

УМНЫЕ

НАНОПАЛЬЦЫ



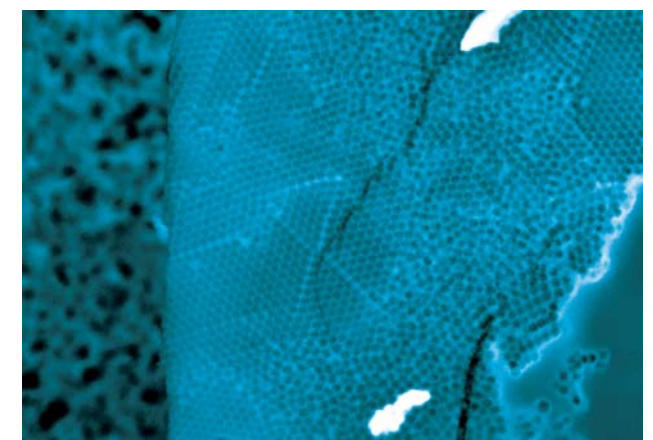
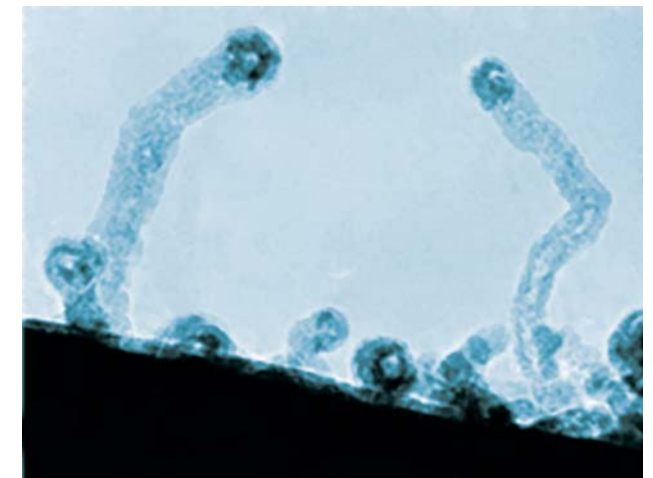
Фото А. Ларичева, предоставлено Управлением молодежной политики администрации г. Красноярск

Ключевые слова: наноэлектромеханические системы (НЭМС), НЭМС-материал, активный наноматериал, активные наномембраны, активные нанореакторы, углеродные нанотрубки, углеродная электроника.
Key words: nanoelectromechanical systems (NEMS), NEMS-material, active nanomaterial, active nanomembranes, active nanoreactors, carbon nanotubes, carbon electronics

Кандидату технических наук из Красноярска С.В. Хартову нет еще и 30. Однако молодому ученому удалось то, о чем мечтают и за что отчаянно сражаются не только маститые ученые, но и целые коллективы академических НИИ – получить национальное признание своих инновационных разработок и государственную поддержку для их завершения и дальнейшего практического использования. Проект «Технология интегральных НЭМС-структур для промышленного производства газовых сенсоров, энергонезависимой памяти и мембран нового типа», руководителем и идеологом которого является Хартов, вошел в тройку лучших идей II Всероссийского молодежного инновационного конвента 2009 г. и стал победителем Конкурса русских инноваций 2008–2009 гг., получив значительные средства на доработку. По мнению самого ученого, сегодня Россия имеет реальную возможность первой создать и вывести на мировой рынок продукцию совершенно нового типа – активный наноматериал (пока существуют только его пассивные образцы в виде нанопорошков, нанопокровов и т.п.).

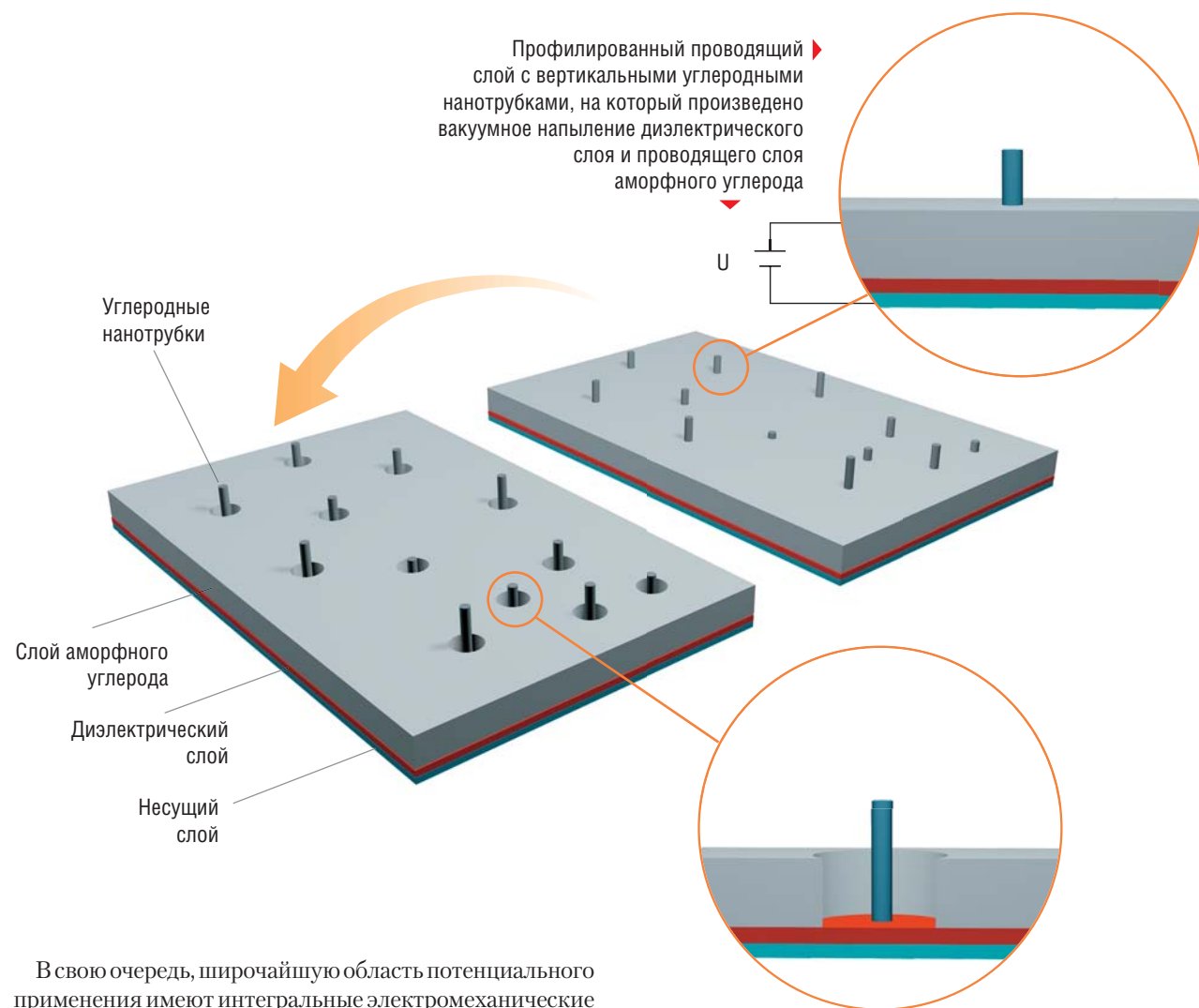
«Начало истории НЭМС-структур можно соотнести с началом века, когда я был еще студентом Московского института электронной техники (МИЭТ). Победив в 2007 г. в конкурсе инновационных проектов Фонда Бортника, мы получили финансовую поддержку нашей разработки по программе СТАРТ (название оказалось весьма символичным). Это был проект по созданию учебно-исследовательской установки роста углеродных нанотрубок методом каталитического пиролиза из газовой фазы этанола. Установка CVDompa была создана и получила ряд наград на престижных международных выставках и форумах. Именно с ее помощью и сформировалась основа будущих НЭМС-структур – проводящий несущий слой с выращенным на нем массивом углеродных нанотрубок, которые в дальнейшем трансформировались в управляемые электроды. Идея интегральной структуры, основанной на управляемых нанотрубках, и способ ее промышленного получения возникли практически одновременно, а идеи возможного применения нового материала в самых разных областях появлялись одна за другой» (С. Хартов)

Растущие на несущем слое углеродные нанотрубки можно получать с помощью учебно-исследовательской установки CVDompa. ПЭМ-изображение



Профилирование несущего слоя (слева) синтезированным слоем инверсного кварцевого опала (справа) обеспечивает разворот растущих нанотрубок в вертикальном направлении. РЭМ-изображение

Плотные упакованные на поверхности функциональные структуры, названные интегральными, известны всему миру в основном по кремниевым транзисторам. Практически безальтернативным современным средством их производства является достаточно сложный процесс фотолитографии. Способ столь же мощный, сколь и дорогой: стоимость получаемых интегральных структур нелинейно возрастает с повышением степени интеграции (количества элементов на единицу площади). Отставание России в области промышленного использования фотолитографии измеряется многими годами и десятками миллиардов долларов.



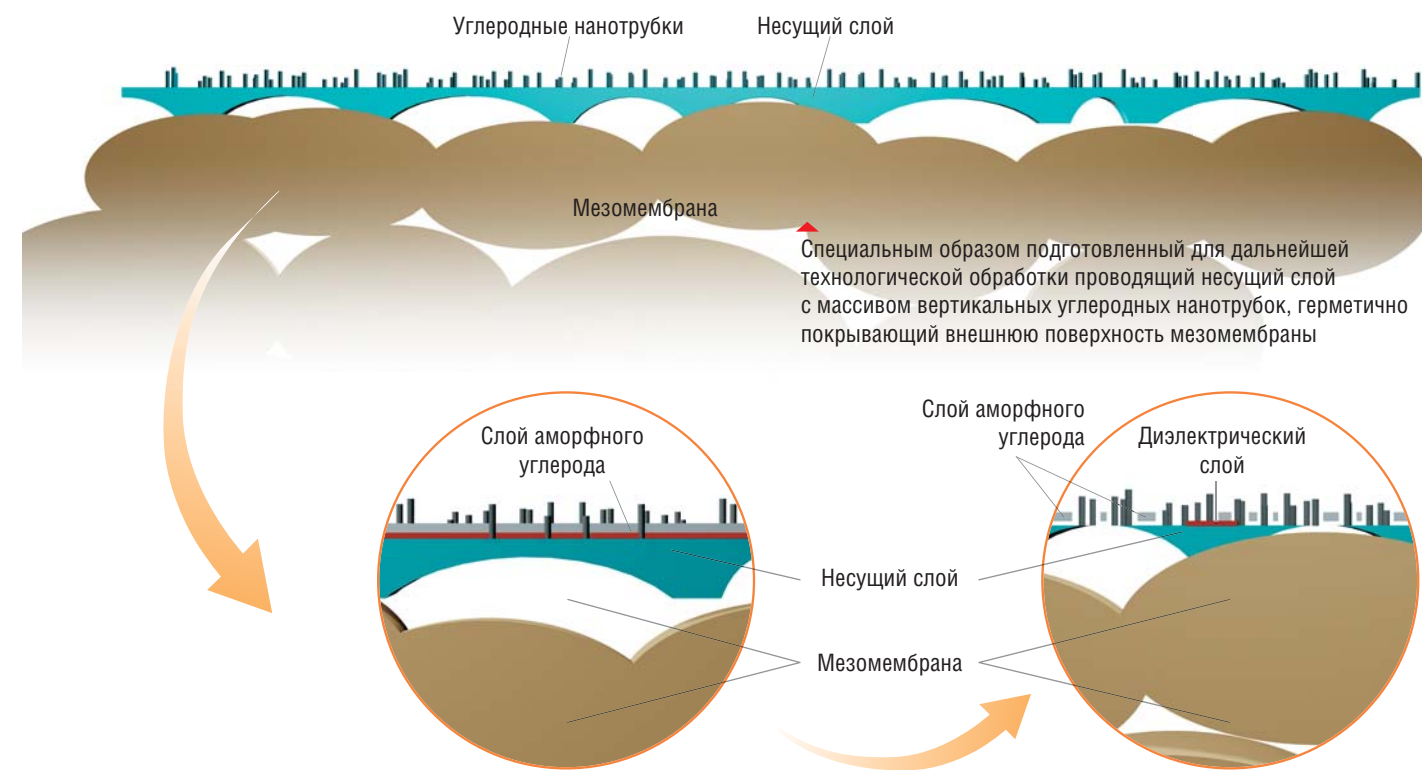
В свою очередь, широчайшую область потенциального применения имеют интегральные электромеханические системы – это системы обработки и хранения информации, сенсорные системы, «умные» электромагнитные материалы и многое другое. В настоящий момент в мире существует ряд проектов интегральных электромеханических систем, выполненных в наномасштабе, но основу их возможного промышленного производства по-прежнему составляет фотолитография с ее ограничениями. В результате можно констатировать, что прорывные продукты на базе наноэлектромеханических систем (НЭМС) в современном мире отсутствуют.

На что это похоже

Предлагаемые в проекте НЭМС-структура и технология ее получения позволяют формировать разнообразные функциональные структуры со степенью интеграции, кардинально превосходящей возможности фотолитографии, при этом сравнительно дешевым способом. Принципиальным отличием предложенных НЭМС-структур является их активность, означающая

В результате процесса локального анодного окисления слоя аморфного углерода (анод) посредством углеродной нанотрубки (катод) между слоем аморфного углерода и углеродными нанотрубками образуются цилиндрические зазоры, величина которых регулируется подаваемым напряжением смещения. Каждая нанотрубка оказывается закрепленной одним концом в дне полученного «стакана»

Этапы формирования НЭМС-структуры, которая является протяженным массивом подобных элементов и представляет собой, по сути, сплошную поверхность управляемых нанопальцев



На несущий слой производится вакуумное напыление диэлектрического слоя и слоя аморфного углерода

Специальным образом подготовленный для дальнейшей технологической обработки проводящий несущий слой с массивом вертикальных углеродных нанотрубок, герметично покрывающий внешнюю поверхность мезомембраны

После проведения процедуры локального анодного окисления слоя аморфного углерода углеродными нанотрубками (образование НЭМС-пор) осуществляется последовательный подтав несущего слоя со стороны мезомембраны и частичное вытравливание диэлектрического слоя для прохода отфильтрованных наночастиц в мезомембрану

Промежуточные стадии получения активного молекулярного сита (процесса формирования монослоя с НЭМС-порами, герметично покрывающего внешнюю поверхность традиционной мембраны). Размеры элементов системы на рисунках показаны условно, на практике степень их взаимного варьирования может быть весьма значительной.

возможность контролируемого электромеханического изменения их функциональных параметров.

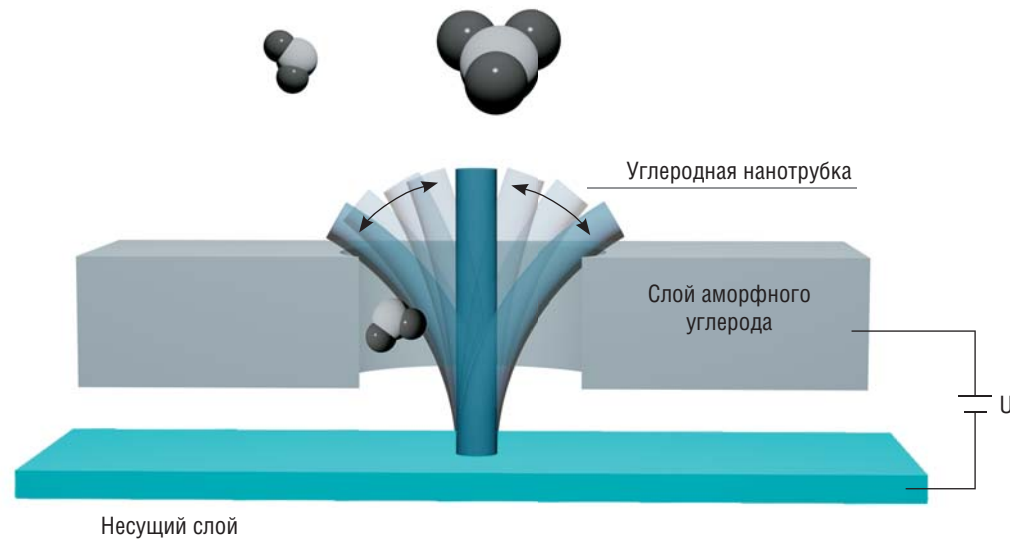
Формирование НЭМС-структуры начинается с создания профилированного проводящего слоя, в порах которого посредством каталитического пиролиза углеродосодержащего газа осуществляется рост вертикальных углеродных нанотрубок (процесс *самоорганизации*). Затем происходит вакуумное напыление на несущий слой диэлектрического слоя (может получаться также при окислении поверхности несущего слоя), а затем – проводящего слоя аморфного углерода. После этого осуществляется впервые предложенный авторами процесс локального анодного окисления слоя аморфного углерода (анод) посредством углеродной нанотрубки (катод). Продуктом реакции окисления в окрестности катода является летучий углекислый газ, что приводит к образованию цилиндрических зазоров

между углеродными нанотрубками и слоем аморфного углерода, величина которых регулируется подаваемым напряжением смещения (процесс *самосовмещения*).

В результате каждая нанотрубка оказывается закрепленной одним концом в дне полученного стакана и может в нем контролируемо изгибаться. Новая НЭМС-структура является протяженным массивом подобных элементов и представляет собой, по сути, сплошную поверхность управляемых нанопальцев.

Активное молекулярное сито

Проиллюстрируем особенности технологии НЭМС-структур на примере формирования *активных наномембран* (другое название – *активное молекулярное сито*), практическое использование которых представляется весьма разнообразным (опреснение морской воды, сис-



Постоянный ток идет по цепи: входной электрод (несущий слой) – управляемый электрод (нанотрубка) – управляющий электрод (слой аморфного углерода) при контакте нанотрубки со стенкой поры (взаимодействие этих электродов определяется силой Кулона). Когда нанотрубка находится в свободном состоянии, через указанную цепь может проходить только переменный ток (при приложении переменного напряжения смещения образуется переменная сила Кулона, приводящая к колебанию нанотрубки, которое, в частности, может быть резонансным)

Схема работы элемента активной наномембраны, препятствующего прохождению частиц, размер которых больше заданного. В случае, если в поре НЭМС застревают какие-либо посторонние частицы, их можно вытолкнуть оттуда посредством колебаний нанотрубки или ее замыкания на стенку поры. Управляемость механическим движением углеродной нанотрубки делает НЭМС-структуру активным наноматериалом

темы фильтрации и очистки, теплоэнергетика и многое другое). Данный класс устройств и метод их реализации предложены впервые.

Традиционные мембраны характеризуются наличием большого массива отверстий (пор) в некоем материале, играющих роль фильтра. Формируемая в результате предлагаемой технологии активная наномембрана представляет собой монослой с НЭМС-порами, герметично покрывающий внешнюю поверхность традиционной мезомембраны. Наличие монослоя препятствует прохождению через мембрану любых частиц, размер которых превышает некоторую заданную величину, находящуюся в пределах от 100 до 0,33 нм.

Прошедшие монослой частицы попадают в систему большего пространственного масштаба и беспрепятственно ее покидают. Если все же в поре НЭМС застревают какие-либо посторонние частицы, их можно вытолкнуть оттуда посредством колебаний нанотрубки или ее замыкания на стенку поры. В последнем случае в нанотрубке появляется постоянный ток, ведущий к росту температуры и давления в поре. При этом пер-

вое стимулирует тепловую десорбцию сорбированных молекул, а второе приводит к механическому выталкиванию из поры ее содержимого (подобно тому, как это происходит у нас при чихании). Интенсивность данного режима самоочистки пор может контролироваться в широких пределах.

Кроме радикального увеличения устойчивости к загрязнению, монослой НЭМС-пор позволяет осуществлять непрерывную настройку своих параметров на целевые молекулы (в том числе *in situ**) с помощью варьирования электрического поля в порах. Кроме того, становится возможным использование кинетических эффектов транспорта через пору (предполагает пере-

* т. е. в процессе функционирования мембраны. В отличие от одноразовой настройки параметров пассивной мембраны на целевые молекулы на этапе ее изготовления, параметры активной мембраны можно изменять до их оптимальной настройки на решаемую задачу

менное электрическое поле), эффекта направленного затягивания молекул из области вблизи входа в пору (обеспечивает выделение из среды молекул с большим дипольным моментом) и многое другое (вплоть до нереализуемого в обычных условиях химического синтеза с одновременным разделением продуктов реакции).

На текущей стадии осуществления проекта показана осуществимость всех операций целевой технологии и получены промежуточные экспериментальные образцы. Теперь необходимо объединение этих операций в рамках единого технологического процесса.

Все основные операции по созданию НЭМС могут осуществляться в одной небольшой реакционной камере специализированной вакуумной установки, что радикально снижает стоимость производства и успешно решает проблему контроля уровня загрязнений.

Проект получил поддержку ГК РОСНАНО для его доработки, включая научно-техническую, патентную и инвестиционную экспертизы. Кроме того, корпорация выразила готовность участвовать в финансировании продолжения научно-исследовательской разработки проекта.

«Проект развивается в Красноярске 1,5 года, и мы рассматриваем Красноярский научный центр как его академическую базу. Сколько бы ни было уже сделано, главное сделать еще предстоит, поэтому нам нужны высококвалифицированные в научно-технической области специалисты. В ближайшее время мы планируем проведение открытых семинаров по проекту с целью усиления команды. Единственное наше требование к профессионалам – любознательность и интерес к теме.

Пока мы работаем вместе с кандидатом технических наук Михаилом Симуниным (сотрудничаем еще со времен МИЭТ) и студентами Сибирского федерального университета. Сейчас намечается тесное взаимодействие с Институтом ядерной физики Томского политехнического университета (<http://magneton-systems.com>), который обладает существенными компетенциями в области вакуумного оборудования и имеет долгосрочную заинтересованность в совместном развитии технологии НЭМС-структур вплоть до стадии промышленного производства» (С. Хартов)

Литература

Симунин М.М., Хартов С.В., Бобринецкий И.И. и др. Установка роста углеродных нанотрубок методом каталитического пиролиза из газовой фазы этанола // Тез. докл. III науч.-практ. конф. «Нанотехнологии – производству 2006»: Фрязино, 2006. – М.: Янус-К, 2006. С. 122–124.

Хартов С.В. Симунин М.М. Селективный датчик газов на основе системы осциллирующих углеродных нанотрубок // Всероссийская молодежная конференция «Электроника – 2007». М.: МИЭТ, 2007. С. 13.

Хартов С.В. Молекулярные сита нового, активного типа и технология их получения // Международный конкурс научных работ молодых ученых в области нанотехнологий в рамках Второго международного форума по нанотехнологиям, 2009. Сборник тезисов. С. 173.

Хартов С.В. Активный метаматериал на основе интегральных НЭМС-структур // Вестн. СибГАУ, 2009. Вып. 4 (25).

Патент № 2349542. РФ. 2009. Наноэлектромеханическая структура (варианты) и способ ее получения (варианты). Заявители: Хартов С.В., Неволин В.К. (начат этап зарубежного патентования).

К. т. н. С. В. Хартов
(Красноярский научный центр, СО РАН)