

## ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Мухина Ивана Сергеевича «Комбинированные методы создания и исследования функциональных наноструктур для нанофотоники и наномеханики» на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики.

Современное развитие информационных, процессорных и коммуникационных технологий неразрывно связано с миниатюризацией соответствующей элементной базы. В связи с этим, представленная к защите диссертационная работа И.С. Мухина, посвященная развитию методов создания и исследования функциональных наноструктур различного назначения, представляется актуальной.

Цель работы заключалась в разработке новых методов создания и диагностики функциональных наноструктур, представляющих интерес для таких областей науки и техники, как нанофотоника и наноплазмоника, наноэлектроника, нанобиотехнологии, квантовая криптография, полупроводниковые технологии, физика низкоразмерных систем и фотовольтаика, что подчеркивает практическую значимость полученных результатов.

В работе рассмотрены комбинированные методы и методики создания и исследования различных функциональных наноструктур с использованием самых современных экспериментальных подходов, включающих сфокусированные электронные, ионные и оптические пучки, разнообразные способы напыления и травления тонких слоев металлов, полупроводников и диэлектриков, молекулярно-пучковую эпитаксию для синтеза наноструктур, характеризующихся высоким кристаллическим совершенством.

Новизна работы состоит в развитии ряда экспериментальных методов, среди которых следует выделить: подвешивание над подложкой фрагментов двумерных материалов, зажатых между металлическими контактами для исключения эффекта близости подложки; манипулирование одиночными микро- и нанообъектами под действием сфокусированного электронного или оптического пучка, или твердотельной иглы СЗМ; управление модовым составом и направленностью излучения полупроводниковых микродисковых лазеров, осаждение углеродсодержащих наноструктур под электронным пучком и исследования их свойств; создания микро и наноструктур в каналах микрофлюидных чипов; создание квазиодномерных полупроводниковых структур, в том числе в виде нанотрубок. Работа включает в себя как экспериментальные исследования, так и аналитические модели, описывающие процессы формирования наноструктур, что подчеркивает ее комплексность.

Проведенные исследования выполнены на высоком уровне и опубликованы в значимом количестве высокорейтинговых научных профильных журналах, а также в полном объеме апробированы на всероссийских и международных конференциях и симпозиумах.

Вместе с тем, работа не лишена недостатков. Наиболее значимые из них:

1. В разделе 3.3 описывается методика совмещения координат воздействия СЗМ и ФИП для неразрушающей модификации поверхности дискового микрорезонатора, однако в системах Cross Beam и Dual Beam данная методика является стандартной. Из описания неясно - в чем новизна предложенной методики?

2. В разделе 3.3 описывается исследование влияния канавок глубиной 5 и 10 нм, сформированных сфокусированным ионным пучком на спектры микрофотолюминесценции микродискового лазера, однако отсутствует сравнение спектров.

3. В работе не приведен анализ глубины внедрения ионов галлия в структуру InAs/InGaAs при ускоряющем напряжении 30 кэВ и отсутствует объяснение механизма влияния внедренных ионов на спектры фотолюминесценции.

4. Для функционализированных нанозондов с улучшенными характеристиками не представлены результаты экспериментальных исследований влияния количества циклов сканирования на изменение параметров острия зонда. Это особенно актуально для углеродных наноструктур в виде нановилки и наноскальпеля, использующихся при проведении силовой литографии и манипулировании микро- и наночастицами, т. к. при силовых воздействиях на поверхность образцов будут происходить повышенный износ острия, в результате которого формирование наноструктур с воспроизводимыми параметрами, а также точность перемещения микро- и наночастиц может существенно снизиться.

5. При проведении экспериментальных исследований зондов на основе Pt/C нановискеров и сравнении полученных результатов со стандартными Si зондами не представлены марки и параметры исходных кантилеверов, на которые происходило осаждение, а также не приведены режим (контактный или полуконтактный) и параметры проведения измерений (сила прижима зонда к поверхности образца, скорость сканирования) методом атомно-силовой микроскопии, в результате чего сложно оценить способность зондов на основе Pt/C нановискеров адекватно визуализировать рельеф гидрофильных поверхностей с суб-100нм топографическими особенностями.

6. Не приведена информация о влиянии размеров мез и краевых эффектов на энергоэффективность генерации однофотонного излучения в структурах CdTe/ZnTe, что затрудняет оценку перспективности использования предлагаемой методики для создания источников однофотонного излучения.

7. При исследовании характеристик микродисковых лазеров с металл-углеродными и кремниевыми наноантеннами не приводится оценка (прогноз) возможности реализации в таких структурах электрической накачки и совместимости предлагаемых методов подавления излучения на боковых модах с техпроцессами групповой обработки.

8. В разделе, посвященном микродисковым лазерам, автор ссылается на результаты численного моделирования, выполненного, очевидно, непосредственно им. Однако никакой информации об используемых математических моделях и методах моделирования не приводится.

Отмеченные замечания не снижают общей высокой оценки полученных соискателем результатов. Диссертация Мухина И.С. представляет собой завершённую научно-исследовательскую работу, в которой поставленная цель по созданию комплексных методик создания функциональных структур нанофотоники, наноэлектроники, наномеханики, микрофлюидики и фотовольтаики на основе объединения методов нанотехнологий была в основном достигнута.

Диссертационная работа Мухина И.С. соответствует всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики. Автореферат полностью раскрывает содержание выполненной работы. Соискатель Мухин И.С. заслуживает присуждения искомой степени

Агеев Олег Алексеевич  
член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор,  
почтовый адрес: 347922, Ростовская область, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, корп. "Е".  
телефон: 8(8634)37-16-11  
e-mail: ageev@sfedu.ru  
ФГАОУ ВО «Южный федеральный

10.06.2019

дата

подпись

университет», профессор кафедры  
нанотехнологий и микросистемной техники

Солодовник Максим Сергеевич  
кандидат технических наук,  
почтовый адрес: 347922, Ростовская область, г.  
Таганрог, ул. Шевченко, 2, корп. "Е"  
телефон: 8(8634)37-16-11  
e-mail: solodovnikms@sfnedu.ru  
ФГАОУ ВО «Южный федеральный  
университет», доцент кафедры нанотехнологий и  
микросистемной техники

10.06.2019

дата



подпись

Подпись Агеева О.А. и Солодовника М.С.  
удостоверяю  
Федотов Александр Александрович,  
кандидат технических наук, доцент, директор  
Института нанотехнологий, электроники и  
приборостроения  
ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет»

10.06.2019

дата

подпись

