

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 002.034.01 НА БАЗЕ  
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ  
НАУКИ ИНСТИТУТА АНАЛИТИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 27 декабря 2018 г., протокол № 7

о присуждении Комиссаренко Филиппу Эдуардовичу, гражданину РФ,  
ученой степени кандидата физико-математических наук

Диссертация “Манипулирование нанообъектами и модификация материалов с помощью сфокусированного электронного пучка для создания функциональных наноструктур” в виде рукописи по специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики – принята к защите 22 октября 2018 г., протокол № 6-1 диссертационным советом Д 002.034.01 на базе Института аналитического приборостроения Российской академии наук, 190103, Рижский пр., д. 26, Санкт-Петербург, РФ, приказ о создании диссертационного совета № 714/нк от 02.11.2012 года.

Диссертация выполнена на кафедре Нанопотоники и метаматериалов федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики».

Соискатель Комиссаренко Филипп Эдуардович, гражданство РФ, 1992 года рождения, в 2014 г. окончил магистратуру федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики», а в 2018 году там же окончил очную аспирантуру.

Научный руководитель: Голубок Александр Олегович, гражданство РФ, доктор физико-математических наук, специальность 01.04.01, профессор кафедры Нанопотоники и метаматериалов Университета ИТМО, зам. директора по научной работе ИАП РАН.

### **Официальные оппоненты:**

1. Вывенко Олег Федорович, гражданство РФ, доктор физико-математических наук, специальность 01.04.10 , профессор физического факультета Санкт-Петербургского государственного университета;
2. Нащекин Алексей Викторович, гражданство РФ, кандидат физико-математических наук, специальность 01.04.07, старший научный сотрудник лаборатории «Диагностики материалов и структур твердотельной электроники» Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе

дали положительные отзывы на диссертацию.

**Ведущая организация** – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», в своем положительном заключении, подписанном директором научно-исследовательского комплекса «Нанобиотехнологии» кандидатом физико-математических наук Ходорковским М.А. и утвержденном проректором по научной работе чл.-корр. РАН, доктором технических наук Сергеевым В.В. указала, что диссертация Комиссаренко Ф.Э. соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а соискатель заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 и отметила следующие замечания:

1. В предложенной в диссертации физической модели перемещения нанообъектов при помощи металлической иглы и фокусированного электронного пучка в качестве объекта перемещения рассматриваются только диэлектрические частицы несмотря на то, что в работе экспериментально продемонстрирована возможность осуществлять перенос металлических частиц.

2. Созданные в работе с применением фокусированного электронного пучка наноструктуры на поверхности диэлектриков исследовались, в том числе, с помощью атомно - силового микроскопа. Принимая во внимание предложенный в диссертации механизм формирования структур, связанный с образованием объемного заряда в приповерхностных слоях диэлектриков, было бы полезно при исследовании топографии образованных наноструктур использовать также метод Зонда Кельвина, позволяющий визуализировать распределение электрического потенциала на поверхности образца.

3. В работе недостаточно подробно обсуждается предельная точность, с которой возможно производить перенос нанообъектов с помощью металлической иглы и сфокусированного электронного пучка. Хотелось бы узнать, какая предельная точность может быть достигнута при манипулировании наночастицами с помощью развитого автором метода?

Соискатель имеет 42 (сорок две) опубликованные работы, из них по теме диссертации опубликовано 28 (двадцать восемь) научных работ, из них 17 (семнадцать) работ в журналах, входящих в Перечень ВАК РФ, 2 (два) патента на изобретения, а также 9 (девять) публикаций в материалах всероссийских и международных конференций и симпозиумов.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Denisyuk A.I., Komissarenko F.E., Mukhin I.S. Electrostatic pick-and-place micro/nanomanipulation under the electron beam // *Microelectronic Engineering* - 2014, V. 121, pp. 15-18.
2. Komissarenko F.E., Mukhin I.S., Golubok A.O., Nikonorov N.V., Prosnikov M.A., Sidorov A.I. Effect of electron beam irradiation on thin metal films on glass surfaces in a submicrometer scale // *Journal of Micro/ Nanolithography, MEMS, and MOEMS* - 2016, V. 15, No. 1, pp. 013502
3. Sinev I.S., Bogdanov A.A., Komissarenko F.E., Frizyuk K.S., Petrov M.I., Mukhin I.S., Makarov S.V., Samusev A.K., Lavrinenko A.V., Iorsh I.V. Chirality Driven by Magnetic Dipole Response for Demultiplexing of Surface Waves // *Laser & Photonics Reviews* - 2017, V. 11, No. 5, pp. 1700168
4. Komissarenko F.E., Zhukov M.V., Mukhin I.S., Golubok A.O., Sidorov A.I. Formation of metallic nanostructures on the surface of ion- exchange glass by focused electron beam // *Journal of Physics: Conference Series* – 2015. V. 643, pp. 012113.
5. Sinev I.S., Iorsh I.V., Bogdanov A.A., Permyakov D.V., Komissarenko F.E., Mukhin I.S., Samusev A.K., Valuckas V., Kuznetsov A.I., Luk'Yanchuk B.S., Miroshnichenko A.E., Kivshar Y. Polarization control over electric and magnetic dipole resonances of dielectric nanoparticles on metallic films // *Laser and Photonics Reviews* - 2016, V. 10, No. 5, pp. 799–806.
6. Polubavkina Y.S., Kryzhanovskaya N.V., Moiseev E.I., Kulagina M.M., Mukhin I.S., Komissarenko F.E., Zadiranov Y.M., Maximov M.V., Krasnok A.E.,

- Bogdanov A.A., Zhukov A.E., Shelaev A.V. Improved emission outcoupling from microdisk laser by Si nanospheres // Journal of Physics: Conference Series - 2016, V. 741, No. 1, pp. 012158.
7. Makarov S.V., Sinev I.S., Milichko V.A., Komissarenko F.E., Zuev D.A., Ushakova E., Mukhin I.S., Yu Y.F., Kuznetsov A.I., Belov P.A., Iorsh I.V., Poddubny A.N., Samusev A.K., Kivshar Y.S. Nanoscale Generation of White Light for Ultrabroadband Nanospectroscopy // Nano Letters - 2018, V. 18, No. 1, pp. 535-539.
  8. Способ получения металлических пленок заданной формы : пат. 2597373. Рос. Федерация : МПК В 05 D 1/00 / Просников М.А., Никоноров Н.В., Сидоров А.И., Голубок А.О., Комиссаренко Ф.Э., Мухин И.С.; заявитель и патентообладатель Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО). - № 2015116555/05 ; заявл. 29.04.2015 ; опубл. 10.09.2016 , Бюл. № 25. - 8 с.
  9. Зонд для сканирующей зондовой микроскопии и способ его изготовления (варианты) : пат. 2660418 Рос. Федерация : МПК G01Q 60/38 G01Q 70/08 B82Y 35/00 / Синева И.С., Мухин И.С., Самусев А.К., Макаров С.В. Комиссаренко Ф.Э.; заявитель и патентообладатель Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО). - № 2017122309 ; заявл. 23.06.2017 ; опубл. 06.07.2018 , Бюл. № 19. - 14 с.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

1. от Вывенко Олега Федоровича, доктора физико-математических наук, профессора физического факультета Санкт-Петербургского государственного университета. Замечания:

- Во второй главе диссертации предложена физическая модель, описывающая процессы зарядки и автоэлектронной эмиссии металлической иглы под действием электронного пучка, и представлены результаты проведенного численного расчета. Однако, экспериментальной проверки указанных результатов проведено не было, несмотря на простоту ее осуществления путем непосредственного измерения тока острия.
- В третьей главе была продемонстрирована возможность создания наночастиц, интерпретируемых как состоящих из серебра, на поверхности

стекла под действием сфокусированного электронного пучка. Однако прямых данных об их химическом составе предоставлено не было.

- В той же главе были получены интересные результаты об изменении скорости травления стекла и диоксида кремния на кремнии в результате воздействия электронного облучения. При этом для указанных двух типов объектов практически одинакового состава были получены противоположные результаты – замедление травления для массивного стекла и его ускорения для тонкого слоя диоксида, что объясняется в работе различием в характере разрушения химических связей в этих материалах вследствие различия в строении их молекулярных сеток. Вместе с тем, автором не обсуждалась возможность объяснения этого различия, учитывающая процессы эмиссии вторичных электронов на интерфейсе диоксид кремния/кремний. Этим можно было объяснить отсутствие эффекта ускорения в этой структуре при больших ускоряющих напряжениях.
- В работе не проверялось и не обсуждалось возможное влияние нарастания углеродных загрязнений под действием электронного пучка, которые, как известно, неизбежны при вакуумных условиях в обычных СЭМ. Между тем с этим явлением могут быть связаны кольцеобразные выступы по краям облученных областей, наблюдаемые после травления стекла и диоксида кремния.

2. от Нащекина Алексея Викторовича, кандидата физико-математических наук, старшего научного сотрудника лаборатории «Диагностики материалов и структур твердотельной электроники» Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе.

Замечания:

- На стр. 92 автор упоминает о возможном образовании ионов алюминия в приповерхностной области стекла при облучении образца пучком электронов, при этом условия реализации такого процесса не обсуждаются. Заявление выглядит голословным.
- Не очевиден механизм формирования наноструктур на поверхности ионно-обменных стекол в результате облучения электронным пучком с последующим стравливанием металлической пленки. По идее, при таком механизме на поверхности стекла вряд ли может что-то оставаться, иначе следовало бы предположить, что при облучении электронами происходит

какая-то модификация самой пленки алюминия на интерфейсе со стеклом. Например, это может быть обогащение ионами серебра и натрия, что кажется сомнительным. Прошу подробнее разъяснить механизм формирования нанокластеров после смывания в жидком травителе.

- Неаккуратным выглядит заявление автора об «островковой, гранулированной» структуре пленки золота. По мнению автора, такая структура пленки может приводить к большему значению удельного сопротивления пленки золота, чем у «макроразмерного золота». Хочется все же указать, что островковый и гранулированный характер пленки являются принципиально различными по своим физическим свойствам, а в случае толщины золота 50 нм говорить об островковой структуре не приходится. В этом случае хочется попросить автора сначала представить электронно-микроскопическое изображение, демонстрирующее тот или иной характер пленки.
- Замечание, вытекающее из предыдущего. Основываясь на выводе о высоком сопротивлении, автор приводит изображение № 2.29, на котором схематично изображает возможность зарядки (!) слоя золота пучком электронов. Всегда считалось, что золото — один из лучших проводников и оно используется для снятия заряда с диэлектриков в СЭМ. Исходя из зарядки золота, автор предлагает механизм формирования наноструктур. Прошу разъяснить каким образом пленка золота, используемая обычно для снятия заряда с диэлектриков в СЭМ, в данных экспериментах не приводит к снятию заряда.

3. от Божко Сергея Ивановича, кандидата физико-математических наук, руководителя группы сканирующей зондовой микроскопии Института физики твердого тела РАН. Замечание:

- При обсуждении механизмов формирования металлических наноструктур на поверхности стекол, автор не учитывает возможность образования на поверхности образца углеродной пленки, возникающей в результате разложения углеводородных радикалов под действием фокусированного электронного пучка в СЭМ.

4. от Миколуцкого Сергея Ивановича, кандидата физико-математических наук, старшего научного сотрудника лаборатории №5 Института электрофизики и электроэнергии РАН. Замечание:

- Как следует из автореферата, с помощью разработанного метода осуществлялось манипулирование как диэлектрическими, так и проводящими нанообъектами. Однако в представленной физической модели рассматриваются только диэлектрические наноочастицы, причем в автореферате ничего не сказано о причине такой «дискриминации».

5. от Сошников Илья Петровича, кандидата физико-математических наук, ведущего научного сотрудника Санкт-Петербургского Академического Университета. Замечания:

- Термин «сканирующая электронная микроскопия» является жаргонным и по правилам оформления диссертационных работ должен использоваться термин «растровая электронная микроскопия». Кроме того, в автореферате сообщается о «диэлектрофоретической силе», хотя было бы уместнее обсуждать силы электрической природы (например, кулоновские).
- На стр.19 автореферата сообщается, что «В заключении представлены основные результаты работы». В этом случае было бы уместнее сказать, что в заключении представлены основные выводы работы.
- К недостаткам автореферата можно отнести некоторую небрежность в оформлении рисунков, использование обозначений как на английском, так и на русском языках в различных форматах; отнесение русскоязычной статьи (A10) к разделу Научные издания, входящие в международные реферативные базы данных и системы цитирования, а не к разделу Научные издания, входящие в перечень российских журналов.
- Также следует отметить, что предлагаемые автором механизмы образования наноструктур на поверхности диэлектриков под действием электронного пучка имеют скорее качественное, чем количественное описание.

6. от Пинаева Александра Леонидовича, кандидата технических наук, инженера-программиста ОАО «ГОИ им. С.И. Вавилова». Замечания:

- в тексте автореферата не отражен механизм сброса нанообъекта с острия наноиглы в заданную область подложки после переноса. Данная информация кажется важной вследствие высоких требований к точности

указанного процесса.

- На рисунке 6 (б) числа значений величин по осям набраны слишком мелким кеглем, что вызывает трудности при их прочтении.

7. от Мошникова Вячеслава Алексеевича, доктора физико-математических наук, профессора кафедры микро- и наноэлектроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина); Спивак Юлии Михайловны, кандидата физико-математических наук, доцента кафедры микро- и наноэлектроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина). Замечания:

- из текста автореферата не ясно, какие приближения использовал автор при построении модели переноса наночастиц, например, учитывалась ли шероховатость поверхности наночастицы или её деформация в зоне контакта с подложкой.
- расчет диэлектрофоретической силы производился для нескольких значений радиуса скругления иглы, однако из текста автореферата не ясно, влияет ли данный параметр на процесс переноса частиц на практике.

#### **Все отзывы положительные.**

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается большим опытом работы в области нанотехнологий, электронной и зондовой микроскопии, физики и технологии наноструктур.

**Диссертационный совет** отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

**предложена** физическая модель взаимодействия электрически изолированного металлического острия и диэлектрической наночастицы, облучаемых сфокусированным электронным пучком, учитывающая зарядку острия электронным пучком и его разрядку за счет упруго отраженных, вторичных и автоэмиссионных электронов, а также поляризацию частицы в неоднородном электростатическом поле вблизи поверхности острия;

**доказано** теоретически и экспериментально, что облучение электрически изолированной металлической иглы с радиусом закругления  $\sim 50$  нм



сфокусированным электронным пучком приводит к зарядке иглы, поляризации диэлектрической наночастицы вблизи ее поверхности и возникновению диэлектрофоретической силы, достаточной для локализации наночастицы на острие иглы и дальнейшего прецизионного манипулирования;

**разработана** новая экспериментальная методика перемещения наночастиц в пространстве с помощью металлического зонда и сфокусированного электронного пучка, позволяющая локализовать на острие зонда и переносить в заданную область на другую подложку диэлектрические и проводящие частицы различных форм;

**предложено** объяснение механизмов формирования металлических и диэлектрических наноструктур на поверхностях ионно-обменных, натрий-силикатных, кварцевых стекол, а также оксидной пленки кремния;

**доказано**, что облучение ионно-обменных, натрий-силикатных, кварцевых стекол, а также оксидной пленки кремния сфокусированным электронным пучком приводит к формированию металлических и диэлектрических наноструктур на поверхности.

**Теоретическая значимость исследования** обоснована тем, что применительно к проблематике диссертации результативно, **с получением обладающих новизной результатов**:

**раскрыты** механизмы взаимодействия сфокусированного электронного пучка с электрически изолированным металлическим острием и диэлектрической наночастицей, а также с поверхностью диэлектрических материалов, таких как ионно-обменные, натрий-силикатные, кварцевые стекла, оксидная пленка кремния;

**изучены** физические процессы, возникающие при облучении сфокусированным электронным пучком электрически изолированного металлического острия и расположенной вблизи его поверхности диэлектрической наночастицы;

**установлена** зависимость величины диэлектрофоретической силы, действующей со стороны заряженного острия на поляризованную диэлектрическую частицу, от расстояния между частицей и острием, а также от диаметра частицы и радиуса закругления острия.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики** подтверждается тем, что:

**разработана** методика создания функциональных наноструктур, основанная на манипулировании микро- и наночастицами металлическим острием, облучаемым электронным пучком, **реализованная** в сканирующем электронном микроскопе;

**предложен** и **реализован** способ изготовления специализированных зондов с локализованной на вершине наночастицей для сканирующей зондовой микроскопии;

**показана** возможность создания ряда функциональных наноструктур для нанофотоники, оптомеханики, нанодиагностики, изготовленных с помощью разработанного метода манипулирования наночастицами;

**разработана** методика формирования металлических и диэлектрических наноструктур на поверхности ионно-обменных, натрий-силикатных, кварцевых стекол, а также оксидной пленки кремния под действием сфокусированного электронного пучка, **не требующая** использования резистов;

**определены** параметры экспонирования сфокусированным электронным пучком ионно-обменных, натрий-силикатных, кварцевых стекол, а также оксидной пленки кремния, обеспечивающие создание наноструктур различной конфигурации.

**Оценка достоверности результатов исследований выявила:**

**экспериментальные результаты** получены на сертифицированном современном технологическом и диагностическом оборудовании и обладают полной воспроизводимостью;

**теория** согласуется с полученными в ходе исследований экспериментальными данными, результатами численных расчетов, проведенных с использованием современных программных пакетов, а также с известными опубликованными по данной тематике экспериментальными данными;

**идеи**, изложенные в диссертации, базируются на обобщении результатов исследований применения сфокусированного электронного пучка для создания наноструктур, а их использование для получения автором экспериментальных данных полностью обосновано и корректно.

**Личный вклад соискателя** заключается в:

- Постановке цели и формулировке задач исследования;

- анализе научной литературы и выявлении недостатков существующих методов создания наноструктур;
- получении лично или при непосредственном участии экспериментальных результатов, обработке и анализе полученных данных;
- проведении компьютерного моделирования и аналитических расчетов;
- Подготовке публикаций по теме диссертации, относящейся к получению и интерпретации экспериментальных результатов, проводимой совместно с научным руководителем и другими соавторами.

На заседании 27.12.2018 г. диссертационный совет принял решение присудить Комиссаренко Филиппу Эдуардовичу ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 18 человек, из них 18 докторов наук, участвовавших в заседании, из 23 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за - 18, против - нет, недействительных бюллетеней - нет.

Председатель  
диссертационного совета  
д.т.н., проф.

Курочкин В.Е.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
д.ф.-м.н.

Буляница А.Л.

