

АКТИВНЫЙ НАНОВОРСИСТЫЙ МАТЕРИАЛ

Рассматриваются концепция активного нановорсистого материала и технология его получения. Обсуждаются потенциальные практические приложения материала данного типа, приводятся результаты предварительных экспериментов.

Ключевые слова: нанотехнология, активный материал, нанотрубки, НЭМС.

S. V. Khartov, M. M. Simunin

Krasnoyarsk Scientific Center, Siberian Branch of the Russian
Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russia

ACTIVE NANO-FLEECE MATERIAL

We consider the concept of Active nano-fleece material and technology of its production. We review potential practical applications of this type of material and give the results of preliminary experiments.

Key words: nanotechnology, active material, nanotubes, nano electro mechanical systems.

Концепция активного нановорсистого материала¹ (АНВ-материала) предполагает, что каждая нановорсинка имеет расположенный рядом управляющий электрод (управляющий электрод является общим для всех нановорсинок; для ряда конечных приложений управляющий электрод не требуется) [2]. Данный материал потенциально обеспечивает выход на новый уровень в широком спектре хозяйственных задач [3, 4].

Описываемые структуры представляют собой протяжённый массив вертикальных углеродных нанотрубок (или нановолокон), пронизывающих проводящий слой (данный слой выполняет функцию управляющего электрода) и отделённых от него коаксиальными

цилиндрическими зазорами (рис. 1). В общем случае каждый элемент активного нановорсистого материала может иметь различные электрические состояния (различные электрический потенциал/напряжённость генерируемого нановорсинкой электрического поля, интенсивность эмиссии электронов, величина электрического тока и др.), а также различные механические состояния (колебательное состояние и два стабильных энергонезависимых состояния: «свободная нановорсинка» и «нановорсинка в контакте с выходным электродом»; таким образом, в общем случае элементы могут обеспечивать функциональность наноэлектромеханических систем (НЭМС)).

Предложенный способ получения активного нановорсистого материала позволяет обойти ограничения фотолитографии. Это достигается благодаря комбинации процессов самоорганизации и самосовмещения. Первичным процессом, задающим геометрию каждой структуры, является процесс само-

© Хартов С. В., Симунин М. М., 2012

¹ Дефиниция «активный» обозначает, что нановорсинки могут изменять своё состояние. Проект является победителем Конкурса русских инноваций 2009 (проект «Технология интегральных НЭМС-структур»). Журнал «Эксперт» [1].

организации (рост углеродной нанотрубки). На следующем этапе задействуются физические механизмы, обеспечивающие трансляцию геометрии выращенной углеродной нанотрубки на управляющий электрод. Для этого впервые предложен метод, основанный на эффекте локального анодного окисления, позволяющий достичь эффекта самосовмещения управляющего электрода и обеспечивающий минимизацию зазора управляющий электрод – углеродная нанотрубка (предел разрешающей способности метода – 0,33 нм). В итоге ключевые геометрические параметры получаемых элементов могут контролироваться на нанометровом и субнанометровом уровнях, а теоретический предел степени интеграции достигает 10^{16} м^{-2} (соответствует площади одного элемента $10 \times 10 \text{ нм}$) без использования какого-либо вида литографии. Отдельно отме-

глобальный характер, адресация отдельных нановорсинок не требуется.

Разработанная базовая технология получения активного нановорсистого материала непосредственно масштабируется до промышленного уровня.

Технология обеспечивает получение нановорсистых покрытий на подложках с произвольной геометрией поверхности. Достижимая на текущий момент поверхностная плотность управляемых нановорсинок составляет 100 штук на 1 мкм^2 (в 200 раз больше, чем число элементов в современных интегральных схемах Intel).

Техпроцесс характеризуется простотой и нетребовательностью. В частности, вместо кремниевых подложек могут быть использованы дешёвые металлические фольги, в том числе алюминиевые, с произвольной геометрией

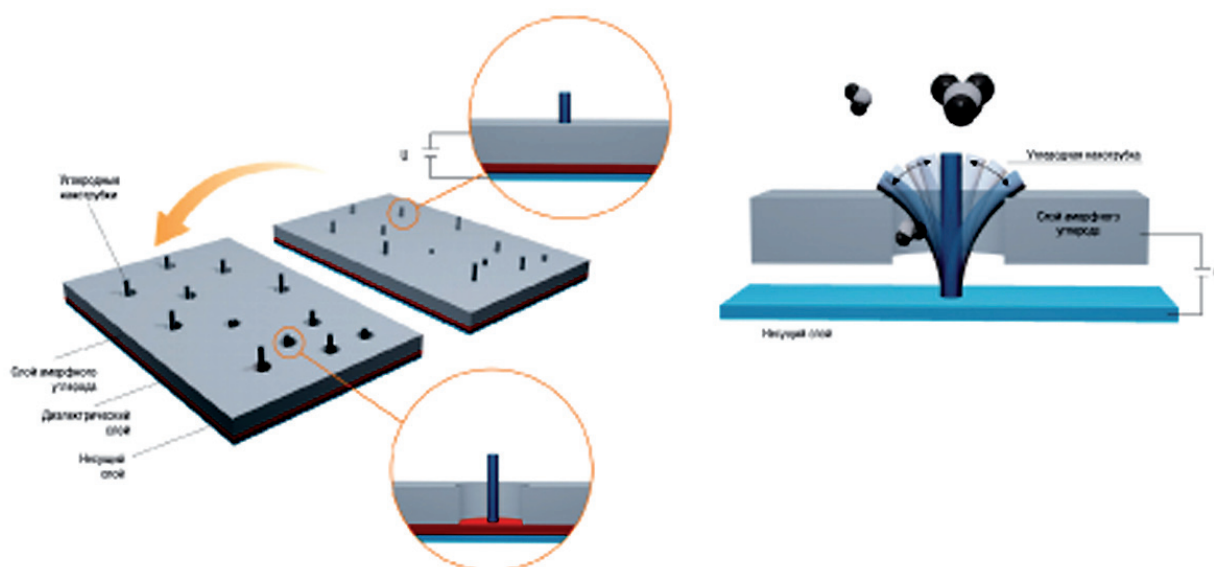


Рис. 1. Схематичное изображение: слева – массив НЭМС-структур; справа – НЭМС-структура в разрезе (нанотрубка показана в состоянии колебательного движения; рядом для примера показаны молекулы детектируемого газа). Слой, обозначенный на рисунке как «несущий», выполняет функцию входного электрода. Роль управляющего электрода (он же – выходной электрод) выполняет второй проводящий слой (слой металла или аморфного углерода). Входной и управляющий слои разделены слоем диэлектрика

тим, что получаемый в рамках метода управляющий электрод является общим для всех нановорсинок. Для тех приложений, где необходима адресация отдельных нановорсинок, используется резонансная координата адресации и/или разделение общего массива нановорсинок на отдельные области (посредством фотолитографии низкого разрешения). Для ряда практически важных приложений, носящих в том числе

поверхности (рис. 2). Обеспечивается низкая стоимость единицы площади АНВ-материала (до 0,3 руб. за 1 см^2), а также впервые реализуется возможность производства интегральных структур в виде протяжённого материала (рассчитанная технологическая линия ориентирована на выпуск листов габаритами $3 \times 3 \text{ м}$; реализованная на текущий момент экспериментальная линейка оборудования обеспечи-

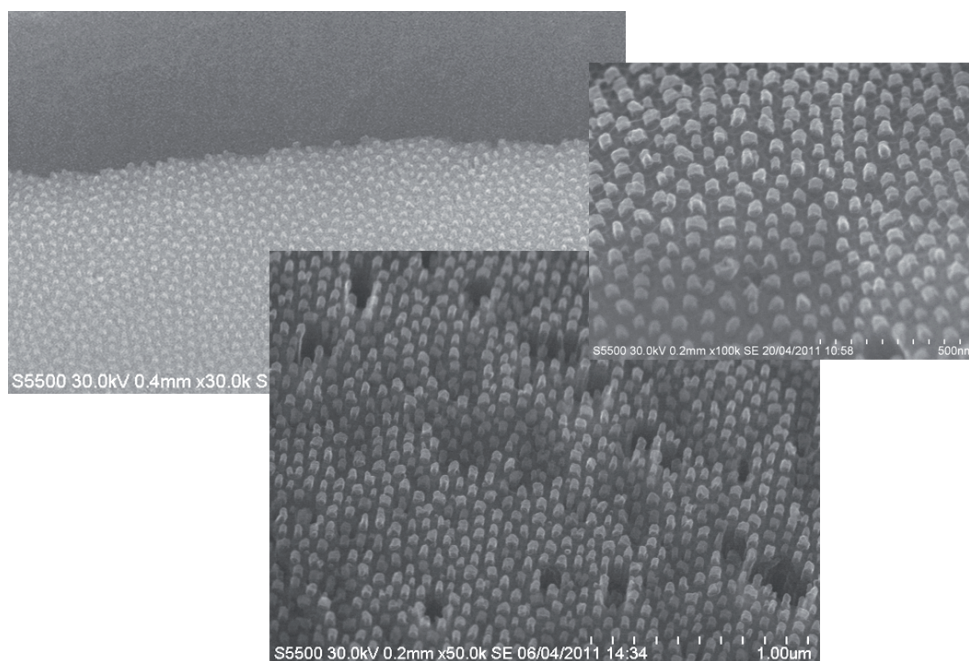


Рис. 2. Вид поверхности образца АНВ-материала (без управляющего электрода); РЭМ-изображения под углом 30 градусов. Вершины нановорсинок выступают на длину 50–70 нм (аспектное соотношение выступающей части может быть увеличено). Длина погружённой в диэлектрик части нановорсинок задаётся в диапазоне 0,2–20 мкм. С обратной стороны нановорсинки подключены к входному электроду

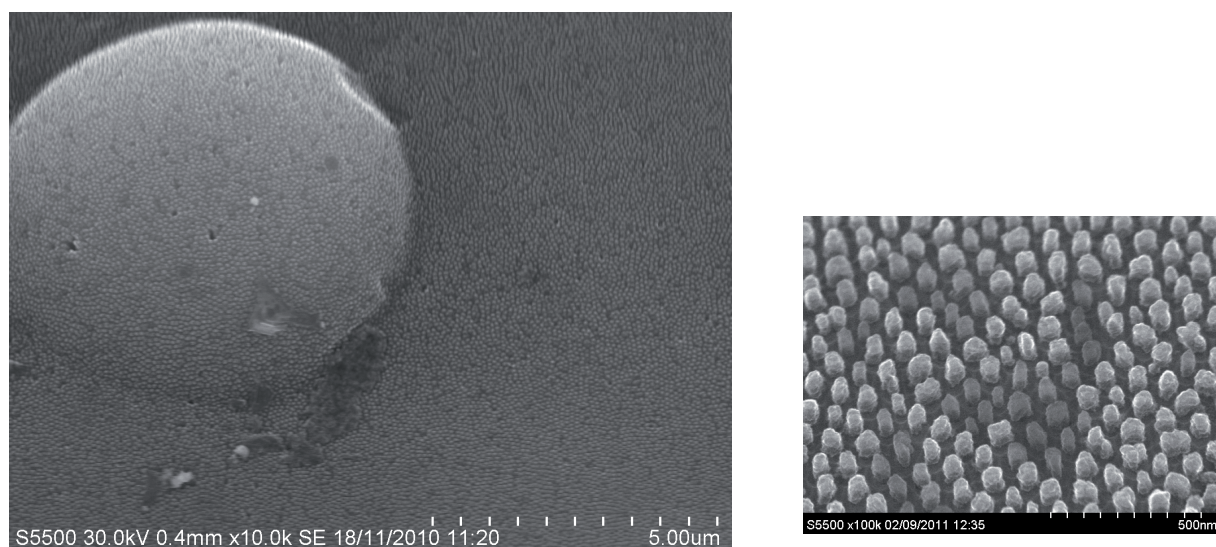


Рис. 3. Массив нановорсинок, покрывающий существенно непланарную поверхность (особенность рельефа исходной коммерческой алюминиевой фольги). Демонстрирует гибкость метода формирования структур, его лояльность к существенным отклонениям используемых материалов. Подобный результат недостижим в случае формирования рисунка катализатора и/или зазоров между нановорсинками средствами традиционной фотолитографии

вает формирование нановорсистого слоя на подложках 2,5х2,5 см).

Приведённые на рис. 2, 3 изображения соответствуют образцам с малым аспектным соотношением оголенной части нановорсинок (длина погружённой в диэлектрик части может быть задана в диапазоне 0,2–20 мкм и

более), в силу чего нановорсинки не имеют механической степени свободы. Случай коротких неподвижных нановорсинок отвечает требованиям, выдвигаемым со стороны первых приложений материала, приоритетных с точки зрения возможных сроков вывода на рынок.

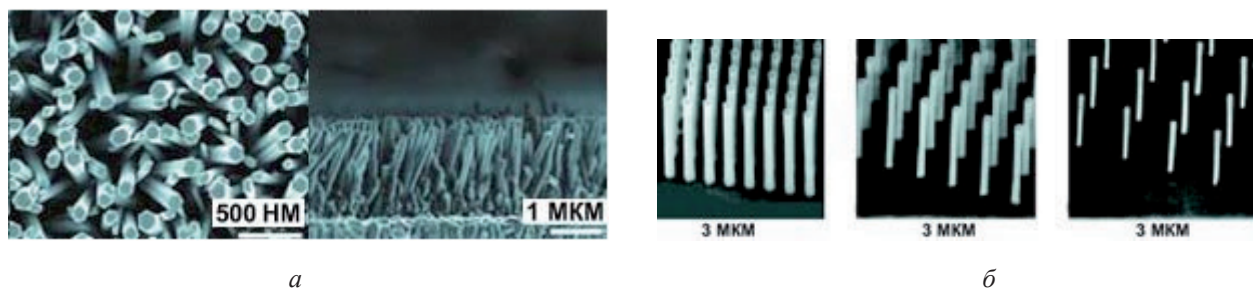


Рис. 4. Ворсистая структура из оксида цинка, полученная китайскими исследователями (а); «Нанотрава» Bell Labs, полученная методом плазмохимического травления кремния через маску РЭМ изображения (б)

С точки зрения формирования систем в виде нановорсистого материала к числу конкурентных решений следует отнести работы китайских исследователей (рис. 4, а) и американской Bell Labs (рис. 4, б). Первые работают над материалом, поверхность которого образована густо расположенными «ворсинками» диаметром 50–150 нм, выполненными из оксида цинка [6]. Оксид цинка обладает способностью переходить из гидрофобного в гидрофильное состояние под действием ультрафиолета. К недостаткам данного решения следует отнести большое время переключения между состояниями, отсутствие входного и управляющего электродов, что не позволяет говорить о большей части функциональности, присущей разрабатываемому в настоящем проекте АНВ-материалу. В Bell Labs работают над наноструктурой, названной «нанотрава» (рис. 4, б). В отличие от китайской структуры, ворсинки которой расположены хаотически, структура Bell Labs характеризуется высокой степенью регулярности [7]. Однако для её получения используется электронная литография, что связано с соответствующими техническими и стоимостными ограничениями. Как и в случае китайского варианта структуры, «нанотрава» Bell Labs не имеет в составе управляющего электрода, что радикально снижает возможную функциональность материала.

Поскольку в АНВ-технологии для решения задачи разделения и механического закрепления углеродных нанотрубок/нановолокон в массиве применён известный подход, заключающийся в использовании в качестве матрицы пористого анодного оксида алюминия (ПАОА), то в числе конкурентных решений следует отметить также все методики формирования массивов одномерных структур в матрице ПАОА. Последний формируется методом самоорганизации в рамках жидкофазно-

го процесса, соединяющего конкурирующие процессы роста оксида и его травления. В результате возникает регулярная структура пор. Далее в порах ПАОА могут формироваться такие объекты, как металлические и полупроводниковые стержни, углеродные нанотрубки, нано волокна и др. Оригинальной частью в разработанной технологии являются:

- наличие самосовмещённого с нановорсинками управляющего электрода (принципиальное отличие). Применён оригинальный метод самосовмещения;
- способ подведения входного электрода к нановорсинкам в массиве [3]. Обеспечивается омический контакт к электроду для подложек произвольной площади и геометрии. Не требуется применение дорогостоящих вакуумных средств напыления;
- способ оголения верхних участков нановорсинок. Обеспечивается однородное оголение нановорсинок по поверхности подложки для подложек произвольной площади и геометрии. Длина оголённой части может варьироваться. Не требуется применение ионного травления. Решена традиционная проблема неоднородности травства матрицы Al_2O_3 жидкостными травителями (проблема решена исключительно для рассматриваемой системы).

В своей совокупности указанные особенности обеспечивают достижение нового технического результата и расширяют практическую применимость структур на основе ПАОА.

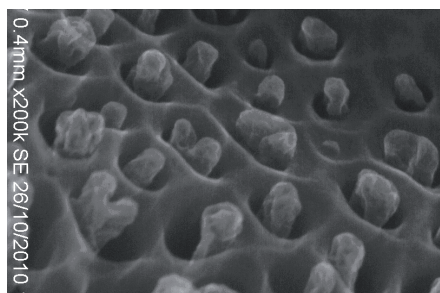
На основе активного нановорсистого материала предложен целый ряд конечных продуктов, приоритетных с точки зрения практической значимости и возможных сроков вывода на рынок.

Солнечные батареи нового поколения. Все существующие в настоящее время солнечные батареи основаны на фотоэффекте.

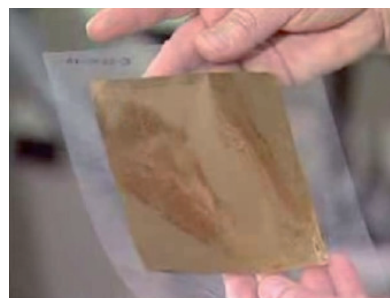
Указанный эффект предполагает использование квантовых свойств света: свет проявляет себя как поток частиц, обладающих импульсом (поток фотонов). Основным недостатком систем на основе фотоэффекта является их относительно низкий КПД (в среднем около 15 %; дальнейшее повышение КПД требует многослойных гетероструктур, концентраторов света и т.п.).

Входящая в современный уровень техники элементная база не обеспечивает решения указанной задачи.

Разрабатываемый в проекте АНВ-материал может выполнять функцию двумерного массива наноантенн, в котором каждая наноантенна окружена управляющим электродом, отделённым нанометровым зазором (рис. 5, б). Указанная организация системы и



а



б

Рис. 5. Американскими исследователями создан массив наноантенн в слое полимера (а) [8]. Данная система преобразует солнечное излучение в тепло (позиционируется как экран для видимого и ИК-излучения). Препятствием на пути преобразования излучения в электроэнергию является проблема распрямления электрического потенциала частотой 10–100 ТГц. В рамках активного нановорсистого материала (б) данная проблема получает своё решение

Между тем свет является электромагнитной волной и может быть преобразован в электрический потенциал при помощи антенны, подобно тому, как в радиотехнике преобразуются электромагнитные волны радиодиапазона. Согласно общему правилу линейные размеры антенны должны быть сопоставимы с длиной принимаемой электромагнитной волны. Таким образом, для прямого преобразования света необходимы антенны, протяжённость которых составляет доли микрометра. Получение массива данных наноантенн не представляет существенной технической трудности [8, 9, 10]. Так, американские исследователи из U.S. Department of Energy's Idaho National Laboratory сообщили об успешном формировании массива наноантенн в слое полимера [8] (рис. 5, а). Благодаря распределённому в полимере наноантеннам последний мог улавливать электромагнитное излучение видимого и ИК-диапазонов и преобразовывать его в тепло (актуально для создания полимерных тепловых экранов). Как отмечают американские исследователи, для преобразования коротковолнового электромагнитного излучения не в тепло, а в электроэнергию необходимо решить проблему выпрямления напряжения, осциллирующего с частотой 10–100 ТГц.

свойства нановорсинок (высокая эффективность полевой эмиссии электронов) позволяют решить ключевую проблему выпрямления осциллирующего напряжения и вывести электрическую мощность во внешнюю цепь. Лежащий в основе выпрямления эффект основан на анизотропии свойств вакуумного контакта нановорсинка – управляющий электрод. Количественные оценки характерного времени туннелирования показывают, что данный механизм сепарации заряда соответствует частотам ИК и видимого спектров.

К преимуществам описанного решения следует отнести:

- высокий КПД. В отличие от солнечных батарей, основанных на фотоэффекте, внутренний КПД преобразования электромагнитного излучения наноантеннами может составлять более 90 % [8]. Реализуемый активным нановорсистым материалом способ выпрямления обеспечивает утилизацию половины периода осцилляций электрического потенциала, в силу чего верхний предел итогового КПД составляет около 45 %;
- целевой диапазон преобразуемого электромагнитного излучения, расширяющийся на всю видимую область, включая её длинноволновую часть, а также на область инфра-

красного (теплого) излучения. Это составляет существенное отличие от батарей, основанных на фотоэффекте, восприимчивых только к коротковолновой части видимого диапазона. Интенсивность инфракрасной области спектра солнечного излучения составляет около 50 % от его совокупной интенсивности. В силу указанного обстоятельства верхний предел КПД солнечных батарей на основе АНВ-материала эквивалентен 90 % КПД традиционных батарей, основанных на фотоэффекте. Солнечные батареи на новом принципе работы могут функционировать также ночью и в плохую погоду, преобразуя тепловое излучение окружающих объектов. Кроме того, возможность работы с длинноволновой частью спектра снижает чувствительность солнечных батарей к загрязнению их поверхности. Низкая стоимость единицы площади солнечной батареи (до 3 тыс. руб. на 1 м²) обеспечивается стоимостными параметрами базовой технологии активного нановорсистого материала.

Текущее состояние по приложению АНВ-технологии в области солнечных батарей. Имеется экспериментальная технология формирования нановорсистых поверхностей с управляющим электродом. Данная технология нуждается в дополнительной отработке с целью обеспечения самосовмещения нановорсинок и электрода по всей площади подложки (в настоящее время показано самосовмещение в локальных зонах). Возможность самосовмещения по всей площади заложена в технологию, в частности, имеется механизм самоликвидации шунтирующих закороток. Основными факторами отсутствия на текущий момент технологии с самосовмещением по всей подложке являются малое время экспериментальных работ и отсутствие собственной технологической установки вакуумного напыления тонких плёнок (в настоящее время указанная установка приобретена, производятся пуско-наладочные работы).

Имеются косвенные экспериментальные подтверждения функционирования рассматриваемой системы, включающие регистрацию ЭДС в системе «терморасширенный графит – алюминиевая пластина», имеющей аналогичный анизотропный вакуумный контакт. Также имеется подтверждение сепарации электрического заряда в системе АНВ-материала без управляющего электрода, в результате кото-

рой нановорсинки и окружающий их диэлектрик заряжаются противоположным образом. Данное поведение напрямую связывается с эффектом односторонней эмиссии электронов из нановорсинок и последующей сорбции данных электронов поверхностью диэлектрика.

В процессе разработки находится компьютерная модель взаимодействия массива наноантенн с внешним электромагнитным излучением. Предложен метод настройки АНВ-технологии, направленный на обеспечение предсказанных моделью оптимальных геометрических параметров массива наноантенн.

Таким образом, на текущий момент необходимы доработка базовой технологии, изготовление экспериментальных образцов АНВ-солнечных батарей и экспериментальное исследование закономерностей эффекта преобразования электромагнитного излучения.

В качестве важного фактора, способствующего развитию указанного направления, следует рассматривать осуществляемое в настоящее время прямое включение в работу над проектом одного из признанных специалистов в области взаимодействия электромагнитного излучения с микро- и наноструктурами Б. А. Беляева (зав. лабораторией электродинамики Института физики им. Киренского СО РАН). С участием Б. А. Беляева в том числе начаты исследования детекторных и преобразующих свойств рассматриваемых систем.

Износостойкое покрытие на основе АНВ-материала. Контакт АНВ-материала с ответным твёрдым телом происходит по вершинам выступающих многослойных углеродных нанотрубок. В имеющихся образцах данные вершины расположены на расстоянии 100 нм друг от друга и имеют радиус закругления около 20 нм (см. рис. 2).

Можно предположить следующие преимущества механического контакта рассматриваемого типа.

1. Уменьшение площади контакта (аперсы нановорсинок расположены на расстоянии 100 нм друг от друга).

2. Использование свойств двумерного кристалла. Вершины нановорсинок представляют собой совокупность монослоёв графита околосферической формы. Монослой графита является двумерным кристаллом, и его наиболее энергетически сильные связи заняты в плоскости кристалла. Это обеспечивает минимальную адгезию поверхности кристалла к контактирующему веществу (данное свойство

проявляется в трибологических качествах графита как такового).

Первый и второй факторы должны способствовать минимизации коэффициента трения с нановорсистым материалом (в случае достаточной твёрдости ответного материала).

3. Повышенная износостойкость. Связь между атомами углерода в плоскости графита является наиболее прочной из известных одноэлементных химических связей (sp^2 -гибридизация; указанная связь прочнее sp^3 связей в алмазе, в силу чего углеродные нанотрубки, в частности, характеризуются сверхвысокой радиационной стойкостью). Данное обстоятельство в совокупности с двумерной организацией кристалла, является предпосылкой к высокой износостойкости материала. Оксид алюминия (Al_2O_3), заполняющий зазоры между нанотрубками, также относится к материалам высокой твёрдости и износостойкости (в настоящее время монокристаллический оксид алюминия применяется, в частности, в качестве основания упорных подшипников в механических часах). Касательно вопроса износостойкости следует отметить существование механизма «самозатачиваения». Протяжённость внедрённой в Al_2O_3 части углеродных нанотрубок может достигать как минимум 20 мкм (верхний предел длины на текущий момент не установлен). По мере износа выступающей части углеродных нанотрубок будет инициироваться опережающий износ матрицы Al_2O_3 с результирующим освобождением следующего участка углеродных нанотрубок. Цикл износ/оголение нанотрубок может повторяться до полного исчерпания длины нанотрубок.

Следует также отметить предпосылки к реализации в рамках АНВ-материала эффекта твёрдой смазки. Известен ряд работ, в которых в качестве эффективной твёрдой смазки используется аэрогель из графитовых и/или графеновых слоёв. Входящие в состав АНВ-материала углеродные нанотрубки по мере своего износа также будут генерировать графитовые/графеновые слои, которые, находясь в пятне контакта, уменьшают степень механического сцепления.

4. Возможность осуществления электрического контакта через АНВ-покрытие. Углеродные нанотрубки насквозь пронизывают слой Al_2O_3 и образуют омический контакт с несущей подложкой (в имеющихся образцах её роль выполняет слой меди или алюминия;

планируется отработка технологического маршрута для формирования АНВ-покрытия на стали). Таким образом, в пятне контакта АНВ-покрытия с ответным твёрдым телом обеспечивается около 100 электрических контактов на 1 мкм^2 поверхности.

Текущее состояние по приложению АНВ-технологии в области износостойких покрытий. Как отмечалось выше, создана экспериментальная линейка технологического оборудования для получения АНВ-материала на алюминиевых и медных подложках диаметром 25 мм. Трибологические испытания материала на текущий момент не проводились. Основными факторами отсутствия указанных испытаний являются фактор времени, а также специфика большей части оборудования для испытаний материалов на износ. Данное оборудование ориентировано на стальные или сравнимые с ними по твёрдости образцы. В получаемых на текущий момент образцах АНВ-слой имеет толщину не более 20 мкм и закреплён на относительно мягких материалах (алюминий или медь). Хотя сам АНВ-слой обладает высокой твёрдостью, при осуществлении точечного контакта с образцом происходит пластическая деформация металла, находящегося под АНВ-слоем, в результате чего последний подвергается нормальной нагрузке и начинает работать на излом.

Для техпроцесса формирования АНВ-слоя на твёрдых поверхностях, в том числе стальных, необходима экспериментальная отработка и проведение полного цикла трибологических испытаний АНВ-материала на технологической установке вакуумного напыления тонких плёнок.

Также предполагается расширение возможностей технологического процесса АНВ-материала посредством повышения температуры синтеза с 600 до 900 °С, что имеет значение с точки зрения внутренней структуры нановорсинок и связанных с ней параметров.

Виброакустический источник энергии. Данное приложение АНВ-материала находится на уровне поисковых исследований.

В массивных твёрдых телах, таких как фундаменты и стены зданий, мосты, плиты набережных, дорожное покрытие, скалистые области земной коры и др., в каждый момент времени распространяются волны упругих деформаций. Амплитуда указанных переменных деформаций мала, однако в силу высоких

нагруженности и модуля Юнга материалов таких конструкций запасённая в них удельная упругая энергия может существенно превосходить удельную энергию, поступающую от Солнца на поверхность Земли. В случае создания функциональных слоёв, способных преобразовывать виброакустическое поле в электроэнергию, возникает возможность создания энергетики на основе волн упругой деформации, распространяющихся в земной коре и расположенных на ней объектах. Если стоимость единицы площади преобразующих слоёв не будет превосходить таковую для солнечных батарей, то рассматриваемая энергетика по параметру рентабельности может существенно превзойти энергетику солнечную. В контексте эксплуатации данного вида энергии следует отметить, что для виброакустических батарей, внедрённых в объём массивных твёрдых тел, могут быть неактуальны такие

АНВ-элементов пьезоэлектрического материала (рис. 6).

В режиме источника энергии механическая деформация пьезоэлектрических прослоек, обусловленная прохождением виброакустической волны к нормали поверхности АНВ-материала, приводит к генерации разности потенциалов между нановорсинкой и управляющим электродом. Поскольку все нановорсинки подключены к входному электроду параллельным образом, то ЭДС работы каждого элемента «нановорсинка – выходной электрод» аддитивно суммируются.

Указанная концепция распределённого наноструктурированного преобразователя волн упругих деформаций и способ его реализации предложены впервые.

Относительно рассматриваемого приложения следует отдельно отметить наличие феномена гигантского пьезоэффекта, связан-

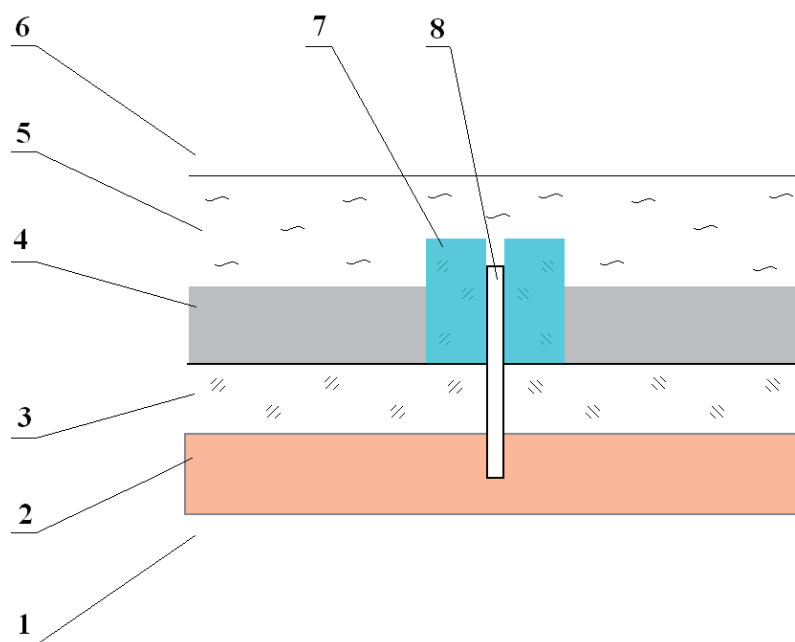


Рис. 6. Схематическое изображение АНВ-элемента с пьезоэлектрическим материалом в зазоре нановорсинка – выходной электрод: 1, 6 – твёрдое тело, в которое встраивается АНВ-слой; 2 – входной электрод; 3 – слой диэлектрика; 4 – выходной электрод; 5 – слой с низким коэффициентом жёсткости; 7 – пьезоэлектрик; 8 – нановорсинка

характерные для солнечной энергетики проблемы, как загрязнение и деградация поверхности, зависимость эффективности работы от времени суток, погодных условий и географической широты.

Реализация данного подхода предполагает размещение в кольцевых зазорах

ного с существенным ростом пьезомодуля при переходе к пьезоэлектрикам в наноразмерном форм-факторе [11]. Это обеспечивает рост эффективности преобразования для системы с АНВ-геометрией по сравнению с макроскопическими пьезоэлектрическими преобразователями.

Текущее состояние по приложению АНВ-технологии в области виброакустических источников энергии. Создана экспериментальная линейка технологического оборудования для получения АНВ-материала на подложках диаметром 25 мм. Данный материал содержит массив коаксиальных электродов, которые могут быть использованы для съёма электрического потенциала с пьезоэлектрика, внедрённого в зазор между указанными электродами. Как отмечалось в разделе о АНВ солнечных батареях, данная технология нуждается в дополнительной отработке с целью обеспечения самосовмещения нановорсинок и электрода по всей площади подложки (в настоящее время показано самосовмещение в локальных зонах). Кроме того, для рассматриваемого приложения необходима разработка дополнительной операции осаждения пьезоэлектрика в зазоры между электродами.

Таким образом, на текущий момент необходимы доработка базовой технологии, разработка дополнительной операции к базовой технологии, изготовление экспериментальных образцов АНВ виброакустических батарей и экспериментальное исследование закономерностей их функционирования. В целом рассматриваемое приложение АНВ-материала находится на уровне поисковых исследований.

Кроме указанных выше приложений, сохраняются актуальными приложения АНВ-технологии в области самоочищающихся покрытий, распределённых источников света, а также мембранное, сенсорное, эмиттерное и некоторые другие приложения. В целом разрабатываемая технология характеризуется макроэкономическим потенциалом. Отдельные продукты технологии, по оценкам авторов, могут быть доведены до этапа организации производства за 1,5–2 года.

Библиографические ссылки

1. www.expert.ru/expert/2009/21/ne_zabyli_o_tvorchestve
2. Хартов С. В. Активный метаматериал на основе интегральных НЭМС-структур // Вестник СибГАУ. 2009. Вып. 4 (25). С. 49–53.
3. 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: сб. тезисов. М., 2009. С. 173.
4. Хартов С. В. Активный нановорсистый материал – новый способ опреснения морской воды // Международный конкурс научных работ молодых ученых в области нанотехнологий в рамках Четвёртого Международного форума по нанотехнологиям, Москва, 2011. С. 214. М., 2011.
5. www.nantero.com
6. Badre C., Pauport T., Turmine M., Lincot D. A ZnO nanowire array film with stable highly water-repellent properties // Nanotechnology. 18 (2007). 365705 (4pp).
7. Shieh J. et al. Plasma-made silicon nanograss and related nanostructures // Appl. Phys. 44 174010. 2011.
8. Kotter D. K., Novack S. D., Slafer W. D. et al. Solar nantenna electromagnetic collectors // Proceedings of Energy Sustainability. 2008. Jacksonville, Florida USA.
9. Wang Y., Kempa K., Kimball B. et al. Receiving and transmitting light-like radio waves: Antenna effect in arrays of aligned carbon nanotubes // Appl. Phys. Lett. 85. 2607. 2004.
10. Muhlschlegel P., Eisler H. J., Martin O. J. F. Resonant optical antennas // Science 308.1607–1609. 2005.
11. Majdoub M. S., Sharma P., Çağın T. Dramatic enhancement in energy harvesting for a narrow range of dimensions in piezoelectric nanostructures // PHYSICAL REVIEW B 78. 121407. R. 2008.