

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Трофимука Андрея Дмитриевича

на тему: «Формирование и структурные свойства двухкомпонентных систем

«Детонационный наноалмаз – оксид графена»»,

представленной на соискание ученой степени кандидата физико-механических наук по специальности 1.3.8 – физика конденсированного состояния

В диссертационной работе Трофимука А.Д. исследуется формирование иерархичных наноуглеродных структур, при создании условий для самоорганизации наноразмерных частиц детонационного наноалмаза и микронных частиц оксида графена в водной среде. Сформированная в водной среде двухкомпонентная структура «детонационный наноалмаз – оксид графена», как показано в диссертационной работе, сохраняет наноструктурную организацию после удаления воды из системы, что и позволяет получать пористые материалы с заданными свойствами. Разработанный в ходе решения основной научной задачи метод формирования композитных структур, позволяет избежать внесения неуглеродных примесей в конечный материал.

Для ряда направлений – таких как электрохимические системы или селективные фильтры и/или сорбенты – такие пористые наноуглеродные структуры могут оказаться востребованным материалом. Такого рода задачи подразумевают возможность управления ключевыми свойствами получаемого материала – структурой пор и удельной поверхностью, что определяет **актуальность** темы диссертации.

Стоит отметить, что помимо основной задачи в диссертационной работе представлены результаты исследования возможности управления размером частиц детонационных наноалмазов. Автор диссертационной работы является воспитанником научной школы специалистов, известных в научном мире по работам и патентам, посвящённым получению, исследованию и применениям водных суспензий частиц детонационных наноалмазов. Автор, помимо исследования двухкомпонентных систем, приводит в диссертационной работе результаты по развитию методики получения частиц и золей детонационных наноалмазов. Эти исследования и полученные результаты напрямую относятся к магистральной теме диссертации, поскольку понимание подходов к изменению размеров частиц детонационных наноалмазов даёт возможность получать двухкомпонентные системы «детонационный наноалмаз – оксид графена» с иным размером пор, а также позволяет повысить удельную поверхность двухкомпонентного материала за счёт уменьшения массы (а значит и размера) частиц.

Научная новизна диссертационной работы заключается в предложении и демонстрации метода самосборки структур из детонационных наноалмазов и оксида графена в водной среде, полноценном исследовании закономерностей формирования таких структур, демонстрации сохранения пористости после удаления воды из системы. Также в работе впервые исследованы и охарактеризованы частицы детонационных наноалмазов, устойчивые к процессу деагрегации.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в демонстрации

методики самосборки структур в водных средах, демонстрации равномерного распределения наночастиц детонационных наноалмазов по частицам оксида графена, получении и исследовании проводящего материала из структур, полученных в коллоидах. Кроме того, автор наглядно продемонстрировал границы применимости предлагаемой методики.

Автором опубликовано 5 статей по теме диссертации (все в профильных рецензируемых изданиях) и сделаны доклады на 9 конференциях и 2 профильных совещаниях (везде в статусе основного докладчика).

Достоверность и обоснованность результатов, изложенных в публикациях и диссертации автора, обусловлена использованием взаимодополняющих методов физико-химического анализа материалов, логичной и честной постановкой эксперимента. Кроме того, данные, представленные автором, согласуются с литературой (в том числе и с публикациями несвязанных с автором научных групп, вышедшими позже публикаций автора).

Личный вклад автора заключается в формулировке и постановке задач, проектировании эксперимента, интерпретации результатов. Не вызывает сомнений, что все эксперименты выполнены лично автором или при его непосредственном и активном участии.

Работа изложена на 99 страницах, иллюстрирована 25 рисунками и 5 таблицами. Диссертация состоит из 6 глав, введения, заключения и списка литературы (146 наименований).

Первая глава диссертации посвящена литературному обзору. Освещены проблема агрегирования листов графена и попытки научного сообщества решить эту проблему. Рассмотрены особенности структурной организации частиц детонационных наноалмазов в водных золях. Сформулированы цели и задачи диссертационной работы.

Во второй главе диссертации подробно описаны исходные материалы, приведено исчерпывающее описание задействованных методов исследования материалов, а также обоснование необходимости и целесообразности использования каждого из них.

В третьей главе диссертации приводятся результаты исследования получаемых двухкомпонентных систем в водной среде. Показано, что при смешении противоположно заряженных в водной среде частиц электрофоретическая подвижность получаемого продукта монотонно меняется с изменением массового отношения компонентов. Кроме того, найдено отношение масс в структуре детонационный наноалмаз – оксид графена, соответствующее полной компенсации зарядов наночастиц в водной среде. Подробно исследована и морфология получаемых частиц. В частности, показано, что положительно заряженные в водной среде частицы детонационных наноалмазов осаждаются на лист окиси графена двумерными массивами, в том числе и при заведомом избытке первых.

В четвёртой главе диссертации приведены результаты исследования двухкомпонентных систем после удаления воды из системы. Автором использованы два подхода: сушка на воздухе с последующей высокотемпературной обработкой и формирование аэрогелей методом лиофилизации гидрозолей. Показано, что после удаления

воды из сформировавшихся в водной среде систем «детонационный наноалмаз – оксид графена» получающиеся материалы сохраняют структурную организацию даже при деформации листа оксида графена. После термообработки в вакууме автор получил проводящие пористые структуры, размер пор в которых сопоставим с размером использованных частиц детонационных наноалмазов. Показано, что максимальная удельная поверхность в линейке образцов достигается при соотношении масс компонентов системы детонационный наноалмаз – оксид графена = 3.5/1.0, то есть при соотношении масс, соответствующему взаимной компенсации зарядов при гетерокоагуляции в водной среде.

В пятой главе диссертации на основании полученных данных предложена модель, на основании которой сделана оценка сверху максимально достижимой для подобных двухкомпонентных структур удельной поверхности ($470 \text{ м}^2/\text{г}$). Это оценка – в пределах погрешности – сходится с экспериментально измеряемой удельной поверхностью получаемых двухкомпонентных материалов.

В шестой главе диссертации показаны направления развития технологии получения алмазных частиц. В частности, предложено применение известного в биологии метода центрифугирования в градиенте плотности для полидисперсных алмазных наночастиц для фракционирования частиц по размерам. Также подробно исследованы агрегаты частиц детонационных наноалмазов, устойчивые к деагрегации. Выявлена структура таких частиц, сделан предположение о причинах их формирования в процессе детонационного синтеза, объяснена устойчивость таких частиц к известным методам деагрегации.

Можно отметить несколько недостатков работы:

1. Прежде всего, можно отметить недостаточность усилий в исследовании удельной поверхности и структуры пор в образцах.
2. В связи с этим представляется важным и интересным подробно исследовать удельную поверхность не порошков, а компактированных (таблетированных) образцов. Такой эксперимент позволил бы сделать непосредственный вывод о возможности применения получаемых структур, например, в качестве электродов суперконденсаторов.
3. Также стоит упомянуть несколько непринципиальных опечаток, связанных, по всей видимости, с заметным изменением структуры диссертации во время написания текста.

В заключении стоит отметить, что указанные замечания не снижают общего положительного впечатления от диссертационного исследования и опубликованных работ. Научные положения обоснованы в достаточной степени, содержание опубликованных работ, а также автореферата соответствует выводам и идеям, отражённым в диссертации. Отдельно хочется отметить кропотливую адаптацию экспериментальных данных из публикаций автора в журналах для текста диссертации.

Таким образом, диссертация «Формирование и структурные свойства двухкомпонентных систем «Детонационный наноалмаз – оксид графена» полностью соответствует требованиям Положения о присуждении ученых степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А. Ф.

Иоффе Российской академии наук, является самостоятельным и завершённым исследованием, которое содержит в себе решение научной задачи, имеющей значение для развития физики наноструктур. Автор исследования – Трофимук Андрей Дмитриевич – заслуживает присуждение ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – физика конденсированного состояния.

5 июня 2025 г.

Доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник,
заместитель руководителя Отделения
физики диэлектриков и полупроводников
Специальность 1.3.8 – физика

конденсированного состояния

Физико-технический институт
им.А.Ф.Иоффе Российской академии наук
Адрес: 194021 Санкт-Петербург,
ул.Политехническая д.26 (т.812-2972245)
Эл.почта: yu.kumzerov@mail.ioffe.ru

_____/Кумзеров Ю.А../