

АКТИВНЫЙ МЕТАМАТЕРИАЛ НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ НЭМС-СТРУКТУР*

Рассмотрен метод получения плотно упакованных наноэлектромеханических систем (НЭМС), основанный на оригинальной комбинации процессов самоорганизации и самосовмещения. Обсуждены функциональность НЭМС-структур, возможные области применения наноматериала, образованного двумерным массивом данных структур. Приведены результаты предварительных экспериментов, реализующих предлагаемую НЭМС-технологию.

Ключевые слова: наноэлектромеханические системы (НЭМС), углеродные нанотрубки, НЭМС-сенсоры, активные наномембраны, активный наноматериал.

Исторически первые функциональные структуры, применяемые человеком для манипулирования веществом и информацией, были механическими – от каменного топора до печатных станков и арифмометров. С изобретением во второй половине XX в. транзистора в оперировании информацией произошел переход к системам, полностью основанным на электронном принципе действия. Это открыло путь к грандиозному увеличению эффективности обработки информации. Однако интересен, а на самом деле – вполне закономерен тот факт, что на новом уровне миниатюризации механика не только не потеряла своей актуальности, но именно на ее основе может быть осуществлен следующий прорыв, причем как в манипулировании информацией (участие в данном процессе вещества и энергии – вынужденная необходимость), так и в манипулировании веществом (участие вещества и энергии есть содержательная часть этого процесса). Особо перспективным направлением является объединение электрической и механической основ работы в рамках единой электромеханической структуры. Однако в настоящее время внедрение интегральных электромеханических систем сдерживается ограничениями, накладываемыми прежде всего существующей технологией производства, в основе которой лежит традиционный метод, заимствованный у кремниевой электроники, – метод фотолитографии. И хотя в ряде проектов [1; 2] используются методики жертвенного слоя и внесение в структуру объектов самоорганизации, что позволяет размерам отдельных элементов в составе функциональных структур выйти за пределы разрешающей способности фотолитографии, однако общая степень интеграции таких структур остается жестко связанной с техническими характеристиками последней. В итоге инновационных продуктов, основанных на наноэлектромеханических системах (НЭМС), на сегодняшний день пока не предложено.

Интегральные НЭМС-структуры и способ их получения. Рассмотрим основные особенности технологии получения плотно упакованных НЭМС-структур. Первичным процессом, задающим геометрию структуры, является процесс роста массива вертикальных углеродных нанотрубок. Данный процесс относится к процессам самоорганизации, в силу чего получаемые на его выходе углеродные нанотрубки характеризуются высокой степенью структурного совершенства, а их диаметр может

достигать 0,7 нм. Столь малые объекты, обладающие совершенной структурой, могут быть получены только в рамках методов самоорганизации (методов «снизу-вверх»), вне зависимости от возможных перспектив развития методов литографии (методов «сверху-вниз»).

Получение массива касающихся друг друга вертикальных углеродных нанотрубок является классическим приложением метода осаждения из газовой фазы для роста углеродных нанотрубок. Однако для создания массива НЭМС-структур необходим массив разрозненных вертикальных углеродных нанотрубок, разделенных достаточно протяженными зазорами. Для обеспечения разделения нанотрубок зазорами и их механического закрепления в вертикальном положении предполагается использовать рост углеродных нанотрубок на каталитических частицах, внедренных в поры подложки из оксида алюминия или титана, при этом вертикальные стенки пор задают направление роста нанотрубок (отметим, что для внедрения катализатора в поры была разработана оригинальная методика никелевого золь-гель-катализатора). Далее на подложке с массивом вертикальных углеродных нанотрубок производится формирование трех функциональных слоев: слоя металла (входной электрод), слоя аморфного углерода (выходной или управляющий электрод) и разделяющего их диэлектрического слоя. На следующем этапе задействуются физические механизмы, обеспечивающие трансляцию геометрии каждой выращенной углеродной нанотрубки на управляющий электрод. Для этого впервые предложен и реализован метод самосовмещения, основанный на локальном анодном окислении (ЛАО) управляющего электрода посредством углеродной нанотрубки.

Одним из наиболее известных технологических приложений сканирующей атомно-силовой микроскопии является модификация свойств проводящей подложки посредством процесса окисления, индуцируемого при помощи зонда атомно-силового микроскопа [3]. В силу того что реакция окисления опосредована зондом, она носит локальный характер. При этом достигается высокое пространственное разрешение, которое определяется геометрическими характеристиками зонда атомно-силового микроскопа, а именно – эффективным радиусом его закругления. Поскольку к зонду атомно-силового микроскопа прикладывается отрицательный полюс напряжения

* Работа выполнена при финансовой поддержке Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг.

смещения (катод), а к обрабатываемой подложке – положительный полюс (анод), то данный процесс является анодным окислением.

Несмотря на то что метод ЛАО демонстрирует высокое пространственное разрешение, превосходящее этот показатель для фотолитографии, данный метод следует отнести скорее к технике эксперимента, чем к технологии, поскольку в его основе лежит принцип последовательной обработки, который предполагает рост затрат времени пропорционально количеству формируемых элементов. Данное обстоятельство является главным ограничением технологических возможностей сканирующей зондовой микроскопии как таковой.

Покажем, как можно совместить функцию инструмента литографии (в данном случае – функцию зонда, инициирующего ЛАО) и функцию управляемого элемента формируемой НЭМС-структуры. Для этого каждую углеродную нанотрубку выращенного на подложке массива следует рассматривать в качестве стационарного аналога зонда атомно-силового микроскопа. Сформировав слой проводящего материала так, чтобы он контактировал с такой нанотрубкой (в рассматриваемом нами случае это слой управляющего электрода) и подав между ним и нанотрубкой напряжение смещения соответствующей полярности, можно инициировать окисление данного слоя в локализованной относительно нанотрубки области. При этом если продукты окисления относятся к летучим соединениям, то для получения зазора между нанотрубкой и проводящим слоем не требуется проведения дополнительных операций.

В качестве примера материала проводящего слоя, удовлетворяющего данному условию, может рассматриваться аморфный углерод. В процессе анодного окисления углеродная нанотрубка играет роль катода и остается стабильной, в то время как слой аморфного углерода играет роль анода и окисляется в граничной с нанотрубкой области с образованием CO_2 . Получаемые на выходе этого процесса структуры представляют собой массив разрозненных вертикальных углеродных нанотрубок, пронизывающих слой управляющего электрода и отделенных от него коаксиальными цилиндрическими зазорами (рис. 1).

Следует отметить, что нанотрубки, показанные на рис. 1, б, получены на учебно-исследовательской установке CVDompa в условиях, по степени чистоты близких к бытовым, в силу чего их структура характеризуется существенной дефектностью. Однако данный пример показывает, что даже в таких экстремально грязных с точки зрения традиционной микроэлектроники условиях организируются целостные проводники диаметром 15...20 нм, что превосходит возможности фотолитографии. В более чистых условиях могут быть получены углеродные нанотрубки высокой степени структурного совершенства.

Интересные возможности открываются, если в качестве материала управляющего электрода использовать химически инертный металл (например, золото), а в качестве управляемого элемента – многослойную углеродную нанотрубку. В этом случае замена полярности приложенного напряжения смещения на обратную позволит инициировать анодное окисление уже не управляющего электрода, а как минимум одного внешнего слоя

самой нанотрубки. Это приводит к удалению внешних слоев многослойной нанотрубки. Минимальная величина полученного таким образом зазора, отделяющего нанотрубку от золотого электрода, будет строго соответствовать межслойному расстоянию в углеродной нанотрубке, равному 0,33 нм. Данную величину можно рассматривать как предельное значение разрешающей способности предлагаемого метода самосовмещения управляющего электрода. Помимо малой ширины, такой зазор будет характеризоваться и совершенной структурой.

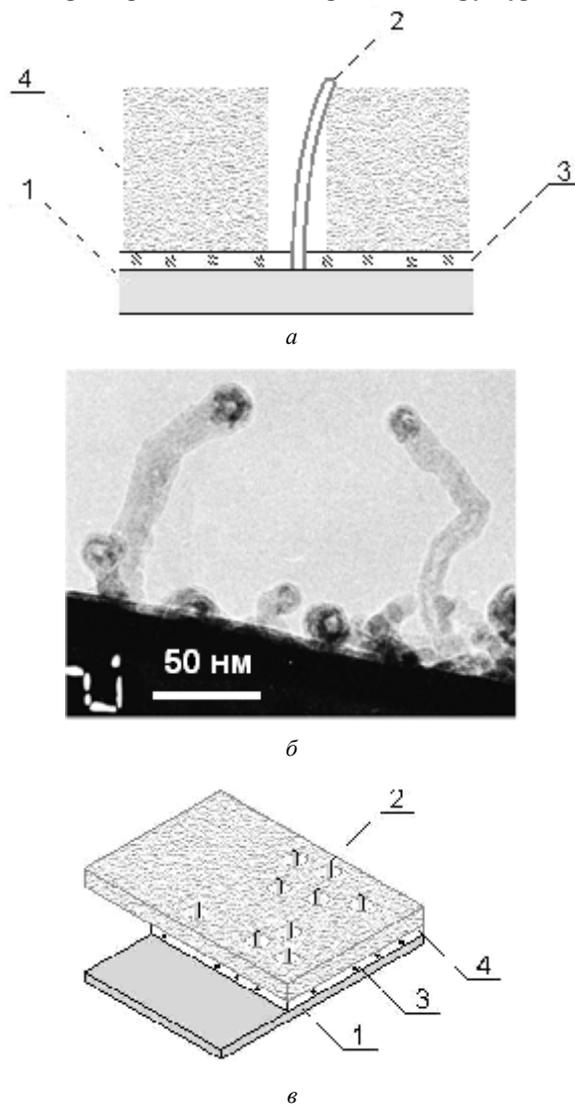


Рис. 1. Схематическое изображение НЭМС-структуры в одном из бистабильных состояний (а), промежуточный шаг формирования НЭМС-структуры (ПЭМ-изображение) (б) и схематическое изображение фрагмента массива интегральных НЭМС-структур (в): 1 – входной электрод; 2 – углеродные нанотрубки; 3 – диэлектрический слой; 4 – слой аморфного углерода

В результате проведения соответствующих экспериментов, осуществленных автором средствами атомно-силовой микроскопии, также было доказано, что многослойные углеродные нанотрубки склонны окисляться дискретно, по слоям, что объясняется кардинальным различием термодинамической устойчивости целого и нарушенного слоев.

В общем случае вместо углеродных нанотрубок в рамках рассматриваемого метода формирования интегральных НЭМС-структур могут использоваться другие одномерные объекты самоорганизации, например нанопроволоки.

Механизм функционирования НЭМС-структур. Углеродная нанотрубка и управляющий электрод в каждой структуре составляют два коаксиальных независимых электрода, отделенных нанометровым или субнанометровым зазором, в результате взаимодействия которых создается электрическое поле в малых пространственных областях. В силу предельной малости данных областей, напряженность получаемого электрического поля может варьироваться в широчайших пределах и достигать величин, сравнимых с внутриаомными (что актуально для рассматриваемых ниже НЭМС-реакторов и НЭМС-наномембран). А поскольку углеродная нанотрубка отделена от управляющего электрода зазором, то она может свободно совершать механическое движение, в том числе колебания на собственных частотах. С нанотрубкой электрически соединен входной электрод. Приложение напряжения смещения между входным и управляющим электродом оказывает на нанотрубку воздействие посредством силы Кулона. При определенном значении этого напряжения упругая деформация нанотрубки обеспечивает ее переход в состояние механического и, следовательно, электрического контакта с поверхностью управляющего электрода (рис. 1, а). В таком состоянии нанотрубка обеспечивает электронный транспорт между входным и управляющим электродами. При достаточно малых значениях ширины разделяющего зазора сила упругой деформации нанотрубки, стремящаяся вернуть ее в исходное вертикальное состояние, уступает по величине силе Ван-дер-Ваальса, действующей в пятне контакта нанотрубки и управляющего электрода, что обеспечивает стабильность данного состояния системы. Для возврата нанотрубки в свободное состояние необходимо приложить одноименный потенциал к входному и управляющему электродам так, чтобы отталкивающая сила Кулона в сумме с силой упругости превысила силу Ван-дер-Ваальса. Таким образом, описываемая НЭМС-структура может находиться в двух стабильных состояниях.

Приложение переменного напряжения смещения между нанотрубкой и управляющим электродом позволяет обеспечить возбуждение механических колебаний углеродной нанотрубки. При совпадении частоты приложенного напряжения с собственной частотой нанотрубки колебания последней переходят в резонансный режим и их амплитуда резко увеличивается. Это приводит к соприкосновению нанотрубки с выходным электродом. В результате действия в пятне контакта сил Ван-дер-Ваальса нанотрубка фиксируется в состоянии механического контакта с управляющим электродом. В этом состоянии нанотрубка обеспечивает электронный транспорт между входным и управляющим электродами, что может быть зафиксировано средствами измерения электрического тока. Для возврата нанотрубки в свободное состояние необходимо приложить одноименный потенциал к входному и управляющему электродам.

Описанный выше механизм обеспечивает простой способ измерения частоты резонансных колебаний на-

нотрубки. В отличие от известных способов, которые основаны, например, на измерении модуляции электрической емкости системы «нанотрубка – пространственно отделенный электрод», модуляции сопротивления или плотности носителей зарядов нанотрубки, этот способ не требует анализа высокочастотного электрического сигнала и сводится к детектированию события возникновения короткого замыкания в цепи «входной электрод – управляющий электрод». Это упрощает техническую реализацию способа и снижает требования к величинам паразитных емкостей системы.

Конечные приложения метода формирования интегральных НЭМС-структур. Наличие дешевого группового метода формирования интегральных НЭМС-структур открывает возможности для создания устройств принципиально нового типа – активных наномембран. В них каждая пора представляет собой НЭМС-структуру, при этом для получения сквозных пор требуется ряд дополнительных операций, в частности частичное удаление диэлектрического слоя посредством травления. Это, с одной стороны, повышает уровень контроля геометрии пор (минимальный размер поры – 0,33 нм; разброс размеров, в силу действующих при самоорганизации фундаментальных ограничений, близок к нулю), а с другой – обеспечивает следующие принципиально новые возможности по манипулированию обрабатываемым веществом, которые связаны с возможностью поддержания в каждой поре заданного электрического поля и варьирования *in situ* эффективной геометрии пор:

- механизм прецизионной настройки системы на целевые молекулы (это особенно важно для задачи разделения многокомпонентных сред с незначительными различиями размеров молекул, например для выделения кислорода из воздуха);
- новые механизмы селективности (когда к стерическому механизму разделения молекул добавляется кулоновский механизм, связанный с различием поляризуемости молекул);
- выход на нереализуемые в обычных условиях цепочки химических превращений (переход на мембранные или активные нанореакторы);
- кардинальное повышение устойчивости к загрязнению пор (возможен режим контролируемой самоочистки);
- применение эффектов резонансного механического транспорта и др.

Предлагаемые в данной статье НЭМС-структуры позволяют превзойти современный уровень техники также в области сенсоров благодаря следующим достоинствам:

- предельно высокой чувствительности (в условиях вакуума – вплоть до регистрации актов сорбции отдельных молекул);
- простые измерения резонансной частоты благодаря существенной роли сил Ван-дер-Ваальса на наномасштабе (этим НЭМС-сенсоры отличаются от традиционных МЭМС-сенсоров на основе кремниевой микробалки);
- целому ряду универсальных механизмов селективности (в частности, электрическому зондированию отдельных молекул или их групп);
- контроль за регенерацией сенсорной способности;

- малой стоимости;
- возможности интегрального исполнения и др.

Таким образом, мембранная и сенсорная функциональность НЭМС-материала создают предпосылки для выхода на новый уровень в распознавании и обработке многокомпонентных сред.

В перспективе на основе предлагаемой НЭМС-элементной базы может быть создана энергонезависимая память, претендующая на роль универсального типа памяти и обладающая сверхвысокой степенью интеграции, предельно малой стоимостью хранения одного бита информации, низкой плотностью межсоединений (используется дополнительная координата адресации в виде частоты резонансных колебаний нанотрубки), сверхвысокой радиационной стойкостью.

Описанный НЭМС-материал имеет приложения и в ряде других важных областей. В частности, он позволяет реализовать фотонные кристаллы с перестраиваемой зонной структурой, «умные» электромагнитные материалы и др.

Экспериментальные результаты. При участии автора была разработана экспериментальная технология роста углеродных нанотрубок на никелевом золь-гель-катализаторе (см. рис. 1, б). В настоящее время на стадии разработки находится технологический процесс роста вертикальных углеродных нанотрубок, закрепленных в порах оксида алюминия.

При участии автора также был реализован технологический процесс фотолитографии и напыления металлических слоев поверх планарных углеродных нанотрубок. Получены образцы интегральных структур, представляющих собой планарные углеродные нанотрубки, случайным образом распределенные между проводящими дорожками сформированной средствами фотолитографии матрицы [4]. В дальнейшем этот техпроцесс необходимо отработать для случая вертикальных углеродных нанотрубок.

Автором производились эксперименты по контролируемому локальному анодному окислению углеродных дорожек под воздействием неоднородного электрического поля, индуцированного углеродной нанотрубкой. В ходе этих экспериментов были получены первые результаты по реализации механизма самосовмещения управляемого элемента и управляющего электрода методом ЛАО (рис. 2). Эти результаты соответствуют интенсивному процессу окисления (с чем связана некоторая неоднородность зазора по ширине).

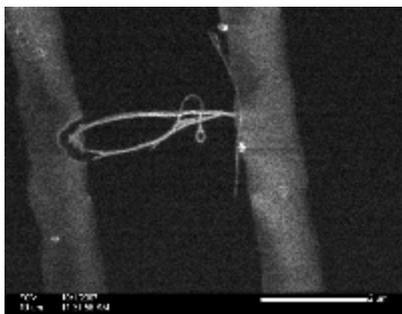


Рис. 2. Результат локального анодного окисления дорожки (слева) планарным пучком углеродных нанотрубок (ФИП-изображение); проводящие дорожки выполнены из аморфного углерода; ширина полученного эквидистантного зазора 100...120 нм

За счет уменьшения интенсивности ЛАО можно уменьшить ширину получаемых зазоров. Поскольку удаления уже нескольких слоев атомов углерода достаточно для разрыва электрического контакта нанотрубки с электродом (туннельным током можно пренебречь), то при достаточно малой скорости протекания ЛАО могут быть получены зазоры шириной порядка единиц нанометров и менее (визуализировать данные зазоры в силу их малости не удалось, но об их наличии свидетельствовало отсутствие проводимости в цепи «нанотрубка – управляющий электрод»).

Автором также получены оригинальные результаты по исследованию зависимости частоты резонансных колебаний кремниевой микробалки, покрытой сеткой углеродных нанотрубок, от концентрации различных газов в атмосфере. В частности, для паров воды разрешающая способность составила около 0,1 % относительной влажности. Отметим, что удельная поверхность и добротность модельной МЭМС-балки и, соответственно, ее чувствительность, много меньше таковых для НЭМС-резонатора. Таким образом, систему «микробалка – поверхностный монослой углеродных нанотрубок» можно рассматривать как физическую модель для сенсорного приложения разрабатываемых НЭМС-структур.

В заключение отметим, что разрабатываемая НЭМС-технология обеспечивает средства промышленного формирования нового материала, представляющего собой совокупность плотно упакованных наноэлектромеханических структур. Этот материал является представителем пока отсутствующих на рынке активных наноматериалов и играет роль многофункциональной НЭМС-платформы, на основе которой могут быть построены системы различной функциональности. В частности, возникает возможность создания систем принципиально новых типов: активных наномембран (НЭМС-мембран) и активных нанореакторов (НЭМС-реакторов). Кроме того, описанные в данной статье НЭМС-структуры представляют значительный интерес в качестве элементной базы для таких систем, как сенсоры, энергонезависимая память, перестраиваемые фотонные кристаллы, «умные» электромагнитные материалы и др. А использование в качестве основы технологии сочетания процессов самоорганизации и самосовмещения позволяет обходиться без дорогостоящих методов литографии высокого разрешения (фотолитография низкого разрешения может требоваться лишь для некоторых приложений, например сенсорного), что обуславливает невысокую стоимость предложенного НЭМС-материала, а также возможность получения данного материала в протяженном форм-факторе.

Автор благодарит за совместную работу в проведении экспериментов М. М. Симунина и И. И. Бобринского.

Библиографический список

1. Pat. WO02080360. Pattern-aligned carbon nanotube growth and tunable resonator apparatus / B. D. Hunt, F. Noca, M. E. Hoenk, et. al. Publ. 2001.
2. Pat. EP1646145. Electromechanical filter and electric circuit and electric apparatus employing it / Ya. Naito, Yo. Nakanishi. Publ. 2004.

3 Неволин, В. К. Зондовые нанотехнологии в электронике / В. К. Неволин. М. : Техносфера, 2006.

4. Разработка подходов к массовому производству структур на основе углеродных нанотрубок / И. И. Боб-

ринецкий, М. М. Симунин, С. В. Хартов и др. // Актуальные проблемы твердотельной микроэлектроники : тр. X Междунар. науч.-техн. конф. / Таганрог. радиотехн. ун-т. Таганрог, 2006. Ч. 2. С. 6–8.

S. V. Khartov

ACTIVE METAMATERIAL BASED ON INTEGRAL NEMS STRUCTURES

The conception of the integrated nanoelectromechanical systems (NEMS) formation method is overlooked in this article. This method is based on an original combination of self-organizing and self-aligning processes. The functionality of the proposed NEMS structures and possible applications of nanomaterial, formed by a two-dimensional array of such structures are discussed. The results of the experiments are directed to propose NEMS technology realization.

Keywords: nanoelectromechanical systems (NEMS), carbon nanotubes, NEMS sensors, active nanomembranes, active nanomaterial.

© Хартов С. В., 2009

УДК 621.316

Н. Н. Горяшин, М. В. Лукьяненко, А. А. Соломатова, А. Ю. Хорошко

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЫ КВАЗИРЕЗОНАНСНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ С КОММУТАЦИЕЙ КЛЮЧЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ НУЛЕВЫХ ЗНАЧЕНИЯХ ТОКА *

Представлены результаты имитационного моделирования параллельной работы квазирезонансных преобразователей напряжения с коммутацией электронных ключей при нулевых значениях тока, работающих в цепи стабилизатора напряжения с общим контуром регулирования посредством частотно-импульсной модуляции.

Ключевые слова: квазирезонансный преобразователь напряжения, электронный ключ, частотно-импульсная модуляция, удельная мощность, динамическое токовыравнивание.

Современные системы электроснабжения (СЭС) космических аппаратов (КА) являются сложным комплексом, включающим источники электроэнергии, преобразующие и распределительные устройства, объединенные в систему автоматического регулирования и предназначенные для питания бортовых нагрузок. Вторичные источники электропитания представляют собой энергопреобразующий комплекс, состоящий из N идентичных импульсных преобразователей напряжения (ИПН), работающих на общую нагрузку. В традиционном варианте в качестве ИПН используются классические преобразователи с прямоугольной формой тока и напряжения ключевого элемента (КЭ) и управлением посредством широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Параллельная работа таких ИПН в режиме стабилизации напряжения может быть организована за счет фазового разделения управляющих импульсов ключевых элементов, работающих на общую нагрузку, с динамическим токовыравниванием, что предполагает введение дополнительных контуров управления. Фазовый сдвиг между соседними управля-

ющими импульсами задается по условию $\varphi = 2\pi/N$, где N – количество параллельных ячеек ИПН [1; 2].

Использование в рассматриваемых системах квазирезонансных преобразователей напряжения (ПН) [3–9] может быть связано с необходимостью повышения технико-экономических показателей СЭС КА, таких как удельная мощность, КПД, электромагнитная совместимость. В публикациях, посвященных преобразователям напряжения с резонансными режимами работы КЭ, вопросы параллельной работы данного типа ПН исследуются лишь в небольшой степени, чего явно не достаточно для их практической реализации.

Далее мы будем рассматривать режимы работы двух параллельно включенных квазирезонансных преобразователей напряжения последовательного типа с коммутацией электронного ключа при нулевых значениях тока (ПНТ) и частотно-импульсным законом регулирования [4; 5; 7; 9].

В упрощенной схеме ПНТ-преобразователя, представленной на рис. 1, выходной фильтр и нагрузка заменены

* Работа выполнялась при финансовой поддержке по гранту аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2010 гг.)» (код проекта 2473).