

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Мухина Ивана Сергеевича на тему
«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

Интенсивное развитие микроэлектроники, сопровождающееся постоянным уменьшением характерных размеров компонентов интегральных схем и дискретных приборов, явилось движущей силой для создания оборудования и технологий, обеспечивающих изготовление элементов нанометровых размеров. В настоящее время невозможно представить технологическую цепочку в производстве изделий нано- и микроэлектроники без комплекса нанотехнологического оборудования, а также приборов, обеспечивающих всестороннюю диагностику создаваемых структур. Более того, именно применение этих технологий и оборудования позволило создать уникальные полупроводниковые приборы такие, как нанофотонные структуры, в которых реализуется управление светом в наномасштабе, уникальные полупроводниковые лазеры и светоизлучающие структуры и т.д. Приблизительно с середины 90-х годов интенсивное развитие получила микромеханика – область техники, в которой создаются на основе использования в основном типичных микроэлектронных технологий и оборудования разнообразные электромеханические и микрофлюидные устройства, представляющие значительный интерес для различных областей техники, особенно, космической, автомобильной и авиационной.

Существующие технологические цепочки изготовления наноэлектронных и наноэлектромеханических систем в основном являются многомаршрутными и многостадийными, состоящими из нескольких последовательно совершаемых операций, причем выбор как оптимального сочетания, так и последовательности их выполнения, представляет собой нетривиальную задачу, посильную для выполнения только высококвалифицированным специалистам.

В этой связи диссертационная работа И.С. Мухина, посвященная дальнейшему развитию комплексных методик создания и исследования разнообразных нанофотонных, наноэлектронных и наномеханических функциональных структур на основе комбинированного использования

различных нанотехнологий, бесспорно является актуальной. В диссертационной работе автор применил для создания уникальных наноструктур широкий круг нанотехнологических процессов, включая разнообразные технологии формирования и травления тонких пленок разных материалов, электронную и ионную литографии, технологии, основанные на применении сфокусированных электронных, ионных и лазерных пучков, и другие.

Актуальность выбранной темы обусловлена и тем обстоятельством, что ряд процессов, исследованных в диссертационной работе, могут быть локализованы в достаточно небольших областях пространства и позволяют осуществлять контролируемое осаждение или травление материалов, а также манипулирование нанообъектами при создании на поверхности подложек наноразмерных структур, что дает им значительное преимущество с точки зрения отсутствия необходимости применения дорогостоящих литографических операций при их формировании.

Особенно хотелось бы отметить тот факт, что значительное количество исследований в области получения разнообразных наноструктур с использованием концентрированных источников энергии, выполняемых российскими учеными, характеризуются новизной и оригинальностью, поэтому диссертационная работа И.С. Мухина служит дальнейшему укреплению роли отечественной науки и технологии в этом направлении.

Важное значение для науки и практического использования имеют результаты по исследованию и разработке комплекса технологических операций, позволяющего закреплять между металлическими электродами «подвешенные» листы таких двумерных материалов, как графен и дисульфид молибдена, и представляющего существенный шаг вперед в создании приборов, основанных на использовании уникальных свойств этих материалов. Именно благодаря предложенному автором диссертации новому комбинированному подходу удалось достичь рекордных значений подвижности в листах графена.

Большую научную и практическую значимость имеет разработанный автором метод манипулирования одиночными микро- и наночастицами, основанный на взаимодействии незаземленного металлического острия и наночастицы в сфокусированном электронном пучке растрового электронного микроскопа, обеспечивающий точность позиционирования объекта около 50 нм. Очень важно, что С.И. Мухин развил этот метод и для осуществления возможности манипулирования нанообъектами при атмосферном давлении за

счет использования сфокусированного лазерного излучения и иглы манипулятора, размещенной в рабочем пространстве микроскопа. Оба метода манипулирования, развитых автором, позволили создать ему ряд уникальных наноструктур таких, как микродисковые лазеры с наноантеннами в виде Si наночастиц, резонансный детектор масс и др.

Среди разнообразных нанотехнологий особый интерес представляют такие, которые обеспечивают формирование желаемого материала химическим осаждением из газовой фазы на локальных участках поверхности подложек, под действием сфокусированных ионных и электронных пучков, исследованию и применению которых С.И.Мухин уделил большое внимание. В целом, такие процессы характеризуются исключительно сложным многомаршрутным и многоступенчатым механизмом, а локализация реакционного пространства до нанометровых размеров приводит к появлению новых проблем. Диссертант успешно развил технологию химического осаждения из газовой фазы под действием сфокусированного электронного луча и использовал ее для выращивания углеродных и металл-углеродных висцерных структур как одномерных, так и двух и трехмерных, представляющих собой «нановилку» и «наноскальпель», а также для формирования массивов функциональных наноструктур в каналах микрофлюидных устройств.

Значительный интерес для науки представляют результаты исследования диссертантом процесса выращивания массивов вертикально ориентированных нитевидных кристаллов нитрида галлия методом молекулярно-пучкового осаждения. И.С. Мухину удалось разработать математическую модель, достаточно достоверно описывающую процесс образования нанотрубок из нитрида галлия и основанную на предположении о формировании в процессе роста высоколегированного периферийного слоя, в котором энергия зародышеобразования меньше, чем на верхней грани.

Научная значимость и практическая ценность полученных С.И. Мухиным результатов тесно взаимосвязаны: развитые и созданные новые нанотехнологии и их комбинации, а также экспериментальная демонстрация их успешного применения для создания наноструктур различного функционального назначения, могут быть рекомендованы для использования в научных центрах и на предприятиях электронной промышленности. Более того, изготовленные с помощью этого комплекса наноструктуры, представляют собой уникальные образцы функционирующих приборов, демонстрирующих высокие эксплуатационные характеристики, а также приборы, позволяющие получать новые знания в области экспериментальной физики. Например,

несомненный интерес представляют созданные за счет применения комплекса уникальных нанотехнологических методов на вершине одиночных углеродных вискеро-ловушки наночастиц, новые конструкции функциональных зондов для сканирующей зондовой микроскопии, прототипы микро- и наноструктур в каналах микрофлюидных устройств для захвата и селекции биообъектов размером до единиц микрометров, детекторов масс наночастиц и др.

Достоверность выводов, содержащихся в диссертации, обусловлена применением современной методологии научных исследований и комплекса использованных разнообразных современных экспериментальных нанотехнологических и аналитических методов (технологии электронных, ионных и лазерных пучков, электронная и ионная литография, наноманипулирование, осаждение материала под действие сфокусированных пучков, плазмохимическое травление, химическое осаждение из газовой фазы, молекулярно-лучевая эпитаксия, растровая и просвечивающая электронная микроскопия, энергодисперсионный рентгеновский микроанализ, сканирующая зондовая микроскопия и т.д.). Применение С.И. Мухиным в диссертационной работе таких разнообразных экспериментальных методик и оригинальных подходов позволяет характеризовать его как разностороннего ученого в области нанотехнологий, приборов и методов экспериментальной физики.

Вместе с тем, считаю необходимым сделать по диссертационной работе следующие замечания:

1. В первой главе, посвященной обзору существующих методов и технологий создания микро- и наноструктур, представлены сведения, которые, с моей точки зрения, носят слишком общий характер и не содержат достаточное количество информации, являющейся важной для того, чтобы выполнить их сравнительный анализ, так как во многих разделах не приводятся данные о достигнутых к настоящему времени разрешениях методов, производительностях процессов и т.д. Имеются и неточности, например на стр.23 автор пишет, что "электронная литография, как и технология сфокусированного ионного пучка ...", однако очевидно, что речь идет лишь об электронно-лучевой литографии. На стр. 38 утверждается, что "...газофазное осаждение позволяет равномерно покрывать материалом все поверхности рельефа", но эта особенность процесса химического осаждения из газовой фазы может наблюдаться только при кинетическом режиме его протекания.

2. На стр. 39 автор пишет о том, что "скорость протекания химической реакции газофазных процессов зависит от двух факторов: термодинамического, определяющего направление реакции, и кинетического, контролирующего транспортные явления, происходящие в процессе роста материала". Это утверждение является некорректным, так как скорость процесса химического осаждения из газовой фазы, а это наиболее правильное название описываемого метода, может зависеть от различных факторов в зависимости от того, в каком режиме протекает процесс и его реакционной схемы.
3. В диссертации применены разнообразные и достаточно сложные экспериментальные методы, использованные как для получения микро- и наноструктур, так и для исследования их характеристик, однако, с моей точки зрения, они описаны очень конспективно и явно в недостаточной степени. В лучшем случае указывается марка используемого прибора, опускаются режимы процессов, практически отсутствуют характеристики чистоты используемых реагентов, не всегда приводятся описания методик подготовки подложек, диссертанту больше внимания следовало бы уделить погрешностям измерений. Например, автор в таблице 2.1 приводит параметры травления аморфного кремния в "индуктивно-связанной плазме ...". Приведены не вполне корректные величины: "поток SF_6 " - это расход, я могу догадаться, что означает "мощность ICP", но что означает "мощность RF" остается загадкой, частоты генераторов вообще не указаны.
4. На стр. 65 автор указывает на использование "сухого реактивного ионного травления в Ar^+ плазме". Этот процесс представляет собой ионное травление, так как в нем не используются реагенты, и не протекают химические реакции.
5. Во второй главе обсуждается процесс манипулирования одиночными микро- и наночастицами. Мне показалось, что отсутствует четкость в описании сил, действующих на частицу. На стр. 70 автор пишет, что "наночастица на поверхности удерживается различными силами, в том числе силой Ван-дер-Ваальса, силой адгезии, электростатической силой и.т.д.", однако силы Ван-дер-Ваальса имеют электростатическую природу, а что подразумевается под силой адгезии хотелось бы услышать от диссертанта.
6. В п. 3.1 автор рассматривает процесс формирования нанопленки "методом осаждения материала Pt/C под действием сфокусированного

электронного пучка в присутствии газов-прекурсоров $C_9H_{16}Pt$ в камере СЭМ". Хочу заметить, что это соединение имеет температуру плавления около 26-29 °С, то есть газом не является. Вероятно, речь идет о паре, но тогда желательно более детально описать систему подачи его в камеру и измерения расхода. Проводился ли химический анализ выращенных из этого реагента нановискеров, и каким образом оценивалась скорость осаждения?

7. В п.4.4 рассматривается резонансный детектор масс на основе углеродного наноосциллятора. Очевидно, что на погрешность измерений должна оказывать влияние точность позиционирования наночастицы или частиц на кончике наноосциллятора, однако в работе этот вопрос не обсуждался. Желательно эти данные, если они имеются, представить на защите диссертации.
8. Обсуждая в п.4.6 создание функциональных СЭМ зондов, диссертант анализирует полученные с их помощью нетривиальные результаты, касающиеся возможного изменения формы мениска с вогнутой на выпуклую под действием различных сил (с.151). Мне никогда не попадалась подобная информация, относящаяся к мезопористым адсорбентам, так как это должно отчетливо проявляться на изотермах адсорбции. Возможно ли какое-то иное объяснение обнаруженным явлениям?
9. Не могу не отметить, что в русскоязычных физическом и химическом словарях вполне достаточно терминов для описания любых известных явлений, процессов и т.д. В этой связи, я не понимаю, зачем использовать термин «прекурсор», представляющий собой написание английского слова «precursor» на кириллице, которое также не является химическим термином, а достаточно случайно стало применяться в англоязычной литературе в области химии. Это относится и к другим терминам, например "паттернирование" (стр.22),
10. В работе имеется некоторое количество опечаток, неудачных выражений или неточностей. Например: "...процесс литографии заключается в переносе шаблона из одной среды в другую." (стр.25), "механизм формирования структур методом МПЭ далек от равновесного термодинамического состояния..." (стр.32), "...гетероструктуры с электронным ограничением электронов и дырок..." (стр.34) и др. Кроме того на многих рисунках (например, 3.10а, 4.29, 6.8 и др.) диссертант использует комментарии и названия осей на английском языке.

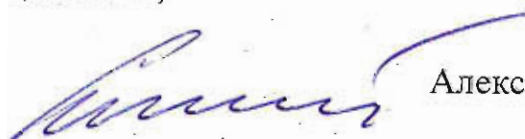
Изложенные замечания не снижают общей положительной оценки работы. Считаю, что в целом диссертация И.С. Мухина является законченной научно-исследовательской работой, выполненной на актуальную тему. Тема диссертации соответствует специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики. Диссертация содержит совокупность новых результатов и положений, имеет внутреннее единство и свидетельствует о высоком экспериментальном и научном уровне автора. Автореферат и опубликованные работы достаточно полно отражают содержание диссертации.

Считаю, что по актуальности, научной новизне, теоретической и практической значимости результатов, объему выполненных исследований, глубине анализа и обобщения материалов диссертационная работа Мухина И.С. «Комбинированные методы создания и исследования функциональных наноструктур для нанофотоники и наномеханики» отвечает всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к докторским диссертациям, изложенным в п.п. 9 – 14 «Положения о присуждения ученых степеней», утвержденном Постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 г. (ред. от 01.10.2018 № 1168), а ее автор, Мухин Иван Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики.

Отзыв составлен 13 июня 2019 года.

Официальный оппонент -
Заведующий кафедрой «Физико-химия
и технологии микросистемной техники»
федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого»,

профессор, д.х.н.



Александров Сергей Евгеньевич

195251, г. Санкт-Петербург,
Политехническая ул., д.29
тел.: (812) 5526171,
email: salexandrov@spbstu.ru

