

На правах рукописи

**Резник Родион Романович**

**Гибридные структуры на основе III-V полупроводниковых нитевидных  
нанокристаллов, синтезированные методом молекулярно-пучковой  
эпитаксии на кремнии**

Специальность 01.04.07 - физика конденсированного состояния

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург — 2019

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий механики и оптики» (Университет ИТМО) Министерства науки и высшего образования Российской Федерации

**Научный руководитель:**

**Цырлин Георгий Эрнстович**

Доктор физико-математических наук, заведующей лабораторией эпитаксиальных нанотехнологий федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет Российской академии наук»

**Официальные оппоненты:**

**Эрвье Юрий Юрьевич**

доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики полупроводников Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», г. Томск

**Алексеев Алексей Николаевич**

кандидат физико-математических наук, генеральный директор закрытого акционерного общества «научное и технологическое оборудование», г. Санкт-Петербург.

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Научнотехнологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур Российской академии наук (НТЦ микроэлектроники РАН), г. Санкт-Петербург.

Защита состоится "28" ноября 2019 г. в 14:00 час. на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 002.269.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет Российской академии наук» по адресу: 194021, Санкт-Петербург, ул. Хлопина д.8, корп.3, СПбАУ РАН.

С диссертацией можно ознакомиться на сайте СПбАУ РАН.

Отзывы об автореферате в двух экземплярах, заверенные печатью, просим высылать по указанному адресу ученому секретарю диссертационного совета.

Автореферат разослан " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2019 г.

Ученый секретарь объединенного совета ДМ 002.269.01  
доктор физико-математических наук



М.В. Максимов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность

В настоящее время кремний является самым распространённым и ключевым материалом для электроники, а из-за необходимости дальнейшего уменьшения размеров полупроводниковой элементной базы особое внимание исследователей привлекает создание и изучение свойств полупроводниковых структур пониженной размерности на основе кремния. Помимо увеличения количества элементов на единице площади микросхемы, создание структур пониженной размерности позволяет как увеличить эффективность приборов, так и создавать принципиально новые приборы. Однако кремний является непрямозонным материалом, излучательная рекомбинация без участия третьих частиц в таком материале затруднена. По этой причине сам по себе кремний не может быть широко использован для оптических приложений.

С другой стороны, с точки зрения зонной структуры, многие прямозонные полупроводниковые соединения III и V группы таблицы Менделеева, идеально подходят для создания оптических приборов<sup>[1]</sup>. Значительный прогресс в технологиях синтеза таких соединений, например, при использовании метода молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ), позволяет создавать высококачественные структуры пониженной размерности на их основе, такие как тонкие плёнки или квантовые ямы (КЯ), нитевидные нанокристаллы (ННК) и квантовые точки (КТ) <sup>[2]</sup>.

В наши дни интеграция таких соединений с кремнием – одно из наиболее быстро развивающихся направлений. Однако получение на поверхности кремния качественных эпитаксиальных слоев, необходимых для создания наноструктур (в том числе КЯ), осложняется значительным рассогласованием по параметрам постоянных решеток материалов III-V и кремния. Такое рассогласование приводит к большому количеству дефектов в растущем слое материала. К тому же, в слое III-V полупроводника возникают механические напряжения при изменении температуры системы вследствие значительного различия коэффициентов термического расширения III-V материалов и кремния.

Одним из способов интеграции прямозонных III-V материалов с кремнием является синтез III-V нитевидных нанокристаллов непосредственно на поверхности кремния. Нитевидные нанокристаллы – это квазиодномерные кристаллические структуры, длина которых (от 100 нм до 100 мкм) значительно превышает их диаметр <sup>[3]</sup>. В настоящее время интерес к ННК вызван перспективой их использования во многих приложениях, поскольку такие квазиодномерные структуры характеризуются оригинальными транспортными, электрическими, механическими и оптическими свойствами и уже находят применение в различных областях микро-, нанoeлектроники, оптоэлектроники и фотоники <sup>[4]</sup>. Современные технологии роста позволяют синтезировать гетероструктуры переменной размерности на основе ННК. В свою очередь, из-за эффективного снятия механических напряжений на боковых гранях при росте, такие наноструктуры являются перспективными для интеграции материалов с рассогласованием по параметрам постоянных кристаллических решеток, в том числе, III-V соединений на кремнии.

Сказанное выше подтверждает необходимость создания воспроизводимых методов эпитаксиального синтеза гетероструктур на основе соединений III-V ННК на кремнии для оптоэлектронных применений и исследования их свойств, что обуславливает **актуальность темы диссертации**.

**Целью работы** является разработка воспроизводимой технологии синтеза методом молекулярно-пучковой эпитаксии и исследование свойств гибридных полупроводниковых нитевидных нанокристаллов на основе материалов InP/InAsP/InP/Si, (GaN, GaAs, AlGaAs, InAs)/SiC/Si, AlGaAs/GaAs/AlGaAs/Si для оптоэлектронных приложений.

Для достижения указанной цели решался следующий комплекс **задач**:

- 1) Разработка технологии синтеза методом МПЭ и исследование морфологических, структурных и оптических свойств ННК в направлении, перпендикулярном подложке Si(111), на основе материалов InP и InP/InAsP/InP.
- 2) Разработка методик роста и исследование морфологических и оптических свойств GaN, GaAs, AlGaAs и InAs ННК на гибридной подложке SiC/Si.
- 3) Определение оптимальных параметров с точки зрения температуры и времени роста для синтеза методом МПЭ AlGaAs ННК в направлении, перпендикулярном подложке Si(111).
- 4) Исследование влияния соотношения потоков Al/Ga на морфологические, структурные и оптические свойства AlGaAs ННК на кремниевой подложке.
- 5) Разработка технологии синтеза методом МПЭ и исследование морфологических, структурных и оптических свойств гибридных ННК на основе материалов AlGaAs/GaAs/AlGaAs/Si.
- 6) Создание источников одиночных фотонов на основе ННК в системе AlGaAs/GaAs/AlGaAs/Si.

**Научная новизна и практическая значимость работы** заключается в том, что:

- 1) Предложена и реализована оригинальная методика синтеза ННК методом МПЭ в направлении, перпендикулярном подложке Si(111), на основе материалов InP и AlGaAs.
- 2) Впервые продемонстрирована возможность синтеза методом МПЭ ННК на основе материалов InP/InAsP/InP и AlGaAs/GaAs/AlGaAs на кремниевой подложке, исследованы их морфологические, структурные и оптические свойства.
- 3) Результаты оптических исследований ННК на основе материалов InP/InAsP/InP показали, что спектры ФЛ от таких структур наблюдаются вплоть до комнатной температуры.
- 4) Впервые продемонстрирована возможность синтеза методом МПЭ ННК на основе материалов AlGaAs/GaAs/AlGaAs на кремниевой подложке, исследованы их морфологические, структурные и оптические свойства.

- 5) Результаты исследований физических свойств ННК на основе материалов AlGaAs/GaAs/AlGaAs продемонстрировали возможность формирования ННК на основе этих материалов с заранее заданной зонной диаграммой.
- 6) Разработан экспериментальный метод исследования физических свойств ННК на основе материалов AlGaAs/GaAs/AlGaAs, позволяющий определить ширину пика фотолюминесценции на полувысоте от GaAs вставки в ННК.
- 7) Исследования оптических свойств AlGaAs/GaAs/AlGaAs ННК показали, что они обладают рекордно малой шириной линии спектра фотолюминесценции на полувысоте от GaAs нанометровой вставки (менее 10 мкэВ) и являются эффективными источниками одиночных фотонов.
- 8) Впервые продемонстрирована возможность синтеза методом МПЭ и исследованы свойства GaN, GaAs, AlGaAs и InAs ННК на гибридной подложке SiC/Si.
- 9) Результаты исследований физических свойств выращенных структур показали увеличение интегральной интенсивности фотолюминесценции от GaN ННК, синтезированных на SiC/Si, а также уменьшение диаметра GaAs, AlGaAs и InAs ННК, синтезированных на SiC/Si, по сравнению с аналогичными ННК, синтезированными при тех же условиях на кремниевой подложке.

#### **Основные методы исследования**

В данной работе для решения поставленных задач в процессе исследования использовались:

- 1) Метод молекулярно-пучковой эпитаксии для синтеза массивов ННК.
- 2) Метод растровой электронной микроскопии для исследования морфологических свойств выращенных образцов.
- 3) Метод просвечивающей электронной микроскопии с возможностью рентгеноструктурного анализа для исследования структурных свойств выращенных образцов
- 4) Методы фотолюминесценции, микрофотолюминесценции и рамановской спектроскопии для исследования оптических свойств выращенных образцов.

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

- 1) Метод молекулярно-пучковой эпитаксии позволяет синтезировать нитевидные нанокристаллы на основе InP и InP/InAsP/InP на поверхности Si(111), обладающие вюрцитной кристаллографической фазой. Выращенные структуры демонстрируют фотолюминесценцию вплоть до комнатной температуры.
- 2) Метод молекулярно-пучковой эпитаксии позволяет синтезировать III-V нитевидные нанокристаллы на кремниевой подложке с нанометровым слоем карбида кремния на её поверхности.
- 3) Вюрцитные AlGaAs нитевидные нанокристаллы, полученные методом молекулярно-пучковой эпитаксии на поверхности Si(111), обладают

самоорганизованной структурой типа стержень/оболочка. Содержание Al в стержне нитевидного нанокристалла всегда меньше, чем в оболочке.

4) Ширина линии фотолюминесценции от GaAs нановставки в AlGaAs нитевидный нанокристалл с максимумом на длине волны 780 нм при температуре 4К не превышает 10 мкэВ.

5) Синтезированные нитевидные нанокристаллы в системе AlGaAs/GaAs/AlGaAs на Si(111) являются источниками одиночных фотонов.

### **Апробация работы**

Результаты, вошедшие в диссертационную работу, докладывались и обсуждались на Всероссийских и международных конференциях и симпозиумах: EMN Meeting on Nanowires (Прага, 2018); 2nd International Conference on Photonics Research (Анталия, 2018); 2ой - 6ой международной школе-конференции “Saint-Petersburg OPEN 2019” по Оптоэлектронике, Фотонике, Нано- и Нанобиотехнологиям (Санкт-Петербург, 2015-2019); Международной конференция “Физика.СПб” (Санкт-Петербург, 2014-2018); XXI - XXIII симпозиумах «Нанопизика и нанозлектроника» (Нижний Новгород, 2017-2019); State-of-the-art trends of Scientific Research of Artificial and Natural Nanoobjects, STRANN-2018 (Москва, 2018); State-of-the-art trends of Scientific Research of Artificial and Natural Nanoobjects, STRANN-2016 (Санкт-Петербург, 2016); 1st – 2nd International workshop and school “Nanostructures for Photonics” (Санкт-Петербург, 2016, 2018); 18 -19th International Conference Laser Optics “ICLO 2020” (Санкт-Петербург, 2016, 2018); 46th International School & Conference on the Physics of Semiconductors “Jaszowiec 2019” (Ширк, 2017); The 20th European Workshop on Molecular Beam Epitaxy “EuroMBE 2019” (Коробицино, 2017); 25й Международных симпозиумах “Наноструктуры: Физика и Технология” (Санкт-Петербург, 2017); XVIII Всероссийской молодежной конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и нанозлектронике (Санкт-Петербург, 2016).

### **Публикации**

По теме диссертационной работы опубликованы 19 печатных работ, из которых 7 входят в перечень ВАК РФ. Список работ представлен в конце автореферата.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка используемой литературы. Она содержит 104 страницы текста, включая 8 формул (с нумерацией), 3 таблицы и 50 рисунков. Список использованной литературы включает 90 наименований

Личный вклад автора состоит в непосредственном участии в разработке дизайна, технологии и синтеза наноструктур. Автор принимал непосредственное участие в исследованиях процессов роста и свойств наноструктур. Автор принимал участие в разработке метода для экспериментального исследования оптических свойств наноструктур.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** представлено обоснование актуальности работы, сформулированы цели и научная новизна проведенных исследований, обоснована практическая значимость, перечислены основные положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** “Синтез нитевидных нанокристаллов методом молекулярно-пучковой эпитаксии: современное состояние и перспективы развития” является обзором литературы на тему работы. В главе представлены результаты предыдущих работ, а также оцениваются перспективы дальнейшего развития данной тематики.

**Вторая глава** “Экспериментальные установки и методы ” посвящена обзору методик и установок, с помощью которых проводились ростовые эксперименты и исследования свойств III-V ННК на кремниевых подложках. Для синтеза ННК методом молекулярно-пучковой эпитаксии использовались две установки. Синтез нитридных ННК проводился с помощью установки Compact 12 фирмы RIBER. Синтез других III-V ННК проводился с помощью установки Compact 21 фирмы RIBER.

Для исследований свойств синтезированных ННК использовались методы растровой электронной микроскопии (РЭМ), просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), фотолюминесценции (ФЛ) и микрофотолюминесценции (мкФЛ), а также Рамановского рассеяния.

**Третья глава** “Нитевидные нанокристаллы на основе системы InAsP/InP на кремниевой подложке” посвящена синтезу методом МПЭ и исследованию свойств InP и впервые синтезированных InP/InAsP/InP ННК на кремниевой подложке. Перед непосредственным синтезом ННК, кремниевая подложка подвергалась термической очистке в дополнительной камере металлизации, где после этого на поверхность подложки напылялся тонкий слой золота для формирования капель-катализатора. На следующем этапе подложка перемещалась в ростовую камеру без нарушений условий сверхвысокого вакуума, где и происходил синтез ННК при температуре подложки - 250°C.

Результаты исследований морфологических свойств InP ННК показали, что средняя высота InP ННК составила ~ 4 мкм, а диаметр составил 100 нм у основания и 30 нм на вершине ННК при их поверхностной плотности  $6 \cdot 10^7 \text{ см}^{-2}$ .

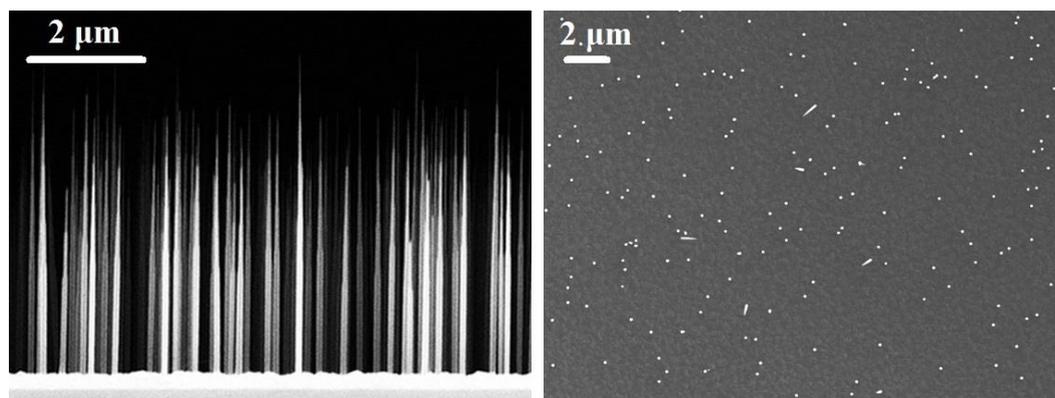


Рисунок 1 - РЭМ изображения ансамбля InP ННК на Si(111) подложке: (а) – вид сбоку, (б) – вид сверху.

Особо отметим, что InP ННК сформировались преимущественно в направлении (111) благодаря оригинальной методике синтеза; лишь менее 5% от всех ННК имели другие направления роста. Следует также отметить, что столь высокий процент когерентных ННК не характерен даже для ансамблей ННК, полученных литографическими методами, для которых величина ННК в направлении (111) 80% уже является значительной.

Результаты исследований оптических свойств синтезированных ННК показали наличие спектра фотолюминесценции при температуре жидкого азота в диапазоне длин волн от 900 до 950 нм.

На следующем этапе были синтезированы ННК на основе материалов InP/InAsP/InP на кремниевой подложке и изучено влияние соотношения потоков мышьяка и фосфора при формировании InAsP вставки на оптические свойства ННК. Исследования морфологических свойств выращенных массивов ННК не выявили существенных отличий от свойств InP ННК, описанных выше.

На спектрах ФЛ обоих образцов, как и в случае InP ННК, наблюдается слабоинтенсивная полоса с максимумом около 1.36 эВ, которая соответствует излучению от InP ННК (рисунок 2). Помимо этого, на спектрах ФЛ наблюдаются широкая полоса излучения в диапазоне 0.8-1.2 эВ, которая, по нашему мнению, является суперпозицией двух линий. Наблюдаемые в диапазоне 1000-1500 нм (1.2-0.8 эВ) две линии сигнала ФЛ соответствует излучению вставок InAsP в InP ННК, но имеют разную природу. Более длинноволновые линии ФЛ соответствуют излучению из вставок, вытянутых в направлении роста. Это объясняется тем, что во время роста InAsP, помимо роста аксиальной вставки, образуется также квантовая яма InAsP вокруг тела ННК вследствие латерального роста.

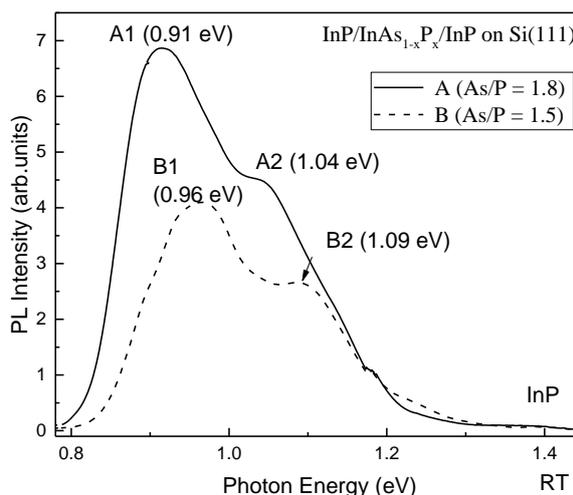


Рисунок 2 - Спектры ФЛ, полученные при комнатной температуре, ансамблей InP/InAsP/InP ННК, выращенных с различным соотношением потоков фосфора и мышьяка для InAsP вставки.

Следует отметить, что исследуемые ННК оказались чистыми с точки зрения кристаллографической фазы (вюрцит). Кроме того, использование столь низкой температуры роста ( $250^{\circ}\text{C}$ ) способствует возможной интеграции оптических элементов на кремниевой платформе с волоконно-оптическими системами связи.

С целью перехода от сложной системы InP ННК с InAsP КЯ и InAsP квантовой вставкой к более простой системе InP ННК с InAsP квантовой вставкой, была предложена процедура термического отжига выращенных ННК. Было установлено, что температура  $450^{\circ}\text{C}$  является оптимальной для увеличения интенсивности люминесценции нановставок InAsP и подавления излучения от квантовых ям InAsP, образовавшихся вследствие латерального роста вокруг InP ННК.

**Четвёртая глава** “III-V нитевидные нанокристаллы на гибридной подложке SiC/Si” посвящена исследованию процессов МПЭ синтеза и свойств GaN, GaAs, AlGaAs и InAs ННК на гибридной подложке SiC/Si. Формирование буферного слоя карбида кремния на подложке Si (111) проводилось методом, описанным ранее в [5-7]. На рисунке 3 приведены типичные РЭМ изображения GaN ННК, выращенных на гибридной подложке SiC/Si(111). Из рисунка видно, что GaN ННК сформировались преимущественно в направлении (111), а их средняя высота составляет около 1,6 мкм. Следует отметить, что выращенные структуры имеют высокую поверхностную плотность  $\sim 2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ , и некоторые ННК имеют тенденцию к сращиванию.

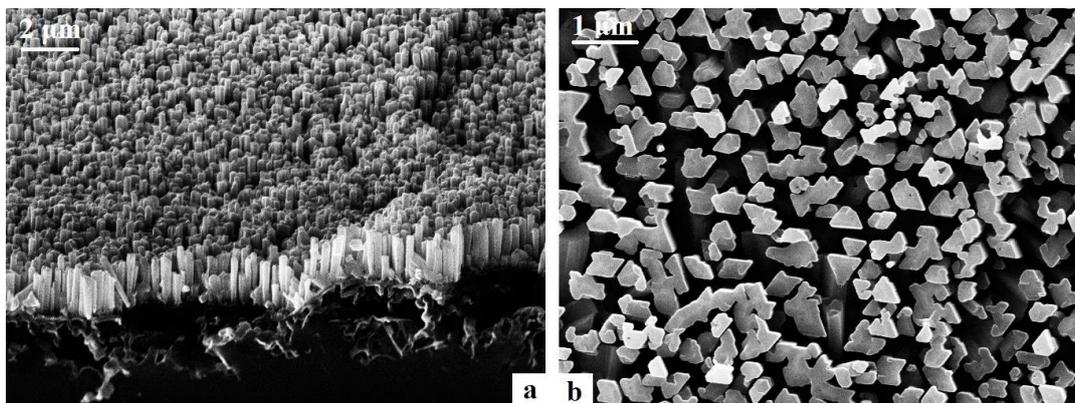


Рисунок 3 - Типичные РЭМ изображения массивов GaN ННК, выращенных на гибридной подложке SiC/Si(111) вид сбоку и сверху.

На рисунке 4, (а) приведено сравнение спектров ФЛ при комнатной температуре от массивов GaN ННК выращенных на гибридной подложке SiC/Si(111) и наиболее удачных GaN ННК, синтезированных непосредственно на поверхности кремния. Максимумы обоих спектров совпадают по длине волны, и их положение соответствует экспериментально измеренному значению излучения для объемного GaN [8]. В то же время, интегральная интенсивность ФЛ GaN ННК, выращенных на буферном слое SiC, более чем в 2 раза превышает интенсивности GaN ННК на поверхности кремния, синтезированных при тех же ростовых условиях. На рисунке 4, (b) приведён типичный спектр Рамановского рассеяния от GaN ННК, выращенных на подложке SiC/Si(111). Стоит отметить, что пики, соответствующие GaN, обладают чрезвычайно малой шириной ( $1,5 \text{ см}^{-1}$ ), что свидетельствует о высоком кристаллографическом качестве GaN ННК.

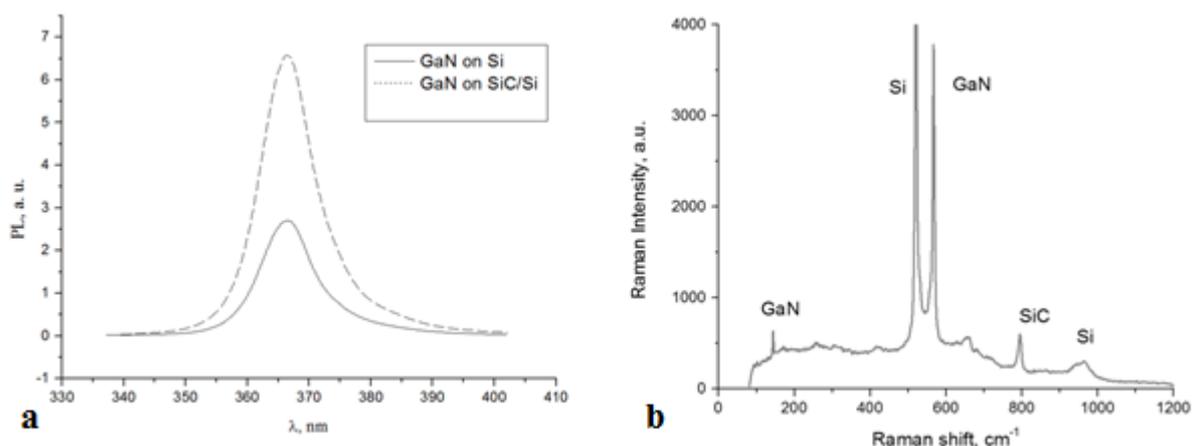


Рисунок 4 – (а) Типичные спектры ФЛ при комнатной температуре GaN ННК, выращенных на подложке SiC/Si(111) на поверхности кремния при одинаковых условиях; (б) Типичный спектр Рамановского рассеяния GaN ННК, выращенных на гибридной подложке SiC/Si(111).

Типичные РЭМ изображения GaAs, AlGaAs и InAs ННК, выращенных на гибридной подложке SiC/Si(111), приведены на рисунке 5. Из рисунка видно, что GaAs и AlGaAs ННК сформировались в различных кристаллографических направлениях. Массивы ННК имеют поверхностную плотность  $3 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$ , средняя высота ННК составляет 4 мкм. Диаметр GaAs ННК постоянен по всей длине ННК и составляет 35 нм, что примерно 30% меньше, чем для GaAs ННК, выращенных на кремниевой подложке [9]. AlGaAs ННК на подложке SiC/Si обладают конусообразной формой, их средний диаметр у основания составляет 80 нм, а у вершины - 15 нм. Тем не менее, диаметр AlGaAs ННК, выращенных на подложке SiC/Si(111), значительно меньше диаметра таких ННК, выращенных на Si(111) [10,11].

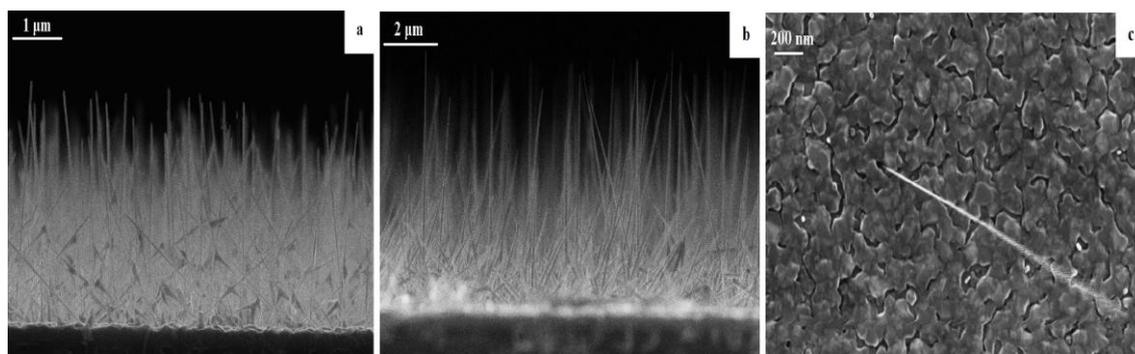


Рисунок 5 – Типичные РЭМ изображения III-V ННК, выращенных на подложке SiC/Si(111): (а) - ННК GaAs; (б) - AlGaAs NWs; (с) - InAs NWs.

По причине значительного рассогласования по постоянным решёткам между InAs и SiC, критический диаметр капля золота, под которыми возможен рост ННК, очень мал [9], поэтому плотность ННК InAs оказалась крайне низкой. Диаметр таких ННК не может быть точно определен с помощью растровой электронной микроскопии, так как ННК приходят в движение под воздействием электронной микроскопии. С уверенностью можно утверждать, что их диаметр меньше 10 нм. Это значение меньше, чем длина волны де Бройля для InAs.

**Пятая глава** “Нитевидные нанокристаллы на основе системы GaAs/AlGaAs на кремниевой подложке” посвящена исследованию процессов МПЭ синтеза и физических свойств синтезированных AlGaAs и AlGaAs/GaAs/AlGaAs ННК на кремниевой подложке. В результате экспериментов были определены оптимальные условия (с точки зрения морфологии ННК) для каталитического роста массивов AlGaAs ННК на поверхности Si(111) методом МПЭ, изучено влияние состава ННК на их морфологию.

Результаты исследований структурных свойств выращенных массивов AlGaAs ННК показали, что ННК обладают структурой типа стержень-оболочка (рисунок 6), причём мольная доля Al в стержне всегда меньше, чем в оболочке. Рост стержня AlGaAs ННК происходит под золотой каплей по механизму пар-жидкость-кристалл. Боковой рост ННК обусловлен меньшим коэффициентом миграции адатомов Al по поверхности по сравнению с адатомами Ga, что приводит к увеличению мольной доли Al на боковых гранях по сравнению со стержнем ННК.

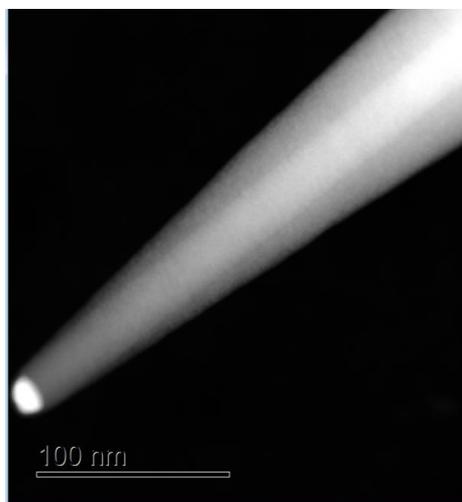


Рисунок 6 - Типичное ПЭМ изображение AlGaAs ННК, выращенного на кремнии.

Результаты исследований оптических свойств AlGaAs ННК при температуре 10К показали, что на спектрах ФЛ выращенных образцов с разной мольной долей Al в твёрдом растворе присутствуют два пика. Эти два пика соответствуют оптическому излучению из стержня и оболочки AlGaAs ННК.

На следующем этапе были синтезированы гибридные AlGaAs/GaAs/AlGaAs ННК типа «КТ в ННК» на кремниевой подложке. Исследования морфологических свойств таких ННК не выявили значительных отличий от свойств AlGaAs ННК.

Исследования оптических свойств методом низкотемпературной ФЛ показали, что положение пиков ФЛ от AlGaAs ННК и GaAs вставки меняется при изменении условий роста ННК (соотношении потоков Al/Ga и времени формирования GaAs вставки). Типичные спектры ФЛ от массивов гибридных AlGaAs/GaAs/AlGaAs ННК представлены на рисунке 7, (a) и (b). Из рисунка видно, что, изменяя параметры роста, можно формировать структуры, такие как «КТ в ННК», излучающие в широком диапазоне длин волн, а также создавать заранее заданные профили зонной диаграммы как для квантовых точек (вставок GaAs), так и для барьеров (AlGaAs ННК).

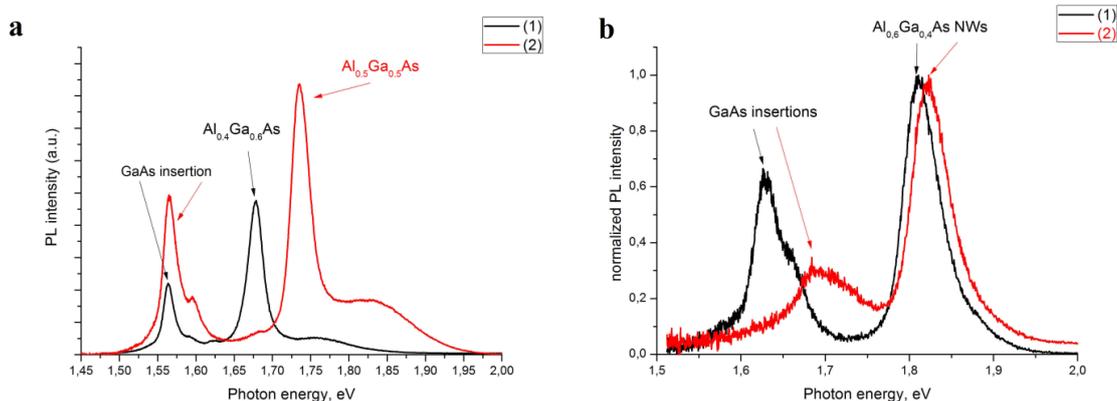


Рисунок 7 - Спектры ФЛ, измеренные при  $T = 10\text{K}$  для гибридных AlGaAs/GaAs/AlGaAs ННК с (a) различным содержанием Al в твердом растворе и различными временами роста КТ GaAs:  $x = 0.4$ , 12 с (1);  $x = 0.5$ , 15 с (2) и (b) одинаковое содержание Al  $x = 0.6$  в твердом растворе, но разные времена роста КТ GaAs: 15 с (1) и 11 с (2).

Оптические свойства одиночных AlGaAs/GaAs/AlGaAs ННК были изучены с помощью методики низкотемпературной микрофотолуминесценции. На рисунке 8, (a) приведены типичные спектры мкФЛ от трех образцов, содержащих КТ, сформированных в течение разного времени: 5 с, 7 с и 15 с. Как и ожидалось, увеличение времени роста увеличивает размер квантовой точки, что уменьшает энергию излучения (увеличивает длину волны излучения) квантовой точки. Как показано на рисунке 8, (b), спектры мкФЛ квантовых точек в ННК имеют сверхмалую ширину линии (FWHM, Full Width at Half Maximum), ограниченную разрешением спектрометра (30 мкэВ). На рисунке 8, (c) приведены автокорреляционные измерения излучения квантовой точки, показывающие характерный минимум на автокорреляционной функции в нулевой момент времени  $g^{(2)}(\tau = 0) = 0.19$ .

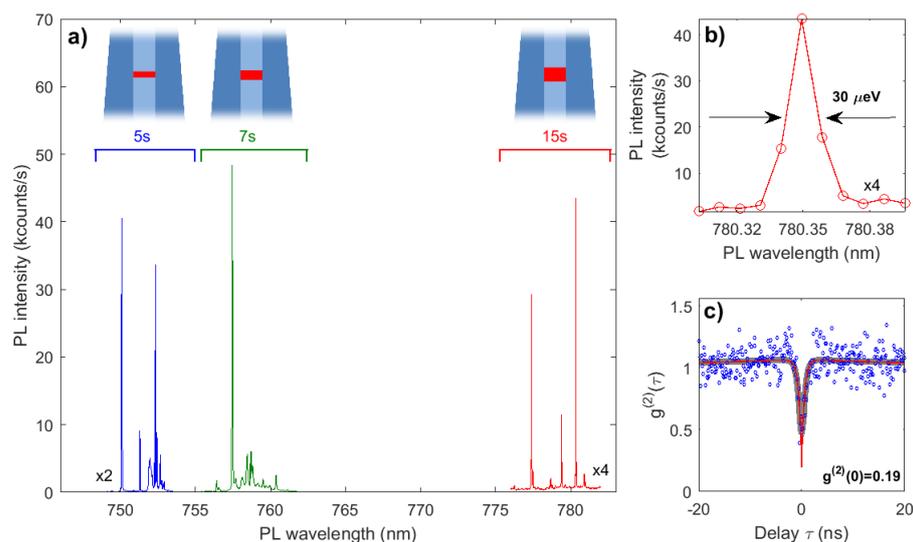


Рисунок 8 - Оптическая характеристика GaAs КТ в AlGaAs ННК.

Таким образом, GaAs квантовые точки в ННК являются спектрально узкими и яркими источниками одиночных фотонов. Узкие и интенсивные линии также

указывают на то, что выращенные гибридные ННК обладают высоким кристаллографическим качеством.

С целью определения реальной ширины линии ФЛ на полувысоте от GaAs вставки был разработан метод, основанный на взаимодействии излучения из вставки с атомами рубидия (Rb). В данном методе оптический переход  $D_2$  атомов  $^{87}\text{Rb}$  используется в качестве установленного эталона частоты, на который настраивается излучение от квантовых точек с использованием приложенного внешнего магнитного поля. Во время эксперимента квантовая точка возбуждается лазером, а затем её излучение направляется через ячейку с парами  $^{87}\text{Rb}$ . Варьируя приложенное магнитное поле, возможно менять частоту испускаемых фотонов. Фотоны проходят через Rb-ячейку и, когда их частота соответствует частоте атомных переходов Rb, они поглощаются. На рисунке 9 приведены результаты эксперимента. Магнитное поле во время эксперимента изменялось от 0.7 Тл до 0 Тл, а затем в обратном направлении до 0.7 Тл для проверки воспроизводимости эксперимента. Затем отслеживались коротковолновые ветви линий Зеемановского расщепления (выделены пунктирными линиями на рисунке 9, (а)) и анализировались интенсивности ФЛ, профили которых показаны на рисунке 9 (б). На рисунке можно чётко разрешить два минимума интенсивности ФЛ, связанных со сверхтонкой дублетной структурой линий  $D_2$   $^{87}\text{Rb}$ .

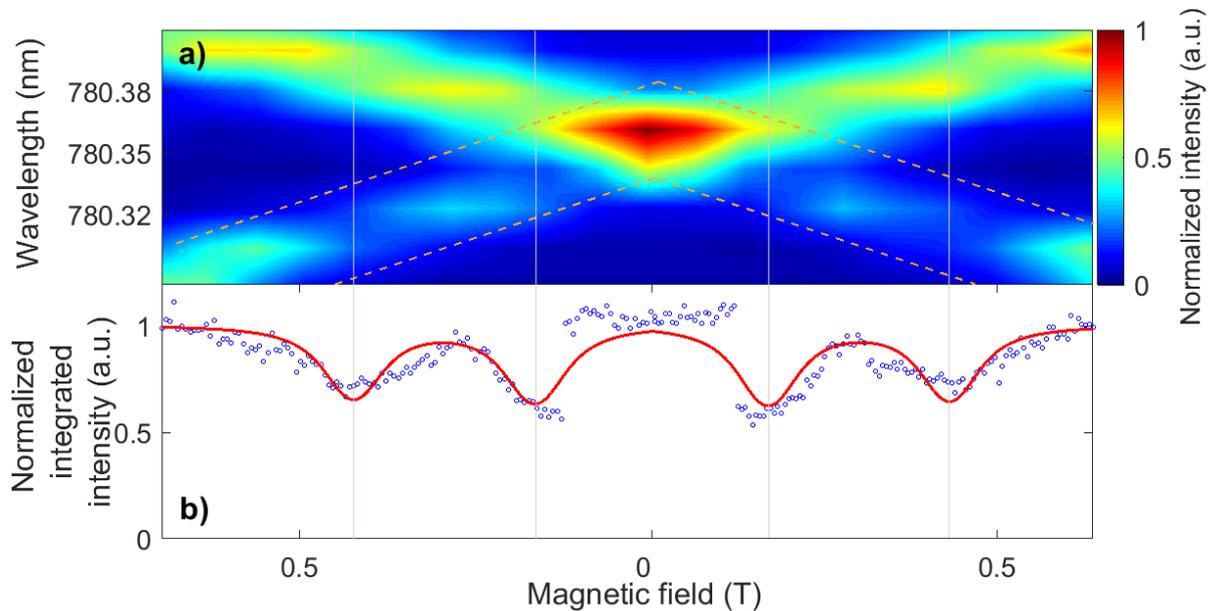


Рисунок 9 - а) Положение пика ФЛ экситона в квантовой точке ННК, сканируемое магнитным полем через атомные переходы Rb. Цвета представляют нормированную интенсивность ФЛ; б) Передача экситонной линии через пары Rb. Синие точки относятся к экспериментальным данным, а красная линия соответствует аппроксимации по модели.

В нашем случае излучение квантовой точки настроено между сверхтонкой структурой  $D_2$ -переходов. Основное состояние  $D_2$ -перехода состоит из двух Лоренцевских резонансов поглощения. Эта резонансная среда с двойным поглощением может быть описана электрической восприимчивостью  $z$  [12],

$$z = A \left( \frac{g(1)}{w(1) - w - iy} + \frac{g(2)}{w(2) - w - iy} \right), \quad (1)$$

где  $g(1)$  и  $g(2)$  – силы двух переходов,  $w(1)$  и  $w(2)$  - частоты переходов,  $2\gamma$  - однородная ширина линии на полувысоте,  $A$  - общая сила резонанса, при этом  $A \sim N$ , где  $N$  - плотность паров рубидия, которая экспоненциально увеличивается с ростом температуры. При наличии экспериментальных данных (рисунок 9), в уравнении (1) остаётся только одна неизвестная –  $\gamma$ . Вычисления показали, что выращенные в ходе экспериментов GaAs вставки в AlGaAs ННК обладают рекордно узкой шириной пика ФЛ на полувысоте – 9.4 мкэВ. Такое значение ширины пика ФЛ сравнимо по порядку величины с шириной линии пика ФЛ естественного атома. Насколько нам известно, это самая узкая ширина линии, о которой когда-либо упоминалось для системы GaAs квантовых вставок в ННК.

**В заключении** сформулированы основные результаты работы.

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертации получены следующие основные результаты:

- Предложена и реализована оригинальная методика синтеза ННК методом МПЭ в направлении, перпендикулярном подложке Si(111), на основе материалов InP и AlGaAs.
- Впервые продемонстрирована возможность синтеза методом МПЭ ННК на основе материалов InP/InAsP/InP и AlGaAs/GaAs/AlGaAs на кремниевой подложке.
- Результаты исследований оптических свойств ННК на основе материалов InP/InAsP/InP на кремниевой подложке показали, что спектры ФЛ от таких структур наблюдаются вплоть до комнатной температуры в диапазоне длин волн от 900 до 1400 нм.
- Результаты исследований структурных свойств ННК на основе материалов InP/InAsP/InP на кремниевой подложке показали, что выращенные ННК обладают чистой вюрцитной кристаллографической фазой.
- Исследовано влияние термической обработки InP/InAsP/InP ННК на их оптические и структурные свойства. Установлено, что температура 450°C является оптимальной для повышения увеличения интенсивности люминесценции нановставок InAsP и подавления излучения от квантовых ям InAsP
- Впервые методом МПЭ были синтезированы и исследованы свойства GaN, GaAs, AlGaAs и InAs ННК на гибридной подложке SiC/Si(111).
- Результаты исследований оптических свойств ННК показали, что интегральная интенсивность фотолюминесценции при комнатной температуре GaN ННК, выращенных на гибридной подложке SiC/Si, более чем 2 раза превышает интенсивность фотолюминесценции структур, выращенных при тех же условиях непосредственно на поверхности кремния.
- Показано, что большее рассогласование по постоянным решёток гибридной подложки SiC/Si (по отношению к Si) и III-V нитевидных нанокристаллов

(GaAs, AlGaAs и InAs) приводит к уменьшению их диаметра по сравнению с аналогичными структурами, выращенными на кремнии, на 30-40%.

- Исследование структурных свойств AlGaAs ННК показали, что они обладают самоорганизованной структурой типа стержень/оболочка. Содержание Al в стержне ННК всегда меньше, чем в оболочке.
- Разработан экспериментальный метод исследования физических свойств ННК на основе материалов AlGaAs/GaAs/AlGaAs, позволяющий определить реальную ширину пика фотолюминесценции от GaAs вставки в ННК.
- Синтезированные гибридные нитевидные нанокристаллы на основе материалов AlGaAs/GaAs/AlGaAs/Si обладают рекордно малой шириной линии излучения от GaAs нанометровой вставки (менее 10 мкэВ) и являются эффективными источниками одиночных фотонов в диапазоне длин волн 750 – 800 нм.

#### НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

1. Резник Р. Р. Рост и оптические свойства нитевидных нанокристаллов GaN, выращенных на гибридной подложке SiC/Si (111) методом молекулярно-пучковой эпитаксии / Р. Р. Резник, К. П. Котляр, И. В. Илькив, И. П. Сошников, С. А. Кукушкин, А. В. Осипов, Е. В. Никитина, Г. Э. Цырлин // Физика твердого тела. – 2016. – Т. 58. – №. 10. – С. 1886-1889. (0.35 п.л./0.21 п.л.)
2. Резник Р.Р. Синтез методом молекулярно-пучковой эпитаксии АШВУ нитевидных нанокристаллов ультра малого диаметра на сильно рассогласованной подложке SiC/Si (111) / Р. Р. Резник, К. П. Котляр, И. В. Штром, И. П. Сошников, С. А. Кукушкин, А. В. Осипов, Г. Э. Цырлин // Физика и техника полупроводников. – 2017. – Т. 51. – №. 11. – С. 1525-1529. (0.48 п.л./0.31 п.л.)
3. Резник Р. Р. Синтез методом молекулярно-пучковой эпитаксии и структурные свойства GaP- и InP-нитевидных нанокристаллов на SiC-подложке с пленкой графена / Р. Р. Резник, К. П. Котляр, И. В. Илькив, И. П. Сошников, С. П. Лебедев, А. А. Лебедев, Д. А. Кириленко, П. А. Алексеев, Г. Э. Цырлин // Физика и техника полупроводников. – 2018. – Т. 52. – №. 11. – С. 1317-1320. (0.33 п.л./0.07 п.л.)
4. Резник Р. Р. Когерентный рост нитевидных нанокристаллов InP/InAsP/InP на поверхности Si(111) при молекулярно-пучковой эпитаксии / Р. Р. Резник, Г. Э. Цырлин, И. В. Штром, А. И. Хребтов, И. П. Сошников, Н. В. Крыжановская, Э. И. Моисеев, А. Е. Жуков // Письма в ЖТФ. – 2018. – Т. 44. – №. 3. – С. 55-61. (0.34 п.л./0.15 п.л.)
5. Цырлин Г. Э. Нитевидные нанокристаллы на основе фосфидных соединений, полученные методом молекулярно-пучковой эпитаксии на поверхности кремния / Г. Э. Цырлин, Р. Р. Резник, Ю. Б. Самсоненко, А. И. Хребтов, К. П. Котляр, И. В. Илькив, И. П. Сошников, Д. А. Кириленко, Н. В. Крыжановская // Физика и техника полупроводников. – 2018. – Т. 52. – №. 11. – С. 1304-1307. (0.36 п.л./0.11 п.л.)
6. Цырлин Г. Э. Гибридные нитевидные нанокристаллы AlGaAs/GaAs/AlGaAs с квантовой точкой, полученные методом

молекулярно-пучковой эпитаксии на поверхности кремния / Г. Э. Цырлин, И. В. Штром, Р. Р. Резник, Ю. Б. Самсоненко, А. И. Хребтов, А. Д. Буравлев, И. П. Сошников // *Физика и техника полупроводников*. – 2016. – Т. 50. – №. 11. – С. 1441-1444. (0.32 п.л./0.08 п.л.)

7. Штром И. В. Пассивация поверхности GaAs нитевидных нанокристаллов с помощью молекулярного наслаивания AlN / И. В. Штром, А. Д. Буравлев, Ю. Б. Самсоненко, А. И. Хребтов, И. П. Сошников, Р. Р. Резник, Г. Э. Цырлин // *Физика и техника полупроводников*. – 2016. – Т. 50. – №. 12. – С. 1644-1646. (0.29 п.л./0.05 п.л.)

8. Leandro L. Nanowire quantum dots tuned to atomic resonances / L. Leandro, Ch. P. Gunnarsson, R. R. Reznik, K. D. Jöns, I. V. Shtrom, A. I. Khrebtov, T. Kasama, V. Zwiller, G. E. Cirlin, N. Akopian // *Nano letters*. – 2018. – Т. 18. – №. 11. – С. 7217-7221. (0.71 п.л./0.19 п.л.)

9. Dubrovskii V. G. Origin of spontaneous core-shell AlGaAs nanowires grown by molecular beam epitaxy / V. G. Dubrovskii, I. V. Shtrom, R. R. Reznik, Yu. B. Samsonenko, A. I. Khrebtov, I. P. Soshnikov, S. Rouvimov, N. Akopian, T. Kasama, G. E. Cirlin // *Crystal Growth & Design*. – 2016. – Т. 16. – №. 12. – С. 7251-7255. (0.77 п.л./0.21 п.л.)

10. Cirlin G. E. AlGaAs and AlGaAs/GaAs/AlGaAs nanowires grown by molecular beam epitaxy on silicon substrates / G. E. Cirlin, R. R. Reznik, I. V. Shtrom, A. I. Khrebtov, I. P. Soshnikov, S. A. Kukushkin, T. Kasama, N. Akopian // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2017. – Т. 50. – №. 48. – С. 484003. (0.6 п.л./0.2 п.л.)

11. Alekseev P. A. Piezoelectric current generation in wurtzite GaAs nanowires / P. A. Alekseev, V. A. Sharov, P. Geydt, M. S. Dunaevskiy, V. V. Lysak, G. E. Cirlin, R. R. Reznik, A. I. Khrebtov, I. P. Soshnikov, E. Lähderanta // *Physica status solidi (RRL)–Rapid Research Letters*. – 2018. – Т. 12. – №. 1. – С. 1700358. (0.5 п.л./0.11 п.л.)

12. Alekseev P. A. Unified mechanism of the surface Fermi level pinning in III-As nanowires / P. A. Alekseev, M. S. Dunaevskiy, G. E. Cirlin, R. R. Reznik, A. N. Smirnov, D. A. Kirilenko, V. Yu. Davydov, V. L. Berkovits // *Nanotechnology*. – 2018. – Т. 29. – №. 31. – С. 314003. (1.07 п.л./0.19 п.л.)

13. Reznik R. R. MBE Growth and Optical Properties of GaN, InN, and Al<sub>3</sub>B<sub>5</sub> Nanowires on SiC/Si (111) Hybrid Substrate / R. R. Reznik, K. P. Kotlyar, I. V. Ilkiv, A. I. Khrebtov, I. P. Soshnikov, S. A. Kukushkin, A. V. Osipov, E. V. Nikitina, G. E. Cirlin // *Advances in Condensed Matter Physics*. – 2018. – Т. 2018. (0.51 п.л./0.3 п.л.)

14. Reznik R. R. MBE growth of thin AlGaAs nanowires with a complex structure on strongly mismatched SiC/Si (111) substrate / R. R. Reznik, I. V. Shtrom, I. P. Soshnikov, S. A. Kukushkin, D. A. Zeze, G. E. Cirlin // *Journal of Physics: Conference Series*. – IOP Publishing, 2018. – Т. 1038. – №. 1. – С. 012063. (0.27 п.л./0.2 п.л.)

15. Cirlin G. E. Hybrid GaAs/AlGaAs Nanowire—Quantum dot System for Single Photon Sources / G. E. Cirlin, R. R. Reznik, I. V. Shtrom, A. I. Khrebtov, Y. B. Samsonenko, S. A. Kukushkin, T. Kasama, N. Akopian, L. Leonardo // *Semiconductors*. – 2018. – Т. 52. – №. 4. – С. 462-464. (0.11 п.л./0.03 п.л.)

16. Reznik R. R. MBE growth and structural properties of InAs and InGaAs nanowires with different mole fraction of In on Si and strongly mismatched SiC/Si (111) substrates / R. R. Reznik, K. P. Kotlyar, I. P. Soshnikov, S. A. Kukushkin, A.

- V. Osipov, G. E. Cirlin // *Semiconductors*. – 2018. – Т. 52. – №. 5. – С. 651-653. (0.27 п.л./0.19 п.л.)
17. Reznik R. R. The dependence of the wavelength on MBE growth parameters of GaAs quantum dot in AlGaAs NWs on Si (111) substrate / R. R. Reznik, I. V. Shtrom, Y. B. Samsonenko, A. I. Khrebtov, I. P. Soshnikov, G. E. Cirlin // *Journal of Physics Conference Series*. – 2017. – Т. 929. – №. 1. – С. 012047. (0.36 п.л./0.19 п.л.)
18. Sharov V. A. Surface state density in wurtzite InP nanowires / V. A. Sharov, P. A. Alekseev, M. S. Dunaevskiy, I. V. Ilkiv, R. R. Reznik, G. E. Cirlin // *Journal of Physics: Conference Series*. – IOP Publishing, 2019. – Т. 1199. – №. 1. – С. 012021. (0.26 п.л./0.03 п.л.)
19. Shtrom I. V. Structural and Optical Properties of Wurtzite AlGaAs Nanowires Grown by MBE on Si (111) Substrate / I. V. Shtrom, K. P. Kotlyar, N. G. Filosofov, A. Y. Serov, D. I. Krizhkov, Y. B. Samsonenko, I. V. Ilkiv, R. R. Reznik, V. F. Agekyan, G. E. Cirlin // *emiconductors*. – 2018. – Т. 52. – №. 16. – С. 2146-2148. (0.22 п.л./0.06 п.л.)

#### СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [<sup>1</sup>] Moerman I. Review on Fabrication Technologies for the Monolithic Integration of Tapers with III–V Semiconductor Devices / I. Moerman, P. P. Van Daele, P. M. Demeester // *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. – 1998. – Т. 3. – №. 6. – С. 1308-1320.
- [<sup>2</sup>] Dubrovskii V. G. Semiconductor nanowhiskers: synthesis, properties, and applications / V. G. Dubrovskii, G. E. Cirlin, V. M. Ustinov // *Semiconductors*. – 2009. – Т. 43. – №. 12. – С. 1539.
- [<sup>3</sup>] Dasgupta N. P. 25th Anniversary article: semiconductor nanowires – synthesis, characterization, and applications / N. P. Dasgupta, J. Sun, C. Liu, S. Brittman, S. C. Andrews, J. Lim, H. Gao, R. Yan, P. Yang // *Advanced Materials*. – 2014. – V. 26. – P. 2137-2184.
- [<sup>4</sup>] Agarwal R. Semiconductors nanowiers: optics and optoelectroniks / R. Agarwal, C. M. Lieber // *Applied physics A*. – 2006. – Т. 85. – №. 3. – С. 209.
- [<sup>5</sup>] Kukushkin S. A. New method for growing silicon carbide on silicon by solid-phase epitaxy: Model and experiment / S. A. Kukushkin, A. V. Osipov // *Physics of the Solid State*. – 2008. – Т. 50. – №. 7. – С. 1238.
- [<sup>6</sup>] Kukushkin S. A. Synthesis of epitaxial silicon carbide films through the substitution of atoms in the silicon crystal lattice: A review / S. A. Kukushkin, A. V. Osipov, N. A. Feoktistov // *Physics of the Solid State*. – 2014. – Т. 56. – №. 8. – С. 1507-1535.
- [<sup>7</sup>] Kukushkin S. A. Theory and practice of SiC growth on Si and its applications to wide-gap semiconductor films / S. A. Kukushkin, A. V. Osipov // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2014. – Т. 47. – №. 31. – С. 313001.
- [<sup>8</sup>] Tchernycheva M. Growth of GaN free-standing nanowires by plasma-assisted molecular beam epitaxy: structural and optical characterization / M. Tchernycheva, C. Sartel, G. E. Cirlin, L. Travers, G. Patriarche, J.-C. Harmand, L. S. Dang, J. Renard, B. Gayral, L. Nevou, F. Julien // *Nanotechnology*. – 2007. – Т. 18. – №. 38. – С. 385306.
- [<sup>9</sup>] Cirlin G. E. Critical diameters and temperature domains for MBE growth of III–V

nanowires on lattice mismatched substrates / G. E. Cirlin, V. G. Dubrovskii, I. P. Soshnikov, N. V. Sibirev, Yu. B. Samsonenko, A. D. Bouravleuv, J. C. Harmand, F. Glas // *physica status solidi (RRL)*–Rapid Research Letters. – 2009. – T. 3. – №. 4. – C. 112-114.

[<sup>10</sup>] Dubrovskii V. G. Origin of spontaneous core–shell AlGaAs nanowires grown by molecular beam epitaxy / V. G. Dubrovskii, I. V. Shtrom, R. R. Reznik, Yu. B. Samsonenko, A. I. Khrebtov, I. P. Soshnikov, S. Rouvimov, N. Akopian, T. Kasama, G. E. Cirlin // *Crystal Growth & Design*. – 2016. – T. 16. – №. 12. – C. 7251-7255.

[<sup>11</sup>] Cirlin G. E. Hybrid AlGaAs/GaAs/AlGaAs nanowires with a quantum dot grown by molecular beam epitaxy on silicon // G. E. Cirlin, I. V. Shtrom, R. R. Reznik, Yu. B. Samsonenko, A. I. Khrebtov, A. D. Bouravleuv, I. P. Soshnikov // *Semiconductors*. – 2016. – T. 50. – №. 11. – C. 1421-1424.

[<sup>12</sup>] Camacho R. M. Wide-bandwidth, tunable, multiple-pulse-width optical delays using slow light in cesium vapor / R. M. Camacho, M. V. Pack, J. C. Howell, A. Schweinsberg, R. W. Boyd // *Physical review letters*. – 2007. – T. 98. – №. 15. – C. 153601.