

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке и инновациям НИТУ



Филонов М.Р.

« 23 » мая 2019 г.

Отзыв ведущей организации

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» на диссертационную работу **Мухина Ивана Сергеевича** на тему «Комбинированные методы создания и исследования функциональных наноструктур для нанофотоники и наномеханики», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.01 «Приборы и методы экспериментальной физики»

Актуальность темы выполненной работы и ее связь с соответствующими отраслями науки и народного хозяйства

Активное развитие нанотехнологий обусловлено прогрессом в микропроцессорной технике и растущими требованиями к миниатюризации устройств и структур, в том числе транзисторных. До сих пор сохраняет свою актуальность эмпирический закон Мура, подчеркивающий требования к непрерывному уменьшению топологических размеров затворного контакта в транзисторах. Уже сегодня существуют светоизлучающие, приемные, транзисторные и другие устройства на основе квантовых точек, нитевидных нанокристаллов и тонких квантовых ям.

Развитие таких областей науки и техники, как нанофотоника и наноплазмоника, нанoeлектроника, спинтроника, нанобиотехнологии, квантовая электроника и криптография, полупроводниковые технологии, физика низкоразмерных систем и фотовольтаика невозможно без разработки новых методов создания и диагностики функциональных наноструктур широкого назначения. Сегодня при создании различных наноструктур применяется большое разнообразие технологий, основанных как на подходах «сверху-вниз» и «снизу-вверх», так и на методах переноса одиночных наноструктур. Для решения

конкретных технологических задач, возникающих при создании функциональных наноструктур и наносистем на их основе, как правило, используют комбинацию различных методов. Очевидно, что не существует универсального метода создания функциональных наноструктур и наносистем в связи с непрерывным увеличением их числа и, как следствие, постоянным увеличением ждущих своего решения технологических проблем и задач. Решение этой важной и актуальной проблемы возможно только путем комплексного развития и объединения экспериментальных методов, направленных на создание функциональных наноструктур различного назначения.

Новизна полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в работе.

Научной новизной обладают следующие результаты диссертации:

1. Создана и апробирована методика, впервые позволившая создавать гибридные металл-диэлектрические наноструктуры с новыми оптическими свойствами;
2. Создан новый метод подвешивания одиночных листов двумерных материалов (включая, графен и MoS_2) над подложкой. Экспериментально доказано, что в подвешенных по данному методу листах графена, зажатых между металлическими контактами, реализуется транспорт носителей заряда близкий к баллистическому;
3. Разработана методика создания новых оптических селективных элементов для микродисковых лазеров с помощью осаждения материала под действием сфокусированного электронного пучка, травления сфокусированным ионным пучком, манипулирования одиночными нанообъектами;
4. Впервые показано, что массив GaN нанотрубок может быть синтезирован с помощью молекулярно-пучковой эпитаксии при активации роста введением примесного легирующего потока, предложена математическая модель, описывающая процесс формирования структур;
5. Предложена новая методика создания прототипов солнечных элементов на основе одиночных GaN нитевидных нанокристаллов и их массивов, синтезированных на Si подложках с помощью молекулярно-пучковой эпитаксии;
6. Показано, что под действием сфокусированного электронного пучка в вакууме возможно самоорганизованное формирование углеродных наноструктур нового типа в виде нановилок, состоящих из трапецеидального основания и массива параллельных нановискеров, и предложена математическая модель, описывающая процесс формирования структур;

7. Показано, что система “металлическое острие - углеродный нановискер” может описываться системой связанных механических осцилляторов, сила связи которых зависит от адсорбции монослоев воды на поверхности наноструктур. Продемонстрировано, что добротность колебаний наноосцилляторов на основе вискероидов с поперечным размером порядка 100 нм и длиной порядка 3 мкм не уменьшается при переходе от вакуумных условий к атмосферному давлению;

8. Предложена и апробирована новая методика создания и калибровки резонансных детекторов масс на основе одиночного наноосциллятора путем прецизионного размещения наносфер калиброванного размера с массами около 10^{-15} г;

9. Предложены и апробированы новые конструкции функциональных зондов для сканирующей зондовой микроскопии (с увеличенным аспектным отношением, увеличенной механической устойчивостью) на основе углеродных и металл-углеродных нановискероидов и наноплоскостей;

10. С помощью сфокусированных ионного и электронных пучков созданы прототипы микро- и наноструктур в каналах микрофлюидных чипов для захвата и селекции по размерам одиночных объектов с субмикронными размерами.

Значимость для науки и производства полученных автором диссертации результатов.

1. Развита методика манипулирования одиночными микро- и нанообъектами массой порядка 10^{-15} г в вакууме и при атмосферном давлении, что может быть использовано в наноманипуляторах нового поколения;

2. В подвешенном листе графена, зажато между металлическими контактами, достигнута рекордная подвижность носителей заряда $2 \cdot 10^6$ см²/В·с, что может быть востребовано при создании наноэлектронных систем на основе двумерных материалов;

3. Разработаны и апробированы методики создания спектрально селективных элементов для управления модовым составом и направленностью излучения микродисковых лазеров;

4. Разработаны новые конструкции солнечных элементов на основе одиночных GaN нитевидных нанокристаллов и их массивов на Si подложках и реализованы их прототипы перспективные для создания сверхкомпактных источников питания.

5. Предложены новые конструкции и созданы прототипы функциональных СЗМ зондов на основе углеродных и металл-углеродных наноструктур, обладающие улучшенными характеристиками (увеличенным аспектным отношением, увеличенной механической устойчивостью) по сравнению со стандартными Si зондами;

6. Предложена конструкция и создан прототип резонансного детектора масс на основе одиночного аморфного нановискера, локализованного на вершине металлического острья, а также предложена и апробирована методика его калибровки с помощью фиксации на вершине наноструктуры одиночных сфер калиброванной массы. Чувствительность детектора лежит в диапазоне ($10^{-14} - 10^{-15}$) г;

7. Разработана и апробирована методика создания функциональных наноструктур в каналах микрофлюидных чипов, обеспечивающие фиксацию и сортировку объектов по размерам в диапазоне от сотен нм до единиц мкм.

Недостатки диссертационной работы.

По материалу диссертации можно сделать следующие замечания:

1. Предложенная модель самоорганизованного формирования наноструктур типа наноскальпель и нановилка под действием сфокусированного электронного пучка носит скорее качественный характер, чем количественный;
2. Не продемонстрирована апробация созданных функционализированных микрофлюидных чипов на реальных биологических объектах;
3. Предложенный автокаталитический метод синтеза нитевидных нанокристаллов GaN требует дальнейшего развития совершенствования для обеспечения формирования более равномерных по геометрическим характеристикам массивов наноструктур, что важно при создании конечных функциональных структур на их основе.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы.

Результаты диссертационной работы могут быть рекомендованы для дальнейшего использования и внедрения в отраслевых научно-исследовательских организациях и предприятиях, разрабатывающих функциональные микро- и наноструктуры широкого назначения, включая лазеры, элементы фотоники и электроники, сенсорные элементы и детекторы. К числу таких предприятий относятся ООО «Коннектор Оптикс», Институт физики микроструктур РАН, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, ЗАО «Научные приборы», Институт физики полупроводников имени А. В. Ржанова СО РАН, Группа компаний «Хевел», АО "Светлана-Полупроводники", Компания «BIOCAD».

Созданные СЗМ зонды могут быть также востребованы отечественными компаниями, специализирующимися на производстве зондовых микроскопов. Разработанные прототипы микрофлюидных чипов могут найти применения в фармкомпаниях, занимающихся созданием лекарственных препаратов.

Заключение.

Диссертационная работа Мухина И.С. «Комбинированные методы создания и исследования функциональных наноструктур для нанофотоники и наномеханики» является комплексным сбалансированным исследованием по созданию методик формирования, диагностики и изучения наноструктур широкого назначения. Работа содержит как результаты теоретических исследований, так и экспериментальные результаты, обладающие существенной новизной и высоким потенциалом прикладного внедрения. Сделанные в работе выводы и заключения являются обоснованными и достоверными.

Основные научные результаты опубликованы в 31 статье в высокорейтинговых рецензируемых отечественных и зарубежных научных изданиях, результаты исследований представлены на признанных всероссийских и международных конференциях и симпозиумах. Содержание автореферата соответствует содержанию работы.

Вышесказанное позволяет сделать вывод о том, что диссертация Мухина И.С. является законченным исследованием, выполненным на высоком научно-техническом уровне, имеет высокую теоретическую и практическую значимость.

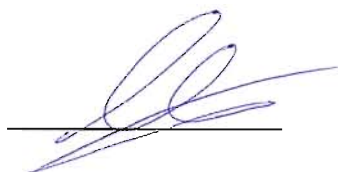
Приведенные замечания не являются принципиальными и не снижают ценности выполненной работы. Диссертация соответствует пунктам 1,5, 6-7 Паспорта специальности ВАК физико-математических наук по специальности 01.04.01 «Приборы и методы экспериментальной физики» и отвечает требованиям п.9 «Положение о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013 (ред. от 01.10.2018).

Диссертация рекомендуется к защите на соискание ученой степени доктора физико-математических наук 01.04.01 – «Приборы и методы экспериментальной физики».

Диссертационная работа Мухина Ивана Сергеевича и настоящий отзыв рассмотрены и утверждены на заседании кафедры функциональных наносистем и высокотемпературных материалов (Протокол № 16 от 23 мая 2019 г.).

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (НИТУ «МИСиС») Юридический и фактический адрес» Ленинский проспект, д. 4, 119049, г. Москва. Телефон: +7 495 955-00-32

Заведующий каф.
ФНСиВТМ, доцент,
к.т.н.



Кузнецов Д.В.