

## НАНОМАТЕРИАЛЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Витязь П.А.

Президиум Национальной академии наук Беларуси,  
220072, Беларусь, г. Минск, пр. Ф. Скорины, 66, e-mail: [academy@mserv.bas-net.by](mailto:academy@mserv.bas-net.by)

В работе дан анализ полученных основных результатов организациями и учреждениями Республики Беларусь в области получения наноматериалов и разработки технологий как по их производству, так и применению. Приведены некоторые свойства наноматериалов и методы их исследований. Показаны перспективы развития этого направления в различных областях, таких как материаловедение, получение сверхтвердых материалов, поверхностной инженерии, электронике, производстве композиционных материалов с функциональными свойствами. Исследования по указанной тематике в Беларуси проводятся в рамках Государственной программы ориентированных фундаментальных исследований "Химические и физико-технологические основы создания дисперсных систем, наноматериалов и устройств наноэлектроники". Программа включает разделы: углеродные нанотрубки и фуллерены; сверхтвердые и тугоплавкие наноматериалы; магнитные наноматериалы; наноэлектроника и микросистемы; композиционные наноматериалы и сертификация продукции; физико-химия элементов и систем с низкоразмерным структурированием. В выполнении заданий программы участвуют 14 организаций НАН Беларуси, 14 организаций Минобразования; количество исполнителей – 1007, из них академиков – 14, членов-корреспондентов – 15, докторов наук – 127, кандидатов наук – 317, докторантов – 7, аспирантов – 112, соискателей ученых степеней – 55.

В числе приоритетных задач по первому разделу важное место занимает исследование механизмов синтеза углеродных нанотрубок и фуллеренов при атмосферном давлении в условиях разного типа электроразрядной плазмы и фильтрационного горения, а также в ударных волнах; разработка высокопроизводительных (от 20 г/ч и выше) методов, установок и технологий их получения, а также наноматериалов на их основе, в том числе обладающих высокой износостойкостью, низким коэффициентом трения и высокой химической инертностью для применения в электронной технике. Актуальной является разработка эффективных методов и технологий очистки и разделения углеродных наноматериалов; разработка нового поколения зондов - наноманипуляторов на базе углеродных нанотрубок для увеличения разрешающей способности атомно-силовых микроскопов до 1 нм.

К приоритетным задачам второго раздела программы относятся исследование процессов получения, структуры и свойств наноразмерных порошков и волокон тугоплавких соединений оксидов, карбидов, нитридов и разработка технологий их получения; исследование условий получения и механизмов формирования сверхтвердых и тугоплавких наноматериалов при высоких давлениях и температурах; разработка новых сверхтвердых наноматериалов на основе алмаза и кубического нитрида бора с твердостью 80-100 ГПа и выше и термоустойчивых наноматериалов на основе тугоплавких соединений (боридов, карбидов, нитридов, оксидов) с твердостью 30-40 ГПа.

В результате исследований, проведенных по разделу "Магнитные наноматериалы", разработаны нанокристаллические и аморфные магнитомягкие материалы; нанокластерные и наногранулированные магнитные материалы с эффектом гигантского изотропного магнитосопротивления; нанопроволоки (многослойные, нанокластерные); мультислойные покрытия с высокой чувствительностью магниторезистивного эффекта; магнито жесткие материалы с большой величиной энергий (анизотропные).

По разделу "Нанoeлектроника и микросистемы" исследованы и оптимизированы технологические процессы синтеза углеродных нанотрубок (УНТ) методами каталитического пиролиза жидких и газообразных углеводородов с использованием <летучих> и локализованных на подложке катализаторов в условиях вариации температурного режима реакционной зоны, концентрации катализатора углеводородной смеси, скорости газа-носителя; Установлено новое явление: формирование многослойной структуры <lift-up growth> в процессе самоорганизации УНТ на комплексе <летучего> и локализованного на кремниевой подложке катализатора, что открывает путь к технологии формирования многоуровневых СБИС с вертикальной коммутацией на основе УНТ. Разработано и создано оборудование, на котором получены вертикально ориентированные углеродные нанотрубки в виде массивов; массивов, локализованных на поверхности Si или SiO<sub>2</sub>; УНТ, разнесенные на определенное расстояние, и впервые – УНТ, расположенные на нескольких уровнях. Полученные результаты позволяют приступить к разработке конкретных приборов на основе УНТ. Эти разработки позволят в будущем вывести нашу микроэлектронику на новый уровень миниатюризации электронных устройств.

По разделу "Композиционные наноматериалы и сертификация продукции" выполнен большой объем исследований в области создания наноматериалов различного назначения для фильтрующих, оптических, пленочных, многослойных, органических, антифрикционных и других видов изделий.

По разделу "Физико-химия элементов и систем с низкоразмерным структурированием" получен ряд интересных и важных результатов. Разработан метод потенциодинамической электрохимической импедансной спектроскопии и проведены исследования по отдельному отслеживанию изменений разных составляющих электрохимического отклика в ходе формирования и разрушения монослоя металла при получении 3D сверхрешеток. Он позволит контролировать и корректировать параметры технологии получения наноструктурированных пленок непосредственно в процессе их послойного электрохимического осаждения. Получены однородные сплошные и пористые пленки Pd-LaCoO<sub>3</sub> с гексагональной симметрией наноразмерных пор. На их основе изготовлены гибридные пленочные структуры, с электрическим сопротивлением 0.3...0.8 Мом, которые могут быть использованы в качестве сенсоров спирта в спиртосодержащих средах. Получено доказательство возможности использования фуллеренов C<sub>60</sub> для модификации реакции биологических систем на различные материалы, что позволит разрабатывать новые типы тканесовместимых материалов для использования в медицине. Изучены обратимые термозависимые структурные перестройки фосфолипидных мембран, связанные с фотовозбуждением порфиринов, находящихся в составе липидной матрицы. Установлено, что амплитуда фотозависимых изменений липидного порядка зависит от фотофизических характеристик и расположения центров связывания молекул пигмента-сенсбилизатора. Обратимые изменения структурных характеристик порфи-ринсодержащих липидных мембран могут быть использованы для создания материалов с фотоконтролируемыми физико-химическими свойствами. Построена модель динамики положительного фотоиндуцированного двулучепреломления в слоях фотосшиваемых полимеров. Это позволит разработать новый способ записи информации и новые материалы для идентификационных знаков. Разработан новый способ идентификации нанопор, образующихся после имплантации ионами водорода, гелия и аргона и последующего вакуумного отжига пластин кремния. Показана возможность повышения чувствительности фотоприемных устройств, использующих в качестве чувствительного элемента алмаз с отрицательным электронным средством поверхности. Разработан способ повышения эффективности холодных катодов на основе алмаза. Разработан способ создания и контроля

захороненных пористых структур в кремнии, который может быть использован для совершенствования технологии Smart-Cut для создания структур кремний-на-изоляторе .

В Беларуси развитие нового направления по созданию и применению наноструктурных материалов прежде всего связано с организацией в республике детонационного синтеза наноалмазов, производство которых в промышленных масштабах освоено на НП ЗАО «Синта» в виде восьми модификаций ультрадисперсных алмазов (УДА), различающихся фазовым составом, степенью очистки, величиной и знаком заряда поверхности. Разработаны методы целенаправленного изменения функционального покрова наноалмазов и их допирования различными элементами в форме адсорбатов, подвижных ионов, металлоксидных и других поверхностных структур, значительно расширяющих диапазон свойств и структурных характеристик. Успешное освоение мощностей по выпуску наноалмазов позволило перейти от лабораторных опытов к промышленным технологиям применения этого наноматериала в ключевых для республики отраслях, какими являются машиностроение, энергетика, транспорт, электроника, производство товаров народного потребления.

Наиболее широко применяются в настоящее время наноалмазы при нанесении электрохимических покрытий. Отличительной особенностью модифицированных гальванопокрытий является повышенная микротвердость, отсутствие микропористости и, как следствие, повышенная износостойкость, отсутствие питтинговой коррозии. Эффективные результаты получены на никель-алмазных покрытиях на медицинском, обрабатывающем и измерительном инструменте и штамповой оснастке. Здесь достигнуто повышения стойкости в 1,5-2,0 раза [1]. Разработан и успешно апробирован на ряде предприятий метод модифицирования наноалмазами или фуллеренами оксидокерамических покрытий на алюминиевых сплавах. В частности, установлено, что использование модифицирующих нанокomпонентов при микродуговом оксидировании алюминиевого сплава АК5М2 приводит к значительному росту толщины оксидокерамического слоя и прочности его связи с подложкой, а также к снижению неоднородности покрытия. В модифицированном оксидокерамическом слое преобладающей фазой оксидного слоя является высокотемпературная фаза  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ , а микротвердость и износостойкость оксидного слоя в результате введения наноалмазов возрастают в 1,5-2,0 раза [2]. Использование наноразмерной алмазографитовой шихты для модифицирования смазочных материалов позволяет существенно улучшить эксплуатационные характеристики трибосопряжений. Так, применение модифицированных смазок в совокупности с новым макрогетерогенным материалом типа «бронза-железоуглеродистые гранулы» позволило обеспечить «безыносную» эксплуатацию ряда узлов скольжения теплоэнергетического оборудования (опоры корпусов подшипников, шпоночные сопряжения, подшипники системы парораспределения), что способствовало увеличению в 1,5 раза нормативного межремонтного периода для турбоагрегатов, работающих в энергосистеме Беларуси [3].

Высокая эффективность введения наноалмазов и кластеров алмазографита в полимерные композитивы и пленки на основе полиамидов, полиолефинов, фторпластов проявляется в значительном повышении механических и триботехнических характеристик модифицированных полимеров, обусловленным образованием пространственной сетки физических связей на границе раздела полимерной матрицы с наночастицами, имеющими повышенные адсорбционные свойства .

Весьма эффективным является применение наноалмазов при синтезе сверхтвердых материалов методами статического и ударно-волнового синтеза [4]. Установлено, что предварительное химическое и физическое модифицирование порошков нанодисперсных алмазов повышает механические характеристики поликристаллов на их основе, способствует снижению параметров спекания и синтеза сверхтвердых материалов. Показано, что при

обработке наноалмазной шихты возможно образование поликристаллов алмаза, имеющих размеры порядка 100-750 мкм [5]. Проводятся исследования по получению композиционных материалов на основе наноалмазов методом пропитки под давлением расплавами различных металлов, а также кремнием для получения на их основе наноструктурных сверхтвердых материалов наноалмаз-карбид кремния. Такие композиты можно использовать прежде всего в качестве инструментальных материалов при изготовлении правящего инструмента, волок, а также в качестве конструкционных материалов, например, для изготовления сопел для пескоструйной и гидроструйной обработки. Образующаяся в процессе спекания пространственная сетка карбида кремния, находящегося в нанодисперсном состоянии, выступает в роли связующего, имеющего коэффициент термического расширения, близкий к алмазу, а также высокую твердость. Разрабатываемые подходы позволяют проводить спекания таких нанокомпозитов в более «мягких» условиях по сравнению с традиционными методами получения композиционных материалов на основе порошков сверхтвердых материалов.

Другая возможность использования наноалмазов в инструментальном производстве – полировальные пасты для суперфинишной доводки и обеспечения шероховатости  $R_a \leq 0,01$  мкм при полировке ювелирных изделий, полупроводниковых пластин из Si, Ge, изготовлении оптических деталей без дефектного поверхностного слоя [4].

Разработана технология газопламенного нанесения одно- и многослойных полимерных покрытий, в которых диспергированы наноалмазы. Материалом для нанесения покрытий является механическая смесь полиамидного порошка с ультрадисперсными алмазами, а также добавками металлических и керамических компонентов. Полученные с помощью газопламенного напыления металлополимерные покрытия с УДА надежно защищают подшипники и роторы погружных насосов, ролика запорной камеры и другие детали от совместного воздействия коррозии и износа, что позволяет сохранить высокие эксплуатационные характеристики в течение длительного срока [6].

Показана возможность получения наноразмерных керамических и мембранных фильтров для различных областей применения. Представлены результаты исследования свойств наноструктурных керамических и композиционных материалов, полученных методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) с механоактивацией исходной шихты. Приведены сведения о получении фотонных кристаллов с регулярной структурой из диоксида кремния. Описаны методы классификации многослойных покрытий из  $ZrO_2$ ,  $Y_2O_3$  толщиной 50-80 нм на алмазных зернах для повышения прочности их удержания в связке в три раза. Приведен ряд других примеров получения и использования наноструктурных материалов.

#### **Литература**

1. Тимошков Ю.В., Губаревич Т.М., Ореховская Т.И., Молчан Н.С., Курмашов В.И. Гальванотехника и обработка поверхности. 2000, Т. 7, № 1. С. 20.
2. Витязь П.А., Жорник В.И., Комаров А.И., Комарова В.И. Физикохимия ультрадисперсных (нано-) систем. МИФИ, 2002. С. 393.
3. Жорник В.И., Калиниченко А.С., Кукареко В.А. Материалы, технологии и оборудование для упрочнения и восстановления деталей машин. Минск: Технопринт, 2003. С. 390.
4. Получение, свойства и применение порошков алмаза и кубического нитрид бора / Под ред. П.А. Витязя. Минск: Беларуская навука, 2003. С. 335.
5. Сенюць В.Т. Сверхтвердые материалы. 2002, № 6. С.68-77.
6. Майло Е.Д., Толстик Э.Н., Кобяк Д.Г., Осипов А.А. // Сварка и родственные технологии. Минск: Беларуская навука, 1999. С.124.