



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ АКАДЕМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

194021, С.-Петербург, ул. Хлопина, 8, корп. 3, лит. А

Телефон (факс): (812) 448-69-80

www.spbau.ru

ОКПО 59503334, ОГРН 1027802511879

ИНН/КПП 7804161723/780401001

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет Российской академии наук»



д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН

А.Е. Жуков

М.П.

« 26 » февраля 2019 г.

Заключение организации, в которой выполнена работа

федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования и науки
«Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет
Российской академии наук»

о диссертационной работе **Мухина Ивана Сергеевича** «Комбинированные методы создания и исследование функциональных наноструктур для нанофотоники и наномеханики», представляемой на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.01 «Приборы и методы экспериментальной физики»

Диссертация «Комбинированные методы создания и исследование функциональных наноструктур для нанофотоники и наномеханики» выполнена в лаборатории Возобновляемых источников энергии.

В период подготовки диссертации соискатель Мухин Иван Сергеевич являлся заведующим лабораторией федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет Российской академии наук».

В 2012 г. Мухин И.С. защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 «Физика полупроводников» в Санкт-

Санкт-Петербургском Академическом университете – научно-образовательном центре нанотехнологий РАН.

Актуальность диссертационной работы.

Всеобъемлющее исследование наноструктур и создание наноустройств на их основе требуют развития экспериментальных методов нанотехнологий, в том числе методов эпитаксиального синтеза гетероструктур различных полупроводниковых материалов, методов осаждения тонких слоев металлических и диэлектрических материалов, методов прецизионного травления различных материалов, технологий сфокусированных оптических, электронных и ионных пучков, литографии, методов манипулирования одиночными нанообъектами и их массивами и т.п.

В диссертационной работе Мухина И.С. рассматриваются комплексные методики создания наноструктур для наноплазмоники, нанофотоники и наноэлектроники. В частности, представлена разработанная методика создания микро- и наноструктур для систем плазмоники и диэлектрической фотоники на основе объединения методов электронной литографии на непроводящих оптически прозрачных подложках, осаждения и травления тонких слоев металлов и диэлектриков. Представлено развитие метода манипулирования одиночными микро- и наночастицами под сфокусированным электронным пучком или лазерным излучением в условиях вакуума или при атмосферном давлении, а также методика подвешивания над подложкой одиночных листов двумерных материалов, в том числе графена.

В работе, на одной из задач исследований, связанной с управлением модовым составом и направленностью излучения микродисковых лазеров, представлена, реализована и апробирована комплексная методика модификации поверхности лазерного резонатора с помощью осаждения материала под действием сфокусированного электронного пучка в присутствии газов-прекурсоров, технологии сфокусированного ионного пучка и прецизионном манипулировании одиночными наночастицами.

Рассматриваются вопросы, связанные с развитием методов создания и исследования наноструктур для наномеханики на основе углеродных и металл-углеродных висцерных наноструктур различной размерности, формируемых под действием сфокусированного электронного пучка. Описан метод исследования в камере СЭМ механических характеристик одиночных нановискеро́в. Разработана математическая модель, описывающая самоорганизованное формирование

наноструктур в виде пьедестала-трапеции и массива параллельных нановискеров, рассматривается математическая модель двух связанных наноосцилляторов в виде металлического острия и одиночного углеродного нановисера.

Представлен, обоснован и апробирован комплексный подход, объединяющий метод осаждения материала под действием сфокусированного электронного пучка в присутствии газов-прекурсоров и технологию сфокусированного ионного пучка, для создания в каналах микрофлюидных чипов массивов микро- и наноструктур.

В диссертационной работе приводятся результаты по объединению молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) и постростовых методов для создания полупроводниковых функциональных наноструктур для фотовольтаики. В частности, рассматриваются конструкции солнечных элементов (СЭ) на основе массивов GaN нитевидных нанокристаллов (ННК) и нанотрубок, формируемых методами молекулярно-пучковой эпитаксии на Si подложке. Показано, что с помощью метода МПЭ при высоких значениях потока легирующей примеси Si возможно формирование как массивов GaN ННК, так и GaN наноструктур в виде нанотрубок. Предложена математическая модель, описывающая процесс формирования GaN нанотрубок и основывающаяся на неравномерном радиальном профиле Si легирования GaN наноструктур.

Таким образом, тема диссертации, направленная на развитие комплексных методов формирования и исследования функциональных наноструктур для областей науки, указанных в названии данной работы, на основе различных современных подходов и технологий, является **актуальной**.

По итогам рассмотрения принято следующее заключение:

1. **Личное участие соискателя ученой степени в получении результатов, изложенных в диссертации.**

Диссертация Мухин И.С. является самостоятельной и оригинальной научно-исследовательской работой, вклад автора диссертации в которую был определяющим. Личный вклад автора состоит в создании и развитии комплексных методов формирования микро- и наноструктур с помощью электронной литографии на непроводящих подложках совместно с методами осаждения и травления материала; в создании метода формирования 1D, 2D и 3D наноструктур под действием сфокусированного электронного пучка; в создании комплексных методов модификации поверхности микродисковых лазеров для управления модовым составом и направленностью излучения; в создании комплексных методик формирования массивов микро- и наноструктур в каналах микрофлюидных чипов; в развитии методов

процессирования прототипов солнечных на основе одиночных GaN нановискеров и их массивов. Теоретические модели формирования двумерных структур в виде C наноплоскостей под действием сфокусированного электронного пучка; роста GaN нанотрубок, активированного потоком легирующей примеси; колебаний связанных осцилляторов «углеродный нановискер – металлическое острие» разработаны автором лично или совместно с соавторами. Интерпретация экспериментальных данных проведена лично автором или совместно с соавторами. Все вошедшие оригинальные результаты получены либо автором диссертации, либо при его непосредственном участии.

2. Степень достоверности результатов проведенных соискателем ученой степени исследований.

Достоверность научных положений, результатов и выводов подтверждается комплексностью используемых экспериментальных методов и подходов, корректным применением численного моделирования, современных методов диагностики объектов исследований (включая, сканирующую электронную и зондовую микроскопию, оптические методы и пр.), контролем условий экспериментов, воспроизводимостью результатов, количественной сходимостью полученных результатов с известными экспериментальными данными, использованием признанных теоретических положений и допущений. Основные положения и выводы диссертации доказаны экспериментально и обоснованы теоретически.

3. Новизна исследований, полученных результатов и выводов заключается в следующем:

При создании наноструктур для нанофотоники, наноплазмоники, фотовольтаики и наноэлектроники:

- на основе комбинации методов сканирующей электронной литографии на непроводящих подложках, термического испарения металлов в вакууме, плазмо-химического травления и модификации фемтосекундным (fs) лазерным излучением предложена методика, впервые позволившая создавать гибридные металл-диэлектрические наноструктуры с новыми оптическими свойствами;

- развита методика манипулирования микро- и нанообъектами при помощи металлического острия под действием сфокусированного электронного пучка в камере сканирующего электронного микроскопа или сфокусированного лазерного излучения в конфокальном лазерном сканирующем микроскопе. Показано, что применение данной методики позволяет создавать новые функциональные наноструктуры для

широкого класса задач (например, специализированные зонды для сканирующей зондовой микроскопии, наноантенны на поверхности микродисковых лазеров);

- 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, достигнута рекордная подвижность носителей заряда $2 \cdot 10^6 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$;

- разработана методика создания новых оптических селективных элементов для микродисковых лазеров с помощью осаждения материала под действием сфокусированного электронного пучка, травления сфокусированным ионным пучком, манипулирования нанообъектами под сфокусированным электронным пучком;

- впервые показано, что массив GaN нанотрубок может быть синтезирован с помощью молекулярно-пучковой эпитаксии на Si подложках при активации роста примесным легирующим потоком Si, предложена математическая модель, описывающая 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 и их массивов, синтезированных на Si подложках с помощью молекулярно-пучковой эпитаксии.

При создании наноструктур для наномеханики и микрофлюидики:

- показано, что под действием сфокусированного электронного пучка в камере сканирующего электронного микроскопа возможно самоорганизованное формирование углеродных наноструктур нового типа в виде нановилок (англ. nanofork) в виде трапецеидального основания и массива параллельных нановискеров, и предложена математическая модель в форме системы линейных уравнений, описывающая процесс формирования структур;

- 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 вискеро с поперечным размером порядка 100 нм и длиной порядка 3 мкм не уменьшается при переходе от вакуумных условий к атмосферному давлению;

- предложена и апробирована новая методика калибровки резонансных детекторов масс на основе одиночного наноосциллятора путем прецизионного размещения наносфер калиброванного размера с массами в диапазоне ($10^{-14} - 10^{-15}$) г;

- предложены новые конструкции функциональных зондов для сканирующей зондовой микроскопии (с увеличенным аспектным отношением, увеличенной механической устойчивостью) на основе углеродных и металл-углеродных нановискеров и наноплоскостей, созданы и апробированы их прототипы;

- 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.

4. Ценность научных работ соискателя ученой степени.

Научная значимость работы определяется всей совокупностью новых и важных результатов, содержащихся в диссертации. Результаты работы дополняют и расширяют существующие методики создания микро- и наноструктур для широкого круга приложений.

- создана методика формирования металлических, диэлектрических и гибридных наноструктур для плазмоники и диэлектрической фотоники на оптически прозрачных непроводящих подложках с использованием электронной литографии;

- предложена и обоснована методика формирования оптических элементов с однофотонной статистикой излучения из полупроводниковых гетероструктур A_2B_6 с квантовыми точками с использованием электронной литографии и плазмохимического травления материалов;

- развита методика контролируемого прецизионного перемещения микро- и нанообъектов в условиях вакуума и при атмосферном давлении под сфокусированным электронным пучком и лазерным излучением с использованием твердотельных игл, а также методика подвешивания над поверхностью подложки листов двумерных Ван-дер-Ваальсовых материалов, включая графен и MoS_2 ;

- создана методика модификации микродисковых лазерных структур на основе квантовых точек в системе материалов A_3B_5 с использованием технологий сфокусированного ионного пучка, осаждения материала под действием сфокусированного ионного пучка, манипулирования наночастицами для управления спектральным составом и направленностью излучения;

- предложен и исследован метод создания функциональных наномеханических устройств на базе металл-углеродных наноструктур, формируемых под действием сфокусированного электронного пучка;

- предложена и обоснована методика формирования функциональных микро- и наноструктур в каналах микрофлюидных чипов с применением технологий сфокусированного ионного пучка и осаждения материала под действием сфокусированного электронного пучка.

- исследованы и развиты методы синтеза массивов GaN нитевидных нанокристаллов и нанотрубок на Si подложках с помощью молекулярно-пучковой эпитаксии;

- развиты методики прототипирования солнечных элементов комбинированной размерности на основе одиночных GaN нитевидных нанокристаллов и их массивов, синтезированных на Si подложках;

Практическая значимость работы Мухина И.С. заключается в следующем:

При создании наноструктур для нанофотоники, наноплазмоники, фотовольтаики и нанoeлектроники:

- 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;

- в подвешенном листе графена, зажато между металлическими контактами, достигнута рекордная подвижность носителей заряда $2 \cdot 10^6$ см²/В·с;

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

- 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.

При создании наноструктур для наномеханики и микрофлюидики:

- 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;

- предложена конструкция и создан прототип резонансного детектора масс на основе одиночного аморфного нановискера, локализованного на вершине металлического острия, а также предложена и апробирована методика его калибровки путем фиксации на вершине нановискера одиночных сфер калиброванной массы в диапазоне (10^{-14} – 10^{-15}) г;

- 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.

Рекомендации по использованию. Возможными потребителями полученных в диссертации результатов могут быть организации, занимающиеся разработкой оптических элементов, лазеров и светодиодов на основе квантовых точек, детекторов, плазмонных структур, полупроводниковых структур, а также организации, занимающиеся исследованиями в области микрофлюидных технологий и солнечной энергетики. Результаты могут быть интересны таким учреждениям как: федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Физико-технический институт имени А.Ф.Иоффе Российской академии наук», Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого, компания ООО «Коннектор Оптикс» (Санкт-Петербург), институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова, институт физики микроструктур РАН, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС».

Общая оценка диссертации.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы. Во введении сформулированы цели и задачи исследований. Поставленные задачи решены полностью. Диссертация хорошо оформлена, является логически связанной и написана языком, доступным широкому кругу специалистов.

Данная работа отвечает всем основным требованиям ВАК. Тема работы, безусловно, актуальна. Основные положения, выносимые на защиту, являются обоснованными, достоверными и апробированными. Автор разработал новые методики создания микро- и наноструктур, а также усовершенствовал известные. Теоретические разработки автор реализовал в программные продукты на персональном компьютере, и с их помощью выполнил обработку модельных объектов. Предложенные модели были верифицированы экспериментально, что подтверждает их достоверность и научную ценность.

Полученные научные результаты прошли апробацию на российских и международных научных конференциях. По материалам диссертации опубликовано 31 печатная работ, в изданиях из перечня ВАК РФ. Основные положения и результаты диссертационного

исследования полностью отражены в опубликованных и входящих в список ВАК работах соискателя и автореферате.

5. Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем.

Основное содержание диссертации опубликовано в 31 статье в изданиях, рецензируемых Web of Science или Scopus, и входящих в перечень ВАК.

1. Mukhin I.S., Fadeev I.V., Zhukov M.V., Dubrovskii V.G., Golubok A.O. Framed carbon nanostructures: Synthesis and applications in functional SPM tips // *Ultramicroscopy* - 2015, Vol. 148, pp. 151-157.
2. Mukhin I.S., Zhukov M.V., Mozharov A.M., Bolshakov A.D., Golubok A.O. Influence of condensation enhancement effect on AFM image contrast inversion in hydrophilic nanocapillaries // *Applied Surface Science* - 2019, Vol. 471, pp. 621-626.
3. Golubok A.O., Mukhin I.S., Popov I.Y., Lobanov I.S. Creation and study of 2D and 3D carbon nanographs // *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures* - 2012, Vol. 44, No. 6, pp. 976-980.
4. Lukashenko S.Y., Mukhin I.S., Komissarenko F.E., Gorbenko O.M., Sapozhnikov I.D., Felshtyn M.L., Uskov A.V., Golubok A.O. Resonant Mass Detector Based on Carbon Nanowhiskers with Traps for Nanoobjects Weighing // *Physica Status Solidi (A) Applications and Materials Science* - 2018, Vol. 215, No. 21, pp. 1800046.
5. Lukashenko S.Y., Mukhin I.S., Veniaminov A.V., Sapozhnikov I.D., Lysak V.V., Golubok A.O. Q-factor study of nanomechanical system "metal tip - carbon nanowhisiker" at low and ambient pressure // *Physica Status Solidi (A) Applications and Materials Science* - 2016, Vol. 213, No. 9, pp. 2375-2379.
6. Evstrapov A.A., Mukhin I.S., Bukatin A.S., Kukhtevich I.V. Ion and electron beam assisted fabrication of nanostructures integrated in microfluidic chips // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* - 2012, Vol. 282, pp. 145-148.
7. Евстратов А.А., Мухин И.С., Кухтевич И.В., Букатин А.С. Метод сфокусированного ионного пучка при формировании наноразмерных структур в микрофлюидных чипах // *Письма в ЖТФ* - 2011, Т. 37, № 20, С. 32-40.

8. Bogdanov A.A., Mukhin I.S., Kryzhanovskaya N.V., Maximov M.V., Sadrieva Z.F., Kulagina M.M., Zadiranov Y.M., Lipovskii A.A., Moiseev E.I., Kudashova Y.V., Zhukov A.E. Mode selection in InAs quantum dot microdisk lasers using focused ion beam technique // *Optics Letters* - 2015, Vol. 40, No. 17, pp. 4022-4025.
9. Kryzhanovskaya N.V., Mukhin I.S., Moiseev E.I., Shostak I.I., Bogdanov A.A., Nadtochiy A.M., Maximov M.V., Zhukov A.E., Kulagina M.M., Vashanova K.A., Zadiranov Y.M., Troshkov S.I., Lipovskii A.A., Mintairov A. Control of emission spectra in quantum dot microdisk/microring lasers // *Optics express* - 2014, Vol. 22, No. 21, pp. 25782-25787.
10. Mozharov A.M., Bolshakov A.D., Cirlin G.E., Mukhin I.S. Numerical modeling of photovoltaic efficiency of n-type GaN nanowires on p-type Si heterojunction // *Physica Status Solidi (RRL)- Rapid Research Letters* - 2015, Vol. 9, No. 9, pp. 507-510.
11. Mozharov A.M., Kudryashov D.A., Bolshakov A.D., Cirlin G.E., Gudovskikh A.S., Mukhin I.S. Numerical simulation of the properties of solar cells based on GaPNAs/Si heterostructures and GaN nanowires // *Semiconductors* - 2016, Vol. 50, No. 11, pp. 1521-1525.
12. Bolshakov A.D., Mozharov A.M., Sapunov G.A., Shtrom I.V., Sibirev N.V., Fedorov V.V., Ubyivovk E.V., Tchernycheva M., Cirlin G.E., Mukhin I.S. Dopant-stimulated growth of GaN nanotube-like nanostructures on Si(111) by molecular beam epitaxy // *Beilstein Journal of Nanotechnology* - 2018, Vol. 9, pp. 146-154.
13. Fedorov, V.V., Bolshakov, A.D., Kirilenko, D.A., Mozharov, A.M., Sitnikova, A.A., Sapunov, G.A., Dvoretckaia, L.N., Shtrom, I.V., Cirlin, G.E. and Mukhin, I.S.. Droplet epitaxy mediated growth of GaN nanostructures on Si (111) via plasma-assisted molecular beam epitaxy // *CrystEngComm.* – 2018, Vol. 20, pp. 3370-3380.
14. Denisyuk A.I., Komissarenko F.E., Mukhin I.S. Electrostatic pick-and-place micro/nanomanipulation under the electron beam // *Microelectronic Engineering* - 2014, Vol. 121, pp. 15-18.
15. Denisyuk A.I., Krasavin A.V., Komissarenko F.E., Mukhin I.S. Mechanical, electrostatic, and electromagnetic manipulation of microobjects and nanoobjects in

- electron microscopes // *Advances in Imaging and Electron Physics* - 2014, Vol. 186, pp. 101-140.
16. Чивилихин С.А., Голубок А.О., Мухин И.С. Рост нановискера под воздействием электронного пучка: математическая модель // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики* – 2010, Т. 2, №66, С. 78-83.
 17. Кудряшов Д.А., Гудовских А.С., Можаров А.М., Большаков А.Д., Мухин И.С., Алфёров Ж.И. Моделирование характеристик двухпереходных солнечных элементов на основе гетероструктур ZnSiP₂ на кремниевой подложке // *Письма в Журнал технической физики* – 2015, Т. 41, № 23, С. 15-23.
 18. Mayorov, A.S., Elias, D.C., Mukhin, I.S., Morozov, S.V., Ponomarenko, L.A., Novoselov, K.S., Geim, A.K. and Gorbachev, R.V. How close can one approach the Dirac point in graphene experimentally? // *Nano Letters* – 2012, Vol. 12, No. 9, pp. 4629-4634.
 19. Baranov D.A., Dmitriev P.A., Mukhin I.S., Samusev A.K., Belov P.A., Simovski C.R., Shalin A.S. Broadband antireflective coatings based on two-dimensional arrays of subwavelength nanopores // *Applied Physics Letters* - 2015, Vol. 106, No. 17, pp. 171913.
 20. Sinev I.S., Voroshilov P.M., Mukhin I.S., Denisjuk A.I., Guzhva M.E., Samusev A.K., Belov P.A., Simovski C.R. Demonstration of unusual nanoantenna array modes through direct reconstruction of the near-field signal // *Nanoscale* - 2015, Vol. 7, No. 2, pp. 765-770.
 21. Zuev D.A., Makarov S.V., Mukhin I.S., Milichko V.A., Starikov S.V., Morozov I.A., Shishkin I.I., Krasnok A.E., Belov P.A. Fabrication of Hybrid Nanostructures via Nanoscale Laser-Induced Reshaping for Advanced Light Manipulation // *Advanced materials* - 2016, Vol. 28, No. 16, pp. 3087-3093.
 22. Lepeshov, S., Krasnok, A., Mukhin, I., Zuev, D., Gudovskikh, A., Milichko, V., Belov, P. and Miroshnichenko, A. Fine-tuning of the magnetic Fano resonance in hybrid oligomers via fs-laser-induced reshaping // *ACS Photonics* – 2017, Vol. 4, No. 3, pp. 536-543.

23. Левичев В.В., Жуков М.В., Мухин И.С., Денисюк А.И., Голубок А.О. Об устойчивости работы сканирующего силового микроскопа с нановискером на вершине зонда // Журнал технической физики – 2013, Т. 83, № 7, С. 115-20.
24. Milichko V.A., Shalin A.S., Mukhin I.S., Kovrov A.E., Krasilin A.A., Vinogradov A.V., Belov P.A., Simovski C.R. Solar photovoltaics: current state and trends // Physics-Uspekhi - 2016, Vol. 59, No. 8, pp. 727-772.
25. P.A. Dmitriev, S.V. Makarov, V.A. Milichko, I.S. Mukhin, A S. Gudovskikh, A.A. Sitnikova, A.K. Samusev, A.E. Krasnok and P.A. Belov. Laser fabrication of crystalline silicon nanoresonators from an amorphous film for low-loss all-dielectric nanophotonics // Nanoscale - 2015, Vol. 8, No. 9, pp. 5043-5048.
26. Sorokin S.V., Sedova I.V., Gronin S.V., Klimko G.V., Belyaev K.G., Rakhlin M.V., Mukhin I.S., Toropov A.A., Ivanov S.V. CdTe/Zn (Mg)(Se) Te quantum dots for single photon emitters grown by MBE // Journal of Crystal Growth – 2017, Vol. 477, pp. 127-130.
27. Rakhlin M.V., Belyaev K.G., Klimko G.V., Mukhin I.S., Kirilenko D.A., Shubina T.V., Ivanov S.V., Toropov A.A. InAs/AlGaAs quantum dots for single-photon emission in a red spectral range // Scientific Reports - 2018, Vol. 8, pp. 5299.
28. Ivan Sinev, Ivan Iorsh, Andrey Bogdanov, Dmitry Permyakov, Filipp Komissarenko, Ivan Mukhin, Anton Samusev, Vytautas Valuckas, Arseniy I. Kuznetsov, Boris S. Luk'yanchuk, Andrey E. Miroshnichenko, Yuri S. Kivshar. Polarization control over electric and magnetic dipole resonances of dielectric nanoparticles on metallic films // Laser & Photonics Reviews - 2016, Vol. 10, No 5, pp. 799-806.
29. Kryzhanovskaya N., Polubavkina Y.S., Moiseev E., Maximov M.V., Zhurikhina V.V., Scherbak S., Lipovskii A.A., Kulagina M.M., Zadiranov Y.M., Mukhin I.S., Komissarenko F.E., Bogdanov A.A., Krasnok A.E., Zhukov A. Enhanced light outcoupling in microdisk lasers via Si spherical nanoantennas // Journal of Applied Physics - 2018, Vol. 124, No. 16, pp. 163102
30. Moiseev E.I., Kryzhanovskaya N., Polubavkina Y.S., Maximov M.V., Kulagina M.M., Zadiranov Y.M., Lipovskii A.A., Mukhin I.S., Mozharov A.M., Komissarenko F.E., Sadrieva Z.F., Krasnok A.E., Bogdanov A.A., Lavrinenko A.V., Zhukov A.E. Light outcoupling from quantum dot-based microdisk laser via plasmonic nanoantenna// ACS Photonics - 2017, Vol. 4, No. 2, pp. 275–281.

31. Neplokh V., Ali A., Julien F.H., Foldyna M.F., Mukhin I.S., Cirlin G.E., Harmand J.C., Gogneau N., Tchernycheva M. Electron beam induced current microscopy investigation of GaN nanowire arrays grown on Si substrates // Materials Science in Semiconductor Processing - 2016, Vol. 55, pp. 72-78.

В целом диссертационная работа Мухина И.С. представляет собой законченное самостоятельное научное исследование, имеющее важное практическое значение. Данные разработки могут быть применены в технике и промышленности для создания компонентов оптоэлектронных приборов, в частности, лазеров, детекторов, сенсоров, солнечных элементов, а также для создания микрофлюидных устройств улучшенными характеристиками, для создания специализированных функциональных зондов.

Диссертация «Комбинированные методы создания и исследования функциональных наноструктур для нанопластики и наномеханики» Мухина Ивана Сергеевича соответствует требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г. (ред. от 01.10.2018), поскольку в ней приводятся результаты как теоретического, так и экспериментального исследования. Результаты диссертационного исследования соответствуют требованиям, установленным в п. 14 «Положения о присуждении ученых степеней» и научной специальности 01.04.01 «Приборы и методы экспериментальной физики», отрасль науки – физико-математические науки. Диссертация соответствует пунктам 1, 5, 7-8 паспорта специальности 01.04.01.

Диссертация «Комбинированные методы создания и исследования функциональных наноструктур для нанопластики и наномеханики» Мухина Ивана Сергеевича рекомендуется к защите на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.01 «Приборы и методы экспериментальной физики».

Диссертационная работа рассмотрена и настоящее заключение подготовлено и утверждено на научном семинаре Центра нанотехнологий «Федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет Российской академии наук» (Протокол № 2 от «26» февраля 2019 г.)

Заключение составил:

Ученый секретарь Академического
университета, д.ф.-м.н.



Липовский А.А.