

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Кочеткова Федора Михайловича на тему «Создание и исследование гибких светодиодов на основе массивов фосфидных и нитридных полупроводниковых соединений нитевидных нанокристаллов, инкапсулированных в полимерные матрицы» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – «Физика полупроводников»

**Актуальность темы.** Гибкие светоизлучающие структуры являются новой платформой для создания современных оптоэлектронных устройств, таких как дисплеи и яркие экраны, или, например, очки дополненной реальности. На сегодняшний день наиболее развитая технология создания гибких устройств основана на применении органических материалов. В настоящий момент органические светоизлучающие диоды (organic light emitting diodes, OLED) обладают относительно эффективной электролюминесценцией (ЭЛ), и, благодаря масштабируемой технологии синтеза, находят широкое применение. Однако органические материалы уступают неорганическим полупроводниковым АЗВ5 соединениям по механической прочности и химической стабильности, а также внешней квантовой эффективности ЭЛ в оптическом диапазоне, особенно в синей и красной областях видимого спектра. Представленная диссертационная работа посвящена развитию методов создания гибких светоизлучающих структур на основе неорганических соединений АЗВ5 и исследованию их оптоэлектронных свойств.

Технология тонких пленок, доминирующая в неорганической оптоэлектронике, сталкивается со значительными трудностями при создании полноцветных устройств, обладающих механической гибкостью. Так, из-за необходимости сочетания материалов с различными параметрами

кристаллической решетки реализация подобных монокристаллических устройств крайне затруднена и требует сложных эпитаксиальных методов синтеза и постростовых технологических подходов. Альтернативой тонким пленкам являются структуры в виде нитевидных нанокристаллов (ННК) – полупроводниковых кристаллов с высоким аспектным соотношением длины к диаметру. За счет эффективной релаксации на боковой поверхности ННК упругих напряжений, возникающих при синтезе, данные наноструктуры могут быть выращены на рассогласованных по параметру решетки подложках. Массив вертикальных светоизлучающих ННК может работать независимо от ростовой подложки (возможна реализации активной области и эмиттеров непосредственно в ННК), при этом малая площадь контакта ННК с подложкой обеспечивает легкое механическое отделение. Массивы ННК со светодиодной структурой, инкапсулированные в гибкую матрицу, например, силиконовый эластомер, чаще всего, полидиметилсилоксан (ПДМС), продемонстрировали значимую гибкость устройств. При этом такие матрицы с ННК могут быть объединены с различными гибкими прозрачными контактными материалами, такими как слои одностенных углеродных нанотрубок (УНТ), полупрозрачные слои металлов и другие.

Среди достоинств рассматриваемого подхода можно отметить тот факт, что массивы вертикально-ориентированных ННК АЗВ5 высокого кристаллического совершенства могут быть синтезированы на относительно недорогих подложках Si (111) большой площади. После переноса массива ННК в силиконовую матрицу ростовые подложки могут быть использованы повторно после обработки жидкостной химией. Такой подход дополнительно снижает затраты на производство устройств.

Для создания механически гибких приборных структур, работающих в расширенном спектральном диапазоне, тонкие силиконовые плёнки с инкапсулированными массивами ННК (мембраны ПДМС/ННК) из различных АЗВ5 соединений могут быть интегрированы друг с другом или другими

оптоэлектронными устройствами, благодаря прозрачности мембраны и контактов из слоев УНТ.

Представленная к защите диссертация состоит из введения, 3-х глав, заключения с перечислением основных результатов и списка литературы. Общий объем диссертации 111 с., включая 62 рисунка, 3 таблицы и список литературы из 131 источника.

Во **введении** отражены требуемые признаки квалификационной работы, представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а именно: актуальность работы и цель, основные решаемые задачи и методы исследования, научная новизна и практическая значимость выполненных исследований, информация об апробации работы и научные положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** представляет собой обзор современного состояния исследований в выбранной области и определяет основные задачи диссертационной работы и их значимость. Приведено краткое описание истории развития полупроводниковых светодиодов. В том числе описаны различные технологические подходы к созданию гибких светоизлучающих устройств, их преимущества и недостатки. Аргументирован выбор ННК в качестве основы для создания гибких светоизлучающих устройств. Большое внимание уделено существующим материалам гибких и прозрачных электродов.

**Во второй главе** представлено описание постростовых технологических подходов для создания гибких и прозрачных мембран с ННК. В их числе – оригинальная методика инкапсуляции ННК в полимерную матрицу, методы отделения мембраны ННК/полимерная матрица от жесткой ростовой подложки и способы формирования электродов к полученным мембранам. Представлены результаты исследования мембран ННК/полимерная матрица с помощью растровой электронной микроскопии, картирования тока,

наведенного электронным пучком, а также измерения вольт-амперных характеристик.

**Третья глава** посвящена созданию и исследованию гибких светодиодных структур на основе нитевидных микро- и нанокристаллов. Продемонстрированы гибкие светодиодные структуры на основе массивов GaPAs/GaP ННК, инкапсулированных в полимерную матрицу, излучающие в красном спектральном диапазоне. Представлены результаты численного моделирования GaPAs/GaP ННК, описывающего режимы работы структуры, оптимальные геометрические параметры ННК, а также состав и профиль легирования наноструктур. Исследованы ЭЛ и ВАХ созданных гибких (эластичных) светоизлучающих диодов, работающих в красной области видимого света. Во второй части данной главы продемонстрированы гибкие и растяжимые светодиодные мембраны на основе нитевидных микрокристаллов InGaN/GaN, излучающих в синем спектральном диапазоне. Представлены результаты исследования светодиодных мембран с помощью растровой электронной микроскопии, электролюминесцентной спектроскопии и измерений вольт-амперных характеристик. Показано, что оптоэлектронные свойства созданных приборных структур практически не деградируют после множества циклов растяжения и релаксации.

**Заключение** содержит основные результаты, полученные автором в ходе диссертационного исследования.

**Степень обоснованности и достоверность результатов, полученных автором диссертации**

Результаты, представленные в диссертации Кочеткова Ф. М., получены с использованием современных технологических подходов и экспериментальных методов, исследование проведено на высоком научно-техническом уровне. Основные результаты работы представлены в докладах на 5 всероссийских и международных конференциях, а также опубликованы в

9 научных статьях, в том числе индексируемых в базах Web of Science и Scopus.

### **Новизна полученных результатов, сформулированных в диссертации**

В рамках диссертационного исследования автором получены следующие новые научные результаты:

1. Разработан и исследован способ инкапсуляции массивов полупроводниковых ННК различной морфологии в полимерные матрицы методом гравитационной накрутки, позволяющей создавать сверхтонкие (менее 10 мкм) гибкие и оптически прозрачные устройства.
2. Предложены и применены прозрачные электроды на основе слоев одностенных углеродных нанотрубок, металлических слоев Cr/Au/Cr и проводящего полимера к мембранам на основе структур p- и n-A3B5 ННК и исследованы их электрофизические свойства.
3. Разработана численная модель, описывающая режимы работы светодиодной структуры на основе массивов GaPAs/GaP ННК, определены оптимальные геометрические размеры ННК, а также состав и профиль легирования p-i-n структуры, излучающей свет в красном спектральном диапазоне.
4. Разработаны и исследованы гибкие светодиодные структуры на основе массивов GaPAs/GaP ННК, инкапсулированных в полимерную матрицу, с основным пиком ЭЛ на длине волны 650 нм, в которых в качестве прозрачных электродов использованы слои одностенных углеродных нанотрубок.
5. Продемонстрированы гибкие и растяжимые мембраны на основе массивов InGaN/GaN ННК, инкапсулированных в полимерную матрицу, с основным пиком электролюминесценции в диапазоне 450-460 нм, и растяжимых прозрачных электродов на основе слоев одностенных углеродных нанотрубок.

**Полученные результаты** имеют как научное значение, поскольку они расширяют понимание природы гибких неорганических оптоэлектронных структур, так и практическую направленность на создание гибких оптоэлектронных приборных структур на основе АЗВ5 ННК, в частности гибких и растяжимых светодиодов.

### **Замечания**

1. В третьей главе представлены светодиоды на основе ННК из различных материальных систем GaPAs/GaP и InGaN/GaN, работающие в красной и синей спектральных областях, соответственно. При этом не обсуждается, возможно ли создание гибких красных светодиодов на основе более эффективных InN материалов?
2. В третьей главе приведены отдельные светодиоды, излучающие в красном и синем спектральных диапазонах. Исследовались ли оптические и электрофизические свойства светодиодов при совмещении таких структур?
3. В диссертации показаны достаточно интересные результаты, которые свидетельствуют о возможности создания RGB устройств на основе полупрозрачных мембран с инкапсулированными массивами ННК. Однако, в данной работе не продемонстрирован гибкий светодиод, работающий в зеленой спектральной области. Какая материальная система может быть наиболее эффективной в этом случае?
4. При разработке численной модели светодиода на основе GaPAs/GaP ННК рассматривается только аксиальная геометрия приборной структуры. Чем это обусловлено, и какие преимущества по сравнению с радиальной геометрией?

Указанные замечания не относятся к основным положениям работы и не снижают значимость полученных научных результатов, представленных в диссертации. Данная работа является комплексным законченным научным исследованием. Проведенные эксперименты и результаты численного моделирования заслуживают высокой оценки.

Полученные Кочетковым Ф.М. результаты и использованные методы решения поставленных в работе задач соответствуют специальности 01.04.10 – «Физика полупроводников». Автореферат и публикации соискателя в полной мере отражают содержание представленной диссертационной работы.

Диссертация Кочеткова Ф.М. полностью удовлетворяет требованиям и критериям, предъявляемым к подобным работам и приведенным в п.9 Положения ВАК РФ «О порядке присуждения ученых степеней» (Утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации т 24 сентября 2013 г. № 842 (ред. от 11.09.2021 № 1539), а ее автор, Федор Михайлович Кочетков, заслуживает присуждение ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – «Физики полупроводников».

Официальный оппонент

Заведующий лабораторией  
Сканирующей зондовой микроскопии  
и спектроскопии  
Института аналитического приборостроения РАН

доктор физико-математических наук,  
профессор

3.06.2022

Голубок Александр Олегович

*Подпись Голубка А.О.  
заверено.*

198095, Санкт-Петербург,  
ул. Ивана Черных, 31-33, лит. А.  
тел.: (812) 363-0719,  
email: aogolubok@mail.ru

*Наг. о/р Голубков Е.И.*

