

Отзыв

официального оппонента на диссертационную работу Мухина Ивана Сергеевича «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».

1. Актуальность

Современное общество и научно-технический прогресс неразрывно связаны с достижениями нанотехнологий в широкой области приложений. В частности, современную коммуникацию как между отдельными пользователями, так и между интегральными системами и серверами невозможно представить без успехов в области физики полупроводников, систем с пониженной размерностью, фотоники и пр. Давно существующий тренд на миниатюризацию функциональных устройств и увеличение плотности расположения элементов на чипе стимулирует развитие методов по созданию наноструктур с заданными оптическими, электронными и др. характеристиками, а также новых подходов по исследованию их свойств. В современных нанотехнологиях, являющихся в том числе последовательным развитием микротехнологий, существует ряд хорошо развитых и прекрасно себя зарекомендовавших и воспроизводимых методов по созданию микро- и наноструктур широкого назначения. В частности, методы литографий сфокусированными лазерными, электронными и ионными пучками позволяют создавать массивы структур с характерным топологическим размером вплоть до десятков и сотен нанометров. Существующие методы осаждения тонких слоев металлов, диэлектриков и полупроводников, а также методы их травления обеспечивают воспроизводимый путь по прецизионному формированию различных функциональных покрытий с контролируемой толщиной с предельно достижимым субнанометровым разрешением. Указанные выше методы прекрасно себя проявили при создании, в том числе массовом, микро- и наноструктур широкого назначения. При этом следует особенно отметить, что создание и развитие комплексных методик, основанных на объединении различных подходов современных нанотехнологий, позволяет формировать различные наноструктуры с улучшенными характеристиками, часто не достижимыми при реализации структур стандартными существующими методами. Например, гибридные металл-диэлектрические фотонные наноструктуры и наноантенны часто обладают характеристиками, превосходящими свойства аналогичных структур, но выполненных только из одного типа материалов. Также ярким примером расширения функциональности конечных структур и приборов является интеграция одиночных наноструктур и их массивов в каналах микрофлюидных чипов. Безусловно, подобные прорывные направления требуют появления

новых комплексных методик и подходов по созданию и характеристике микро- и наноструктур, часто объединяющих технологические возможности из различных направлений, что обуславливает высокую актуальности представленной научной работы.

2. Обоснованность и новизна научных результатов диссертационной работы.

В диссертационной работе Мухин И.С. объединил как результаты экспериментальной работы по созданию и исследованию различных наноструктур, так и методы численного моделирования и теоретического анализа свойств структур, а также физических процессов, происходящих при их формировании. Обоснованность сделанных в работе выводов и заключений подтверждается воспроизводимостью полученных экспериментальных данных и совпадений сделанных теоретических предсказаний с результатами экспериментов. Данный подход к организации и проведению исследований позволил получить ряд новых наноструктур с улучшенными свойствами, а также разработать комплексные методы их создания и исследования, среди которых особенно следует выделить следующие:

- с помощью объединения методов электронной литографии на непроводящих подложках, термического испарения металлов в вакууме, плазмохимического травления и модификации короткими лазерными импульсами реализована методика, впервые позволившая создавать гибридные металл-диэлектрические наноструктуры с расширенными физико-химическими характеристиками;
- предложена и реализована новая методика манипулирования микро- и нанообъектами при помощи металлического острья, экспонируемого сфокусированным пучком электронов или лазерным пучком. В работе продемонстрирован ряд функциональных наноструктур с улучшенными характеристиками, созданный в том числе с применением развитого подхода по манипулированию объектами. В частности, созданы и апробированы специализированные зонды для сканирующей зондовой микроскопии, наноантенны на поверхности микродисковых лазеров и пр.;
- создан новый метод подвешивания над подложкой одиночных листов двумерных материалов (включая, графен и MoS₂), зажатых между металлическими контактными площадками. В частности, экспериментально доказано, что данный подход позволяет реализовывать в листах подвешенного графена условия близкие к баллистическому транспорту электронов;
- на основе комбинации различных подходов, основанных на сфокусированных электронных и ионных пучках, разработана методика создания новых оптических

элементов для микродисковых лазеров, обеспечивающих селекцию мод и управление направленности лазерного излучения;

- впервые показано, что массив GaN нанотрубок может быть синтезирован с помощью молекулярно-пучковой эпитаксии на Si подложках при активации роста примесным потоком Si. В соответствии с математической моделью, описывающей процесс формирования структур, переход режима роста от нановискера к нанотрубке происходит при превышении концентрации Si легирующей примеси уровня $5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$

- предложена новая методика процессирования солнечных элементов на основе одиночных GaN нитевидных нанокристаллов или нанотрубок, а также их массивов, синтезированных на Si подложках с помощью молекулярно-пучковой эпитаксии, для создания компактных источников питания;

- с помощью сфокусированных ионного и электронных пучков созданы прототипы микро- и наноструктур в каналах микрофлюидных чипов для захвата и селекции по размерам одиночных биообъектов в диапазоне размеров от сотен нм, до единиц мкм.

3. Научная ценность и практическая значимость результатов диссертационной работы.

Научная ценность представленной к защите работы определяется комплексным развитием и объединением экспериментальных методов, основанных на подходах «снизу-вверх» и «сверху-вниз», а также манипулировании одиночными нанообъектами, направленных на создание и исследование наноструктур и наносистем широкого назначения для элементов нанофотоники, наноэлектроники, наномеханики, фотовольтаики и пр., и обладающих расширенным функционалом. Полученные результаты обладают существенной значимостью как с фундаментальной точки зрения, так и открывают широкие возможности для решения ряда прикладных задач в указанных областях науки и техники.

Практическая значимость полученных результатов заключается в следующем:

- создана и внедрена методика манипулирования одиночными нанообъектами массой порядка 10^{-15} г в вакууме и при атмосферном давлении, что может быть использовано в наноманипуляторах нового поколения. Показано, что данный подход позволяет проводить калибровку резонансных детекторов масс на основе одиночных углеродных нановисекров, с чувствительностью на указанном уровне;

- разработаны и апробированы методики создания спектрально селективных элементов для управления модовым составом и направленностью излучения микродисковых лазеров с массивами квантовых точек;

- 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;
- рассчитаны 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;
- разработаны и апробированы методики создания функциональных наноструктур в каналах микрофлюидных чипов, обеспечивающие фиксацию и сортировку объектов по размерам в диапазоне от сотен нм до единиц мкм.

4. По рецензируемой диссертации можно сделать следующие замечания:

1. В главе 2 представлены результаты по подвешиванию одиночных листов графена для исследования их транспортных свойств. Общеизвестным является тот факт, что для исследования электронных характеристик структур обоснованно использовать четырехточечную схему подключения электрических контактов. Однако в работе приведены результаты только для двухточечной схемы подключения.
2. В главе 3 экспериментально показано, что введение в систему микродискового лазера плазмонной антенны приводит не только к увеличению мощности, излучаемой лазером в верхнюю полуплоскость, но и к увеличению порога накачки лазера. При этом в случае введения диэлектрической наноантенны такого эффекта не наблюдается. С чем связано такое поведение?
3. В главе 4 при описании колебаний углеродного нановискера, локализованного на вершине металлического острья, используются уравнения 2-го порядка. Хотя известно, что колебания упругой балки более корректно описываются уравнением 4-го порядка. Данный факт требует пояснений.
4. В главе 5 представлены подходы для создания селективного элемента по размерам для объектов в жидкости, основанные на подходе «сверху-вниз» с применением сфокусированного ионного пучка и подходе «снизу-вверх» с осаждением материала под действием сфокусированного электронного пучка. При этом отсутствует анализ, какой из подходов является более перспективным для данной задачи.
5. В главе 6 приводятся оценки максимальной эффективности солнечных элементов на основе GaN НК и Si подложки. Экспериментально измеренная эффективность созданных прототипов элементов существенно ниже, предсказываемой с помощью методов численного моделирования, что требует пояснений.

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 выполненный теоретический анализ, а также результаты численного моделирования заслуживают высокой оценки.

Полученные Мухиным И.С. результаты и использованные методы решения поставленных в работе задач соответствуют специальности 01.04.01 – «Приборы и методы экспериментальной физики». Автореферат и публикации соискателя в полной мере отражают содержание представленной диссертационной работы.

Диссертация Мухина И.С. 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 от 24 сентября 2013 г. № 842 (редакция от 28.08.2017)), а ее автор, Иван Сергеевич Мухин, заслуживает присуждение ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.01 – «Приборы и методы экспериментальной физики».

Официальный оппонент

Заведующий лабораторией Фотоэлектрических преобразователей
Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН
доктор технических наук, профессор, член.- корр. РАН

Андреев Вячеслав Михайлович

Адрес организации: 94021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26

Электронная почта: post@mail.ioffe.ru

Факс: (812) 297-1017

Телефон: (812) 297-2245

Сайт: <http://www.ioffe.ru>



Подпись руки Андреева В.М. заверяю