31 January. P. 1606.
21. **Van Roosbroeck W.** Theory of the flow of electrons and holes in germanium and other semiconductors // *Bell System Technical Journal*. 1950. Vol. 29. No. 4. Pp. 560–607.
22. **Adachi S.** Properties of group-IV, III – V and II – VI semiconductors. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2005. 408 p.
23. **Liu K.-M., Cheng C.-P.** Investigation on the effects of gate-source overlap/underlap and source doping gradient of *n*-type Si cylindrical gate-all-around tunnel field-effect transistors // *IEEE Transactions on Nanotechnology*. 2020. Vol. 19. 07 May. Pp. 382–389.
24. **Eftychis S., Kruse J. E., Tsagaraki K., Koukoulia T., Kehagias T., Komninou P., Georgakilas A.** Effects of ultrathin AlN prelayers on the spontaneous growth of GaN nanowires by plasma assisted molecular beam epitaxy // *Journal of Crystal Growth*. 2019. Vol. 514. 15 May. Pp. 89–97.
25. **Landré O., Bougerol C., Renevier H., Daudin B.** Nucleation mechanism of GaN nanowires grown on (111) Si by molecular beam epitaxy // *Nanotechnology*. 2009. Vol. 20. No. 41. P. 415602.
26. **Geelhaar L., Chuze C., Jenichen B., et al.** Properties of GaN nanowires grown by molecular beam epitaxy // *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. 2011. Vol. 17. No. 4. Pp. 878–888.
27. **Kumar M. J., Sharma S.** GaAs tunnel diode with electrostatically doped *n*-region: Proposal and analysis // *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2015. Vol. 62. No. 10. Pp. 3445–3448.
28. **Pan J. L., McManis J. E., Grober L., Woodall J. M.** Gallium-arsenide deep-level tunnel diode with record negative conductance and record peak current density // *Solid-State Electronics*. 2004. Vol. 48. No. 10–11. Pp. 2067–2070.
29. **Ahmed S., Melloch M. R., Harmon E. S., McInturff D. T., Woodall J. M.** Use of nonstoichiometry to form GaAs tunnel junctions // *Applied Physics Letters*. 1997. Vol. 71. No. 25. Pp. 3667–3669.
30. **Darbandi A., Kavanagh K. L., Watkins S. P.** Lithography-free fabrication of core–shell GaAs nanowire tunnel diodes // *Nano Letters*. 2015. Vol. 15. No. 8. Pp. 5408–5413.
31. **Chen L., Fung W. Y., Lu W.** Vertical nanowire heterojunction devices based on a clean Si/Ge interface // *Nano Letters*. 2013. Vol. 13. No. 11. Pp. 5521–5527.
32. **Schmid H., Bessire C., Björk M. T., Schenk A., Riel H.** Silicon nanowire Esaki diodes // *Nano Letters*. 2012. Vol. 12. No. 2. Pp. 699–703.
33. **Ganjipour B., Dey A. W., Borg B. M., Ek M., Pistol M.-E., Dick K. A., Wernersson L.-E., Thelander C.** High current density Esaki tunnel diodes based on GaSb-InAsSb heterostructure nanowires // *Nano Letters*. 2011. Vol. 11. No. 10. Pp. 4222–4226.

34. **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.
35. **Лебедев А. И.** Физика полупроводниковых приборов. М.: Физматлит, 2008. 488 p.

REFERENCES

- Hopkins J. B.**, Microwave backward diodes in InAs, *Solid-State Electron*. 13 (5) (1970) 697–705.
- Tabe M., Tan H. N., Mizuno T., et al.**, Atomistic nature in band-to-band tunneling in two-dimensional silicon pn tunnel diodes, *Appl. Phys. Lett.* 2016. Vol. 108 (9) (2016) 093502.
- Li Q., Han Y., Lu X., Lau K. M.**, GaAs-InGaAs-GaAs fin-array tunnel diodes on (001) Si substrates with room-temperature peak-to-valley current ratio of 5.4, *IEEE Electron. Device Lett.* 37 (1) (2016) 24–27.
- Kalinovskiy V. S., Maleyev N. A., Kontrosh E. V., et al.**, Tunnelnyye diody n^{++} -GaAs:(δ -Si)/ p^{++} -Al_{0.4}Ga_{0.6}As:(C) dlya soyedinitelnykh elementov mnogoperekhodnykh lazernykh fotopreobrazovateley [n^{++} -GaAs:(δ -Si)/ p^{++} -Al_{0.4}Ga_{0.6}As:(C) tunnel diodes for connecting the elements of multijunction laser converters], *Pisma v Zhurnal Tekhnicheskoy Fiziki*. 50 (7) (2024) 39–42 (in Russian)
- Jia R., Huang Q., Huang R.**, Vertical SnS₂/Si heterostructure for tunnel diodes, *Sci. China Inf. Sci.* 63 (2) (2019) 122401.
- Zhu Y., Lv H., Zhang Y., et al.**, MoS₂/Si tunnel diodes based on comprehensive transfer technique, *Chin. Phys. B*. 32 (1) (2023) 018501.
- Anandan D., Hsu C.-W., Chang E. Y.**, Growth of III–V antimonide heterostructure nanowires on silicon substrate for Esaki tunnel diode, *Mater. Sci. Forum*. 1055 (March) (2022) 1–6.
- Ajitha D., Lakshmi K. N. V. S., Lakshmi B. K.**, Nanowire transistors: A next step for the low-power digital technology, *IETE J. Res.* 69 (11) (2021) 1–17.
- Im K.-S., Reddy M. S. P., Caulmilone R., et al.**, Low-frequency noise characteristics of GaN nanowire gate-all-around transistors with/without 2-DEG channel, *IEEE Trans. Electron Dev.* 66 (3) (2019) 1243–1248.
- Shugurov K. Yu., Mozharov A. M., Sapunov G. A., et al.**, Microwave Schottky diodes based on single GaN nanowires, *Techn. Phys. Lett.* 48 (8) (2022) 18–21.
- Han S., Noh S., Kim J.-W., et al.**, Stretchable inorganic GaN-nanowire photosensor with high photocurrent and photoresponsivity, *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 13 (19) (2021) 22728–22737.
- Jamond N., Chrétien P., Houzé F., et al.**, Piezo-generator integrating a vertical array of GaN nanowires, *Nanotechnol.* 27(32) (2016) 325403.
- Shugurov K., Mozharov A., Sapunov G., et al.**, Single GaN nanowires for extremely high current commutation, *Phys. Stat. Solidi (RRL)* 15 (4) (2021) 2000590.
- Zhang H., Xue J., Sun Z., et al.**, 1039 kA/cm² peak tunneling current density in GaN-based resonant tunneling diode with a peak-to-valley current ratio of 1.23 at room temperature on sapphire substrate, *Appl. Phys. Lett.* 119 (15) (2021) 153506.
- Fang Z., Robin E., Rozas-Jiménez E., et al.**, Si donor incorporation in GaN nanowires, *Nano Lett.* 15 (10) (2015) 6794–6801.
- Léonard F.**, Reduced Joule heating in nanowires, *Appl. Phys. Lett.* 98 (10) (2011) 103101.
- Takahashi T., Kawaguchi K., Sato M., Suhara M., Okamoto N.**, Highly sensitive *p*-GaAsSb/*n*-InAs nanowire backward diodes for low-power microwaves, *Proc. 49th Europ. Solid-State Device Res. Conf. (ESSDERC)*. 23–26 Sept., 2019. Cracow, Poland. (2019) 214–217.
- Shao Y., Pala M., Esseni D., del Alamo J. A.**, Scaling of GaSb/InAs vertical nanowire Esaki diodes down to sub-10-nm diameter, *IEEE Trans. Electron Dev.* 69 (4) (2022) 2188–2195.
- Anabestani H., Shazzad R., Fattah M. F. A., et al.**, Review on GaAsSb nanowire potentials for future 1D heterostructures: Properties and applications, *Mater. Today Commun.* 28 (Sept) (2021) 102542.
- Yoshida A., Gamo H., Motohisa J., Tomioka K.**, Creation of unexplored tunnel junction by heterogeneous integration of InGaAs nanowires on germanium, *Sci. Rep.* 12 (31 Jan) (2022) 1606.
- Van Roosbroeck W.**, Theory of the flow of electrons and holes in germanium and other semiconductors, *Bell Syst. Tech. J.* 29 (4) (1950) 560–607.
- Adachi S.**, *Properties of Group-IV, III–V and II–VI Semiconductors*. John Wiley & Sons, 2005. 408 p.

23. Liu K.-M., Cheng C.-P., Investigation on the effects of gate-source overlap/underlap and source doping gradient of *n*-type Si cylindrical gate-all-around tunnel field-effect transistors, IEEE Trans. Nanotechnol. 19 (07 May) (2020) 382–389.
24. Eftychis S., Kruse J. E., Tsagaraki K., et al., Effects of ultrathin AlN prelayers on the spontaneous growth of GaN nanowires by plasma assisted molecular beam epitaxy, J. Cryst. Growth. 514 (15 May) (2019) 89–97.
25. Landré O., Bougerol C., Renevier H., Daudin B., Nucleation mechanism of GaN nanowires grown on (111) Si by molecular beam epitaxy, Nanotechnol. 20 (41) (2009) 415602.
26. Geelhaar L., Chèze C., Jenichen B., et al., Properties of GaN nanowires grown by molecular beam epitaxy, IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 17 (4) (2011) 878–888.
27. Kumar M. J., Sharma S., GaAs tunnel diode with electrostatically doped n-region: Proposal and analysis, IEEE Trans. Electron Dev. 62 (10) (2015) 3445–3448.
28. Pan J. L., McManis J. E., Grober L., Woodall J. M., Gallium-arsenide deep-level tunnel diode with record negative conductance and record peak current density, Solid-State Electron. 48 (10–11) (2004) 2067–2070.
29. Ahmed S., Melloch M. R., Harmon E. S., et al., Use of nonstoichiometry to form GaAs tunnel junctions, Appl. Phys. Lett. 71 (25) (1997) 3667–3669.
30. Darbandi A., Kavanagh K. L., Watkins S. P., Lithography-free fabrication of core–shell GaAs nanowire tunnel diodes, Nano Lett. 15 (8) (2015) 5408–5413.
31. Chen L., Fung W. Y., Lu W., Vertical nanowire heterojunction devices based on a clean Si/Ge interface, Nano Lett. 13 (11) (2013) 5521–5527.
32. Schmid H., Bessire C., Björk M. T., et al., Silicon nanowire Esaki diodes, Nano Lett. 12 (2) (2012) 699–703.
33. Ganjipour B., Dey A. W., Borg B. M., et al., High current density Esaki tunnel diodes based on GaSb–InAsSb heterostructure nanowires, Nano Lett. 11 (10) (2011) 4222–4226.
34. 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.
35. Lebedev A. I., Fizika poluprovodnikovyykh priborov [Physics of semiconductor devices], Fizmatlit Publishing, Moscow, 2008 (in Russian).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

БАРЫКИН Дмитрий Артемович — лаборант центра приоритетных направлений науки и технологий Академического университета им. Ж. И. Алфёрова РАН, студент Института электроники и телекоммуникаций Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

194021, Россия, Санкт-Петербург, ул. Хлопина, 8, к. 3
 d.a.barykin02@mail.ru

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

194021, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Хлопина, 8, к. 3
 mozharov@spbau.ru
 ORCID: 0000-0002-8661-4083

МУХИН Иван Сергеевич – доктор физико-математических наук, профессор, директор Высшей инженерно-физической школы Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

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

muhin_is@spbstu.ru

ORCID: 0000-0001-9792-045X

THE AUTHORS

BARYKIN Dmitrii A.

Alferov University;

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

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

d.a.barykin02@mail.ru

SHUGUROV Konstantin Yu.

Alferov University

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

shugurov17@mail.ru

ORCID: 0000-0001-8973-3187

MOZHAROV Alexey M.

Alferov University

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

mozharov@spbau.ru

ORCID: 0000-0002-8661-4083

MUKHIN Ivan S.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

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

muhin_is@spbstu.ru

ORCID: 0000-0001-9792-045X

*Статья поступила в редакцию 17.04.2024. Одобрена после рецензирования 21.05.2024.
Принята 21.05.2024.*

Received 17.04.2024. Approved after reviewing 21.05.2024. Accepted 21.05.2024.