

ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Мухина Ивана Сергеевича
«Комбинированные методы создания и исследования функциональных
наноструктур для нанофотоники и наномеханики»,
представленной на соискание ученой степени доктора физико-
математических наук по специальности
01.04.01 — «Приборы и методы экспериментальной физики».

Бурное развитие нанотехнологий неразрывно связано с разработкой и реализацией новых методов создания наноструктур и их последующей функционализации. Очень интенсивно развиваются такие направления как нанофотоника и наномеханика. В первую очередь, это связано со стремительным прогрессом в развитии различных типов литографических методов, а также с высокой востребованностью этих продуктов на рынке высокотехнологичных электронных приборов. В связи с этим тема диссертации И.С. Мухина, посвященная комбинированным методам создания и исследования функциональных наноструктур для нанофотоники и наномеханики, без сомнения, является актуальной. Автор продемонстрировал высокий уровень научных разработок литографических методов для различных типов наноматериалов. Отметим здесь лишь некоторые из них:

- Был разработан комбинированный метод «сухой» и «мокрой» и литографии для создания электронных приборов на основе подвешенных над микроканавками листов двумерных материалов, таких как графен и MoS_2 , где расстояние от поверхности подложки более 150 нм, что исключает влияние подложки на транспортные свойства однослойных двумерных материалов. И это позволило подвижность носителей заряда в графене на рекордном уровне $2 \cdot 10^6 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. Данный материал является перспективным для создания нового поколения быстродействующих электронных приборов.

- Было продемонстрировано, что под действием сфокусированного электронного пучка в присутствии газов-прекурсоров возможна реализация методики осаждения атомов углерода на вершине вольфрамовых иглолок для формирования наноструктур в виде нановилки и наноскальпеля, которые

затем использовались для контактной модификации профиля различных поверхностей с нанометровым разрешением.

- Был предложен и реализован комбинированный метод литографии на основе травления сфокусированным ионным пучком и осаждения материала под действием сфокусированного электронного пучка в присутствии газов-прекурсоров, который позволяет формировать в каналах микрофлюидных чипов наноструктуры с характерными минимальными размерами порядка 100 нм. Которые могут быть использованы как элементы для захвата, а также для селекции одиночных объектов по размерам.

Таким образом, в диссертационной работе И.С. Мухина решаются важные актуальные научные задачи, которые имеет также высокую практическую значимость.

Основные результаты диссертации опубликованы в 31 статье в периодических научных изданиях, рекомендованных ВАК, а также были представлены на многочисленных российских и международных конференциях.

Из содержания автореферата можно сделать вывод о том, что диссертация И.С. Мухина «Комбинированные методы создания и исследования функциональных наноструктур для нанофотоники и наномеханики» является законченным научным исследованием, выполненным самостоятельно на высоком научном уровне, и имеющим большое прикладное значение.

К тексту автореферата имеется несколько замечаний:

1. Из текста автореферата не понятно, как контролировалось удаление остатков резистов и технологических загрязнений листе графена после термического отжига, реализованного путем пропускания через него электрического тока.
2. В работе реализован метод формирования наноструктур под действием сфокусированного электронного пучка, который

заключается в разложении молекул газа-прекурсора при взаимодействии со вторичными электронами, рождаемыми при рассеянии энергии первичного электронного пучка в образце. Было показано, что данная технология за счет перемещения точки фокусировки электронного пучка в пространстве позволяет формировать многомерные наноструктуры. Однако не понятно, какими процессами определялось время экспозиции, а также величина и скорость перемещения точки фокусировки.

По актуальности темы, обоснованности выводов, научной новизне, практической значимости полученных научных результатов, содержание диссертации полностью соответствует требованиям п.9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ (№ 842, от 24 сентября 2013 г.), а её автор, Мухин Иван Сергеевич, заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.01 — «Приборы и методы экспериментальной физики».

Доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник - заведующий лабораторией,
лаборатория диагностики материалов
и структур твердотельной
электроники ФТИ им. А.Ф. Иоффе

Брунков Павел Николаевич
10.06.2019

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской Академии Наук
Почтовый адрес: Россия 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26
Адрес электронной почты: brunkov@mail.ioffe.ru
Web-сайт организации: <http://www.ioffe.ru>

Подпись д.ф.-м.н. П.Н. Брункова заверено:
Ученый секретарь ФТИ им. А.Ф. Иоффе,
профессор, д.ф.-м.н.



Шергин А.П.