

ОТЗЫВ

официального оппонента

доктора технических наук Тарасова Сергея Анатольевича

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 - Приборы и методы экспериментальной физики

Актуальность темы.

Развитие и совершенствование современных полупроводниковых приборов во многом зависит от материальной базы и ее фундаментальных ограничений. Прогресс в освоении нитрида галлия (GaN) и многокомпонентных нитридных соединений в середине 90-х привел к революции в области энергоэффективного освещения. На текущий момент на основе данной системы материалов до серийного производства доведены уже элементы силовой и СВЧ электроники. Тем не менее, их высокая себестоимость сдерживает массовое внедрение в индустрию. Несмотря на совершённый рывок, технологическая необходимость гетероэпитаксиального синтеза GaN до сих пор сопряжена с проблемами получения высококачественных слоев данного материала, что, в свою очередь, ограничивает характеристики приборов на его основе. В связи с этим продолжается активный поиск решений, которые позволят не только нивелировать указанную проблему, но и будут экономически целесообразны. В этой связи значимый интерес вызывают нитевидные нанокристаллы (ННК) GaN, кристаллическое совершенство которых выше, чем у планарных слоев, даже при использовании ростовых подложек с большим рассогласованием по параметру решетки. Таким образом, тема диссертационной работы К.Ю. Шугурова, посвященная исследованию гетероперехода GaN ННК/Si, свойствам самих GaN ННК, а также реализации на их основе приборной структуры диода Шоттки без сомнения является **актуальной**.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка сокращений, списка публикаций автора по теме диссертации, а также списка использованной литературы. Объем диссертации составляет 146 страниц, включая 9 таблиц и 57 рисунков. Список цитируемой литературы содержит 242 источника.

Во введении описана актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи работы, её научная новизна, практическая значимость и представлена апробация результатов. Также представлены положения, выносимые на защиту, описан личный вклад автора и указано общее число публикаций по теме диссертации.

В **первой главе** диссертации приведен обзор литературы по теме исследования. Первая часть посвящена хронологической последовательности, довольно подробно отражающей ход исследований GaN, начиная от момента первого литературного упоминания и заканчивая сегодняшними аспектами GaN-технологии. Остальные три части первой главы касаются непосредственно ННК, их свойств, методов синтеза, а также особенностей приборного применения как в составе массива, так и в одиночном варианте.

Вторая глава посвящена описанию технологических и экспериментальных методов, использованных в процессе подготовки диссертационной работы, приводятся характеристики ряда задействованного оборудования.

В **третьей главе** исследуются транспортные свойства гетероперехода *n*-GaN ННК с кремнием дырочного типа проводимости для семи различных затравочных слоев: без затравки, SiN_x, AlN, GaO_x, а также 0.3, 0.6 и 2 монослоев (МС) Ga. Для этого на основе ростовых образцов изготовлена серия фотодиодных структур, в которых вертикально ориентированные массивы ННК GaN инкапсулированы в фотоотверждаемый полимер SU-8 с последующим формированием к структурам электрических контактов. Нижний омический контакт (к подложке) выполнен из алюминия, в качестве материала верхнего (к ННК) используется оксид индия-олова (ИТО), что обеспечивает оптическое воздействие на область гетероинтерфейса. Анализ полученных вольт-амперных характеристик (ВАХ) показал наличие существенных утечек практически для всей серии структур, предположительно вызванных дефектами в области пространственного заряда гетероперехода *n*-GaN ННК/*p*-Si и особенностями диффузии атомов Ga и Al в подложку во время роста. Установлено, что при обратном смещении по напряжению для затравочных слоев AlN и 2 МС Ga наблюдался наибольший уровень утечек, а уменьшение количества Ga в затравке сопровождалось их снижением.

На следующем этапе была дополнительно изготовлена аналогичная серия структур, которая предварительно подвергалась обработке в плазме водорода с целью воздействия на предполагаемые дефекты. Данные структуры в большинстве своем продемонстрировали улучшение запирающих свойств *p-n* перехода, при этом для всех затравочных слоев, кроме AlN, обратный темновой ток снизился в значительной степени. Также, для структуры без затравочного слоя в условиях внешней засветки было обнаружено, что в интервале времен обработки в водороде от 1 до 20 минут сперва наблюдается нарастание уровня фототока, а затем его спад.

Четвёртая глава посвящена исследованию транспортных свойств ННК GaN. В диссертационной работе подробно описана процедура подготовки образцов, где к отдельным (одиночным) ННК, перенесенным на вспомогательную подложку Si/SiN, сформированы электрические контакты на основе Ti/Au. Для таких структур при комнатной температуре были

получены импульсные ВАХ в осях плотность тока – напряженность электрического поля и установлено, что плотность тока, протекающего через одиночные ННК GaN, достигала значений 1.7 ± 0.3 MA/cm². При этом отмечается, что столь высокая токовая нагрузка не приводила к разрушению ННК, а вид самих ВАХ в таком режиме не претерпевал каких-либо изменений в течение 30 минут.

Также в рамках **четвертой главы** проведено численное моделирование распределения концентрации электронов по диаметру GaN ННК с учетом поверхностных состояний на боковых гранях. Полученный результат позволил оценить влияние сужения канала проводимости в исследуемых ННК на плотность коммутируемого ими тока.

В **пятой главе** представлены результаты численного моделирования режимов работы диодов Шоттки Au/GaN и Pt/GaN на основе одиночного ННК. В процессе расчета учитывались такие явления как термоэлектронная эмиссия, эффект Шоттки, квантово-механическое туннелирование, а также наличие поверхностных состояний в области барьера Шоттки. В соответствии с полученными зависимостями высоты потенциального барьера от приложенного напряжения сделан вывод об отсутствии закрепления уровня Ферми на границе металл/полупроводник. Приведены ВАХ для различных уровней легирования ННК. Осуществлена оценка частотных характеристик по кривым релаксации тока от времени, на основании которых определены частоты отсечки в зависимости от длины и уровня легирования ННК.

Шестая заключительная глава посвящена разработке и созданию на базе одиночных нелегированных и легированных ННК приборных структур диодов Шоттки Au/GaN, а также исследованию их характеристик. При помощи метода лазерной литографии развита технология формирования электрических контактов с субмикронным зазором к отдельно лежащим ННК. Предложенная конструкция состояла из кварцевой подложки, на которой размещены ННК GaN, а металлизация контактов выполнена в GSG-конфигурации. В ходе обработки экспериментальных данных ВАХ изготовленных диодных структур была обнаружена корреляция между эффективной высотой барьера Шоттки и диаметром ННК, а именно: увеличение диаметра сопровождалось снижением высоты барьера.

В рамках частотных исследований была предложена эквивалентная электрическая схема диодных структур, для которой получены аналитические выражения зависимости S-параметров от частоты поданного сигнала. Данные выражения использовались для аппроксимации соответствующих экспериментальных кривых с целью определения номиналов элементов эквивалентной схемы. В результате было установлено, что в случае нелегированных ННК наибольшая частота отсечки составляет 27.5 ± 0.3 ГГц, в то время как для легированных –

165.8±1.5 ГГц. Кроме того, численный анализ топологии металлических контактов показал незначительные потери, вносимые металлизацией, при прохождении СВЧ сигнала через структуру. В целом, продемонстрировано хорошее соответствие данных моделирования и эксперимента.

В **Заключении** приведены основные выводы по диссертации.

Научная новизна и практическая значимость исследований. К результатам, полученным в диссертации К.Ю. Шугурова, которые обладают наибольшей научной новизной, можно отнести приборную реализацию диода Шоттки субтерагерцового диапазона на базе одиночных нитевидных нанокристаллов GaN.

В диссертации получен ряд практически значимых результатов, к которым можно отнести:

- развитие технологических методов постростовой обработки для создания приборных структур на основе отдельных нитевидных нанокристаллов, а также их массивов;
- демонстрацию улучшения диодных характеристик гетероинтерфейса нитевидных нанокристаллов *n*-GaN с кремнием *p*-типа за счёт обработки в водородной плазме;
- демонстрацию способности одиночных нитевидных нанокристаллов GaN коммутировать токи большой плотности без принудительного охлаждения;
- исследование при помощи численного моделирования диода Шоттки на основе одиночного нитевидного нанокристалла в системе GaN/Au.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов обеспечивается корректной постановкой цели и задач исследования, использованием современных экспериментальных и технологических методов. Представленные численные и экспериментальные результаты согласуются с результатами, полученными в других научных группах, не противоречат существующим научным представлениям и прошли апробацию на всероссийских и международных конференциях. Основные результаты диссертационной работы, полученные соискателем лично или в соавторстве, опубликованы в 12 статьях, индексируемых Web of Science или Scopus и соответствующих требованиям ВАК.

Замечания по работе.

1. В главе 3 в качестве одного из объяснений значительных обратных токов в структурах *n*-GaN ННК/*p*-Si выступают дефекты в области гетероинтерфейса. Какие исследования проводились для подтверждения их наличия?
2. В главе 3, на страницах 55 – 56 представлены экспериментальные ВАХ для структур *n*-GaN ННК/*p*-Si до и после обработки в плазме водорода. Представляется, что для большей наглядности следовало бы также проиллюстрировать эти данные в полупологарифмическом

масштабе по оси ординат. Кроме того, при описании полученных зависимостей говорится, что «... у образцов 1, 2 и 4 – 7 обратный темновой ток падает более чем на порядок, а у образца 3 – в 1.5 раза». Здесь и в ряде других мест третьей главы количественное сравнение обратных ветвей ВАХ, вероятно, приведено для конкретной точки по напряжению – этот момент следовало бы отразить в тексте диссертации.

3. В главе 5, посвященной моделированию диода Шоттки на основе одиночного НК GaN, не приведены детали расчета, в частности, не указано, какие уравнения и параметры материалов использовались, каким образом учитывался эффект Шоттки и наличие поверхностных состояний.
4. В главе 6 при описании эквивалентной схемы диодных структур вводится элемент, отвечающий за паразитную индуктивность контактных площадок. Оценивалось ли влияние индуктивной составляющей на частоту отсечки диодов?
5. В тексте диссертации присутствуют опечатки. На странице 56 (рисунок 3.8) неверно указана подпись для образца с затравочным слоем 0.3 МС Ga, вместо этого указано 0.2 МС Ga. На странице 83 неверно указана ссылка на рисунок 6.1 г.

Указанные замечания не снижают значимости полученных результатов и не влияют на общую положительную оценку диссертации К.Ю. Шугурова.

Общее заключение. Диссертация К.Ю. Шугурова является законченной научно-квалификационной работой и представляет собой исследование, выполненное на высоком научно-технологическом уровне. Содержание и результаты исследований изложены четко и понятно. Автореферат диссертации полностью отражает ее содержание, основные результаты, научные положения и выводы. Полученные результаты вносят значительный вклад в развитие методов формирования структур с нитевидными нанокристаллами, а также создание на их основе полупроводниковых приборов для совершенствования электронной компонентной базы. По своей теме и содержанию диссертация полностью соответствует специальности 1.3.2. — «Приборы и методы экспериментальной физики».

Считаю, что диссертация К.Ю. Шугурова «Нитевидные нанокристаллы нитрида галлия на кремнии: свойства и приборное применение» соответствует всем критериям, установленным в пунктах 9, 10, 11, 13 раздела II «Положения о присуждении ученых степеней» от 24.09.2013 года № 842 и предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук. Диссертант, Шугуров Константин Юрьевич, заслуживает присуждения ему ученой степени

кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 – «Приборы и методы экспериментальной физики».

Официальный оппонент:

Тарасов Сергей Анатольевич, ~~доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), доктор технических наук по специальности 08.07.01 – «Электроника, радиоэлектронная аппаратура, электротехника и электромеханика», доцент кафедры «Электроника, приборы на квантовых эффектах»~~

197022, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, дом 5, литера Ф

~~Тел.: (812) 294-51-46, E-mail: tarasov@spbgpu.ru~~

«30» декабря 2022



С.А. Тарасов

Подпись Тарасова С.А. заверяю

Начальник отдела диссертационных советов

СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

