

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по научной работе
Университета ИТМО
д.т.н., профессор


В.О. Никифоров
« 22 » _____ 2019 г.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО) Министерства науки и высшего образования Российской Федерации

Диссертация «Комбинированные методы создания и исследования функциональных наноструктур для нанофотоники и наномеханики» выполнена на Физико-техническом факультете.

В период подготовки диссертации соискатель Мухин Иван Сергеевич работал в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики» (Университет ИТМО) Министерства образования и науки Российской Федерации, на Физико-техническом факультете, в должности научного сотрудника.

В 2012 г. окончил очную аспирантуру в федеральном государственном бюджетном учреждении высшего образования и науки «Санкт-Петербургском Академическом университете – научно-образовательном центре нанотехнологий РАН» по специальности 01.04.10 - «Физика полупроводников».

В 2012 г. защитил кандидатскую диссертацию в федеральном государственном бюджетном учреждении высшего образования и науки «Санкт-Петербургском Академическом университете – научно-образовательном центре нанотехнологий РАН» по специальности 01.04.10 - «Физика полупроводников».

Диплом кандидата физико-математических наук ДКН № 179769, выдан 11 марта 2013 г. в федеральном государственном бюджетном учреждении высшего образования и науки «Санкт-Петербургском Академическом университете – научно-образовательном центре нанотехнологий РАН» по специальности 01.04.10 - «Физика полупроводников».

По итогам рассмотрения материалов диссертации принято следующее заключение:

1. Автор принимал непосредственное личное участие в получении основных результатов диссертационной работы. С 2009 по 2019 годы выступал с докладами на международных и российских конференциях, семинарах Физико-технического факультета. Личное участие автора в получении изложенных в

диссертации результатов подтверждено соавторами и отражено в совместных публикациях.

2. Степень достоверности результатов проведенных исследований подтверждена их верификацией при разнообразном тестировании, совпадением результатов экспериментов с аналитическими расчетами, четким физическим смыслом полученных результатов и согласованностью их с современными представлениями о предмете исследования.

3. Научная новизна состоит в следующем:

- 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;
- предложен метод самоорганизованного формирования углеродных наноструктур нового типа в виде нановилок в виде трапецеидального основания и массива параллельных нановискеров синтеза под действием сфокусированного электронного пучка, и предложена математическая модель, описывающая процесс формирования структур;
- 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 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;

- 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;

- предложена новая методика создания солнечных элементов на основе одиночных GaN нитевидных нанокристаллов и их массивов, синтезированных на Si подложках с помощью молекулярно-пучковой эпитаксии.

Практическая значимость полученных результатов заключается в следующем:

- 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, зажатом между металлическими контактами, достигнута рекордная подвижность носителей заряда $2 \cdot 10^6$ см²/В·с, что может быть использовано при создании элементов нанoeлектроники с улучшенными характеристиками;

- разработаны и апробированы методики создания спектрально селективных элементов для управления модовым составом и направленностью излучения микродисковых лазеров с использованием металлических и диэлектрических наноантенн, а также локальных дефектов поверхности резонаторов.

- 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 острья, 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.

- 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.

4. Ценность научных работ соискателя ученой степени состоит в том, что рассмотренные в работе и публикациях вопросы имеют в настоящее время большое фундаментальное и практическое значение. Результаты данной работы необходимы для решения широкого спектра практических задач, связанных с созданием и развитием методов формирования и исследования свойств микро- и наноструктур. Предложенные комплексные методики на основе объединения

методов современных нанотехнологий, включая технологии сфокусированных электронных, ионных и лазерных пучков, электронную и ионную литографию, зондовую микроскопию и силовую литографию, наноманипулирование, осаждение материала под действием сфокусированных пучков, осаждение и травление тонких слоев металлов и диэлектриков, а также молекулярно-пучковую эпитаксию, позволяют создавать функциональных структур нанофотоники, наноэлектроники, наномеханики, микрофлюидики и фотовольтаики.

Диссертация соответствует научной специальности: 01.04.01 – «Приборы и методы экспериментальной физики», а также требованиям, установленным п. 14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г. (ред. от 01.10.2018).

5. Полнота изложения материалов обеспечена 31 публикацией, из них 27 публикаций в изданиях, рецензируемых Web of Science или Scopus, 4 публикации в журналах из перечня ВАК.

5.1. Научные издания, входящие в международные реферативные базы данных и системы цитирования (с указанием авторского вклада):

Публикации в изданиях, рецензируемых Web of Science или Scopus:

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. Вклад Мухина И.С.: идея статьи, руководство измерением и обработкой экспериментальных данных, участие в проведении теоретических расчетов, обсуждение результатов, написание статьи.
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. Вклад Мухина И.С.: идея статьи, руководство измерением и обработкой экспериментальных данных, участие в построении модели заполнения нанопоры водой, обсуждение результатов, написание статьи.
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. Вклад Мухина И.С.: проведение экспериментов и обработка экспериментальных данных, обсуждение результатов, написание статьи.
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. Вклад Мухина И.С.: руководство экспериментом и обработкой экспериментальных данных, обсуждение результатов, написание статьи.
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

- nanowhisker" at low and ambient pressure // *Physica Status Solidi (A) Applications and Materials Science* - 2016, Vol. 213, No. 9, pp. 2375-2379. Вклад Мухина И.С.: идея статьи, руководство измерением и обработкой экспериментальных данных, построение модели взаимодействия связанных механических осцилляторов, обсуждение результатов, написание статьи.
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. Вклад Мухина И.С.: идея статьи, проведение экспериментов по созданию структуру, обработка экспериментальных данных, обсуждение результатов, написание статьи.
 7. 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. Вклад Мухина И.С.: создание экспериментальных структур, обработка экспериментальных данных, обсуждение результатов, участие в написании статьи.
 8. 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. Вклад Мухина И.С.: создание экспериментальных структур, обработка экспериментальных данных, обсуждение результатов, участие в написании статьи.
 9. Mozharov A.M., Bolshakov A.D., Cirilin 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. Вклад Мухина И.С.: идея статьи, руководство численным моделированием и обработкой данных, обсуждение результатов, написание статьи.
 10. Bolshakov A.D., Mozharov A.M., Sapunov G.A., Shtrom I.V., Sibirev N.V., Fedorov V.V., Ubyivovk E.V., Tchernycheva M., Cirilin 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. Вклад Мухина И.С.: идея статьи, руководство экспериментами и обработкой экспериментальных данных, участие в построении теоретической модели формирования нанотрубок, обсуждение результатов, написание статьи.
 11. Fedorov V.V., Bolshakov A.D., Kirilenko D.A., Mozharov A.M., Sitnikova A.A., Sapunov G.A., Dvoretckaja L.N., Shtrom I.V., Cirilin, 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. Вклад Мухина И.С.: соруководство экспериментами и обработкой экспериментальных данных, обсуждение результатов, написание статьи.
12. 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. Вклад Мухина И.С.: идея статьи, соруководство экспериментами и обработкой экспериментальных данных, обсуждение результатов, участие в написании статьи.
 13. 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. Вклад Мухина И.С.: идея статьи, соруководство экспериментами и обработкой экспериментальных данных, обсуждение результатов, участие в написании статьи.
 14. 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. Вклад Мухина И.С.: создание экспериментальных структур и обработка экспериментальных данных, обсуждение результатов, участие в написании статьи.
 15. 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. Вклад Мухина И.С.: создание экспериментальных структур и обработка экспериментальных данных, обсуждение результатов, участие в написании статьи.
 16. Sinev I.S., Voroshilov P.M., Mukhin I.S., Denisyuk 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. Вклад Мухина И.С.: создание экспериментальных структур и обработка экспериментальных данных, обсуждение результатов, участие в написании статьи.
 17. 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. Вклад Мухина И.С.: создание экспериментальных структур и обработка экспериментальных данных, обсуждение результатов, участие в написании статьи.
 18. Lepeshov S., Krasnok A., Mukhin I., Zuev D., Gudovskikh A., Milichko V., Belov P. and Miroschnichenko 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. Вклад Мухина И.С.: создание экспериментальных структур и обработка экспериментальных данных, обсуждение результатов, участие в написании статьи.
19. 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. Вклад Мухина И.С.: идея статьи, обсуждение общей концепции, написание главы по Si CЭ.
 20. 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. Вклад Мухина И.С.: создание экспериментальных структур и обработка экспериментальных данных, обсуждение результатов, участие в написании статьи.
 21. 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. Вклад Мухина И.С.: создание экспериментальных структур и обработка экспериментальных данных, обсуждение результатов, участие в написании статьи.
 22. 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. Вклад Мухина И.С.: создание экспериментальных структур и обработка экспериментальных данных, обсуждение результатов, участие в написании статьи.
 23. 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. Вклад Мухина И.С.: создание экспериментальных структур и обработка экспериментальных данных, обсуждение результатов, участие в написании статьи.
 24. 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. Вклад Мухина И.С.: идея статьи, создание экспериментальных структур и обработка экспериментальных данных, обсуждение результатов, участие в написании статьи.

25. 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. Вклад Мухина И.С.: идея статьи, создание экспериментальных структур и обработка экспериментальных данных, обсуждение результатов, участие в написании статьи.
26. 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. Вклад Мухина И.С.: создание экспериментальных структур и обработка экспериментальных данных, обсуждение результатов, участие в написании статьи.
27. 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. Вклад Мухина И.С.: идея статьи, руководство численным моделированием и обработкой данных, обсуждение результатов, написание статьи.

Публикации в журналах из перечня ВАК:

28. Евстравов А.А., Мухин И.С., Кухтевич И.В., Букатин А.С. Метод сфокусированного ионного пучка при формировании наноразмерных структур в микрофлюидных чипах // Письма в Журнал технической физики - 2011, Т. 37, № 20, С. 32-40. Вклад Мухина И.С.: идея статьи, создание экспериментальных структур, обработка экспериментальных данных, обсуждение результатов, написание статьи.
29. 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. Вклад Мухина И.С.: идея статьи, создание экспериментальных образцов, участие в разработке аналитической модели, обсуждение результатов, написание статьи.
30. 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. Вклад Мухина И.С.: идея статьи, руководство численным моделированием и обработкой данных, обсуждение результатов, написание статьи.

31. 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. Вклад Мухина И.С.: идея статьи, создание экспериментальных структур, обработка экспериментальных данных, обсуждение результатов, написание статьи.

Диссертация «Комбинированные методы создания и исследования функциональных наноструктур для нанофотоники и наномеханики» Мухин Ивана Сергеевича содержит как результаты экспериментальных исследований, так и математические модели, описывающие процессы формирования наноструктур, соответствует требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г. (ред. от 01.10.2018) и пунктам 1,5, 6-7 Паспорта специальности ВАК физико-математических наук по специальности 01.04.01 – «Приборы и методы экспериментальной физики».

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

Заключение принято на заседании ученого совета Физико-технического факультета.

Присутствовало на заседании 11 чел.

Результаты голосования: «за» - 11 чел., «против» - 0 чел., «воздержалось» - 0 чел., протокол № 1 от «16» января 2019 г.

Председательствующий



доктор физ.-мат. наук, декан ФТФ
главный научный сотрудник

Белов П.А.

Подпись лица, оформившего заключение

секретарь Ученого совета ФТФ

Музыченко Я.Б.