

Отзыв официального оппонента на диссертационную работу

Шугурова Константина Юрьевича

НИТЕВИДНЫЕ НАНОКРИСТАЛЛЫ НИТРИДА ГАЛЛИЯ НА КРЕМНИИ: СВОЙСТВА И ПРИБОРНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 (01.04.01) – приборы и методы экспериментальной физики

Актуальность темы диссертационной работы

Нитрид галлия (GaN) – широкозонный полупроводник, обладающий высокой термической, химической и радиационной стойкостью, широко используемый в современной оптоэлектронике. При развитии электронной компонентной базы (ЭКБ) приборы на основе GaN в ряде случаев представляют привлекательную альтернативу классическим приборам на основе кремния, однако их широкое внедрение сдерживается отсутствием собственной качественной подложки и необходимостью выращивания толстых буферных слоев для компенсации решеточного рассогласования. Одним из перспективных направлений развития нитрид галлиевой электроники является переход от классических планарных структур к нитевидным нанокристаллам (ННК), которые практически не имеют дислокационных дефектов и могут быть синтезированы без использования буферных слоёв на подложках с существенным рассогласованием по параметру кристаллической решётки. Кроме того, в случае ННК развитая боковая поверхность позволяет эффективно отводить тепло, а субмикронные поперечные размеры обуславливают сверхмалые величины электрической ёмкости создаваемого на их основе полупроводникового прибора. В большом числе опубликованных работ, посвященных созданию различных типов приборов на основе GaN ННК, не приводится детальное рассмотрение свойств гетероинтерфейса на границе GaN ННК/Si, являющегося составной частью приборных структур. Кроме того, практически неизученными являются возможности использования GaN ННК для коммутации высоких плотностей тока. Кроме того, применительно к диодам Шоттки на базе GaN ННК, существенный интерес представляет оценка их предельных частотных характеристик. В связи с этим, диссертационная работа К.Ю. Шугурова, посвященная исследованию транспортных свойств гетероперехода GaN ННК/Si и одиночных GaN ННК для создания на их основе диодов Шоттки, представляется актуальной.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

1. В диссертационной работе сформулировано научное положение, согласно которого гетероструктуры n-GaN ННК/p-Si, в которых GaN ННК синтезированы без затравочного слоя, при обработке в плазме водорода с плотностью мощности 2

мВт/см³, давлением 0.5 Торр, температуре 350 °С и в интервале 1 – 20 минут демонстрируют уменьшение темнового обратного тока более чем на порядок; при этом длительность обработки, при которой наблюдается снижение обратного тока более чем на 3 порядка, составляет 10 минут. Достоверность сформулированного положения экспериментально подтверждается результатами подробных исследований влияния предварительной обработки в плазме водорода на токи утечки для гетероструктур GaN ННК/Si, синтезированных методом МПЭ непосредственно на Si подложке или с использованием различных вариантов затравочного слоя.

2. В соответствии со вторым научным положением, сформулированным в работе, экспериментально продемонстрировано, что отделённые от ростовой подложки кремния одиночные нитевидные нанокристаллы GaN, синтезированные методом молекулярно-пучковой эпитаксии, обеспечивают коммутацию токов плотностью 1.7 ± 0.3 МА/см² в импульсном режиме с длиной импульса 1 мс и коэффициентом заполнения 0.001. Помимо результатов выполненных детальных экспериментальных исследований, в пользу справедливости данного положения также свидетельствуют результаты оценки скорости насыщения электронов в исследуемых структурах GaN ННК на уровне $1.2 - 2.5 \times 10^7$ см/с, что близко к ранее опубликованным значениям.

3. Третье научное положение сформулировано в соответствии с результатами численного моделирования, согласно которым диод Шоттки, образованный одиночным GaN ННК диаметром 200 нм, уровнем легирования 1×10^{17} см⁻³ и торцевым Au-контактом, а также находящийся при нулевом смещении по напряжению, имеет частоту отсечки в диапазоне от 100 до 300 ГГц при длине ННК от 0.5 до 3 мкм. Частота отсечки от 200 до 400 ГГц достигается для диодов Шоттки на основе GaN ННК такого же диаметра и длине 2 мкм с уровнем легирования, лежащим в диапазоне $10^{17} - 10^{18}$ см⁻³. Данное положение сформулировано в рамках предложенной физической модели и подтверждено результатами выполненных расчетов. При этом качественный вид полученных вольт-амперных характеристик при изменении уровня легирования для различных барьерных контактов соответствует ожидаемому, а оценки частоты отсечки хорошо коррелируют с полученными экспериментальными данными, использованными при формулировке четвертого научного положения.

4. В соответствии с четвертым научным положением, диоды Шоттки на основе одиночных нитевидных нанокристаллов GaN легированных кремнием на уровне 10^{18} см⁻³, синтезированных методом молекулярно-пучковой эпитаксии на кремнии, достигают частот отсечки 165.8 ± 1.5 ГГц. Данное экспериментальное положение сформулировано по результатам детальных экспериментальных исследований и оптимизации конструкции диодов Шоттки на основе GaN ННК, подробно описанных в диссертационной работе.

Достоверность представленных в диссертационной работе результатов подтверждается анализом литературных источников по теме работы, использованием современной технологической базы и измерительной аппаратуры, большим объемом и детальным изложением результатов выполненных экспериментальных исследований, корреляцией полученных экспериментальных данных с результатами моделирования, а также апробацией результатов выполненных исследований как на международных и российских конференциях, так и в ходе экспериментальных

исследований по изготовлению приборных структур.

Научная новизна работы

Ряд результатов, представленных автором в диссертационной работе, имеют существенную научную новизну. Среди них можно выделить следующие:

1. Создание и детальное экспериментальное исследование диода Шоттки со структурой комбинированной размерности (квазиодномерная/планарная) на основе перспективного типа наногетероструктур – GaN нитевидных нанокристаллов на подложках Si;
2. Впервые продемонстрированное улучшение диодных характеристик гетероинтерфейса n-GaN ННК/p-Si за счёт обработки в водородной плазме;
3. Экспериментальная демонстрация способности одиночных GaN ННК коммутировать токи плотностью 1.7 ± 0.3 MA/cm² в импульсном режиме для перспективных приложений в силовой электронике;
4. Исследование свойств контакта GaN ННК/Au методами численного моделирования и демонстрация возможности достижения субтерагерцовых частот отсечки для диода Шоттки на основе одиночного GaN ННК;
5. Экспериментально впервые продемонстрированное достижение частоты отсечки 165.8 ± 1.5 ГГц для изготовленных диодов Шоттки на основе одиночных GaN ННК.

Практическая значимость работы

Предложенная конструкция диодов Шоттки на основе одиночных GaN ННК, обеспечивающая получения субтерагерцовых частот отсечки, представляет существенный интерес для практического использования в перспективных разработках электронной компонентной базы систем связи и радиолокации, особенно с учетом возможности пропускания высоких значений токов в импульсном режиме и повышенной температурной стабильности приборов на широкозонных полупроводниках. Выполненные исследования по обработке гетероинтерфейса n-GaN ННК/p-Si в водородной плазме представляют существенный интерес для разработки эффективных методов пассивации диодных структур на основе GaN ННК.

Оценка содержания диссертации, ее завершенность в целом

Диссертационная работы состоит из введения, шести глав с выводами, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка публикаций автора по теме диссертации и списка цитируемой литературы списка литературы, включающего 242 источника. Полный объем диссертации составляет 146 страниц печатного текста и содержит 57 рисунков и 9 таблиц.

Во введении обоснована актуальность, определены цели и задачи проводимых исследований, сформулированы научные положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая значимость представляемой работы, приводятся сведения о структуре и объёме диссертации, а также апробации результатов исследования

В первой главе автором представлен обзор литературных источников по теме диссертации, в том числе представлена краткая историческая хронология исследований, обсуждаются технологические и экономические аспекты проблемы

получения высококачественных эпитаксиальных слоёв GaN, определяющие актуальность использования полупроводниковых структур к геометрии ННК, приводится подробное описание их свойств на примере конкретных приложений, в том числе возможностей интеграции с кремнием, отдельно отмечены актуальные проблемы, которые в отношении GaN ННК и системы GaN ННК/Si остаются неизученными или не получили должного рассмотрения.

Во второй главе подробно описаны технологические и экспериментальные методы, использованные в ходе выполнения диссертационной работы. Приведено краткое описание основного технологического оборудования, в том числе, установок лазерной литографии, вакуумного осаждения, плазменной и термической обработки, задействованных в технологическом цикле изготовления приборных структур. Обсуждаются используемые методики измерения вольт-амперных характеристик на базе специализированной многофункциональной зондовой станции малосигнального частотного анализа.

Третья глава посвящена исследованию транспортных свойств гетероинтерфейса n-GaN ННК/p-Si. Исследуемые структуры ННК были синтезированы методом молекулярно-пучковой эпитаксии непосредственно на поверхности Si подложки либор на различных затравочных слоях. Приводится детальное описание разработанного технологического цикла формирования исследуемых структур на базе массива GaN ННК, включающего формирование нижнего контакта (Al) к Si-подложке, слоя диэлектрика между ННК и верхним контактом (ITO) к вершинам ННК. Представлены результаты исследования вольт-амперных характеристик (ВАХ) изготовленных образцов и показано, что транспортные свойства гетероинтерфейса GaN ННК/Si в значительной степени зависят от выбора затравочного слоя. Обсуждаются результаты исследования влияния предварительной обработки гетероструктур в плазме водорода на их транспортные характеристики. Экспериментально продемонстрировано, что данный метод обеспечивает существенное улучшение диодных характеристик гетероперехода n-GaN ННК/p-Si. По результатам, представленным в данной главе, сформулировано первое научное положение.

В четвёртой главе исследовались характеристики одиночных GaN ННК в условиях высоких токовых нагрузок. Для этого были изготовлены соответствующие тестовые структуры со сформированными к ННК омическими контактами на основе Ti/Au и выполнены измерения их ВАХ в импульсном режиме. Показано, что максимальная плотность тока для всех исследованных ННК находится в диапазоне $1.7 \pm 0.3 \text{ MA/cm}^2$, что позволило впервые продемонстрировать способность одиночных GaN ННК коммутировать токи экстремально высокой плотности без необходимости принудительного охлаждения. По результатам, представленным в данной главе, сформулировано второе научное положение.

Пятая глава посвящена численному моделированию диода Шоттки на основе одиночного GaN ННК. Моделирование проводилось в рамках классической дрейфово-диффузионной модели при помощи пакета прикладных программ Comsol Multiphysics. Модель учитывала наличие энергетических состояний на поверхности GaN (0001), термоэлектронную эмиссию, эффект Шоттки и квантово-механическое туннелирование. В качестве металлов, образующих барьер Шоттки, рассматривались

Au и Pt. В ходе проведенных численных расчётов получены зависимости высоты потенциального барьера от приложенного напряжения, а также набор ВАХ для различных уровней легирования ННК. Показано, что в рамках рассматриваемой модели не происходит закрепления уровня Ферми на поверхности GaN под контактом Шоттки. По расчетным зависимостям временной релаксации тока определены постоянные времени RC-цепи и соответствующие им частоты отсечки диодной структуры в зависимости от длины и уровня легирования ННК. Установлено, что частота отсечки диода Шоттки для рассматриваемой конфигурации приборной структуры при нулевом напряжении смещения лежит в субтерагерцовом диапазоне. По результатам, приведенным в пятой главе, сформулировано третье научное положение.

В шестой главе представлены результаты экспериментальной реализации диодов Шоттки на основе одиночных GaN ННК и исследования их характеристик. Для обеспечения возможности измерений приборных структур в СВЧ-диапазоне разработаны соответствующие варианты конструкции приборных структур и технологические методы из реализации. Исследование высокочастотных характеристик осуществлялось методами малосигнального частотного анализа в широком частотном диапазоне (100 МГц - 40 ГГц) с использованием измерений элементов матрицы рассеяния (S-параметров) на векторном анализаторе цепей с их последующей аппроксимацией соответствующими аналитическими выражениями через значения элементов эквивалентной электрической схемы диодных структур. Анализ результатов измерений показывает хорошее соответствие экспериментальных данных и результатов моделирования, отсутствие существенного влияния паразитных элементов эквивалентной схемы, связанных с контактной металлизацией, на S-параметры (за исключением шунтирующей параллельной ёмкости), а также хорошее согласование значений последовательного паразитного сопротивления, полученных из СВЧ-измерений и анализа статических ВАХ. Диоды, изготовленные на основе нелегированных ННК, продемонстрировали максимальные значения частоты отсечки на уровне 27.5 ± 0.3 ГГц, а для легированных ННК максимальная частота отсечки достигает 165.8 ± 1.5 ГГц. По результатам, приведенным в шестой главе, сформулировано заключительное научное положение.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы. В частности, отмечено, что транспортные свойства гетероинтерфейса GaN ННК/Si в значительной степени зависят от выбора затравочного слоя для синтеза ННК, а предварительная обработка гетероструктур n-GaN ННК/p-Si в водородной плазме улучшает их диодные характеристики. Обнаружено, что одиночные GaN ННК способны коммутировать токи плотностью 1.7 ± 0.3 МА/см² в импульсном режиме без принудительного охлаждения, при этом их деградации не наблюдается, а максимальное значение частоты отсечки для изготовленных диодов Шоттки на основе одиночных GaN ННК достигает 165.8 ± 1.5 ГГц.

Общая оценка диссертационной работы

Диссертационная работа К.Ю. Шугурова выполнена на актуальную тему, содержит оригинальные результаты экспериментальных исследований и численного

моделирования, хорошо проиллюстрирована и оформлена в соответствии с требованиями ВАК РФ. Материалы автореферата полностью отражают результаты, представленные в диссертационной работе. Основные результаты опубликованы в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий ВАК Минобрнауки РФ (5 журнальных статей). Всего по результатам работы подготовлено 12 печатных работ в российских и зарубежных рецензируемых научных журналах, входящих в перечень, рекомендуемых ВАК, а также индексируемых в базах Scopus и Web of Science.

В качестве замечаний по работе можно отметить следующие:

1. В разделе 3.4 приведены результаты исследования влияния предварительной обработки в плазме водорода на транспортные характеристики гетероперехода n-GaN ННК/p-Si. При этом варьировалось только время обработки, а мощность плазмы, давление и температура держателя образцов были зафиксированы на уровне 20 Вт, 500 мТорр и 350°С соответственно. Представляется, что указанные параметры могут оказывать заметное влияние и их вариация представляет существенный интерес для выбора оптимального режима обработки.

2. В главе 4, раздел 4.3 «Влияние поверхностных состояний на канал проводимости в GaN ННК» при анализе поверхностного обеднения для расчета реальной плотности тока в структурах ННК использована модель поверхностных состояний с уровнем энергии 0.55 эВ относительно дна зоны проводимости и плотностью поверхностных состояний $5 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$ (стр.69). В то же время, в главе 5, раздел 5.1 «Физическая модель» использована модель поверхностных состояний с уровнем энергии 0.7 эВ относительно дна зоны проводимости и плотностью поверхностных состояний $1 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$ (стр.73). Причина данного расхождения не вполне понятна. Поскольку плотность поверхностных состояний в структурах GaN ННК может варьироваться в широких пределах (см. ссылки на стр. 73), было бы целесообразным выполнить расчеты для нескольких вариантов плотности поверхностных состояний в целях оценки ее влияния на результаты моделирования.

Отмеченные замечания не влияют на общую высокую оценку качества выполненной работы.

Заключение

Диссертационная работа К.Ю. Шугурова выполнена на актуальную тему, является завершенным научным исследованием, содержит новые оригинальные научные результаты, представляющие существенный научный интерес и прикладное значение для развития технологии перспективных приборов на основе GaN нитевидных нанокристаллов, в том числе расширения диапазона рабочих токов и продвижения в область высоких частот для диодных структур с барьером Шоттки.

Представленная диссертационная работа «Нитевидные нанокристаллы нитрида галлия на кремнии: свойства и приборное применение» соответствует требованиям пункта «Положения о присуждении ученых степеней» ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Шугуров Константин Юрьевич, заслуживает

присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 (01.04.01) – приборы и методы экспериментальной физики.

Официальный оппонент,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
лаборатории физики полупроводниковых
гетероструктур
ФТИ им. А.Ф.Иоффе



Малеев Николай Анатольевич

09 января 2023 г.

Контактные данные:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
научно-технологический отдел,
лаборатория физики полупроводниковых гетероструктур
194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26
8 (812) 297-22-45
maleev@beam.ioffe.ru



Подпись: Малева Н.А. удостоверение
зав.отделом кадров ФТИ им.А.Ф.Иоффе

