

ПРОГРАММА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК В СФЕРЕ НАНОТЕХНОЛОГИЙ

В конце 2007 года в Москве состоялось Общее собрание Российской академии наук (РАН), на котором были заслушаны доклады по ряду направлений научной деятельности академии. Выступление лауреата Нобелевской премии академика Ж. Алферова было посвящено Программе РАН в сфере нанотехнологий.

Комиссия по разработке Программы фундаментальных исследований в области нанотехнологий образована Постановлением Президиума РАН № 163 от 26 июня 2007 года в развитие инициатив Президента и Правительства РФ в данной области. Программа формировалась на основе предложений академических институтов, и в адрес комиссии уже поступили предложения от восьми отделений РАН.

Согласно прогнозам, в ближайшее десятилетие использование нанотехнологий в транспортном секторе составит порядка 6,1%, в экологической продукции и катализаторах – по 8,7%, в фармацевтике – 15,7%. Оставшаяся часть (60,8%), оцениваемая в 700 млрд. долл., распределяется поровну между наноэлектроникой и наноматериалами. Соответственно, в комиссии созданы секции: *физика наноструктур, наноматериалы, наноэлектроника, нанодиагностика, нанобиотехнология и образование*. В состав Бюро комиссии, возглавляемого академиком Ж.Алферовым, входят академики А.Асеев, Е.Каблов, Р.Петров, В.Садовничий и чл.-кор. М.Ковальчук.

В рамках направления *физика наноструктур* в качестве подраздела изучаются электронные состояния и квантовый транспорт в полупроводниковых наноструктурах: одноэлектронные транзисторы и электронные интерферометры, мезоскопические явления в квантовых контактах; двумерные электронные системы, переходы "металл-изолятор"; новые принципы генерации и детектирования терагерцевого излучения, туннельные явления и каскадные процессы; квантовый

магнитотранспорт и макроскопические когерентные состояния в низкоразмерных электронных системах.

Можно выделить также нанофотонику и наноэлектронику, информационные и телекоммуникационные технологии, экологию и здравоохранение, использование нанотехнологий в спецпродукции и антитеррористической деятельности. В числе исполнителей работ – Физический институт им. П.Н.Лебедева (ФИАН), Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН (ИРЭ), Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов (ИПТМ), Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе (ФТИ), Институт физики полупроводников им. А.В.Ржанова СО РАН (ИФП) и Казанский физико-технический институт им. Е.К.Завойского (КФТИ) Казанского научного центра РАН (КазНЦ РАН), Институт физики металлов УрО РАН, Институт физики твердого тела, Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН (ИОФ), Институт физики микроструктур РАН (ИФМ).

Исследования *физики наноструктур* включают спинтронику и нанофотонику, неравновесные электронные состояния и коллективные явления в полупроводниковых наноструктурах, нанокуглеродные материалы и физические основы технологий квантовых наноструктур, сверхпроводимость и низкие температуры. Стоимость НИР подраздела – 820 млн. руб., капиталовложения оцениваются в 350 млн. руб.

В качестве примера эффективности нанотехнологий было представлено сравнение спектров фотолюминесценции мас-

сивов InAs точек со спектром созданного наносветовода. В отличие от спектров макро- и микрофлюоресценции исследуемой структуры с диаметрами лазерного пятна 100 мкм и 2 мкм соответственно на наноуровне удается реализовать работу одной квантовой точки с единой энергетической линией. При этом достигается инжекционная эффективность в 1 фотон на 5 электронов, что может применяться в квантовой криптографии, прецизионной спектроскопии и метрологии (например, эталон оптической мощности).

Разработанные в ИФП СО РАН принципы создания гетероструктур и превращения их в прецизионные трехмерные нанобъекты позволяют проводить самосборку приборных конструкций из ультратонких (до 6 ангстрем) отсоединяемых от подложки сжатых пленок с селективным удалением жертвенного слоя, гофрировкой с фиксированной амплитудой и периодом; для структур с контролируемым периодом от 10 мкм до 10 нм (Ge, InAs, Me и Si) допустимо расщепление трехслойной пленки с образованием квантовых точек, соединенных изогнутыми волноводами, и масштабирование зигзагообразных гофрировок.

Всего по разделу *физики наноструктур* поступили 172 заявки от 38 институтов РАН с оценочной стоимостью НИР 6,37 млрд. руб., а планируемый объем капиталовложений, направляемый в первоочередном порядке на обновление парка научного оборудования, составляет 4,28 млрд. руб.

Направление *наноматериалов* охватывает круг вопросов, связанных с исследованиями продукции, применяемой в оптических и магнитных системах и в электронике, конструктивных энергонасыщенных и функциональных наноматериалах: полимерах, катализаторах, мембранах и сорбентах. К изучаемым объектам относятся супрамолекулярные материалы и нанокompозиты (частицы в металлической, керамической или полимерной матрице, структурированные матрицы), нанодисперсные материалы: размерности 0D (квантовые точки, кристаллы и порошки), наноструктурированные материалы размерности 1D (проволока, трубки, агрегаты и волокна), 2D планарные (самособирающиеся монослои, пленки, печатная литография и покрытия) и объемные 3D (керамика, металлы и сплавы с ультрамикрoзернистой структурой). Основные направления исследований – моделирование наноматериалов и процессов их формирования, фундаментальные особенности наносостояния, в том числе с учетом структурных и морфологических особенностей наноструктур, влияния размерного фактора, размерности и анизотропии. В числе направлений исследований – взаимодействие в ансамблях наночастиц и новые подходы к созданию наноматериалов, в частности, с задействованием механизмов самоорганизации и самосборки.

Подраздел "Конструкционные наноматериалы и наноматериалы со специальными свойствами" включает исследования

в сфере наноматериалов функционального назначения с такими физическими свойствами как отражение, преломление или поглощение различных излучений, создание на базе наноструктурированной керамики высокотемпературных конструкционных композиционных материалов, упрочнение конструкционных и жаропрочных сплавов наноструктурированными фазами для повышения эксплуатационных характеристик и получение, очистка, модифицирование, диспергирование наноструктурных наполнителей, волокон и упрочнителей для наноматериалов и композитов конструкционного назначения. Сюда же относятся: создание элементной базы молекулярных компьютеров на новых принципах, физико-химические методы исследования, диагностики и контроля качества наноматериалов, проектирование коррозионно-стойких, лакокрасочных, звукоизолирующих, вибропоглощающих, молние- и теплозащитных наноструктурных покрытий, формирование полимерных конструкционных нанокompозитов, упрочняемых и модифицированных за счет прививки или введения наночастиц, в частности, функциональных.

В исследовании, проведенном Институтом проблем химической физики РАН совместно с Институтом неорганической химии СО РАН, определена последовательность реакций привития органических радикалов в присутствии катализаторов, заключающаяся в хлорировании – разрыве двойной связи C=C и присоединении хлора с образованием связи C-Cl, замещении хлора органическим радикалом с аминогруппами и выделении HCl с его последующей нейтрализацией. Введение в эпоксидную смолу производных фуллерена C₆₀, содержащих аминогруппы, приводит к их химической фиксации в структуре полимерной матрицы. Введение до 2% функционализированных наночастиц (астралена и фуллерена) способствует существенному изменению тепло- и электропроводности, молниестойкости, экранированию электромагнитных излучений, звуко- и рентгенопрозрачности, а также комплексному повышению эксплуатационных и механических свойств конструкционных углепластиков, увеличивая прочность материала при сдвиге и сжатии в 1,2 раза, ударную стойкость – в 1,45 раза, остаточную прочность и топливостойкость – в 1,5 раза, ресурс работы – в 1,8 раза и водостойкость – в 2 раза. Также высокоресурсные углепластики со специальными свойствами перспективны в применении для самолетов пятого поколения.

В институте катализа им. Г.К.Борескова СО РАН ведутся исследования по эпитаксиальному выращиванию наночастиц золота. Катализаторы на основе нанесенных на Al₂O₃ наночастиц перспективны для решения проблемы "холодного старта" дожигания выхлопных газов автомобильных двигателей. В рамках исследований предложен способ изготовления блочного катализатора: стандартная нейтрализация газов обеспе-



чивается лобовым слоем (Pt), дожигание СО – вторым слоем (Au). Всего по разделу *наноматериалы* поступило 329 проектов от 116 организаций, в том числе 96 институтов РАН. Оценочная стоимость проектов НИР – 16,46 млрд. руб., ориентировочный объем капиталовложений – 1,189 млрд. руб.

В секции *нанoeлектроника* особое внимание уделяется методам вычислительного моделирования и формированию инфраструктуры суперкомпьютерных вычислений, развитию нанoeлектронных технологий, созданию нанoeлектронных элементов, устройств и функциональных систем, изучению диагностических методов и методологий построения диагностического оборудования, исследованию физических принципов для создания нового поколения нанoeлектронных устройств.

Подраздел "Элементы, устройства и функциональные системы нанoeлектроники" включает исследования по нанотранзисторам и сенсорам на КНИ-структурах для биологии и информатики, полупроводниковым и твердотельным наногетероструктурам и нанотранзисторам для СВЧ-техники и интегральных квантовых схем. К подразделу относятся разработки кремниевой флэш-памяти нового поколения на основе нанометровых пленок диэлектриков с высокой диэлектрической проницаемостью и структур с квантовыми точками, подготовка производства высокоэффективных элементов для солнечной энергетики на основе полупроводниковых наноструктур, получение на основе наноструктурированных полупроводниковых систем детекторов частиц и фотоприемных устройств, создание на базе полупроводниковых наногетероструктур новых элементов нанofотоники и источников излучения.

Помимо ИОФ РАН, ИПТМ и ИРЭ РАН, ИФМ РАН и ИФМ СО РАН, КФТИ КазНЦ РАН, ФИАН и ФТИ им. А.Ф.Иоффе в качестве исполнителей работ задействованы: Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Институт лазерной физики СО РАН, Институт неорганической химии (ИНХ) СО РАН, Институт СВЧ полупроводниковой электроники, Институт спектроскопии, Институт теплофизики им. С.С.Кутателадзе СО РАН, Институт физики металлов УрО РАН, Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН (ИЯФ), Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур, НИИ системных исследований, Санкт-Петербургский физико-технологический научно-образовательный центр (СПбФТНОЦ) РАН, Физико-технологический институт и Южный научный центр (ЮНЦ) РАН. При стоимости работ по подразделу в 2008–2010 годах в 3,157 млрд. руб. необходимы капиталовложения в объеме 2,502 млрд. руб.

Примером работ по разделу является применение квантово-размерных гетероструктур для создания и развития светодиодов с перспективой получения монолитного InGaN/GaN с набором квантовых ям в плоскостях пучности резонатора, что помимо оригинальной конструкции обеспечивает отсутствие дополнительных потерь.

Согласно экспертным оценкам, в 20–30 годах XXI столетия до половины систем освещения может быть переведено на полупроводниковую светодиодную технику, дающую суммарную экономию электроэнергии в 10%.

Другой пример – разработанные в ИФП СО РАН фотоприемные устройства для ИК-области спектра на основе эпитаксиальных структур AlGaAs/GaAs, позволяющие использовать в спектральном диапазоне 7,5–8,8 мкм полупроводниковые сверхрешетки. Созданный микроволновый полевой транзистор на псевдоморфной эпитаксиальной гетероструктуре AlGaAs/InGaAs/GaAs применяется в СВЧ-приборах, заменяющих РЛС в современных авиационных комплексах.

Высокоэффективные преобразователи солнечного излучения разработаны в ФТИ им. А.Ф.Иоффе: концентраторная солнечная батарея имеет КПД свыше 40% с перспективой выхода в ближайшее время на 50%. Всего по секции *нанoeлектроники* поступило 326 заявок от 58 институтов РАН с привлечением в качестве соисполнителей 57 предприятий. Общая стоимость работ секции в 2008–2010 годах оценивается в 8,325 млрд. руб. и предполагаются капиталовложения в сумме 5,241 млрд. руб.

В разделе *нанобиотехнологий* внимание уделяется наноконструированию из воспроизведенных или естественных синтетических или генно-инженерных наноструктур живых объектов разных биотипов – от вирусов до млекопитающих и человека. Одна из главных целей – создание наноструктур с искомыми свойствами. Основными компонентами нанобиотехнологий являются нанобионика (обеспечение конструирования замещающих систем и регуляторных компонентов тела), нановакцины (регулировка процессов конструирования нано- и мини-антител и иммуногенов), нанодетекция и нанодиагностика (наноконструирование биологических узнающих систем), нанотрансгенез (трансгенное конструирование), нанолечения (конструирование новых лечебных препаратов). Отмечается, что в качестве головных организаций по направлению "Нанобионика" целесообразно задействовать МГУ им. М.В.Ломоносова и Институт белка РАН, "Нановакцины" – институты иммунологии и биоорганической химии РАН, "Нанодетекция и нанодиагностика" – институты биохимии и молекулярной биологии РАН, "Нанотрансгенез" – Институт генетики РАН и Центр клеточной инженерии РАН и "Нанолечения" – институты органической химии и биологии гена РАН.

Основные приоритеты в рамках направления "Нанодетекция и нанодиагностика" – разработка пригодных для внутривенного введения наноконструкций, состоящих из биосенсоров с наночастицами, регистрируемыми расположенными вне тела физическими приборами, создание наноструктурных комплексов детекции биоорганических субстанций, вирусов и бактерий для молекулярной медицины, криминалистики, экологии и биологии, формирование систем гигиенического надзора безопасности нанотехнологического производ-

тва и нанопродукции (нанозэтика), производство нанобиосенсоров для мониторинга лекарств, генодиагностики, диагностики токсинемии и вiremии и наркодиагностики.

Одной из иллюстраций эффективности нанотехнологий в биологии служит эволюция гриппозных вакцин. Если иммунная доза (ИД) в 100 мкг цельновиральной вакцины высокоэффективна и малоэффективна, то ИД в 15 мкг субъединичной вакцины "Ваксигрипп" эффективна и малотоксична, а ИД в 5 мкг полимер-субъединичной нановакцины "Гриппол" высокоэффективна и нетоксична. Ее создание стало возможным благодаря наноконструкции из ответственных за иммунизацию вирусных белков и стимулирующего полимера Полиоксидония. По экспертным оценкам, в 2004 году "Грипполом" было привито 8 млн. чел., в 2005 – 14 млн. чел., в 2006 – 22 млн. чел., в 2007 – 26 млн. чел. Финансирование раздела *нанобиотехнологий* на 2008 – 2011 годы должно составить 4–5 млрд. руб.

Секция *нанодиагностики* ориентирована на формирование перспективной научно-методологической и приборно-аналитической базы метрологического и диагностического обеспечения нанотехнологий. В работах по этому направлению участвуют 49 академических организаций, 23 коммерческих предприятия, 19 вузов и 13 научных центров. Среди направлений исследований секции – оптическая микроскопия и спектроскопия, нанометрология и методы с применением синхротрон-

ного и рентгеновского излучений, частиц и нейтронов, физические и физико-химические методы, электронография, электронная и зондовая микроскопия. Развитие таких методов будет способствовать формированию сети исследовательских станций и систем оборудования, созданию новых диагностических методов и разработке технологий получения мощных источников излучения, интегрируемых в инфраструктурные комплексы. В результате работы планируется совершенствование методологии атомарного пространственного и временного разрешения для диагностики наноматериалов и наносистем и создание новых источников излучения.

Нанометрологический подраздел Программы РАН взаимосвязан со стандартизацией и сертификацией наноструктур и наноматериалов, созданием нанометрологических стандартов и принципов и формированием методологической базы обеспечения экологической, экономической и технологической безопасности в сфере нанотехнологий.

Концепция развития отечественного инструментального и методического нанометрологического комплекса предполагает переход на новую систему стандартов – от эталонов, основанных на макроскопических физических явлениях, к наноскопическим и квантовым. Особое внимание планируется уделить созданию средств калибровки измерительного оборудования. В числе ожидаемых результатов – появление



сети центров коллективного пользования для комплексной диагностики наноматериалов и наносистем, гармонизация нормативно-правовой и приборно-методической баз нанометрологии, разработка принципиально новых технологий и оборудования для высокоразрешающей диагностики, конструирование в РФ соответствующих мировому уровню новых источников излучения и элементарных частиц.

Примерами уже работающего по подразделам Программы оборудования являются приборы Курчатовского центра синхротронного излучения и нанотехнологии, источник терагерцового излучения – кольцевой лазер на свободных электронах (ИЯФ СО РАН), сверхвысоковакуумный сканирующий туннельный микроскоп GPI-300, вмонтированный в установку молекулярно-лучевой эпитаксии "RIBER SS-center" (ИОФ РАН). Синхротронная станция белковой кристаллографии "Белок" (Курчатовский центр) предназначена для изучения соединений с биологической активностью, исследований атомных структур биоорганических объектов, установления молекулярных механизмов функционирования биоорганических систем. Медицинское оборудование позволяет проводить микроангиографию и рентгенографию полостных органов, диагностировать онкологические заболевания, использовать в рефракционной медицинской диагностике адаптивные контрастные среды. На финансирование работ выделено 58,47 млрд. руб. бюджетных средств: на НИР и ОКР – 30,87 млрд. руб., капитальные вложения достигают 27,6 млрд. руб., которые вместе с внебюджетными источниками составляют 63,81 млрд. руб.

Целостная система фундаментального *образования* на всех уровнях является залогом устойчивого развития сферы производства наноматериалов, разработки нанотехнологий и индустрии наносистем, способствуя непрерывному притоку новых научных идей, подготовке и переподготовке высококвалифицированных кадров, общественному просвещению и преемственности научных школ. Цель раздела *образование* Программы РАН – обеспечение академической, вузовской и отраслевой науки, промышленных предприятий и высокотехнологических инновационных компаний кадрами для фундаментального и прикладного развития индустрии нанотехнологий и наноматериалов в России на принципах оценки вклада НИР и экспериментальных работ, интеграции госструктур, образовательных учреждений, научных предприятий и высокотехнологичного производства. Докладчик подчеркнул необходимость создания сети научных образовательных центров различных категорий – федеральных, региональных, отраслевых, в числе критериев отбора которых – комплексный характер подготовки выпускников, сочетающий теорию и практику с использованием развитой инфраструктуры учреждений и доступного молодым ученым современного оборудования, участие студентов и аспирантов в научной работе по федеральным проектам и грантам, возможность продолжения научной карьеры выпускниками, наличие ведущего ву-

за и реализация качественных образовательных программ, международная и внутрироссийская академическая мобильность и возможность трудоустройства выпускников по специальности. Обсуждалась также необходимость пересмотра правил обучения и подготовки научных кадров в аспирантуре и докторантуре, уделялось особое внимание изучению смежных дисциплин и освоению мультидисциплинарных и междисциплинарных подходов.

Успешным примером реализации таких работ является деятельность СПб ФТНОЦ, сотрудничающего, в том числе с Академическим физико-технологическим университетом РАН (АФТУ РАН), Санкт-Петербургским государственным политехническим университетом и Санкт-Петербургским государственным электротехническим университетом.

На химическом, медицинском, биологическом, физическом, физико-химическом, материаловедческом факультетах МГУ им. М.В.Ломоносова и на базе Центра коллективного пользования в сфере наноматериалов и нанотехнологий в сотрудничестве с ОАО "Норникель", ОАО "Русал" подготовлено более 450 специалистов-нанотехнологов.

В Научно-образовательном комплексе "Наносистемы и современные материалы" Новосибирского государственного университета действуют Учебно-научный центр "Современная ядерная физика" с изучением характера воздействий пучков высокоэнергетичных частиц и электромагнитных излучений на материалы и вещества, Региональный межвузовский центр структурных исследований наноматериалов с подготовкой специалистов по физическим методам исследований твердого тела, в том числе наноматериалов и наноструктур, Инновационный центр "Плазмохимические технологии, кластеры и аэрозоли" по исследованию кластеров и наносистем в потоках низкотемпературной плазмы для получения новых низкоразмерных материалов и Центр научно-исследовательской и образовательной деятельности "Оптика наноструктур" по применению оптических методов к биологическим объектам.

Всего по разделам Программы РАН было подано 974 заявки, предусматривающие выделение 70,89 млрд. руб. на НИР и 69,74 млрд. руб. – капитальные вложения. Все основные компоненты Программы РАН соответствуют приоритетным направлениям развития мировой nanoиндустрии, и, по мнению академика Ж.Алферова, Комиссия должна стать *постоянным* органом по развитию, совершенствованию и реализации Программы.

На Общем собрании РАН было также принято решение о переименовании Отделения информационных технологий и вычислительных систем, возглавляемого академиком Е.Велиховым, в Отделение нанотехнологий и информационных технологий (ОНИТ) и расширении состава Отделения за счет проведения выборов на десять новых вакансий академиков и на двадцать – член-корреспондентов РАН. 

Фото: Раткин Л.