

## Отзыв

официального оппонента на диссертационную работу Мухина Ивана Сергеевича «Создание и исследование функциональных наноструктур для нанофотоники, наномеханики и фотовольтаики», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.01 – «Приборы и методы экспериментальной физики».

Актуальность темы диссертации определяется широким использованием разнообразных наноразмерных элементов во многих областях науки и техники, что требует поиска и разработки новых способов и методик, позволяющих решать задачи по созданию наноструктур с новыми свойствами. Хотя развитая к настоящему времени и коммерчески доступная аппаратура позволяет проводить разнообразные стандартные технологические процессы такие как фото- и электронно-лучевая литография, ионное травление, эпитаксия наногетероструктур и.т.п., получение наноструктур с заранее заданными свойствами, необходимых в приложениях, представляет собой сложную задачу. При этом в зависимости от требуемых функциональных свойств конечного нанообъекта подчас невозможно их достигнуть в рамках одного технологического приема и требуется сочетание различных методов и материалов. Так, для создания широко востребованных в настоящее время элементов нанофотоники и наноплазмоники требуется обеспечение управлением направленностью излучения и рассеяния таких структур, состоящих из различных металлических и диэлектрических наноантенн, а для увеличения эффективности вывода излучения из микродисковых лазерных структур требуется развитие методов локальной модификации поверхности резонаторов. Широкий круг применений имеют не только структуры с уникальными оптическими и электронными свойствами, но также и различные наномеханические устройства, на основе которых могут быть созданы прецизионные нановесы, акселерометры, сенсорные элементы и функциональные структуры, получение которых требует использование совершенно других технологий. В связи с этим тема рецензируемой диссертационной работы, направленной на развитие комплексных методов формирования и исследования функциональных наноструктур для различных областей науки на основе комбинации различных современных подходов и технологий представляется несомненно актуальной.

Диссертация изложена на 289 страницах, содержит 312 ссылки на оригинальную литературу, начиная с давних классических работ вплоть до последних лет. Она состоит из введения, заключения и 6 глав, из которых первая посвящена анализу современного

состояния области исследований, а в остальных излагаются оригинальные результаты, полученные автором.

К наиболее существенным и новым, впервые полученным автором, результатам работы следует, на наш взгляд, отнести:

- создание и развитие методик формирования металлических и диэлектрических наноструктур для плазмоники и диэлектрической фотоники на оптически прозрачных непроводящих подложках с использованием электронной литографии;

- создание и развитие методик формирования оптических элементов с однофотонной статистикой излучения из полупроводниковых гетероструктур  $A_2B_6$  с квантовыми точками с использованием электронной литографии и плазмо-химического травления материалов;

- развитие методик контролируемого прецизионного перемещения микро- и нанообъектов в условиях вакуума и при атмосферном давлении под сфокусированным электронным пучком и лазерным излучением с использованием твердотельных игл;

- развитие методик подвешивания над поверхностью подложки листов двумерных ван-дер-ваальсовых материалов, включая графен и  $MoS_2$ ;

- создание и развитие методик 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 электронного пучка, манипулирования наночастицами и силовой литографии для управления спектральным составом и направленностью излучения.

- создание и развитие методик формирования 1d, 2d и 3d углеродных и металл-углеродных наноструктур под действием сфокусированного электронного пучка в присутствии газов-прекурсоров;

- исследование электрических и механических свойств углеродных и металл-углеродных наноструктур, формируемых под действием сфокусированного электронного пучка;

- развитие методик создания функциональных наномеханических устройств на базе металл-углеродных наноструктур, формируемых под действием сфокусированного электронного пучка, включая резонансные детекторы масс и функциональные СЗМ зонды;

- создание и развитие методик производства функциональных микро- и наноструктур в каналах микрофлюидных чипов, обеспечивающих захват и селекцию по размерам одиночных объектов с применением технологий сфокусированного ионного пучка и осаждения материала под действием сфокусированного электронного пучка

Достоверность полученных автором результатов и выводов подтверждается их воспроизводимостью на широком наборе нанообъектов, демонстрацией функциональной работоспособности различных наноустройств, созданных с помощью разработанных методов, что отражено в научных публикациях в рецензируемых изданиях, индексируемых в базах вак, web of science, scopus. Также достоверность результатов обеспечивается сочетанием использования современного экспериментального оборудования и программных пакетов численного моделирования.

Практическая значимость полученных результатов определяется тем, что разработанные в ходе работы методы создания наноструктур уже нашли конкретные применения при создании нескольких видов наноустройств. Указанные методы могут быть рекомендованы для применения при создании и других различных устройств, основанных на использовании наноразмерных элементов.

По диссертации имеются следующие замечания:

1. Во *главе 2* 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 и созданы образцы широкополосных светоулавливающих покрытий для увеличения эффективности захвата падающего света в тонкопленочных солнечных элементах (сэ). Однако сведения о влиянии таких покрытий на эффективность сэ не приводятся.
2. В *главе 3* представлены данные по зависимости интенсивности излучения модифицированные микродисковых резонаторов от мощности накачки, однако не объясняется немонотонный вид таких зависимостей.
3. В *главе 4* утверждается, что происходит испарение углерода под действием электронного пучка, что представляется маловероятным при использованных его энергиях и токах. Более вероятным является процесс разложения углеводородов из материала подложки, состав которой в диссертации не указан.
4. В *главе 6* остался непонятным выбор подложки p-si с вырожденным характером дырочного газа для создания солнечного элемента с использованием массива нитевидных нанокристаллов GaN
5. 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.

Сделанные замечания не затрагивают основные положения и выводы диссертации. Разработанные в ней экспериментальные методы применимы к широкому кругу нанообъектов и открывают перспективу их дальнейшего развития и использования их в приложениях.

Автореферат диссертации правильно и достаточно полно отражает ее содержание, которое в полной мере отражено в публикациях журналов из списка вак и докладывались на многочисленных научных конференциях и семинарах.

На основании знакомства с диссертацией и опубликованными работами считаю, что по научно-практическому значению, достоверности и новизне диссертация Мухина Ивана Сергеевича «создание и исследование функциональных наноструктур для нанофотоники, наномеханики и фотовольтаики», полностью отвечает требованиям п. 9 «положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением правительства российской федерации № 842 от 24 сентября 2013 года, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, а ее автор, несомненно, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.01 – «приборы и методы экспериментальной физики».



Вывенко Олег Федорович

Профессор кафедры электроники твердого тела федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «санкт-петербургский государственный университет», доктор физико-математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников, профессор по специальности 01.04.07 – физика твердого тела.

Контактная информация:

Почтовый адрес: Старый Петергоф, ул. Ульяновская д. 1, Санкт-Петербург, 198504

Тел. (+7) 812-428-43-96

E-mail: [vyvenko@nano.spbu.ru](mailto:vyvenko@nano.spbu.ru)

ЛИЧНУЮ ПОДПИСЬ

НАЧАЛЬНИК ОТДЕЛА

Н. И. МАШТЕПА



Документ подготовлен  
в порядке исполнения  
трудовых обязанностей