

Третинников Д.Л., Табунов А.В., Пищ П.В., Августинович А.Г.

*Белорусский национальный технический университет, Минск*

*Nanomaterials is a field which takes a materials science-based approach to nanotechnology. It studies materials with morphological features on the nanoscale, and especially those which have special properties stemming from their nanoscale dimensions. Nanoscale is usually defined as smaller than a one tenth of a micrometer in at least one dimension, though this term is sometimes also used for materials smaller than one micrometer.*

*The first observations and size measurements of nano-particles were made during the first decade of the 20th century. They are mostly associated with the name of Zsigmondy who made detailed studies of gold sols and other nanomaterials with sizes down to 10 nm and less. There are traditional techniques developed during 20th century in Interface and Colloid Science for characterizing nanomaterials. These are widely used for first generation passive nanomaterials specified in the next section.*

Ключевые слова: наноматериалы, нанотрубки, получение, методы, нанопорошки.

## 1. Методы получения наноматериалов

### 1.1. Получение графита в дуговом разряде

Метод основан на образовании углеродных нанотрубок при термическом распылении графитового электрода в плазме дугового разряда, горящего в атмосфере гелия. Этот метод позволяет получать нанотрубки в количестве, достаточном для детального исследования их физико-химических свойств.

Трубка может быть получена из протяженных фрагментов графита, которые далее скручиваются в цилиндр. Для образования протяженных фрагментов необходимы специальные условия нагрева графита. Оптимальные условия получения нанотрубок реализуются в дуговом разряде при использовании электролизного графита в качестве электродов. На рис. 1 показана упрощенная схема установки для получения фуллеренов и нанотрубок.

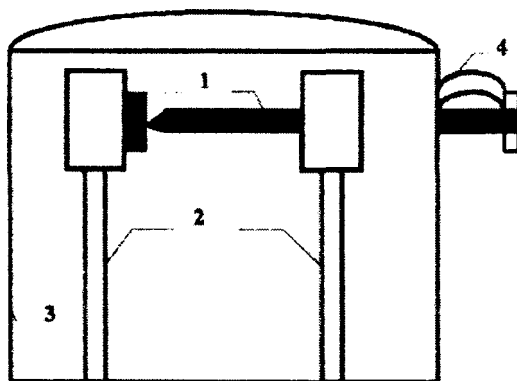


Рис. 1. Схема установки для получения фуллеренов и нанотрубок: 1 - графитовые электроды; 2 - охлаждаемая медная шина; 3 - медный кожух, 4 - пружины

Распыление графита осуществляется при пропускании через электроды тока с частотой 60 Гц, величина тока от 100 до 200 А, напряжение 10-20 В. Регулируя натяжение пружины, можно добиться, чтобы основная часть подводимой мощности выделялась в дуге, а не в графитовом стержне. Камера заполняется гелием с давлением от 100 до 500 торр.

Скорость испарения графита в этой установке может достигать 10 г/В. При этом поверхность медного кожуха, охлаждаемого водой, покрывается продуктом испарения графита, т.е. графитовой сажой. Если получаемый порошок соскоблить и выдержать в течение нескольких часов в кипящем толуоле, то получается темно-бурая жидкость. При выпаривании ее во вращающемся испарителе получается

мелкодисперсный порошок, вес его составляет не более 10 % от веса исходной графитовой сажи, в нем содержится до 10 % фуллеренов и нанотрубок.

В описанном способе получения нанотрубок гелий играет роль буферного газа. Атомы гелия уносят энергию, выделяющуюся при объединении углеродных фрагментов. Опыт показывает, что оптимальное давление гелия для получения фуллеренов находится в диапазоне 100 торр, для получения нанотрубок – в диапазоне 500 торр.

Среди различных продуктов термического распыления графита (фуллерены, наночастицы, частицы сажи) небольшая часть (несколько процентов) приходится и на многослойные нанотрубки, которые частично прикрепляются к холодным поверхностям установки, частично осаждаются на поверхности вместе с сажой.

Однослойные нанотрубки образуются при добавлении в анод небольшой примеси Fe, Co, Ni, Cd (т.е. добавлением катализаторов). Кроме того, ОСНТ получают при окислении многослойных нанотрубок. С целью окисления многослойные нанотрубки обрабатываются кислородом при умеренном нагреве, либо кипящей азотной кислотой, причем в последнем случае происходит удаление пятичленных графитовых колец, приводящее к открытию концов трубок. Окисление позволяет снять верхние слои с многослойной трубки и открыть ее концы. Так как реакционная способность наночастиц выше, чем у нанотрубок, то при значительном разрушении углеродного продукта в результате окисления доля нанотрубок в оставшейся ее части увеличивается.

## 1.2. Метод лазерного испарения

Альтернативой

выращивания нанотрубок в дуговом разряде является метод лазерного испарения. В данном методе синтезируются в основном ОСНТ при испарении смеси углерода и переходных металлов лазерным лучом из мишени, состоящей из сплава металла с графитом. По сравнению с методом дугового разряда, прямое испарение позволяет обеспечить более детальный

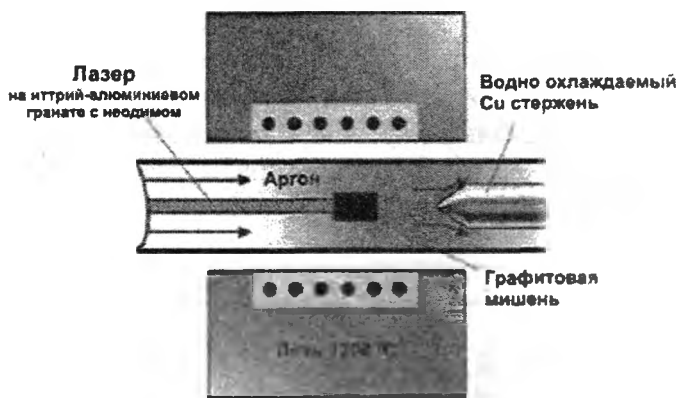


Рис. 2. Схема установки лазерной абляции

контроль условий роста, проводить длительные операции и производить нанотрубки с большим выходом годных и лучшего качества. Фундаментальные же принципы, лежащие в основе производства ОСНТ методом лазерного испарения такие же, как и в методе дугового разряда: атомы углерода начинают скапливаться и образовывать соединение в месте нахождения частиц металлического катализатора. В установке (рис. 2) сканирующий лазерный луч фокусировался в 6-7 мм пятно на мишень, содержащую металл-графит. Мишень помещалась в наполненную (при повышенном давлении) аргоном и нагретую до 1200 °C трубу. Сажа, которая образовывалась при лазерном испарении, уносилась потоком аргона из зоны высокой температуры и осаждалась на охлаждаемый водой медный коллектор, находящийся на выходе из трубы.

### 1.3. Технология Laser Spinning

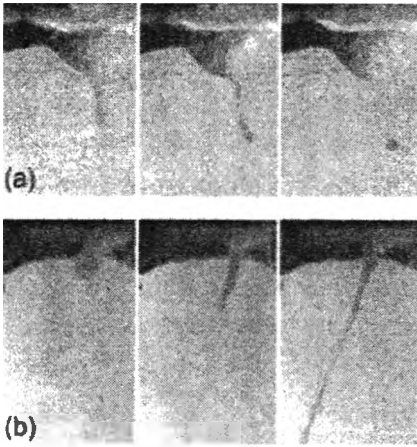


Рис. 3. Образование капли расплава;  
(b) Вытягивание волокна

Материаловеды из США и Испании придумали новый способ получения длинных аморфных нановолокон. Технология, названная «laser spinning», позволяет получить волокна длиной несколько сантиметров и всего 35 нм в диаметре.

Квазиодномерные структуры (нанопроволоки, наноленты, наностержни и нанотрубки) обладают уникальными электрическими и механическими свойствами и могут найти применение в электронике, катализе, биомедицине, использоваться для изготовления различных сенсоров и композитов. В настоящее время такие структуры обычно получают из паровой фазы или из растворов.

Исследователям из University of Vigo и Rutgers University удалось получить очень длинные аморфные нановолокна, используя простой процесс, не требующий участия катализаторов, шаблонов и каких-либо других реагентов, кроме материала будущего волокна. Технология позволяет получать волокна из довольно тугоплавких веществ, что невозможно достичь другими методами, например, при помощи электроспиннинга.

Методика «laser spinning» основана на использовании мощного лазера для локального нагрева поверхности исходного керамического материала (кварца или оксида алюминия), т.е. только очень малый его объем находится в расплавленном состоянии. Далее под действием сильной струи газа расплав вытягивается в волокно и застывает. В результате формируется неупорядоченная сеть из микро- и нановолокон. Ученые утверждают, что такая технология позволит получать очень длинные аморфные волокна требуемого состава.

### 1.4. Получение нанотрубок в биореакторе

Известно, что микроорганизмы способны формировать широкий спектр минералов с уникальными физико-химическими свойствами, которые не образуются в ходе геохимических процессов.

Так исследователями из Калифорнийского Университета Риверсайд было показано формирование внеклеточной сети нанотрубок сульфидов мышьяка анаэробными металл-восстанавливающими бактериями Shewanella sp.

В ходе своего эксперимента штамм бактерий помещали в герметичный сосуд, и создавали оптимальные условия для их жизнедеятельности. Среда, в которой находились бактерии, содержала значительное количество пятивалентного мышьяка  $As(V)$  и тиосульфат  $S_2O_3^{2-}$ . В течении семи дней состав питательной среды по соединениям мышьяка и серы сильно изменялся, а затем вы-

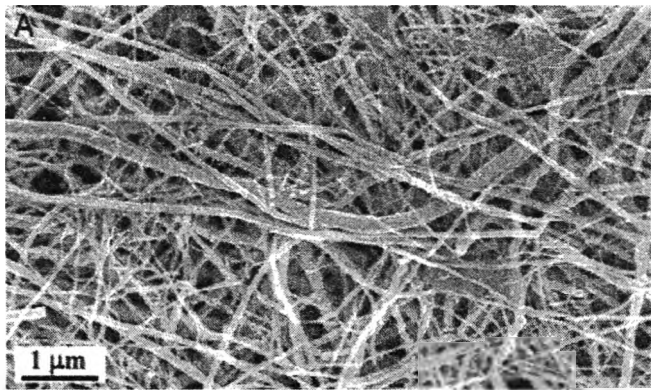


Рис. 4. Сеть нанотрубок  $As_xS_y$  разной степени зрелости

ходил на плато. В ходе метаболизма бактерий выделялся газообразный сероводород и формировался нерастворимый осадок, который, как показали исследования, состоял преимущественно из сульфидов мышьяка и представлял собой сеть нанотрубок диаметром от 20 до 100 нм и длиной до 30 мкм. Процесс образования филаментов начинался с синтеза внеклеточных полисахаридов, которые постепенно "облеплялись" аморфными наночастицами сесквисульфида мышьяка  $As_3S_2$ , постепенно замещающегося на  $AsS$  и  $As_4S$ .

Как показали эксперименты, биогенные нанотрубки сульфидов мышьяка обладали фоточувствительностью и свойствами полупроводника.

Этот способ синтеза полупроводников оказался легче промышленного и, как считают авторы, это открывает путь к созданию нового поколения эффективных нанометровых оптоэлектронных устройств.

### 1.5. Масштабное производство нанотрубок

Пожалуй, можно сказать, что углеродные нанотрубки (УНТ) за последние несколько лет превратились в символ нанотехнологий. УНТ, благодаря своим уникальным физико-химическим свойствам, являются наиболее перспективными материалами для огромного множества применений в электронике, композитных материалах, химических источниках тока и т.д. Упорядочение нанотрубок в материале играет немаловажную роль, так как именно этим и определяется, будет ли материал изотропным или же анизотропным по отношению к тем или иным свойствам (например, тепло- и электропроводности).

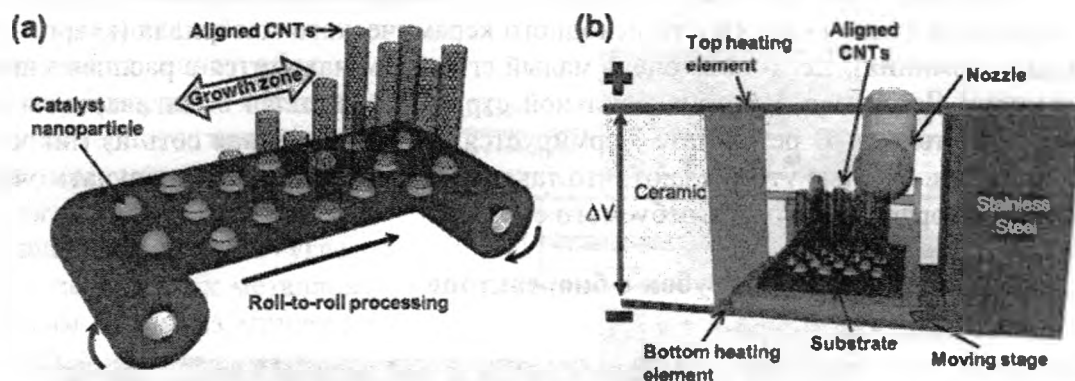


Рис. 5. Процесс непрерывного роста УНТ. (а) Схема подвижной кремниевой подложки с нанесённым катализатором  $Fe/Al_2O_3$  и роста на них нанотрубок. (б)

На сегодняшний день предложено несколько способов получения УНТ, однако наиболее эффективным для создания плотного массива нанотрубок является термохимическое осаждение из газовой фазы прекурсоров, содержащих углерод, которое катализируется наночастицами металлов (т.е. это фактически аналог метода CVD). Авторы работы, опубликованной в журнале *Nanotechnology*, основываясь на описанном выше методе синтеза УНТ, предложили метод практически промышленного синтеза нанотрубок. Он заключается в том, что кварцевая подложка с нанесёнными наночастицами катализатора  $Fe/Al_2O_3$  (подробнее о катализе на наночастицах  $Fe$  здесь) продвигается с различными скоростями между двумя нагревательными элементами при подаче соответствующего источника углерода (этилен). На рис. 5 представлены изображения установки. Стоит отметить, что подложку можно «разгонять» вплоть до 2.4 мм/с без видимых потерь в каче-

стве синтезируемых нанотрубок, а высота такого плотного «леса» из нанотрубок достигает 1 см.

Учёные уверены, что описанный выше метод синтеза наиболее оптимален для крупномасштабного производства УНТ, однако требует дальнейшей оптимизации условий разложения исходной газовой смеси и роста нанотрубок.

### 1.6. Методы получения углеродных роллов

Углеродные наноматериалы подвергаются тщательному изучению уже несколько лет, но до сих пор не все они подробно изучены. Например, пекинские

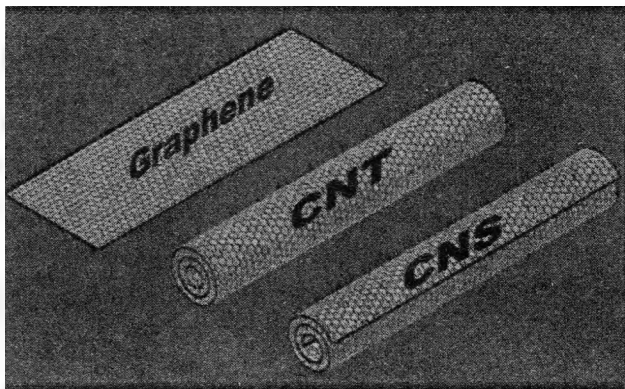


Рис. 6. Сравнение наноленты, нанотрубки и наносвитка

ученые дополнили список таких материалов, добавив к графену, нанолентам и нанотрубкам углеродные наносвитки (УНС). Наносвиток – скрученный слой графена – обладает многими уникальными свойствами. Например, электронный транспорт зависит от п-п взаимодействия его внешней и внутренней сторон, а ток может протекать не только через внешний цилиндр, как в случае многослойных нанотрубок (МНТ), а по всей поверхности. Их уникальная топология упрощает интеркаляцию, ведь наносвиток не замкнут, и позволяет эффективно использовать их в качестве аккумулятора водорода. Однако пока все это только слова, проверить которые на практике мешало отсутствие способа получить качественные наносвитки и устройства на их основе.

Предложенные ранее методы допускали получение свитков только в смеси с другими формами углерода. Все они основаны на скручивании тонких слоев графита под воздействием ультразвука, однако высокий выход УНС сочетался с низким качеством поверхности, поскольку скручиванию подвергались как монослой графена, так два, три и более слоев.

Улучшение качества произошло, когда монослой графита удалось получить простым отшелушиванием. Тогда было показано, что при абсорбции газа такие монослои скручиваются, но позже был предложен еще более простой и эффективный способ. Графеновые слои отшелушивали на предварительно подготовленную подложку ( $\text{SiO}_2(285 \text{ нм})/\text{Si}$ ) и определяли количество слоев методом спек-

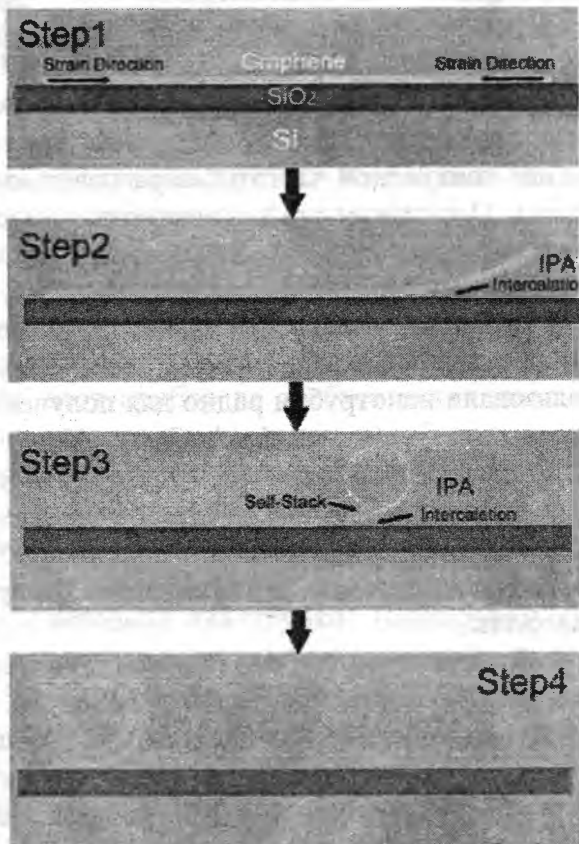


Рис. 7. Схема образования наносвитка

троскопии комбинационного рассеивания. Затем выбирали монослой и погружали их в чашку Петри с изопропанолом на 5 минут. После сушки в азоте оказалось, что двумерная структура действительно превратилась в одномерную. Изображение ПЭМ подтверждает, что это наносвитки, слои в которых плотно и равномерно упакованы. При этом расстояние между слоями составляет 0.35 нм.

КР спектры подтверждают, что образуется не нанотрубка, а именно свиток: так называемая "линия G" в спектрах хотя и уширяется по сравнению с графеном, однако остается гораздо уже, чем в нанотрубке, а "линия D" практически исчезает, в отличие от нанотрубок.

## 2. Применение наноматериалов

### 2.1. Нанотрубки в радио

Zettl построили полностью функциональное, со встроенным радиоприемником, во много раз меньше, чем любое предыдущее радио, из углеродных нанотрубок. Одна нанотрубка служит, как и все основные компоненты радио: антенна, тюнер, усилитель и демодулятор. Прием сигналов производится с помощью высокочастотных механических колебаний нанотрубки, а не через традиционные электрические средства.

Изображения, полученные с помощью электронной микроскопии, показывают одну из

углеродных нанотрубок, торчащих из электродов. Эти нанотрубки меньше микрона, или в 10000 раз тоньше, чем ширина человеческого волоса. Когда радио сигнал конкретной частоты затрагивает нанотрубку, она начинает активно вибрировать. Электрический ток может использоваться для обнаружения механических колебаний нанотрубки, и это позволяет слышать радио сигналы.

Антенна и тюнер осуществляются в совершенно иначе, чем традиционные радиостанции, прием сигналов с помощью высокочастотных механических колебаний нанотрубки, а не через традиционные электрические средства. Мы уже использовали нанотрубки радио для получения и воспроизведения музыки с FM радиопередач таких как *Layla* Эрика Клэптона (Derek And The Dominos) и пляж *Boy's Good Vibrations*. Радио нанотрубки чрезвычайно малых размеров могут позволить радикально новые приложения, такие как радиоуправляемые устройства достаточно малых размеров, чтобы существовать в человеческой крови, или просто меньше, дешевле, и эффективнее беспроводных устройств, таких как сотовые телефоны.

Высокое разрешение просвечивающего электронного микроскопа позволяет наблюдать нанотрубки радио в действии. Zettl записали четыре видеопленки с помощью электронного микроскопа, где нанотрубки радио играют четыре песни. В начале каждого видео, радио нанотрубки настроены на другую частоту, которой передается радиосигнал. Таким образом, нанотрубки не вибрируют, и только статические помехи могут быть услышаны. Как только радио становится в гармонии

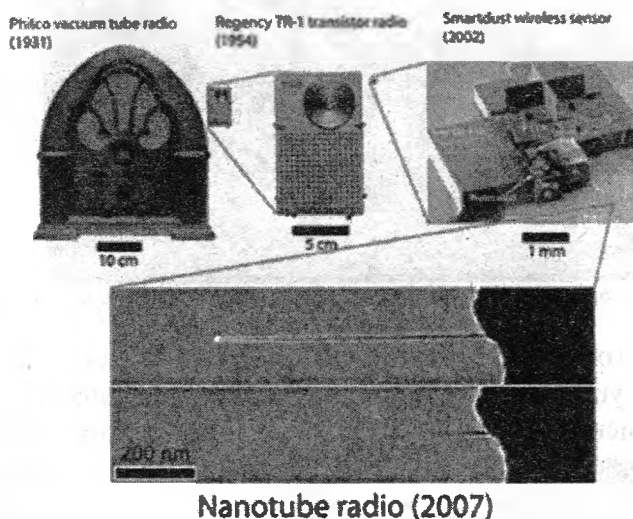


Рис. 8. Изменение размеров радио со временем

с передаваемым сигналом, нанотрубка начинает вибрировать, которая размывается в видео, и в то же время, музыка становится слышимой. За последнее столетие, радио в значительной степени уменьшилось по сравнению с деревянными " в стиле собор", радиостанциями 1930-х годов, карманными транзисторными радиоприемниками 1950-х годов и современными в одном радиочипе в сотовых телефонах и беспроводных датчиках. Продолжая эту тенденцию, Zettl еще более уменьшили радио, искусно осуществили нескольких функций радио с одним компонентом, углеродными нанотрубками. Эти радио нанотрубки в более девятнадцать раз меньше, чем вакуумная трубка Philco радио с 1930-х!

## 2.2. Наномеханический датчик определения масс частиц атомных размеров

Какова наименьшая масса, которую может измерять простое механическое устройство? Едва заметные пылинки? Одна бактерия? Или, возможно, нанокристалл, состоящий из нескольких тысяч атомов? В самом деле, Zettl разработали новый вид механического датчика, основанного на вибрирующей углеродной нанотрубке,

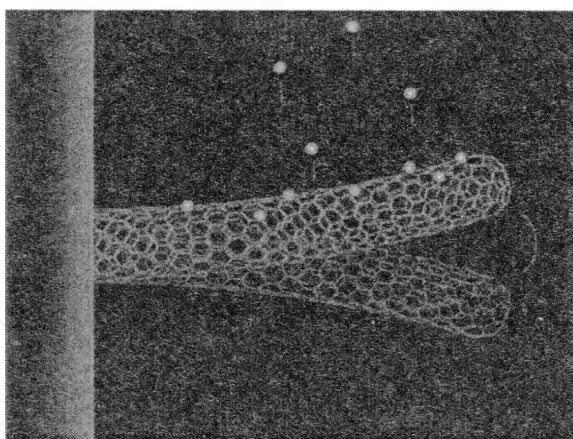


Рис. 9. Принцип действия наномеханического датчика

которым можно определить массу одного атома! Массовый датчик, основанный на нанотрубке, относится к семейству противовеса, известного как *инерциальный противовес*. Эти противовесы представляют собой пружину с присоединенной массой, которая может свободно колебаться. Отслеживая изменения в частоте колебаний, можно обнаружить изменения в массе. В этом устройстве, нанотрубка служит пружиной, а также контролируя

частоты ее колебания, мы можем обнаружить изменения в массе, вызванные адсорбированием отдельных атомов на поверхности нанотрубок. Чтобы быть более точным, текущая чувствительность устройства составляет  $1,3 \cdot 10^{-25}$  кг / Гц  $1/2$  или, что эквивалентно 0,40 атомов золота / Гц  $1/2$ . Таким образом, путем расширения понятия инерционного баланса до нанометрового масштаба, Zettl увеличили ее чувствительность до порядка нано-величины. Наномеханический датчик имеет множество преимуществ по сравнению с традиционным спектрометром точного определения масс. Во-первых, этот прибор не требует потенциально разрушающую ионизацию образца. (Большие молекулы, такие как белки, часто разрушаются при ионизации.) Во-вторых, это устройство становится более чувствительным в высших массовых диапазонах в отличие от традиционных масс-спектрометров. Наконец, наномеханический датчик компактен и, в конечном счете, может быть включен на чипе.

Как можно обнаружить колебания углеродной нанотрубки? Нанотрубки обладают меньшим размером, чем длина волны света, оптические стандартные методы для обнаружения вибраций неудачны. Хотя можно увидеть колебания с помощью просвечивающего электронного микроскопа, но этот метод является слишком медленным, чтобы быть полезным, и это не практично для коммерческих применений. Решение для обнаружения электрических колебаний. Zettl ис-

пользуют модифицированную версию «Нанотрубки Радио». По сути, они слушают колебания нанотрубки.

### 2.3. Хранение водорода с использованием фуллеренов

Хранение водорода — одна из самых больших проблем, с которыми столкнулась альтернативная энергетика. Но оказывается, решение ее не сложнее, чем микроскопические шарообразные молекулы углерода.

Казалось бы, внимание в эти дни приковано к углеродным нанотрубкам и углеродной нанопроводке. Но нельзя забывать и еще одну многообещающую и уникальную углеродную молекулу — бакиболл. Бакиболлы (buckyballs), названные так в честь Бакминстера Фуллера, содержат 60 атомов углерода. Это самая маленькая разновидность шарообразных углеродных молекул, фуллеренов, число атомов в которых может достигать до 2000.

Новое исследование, проведенное Университетом Райса, показывает, что углеродные бакиболлы можно

использовать для хранения водорода с плотностью, сравнимой с плотностью ядра Юпитера. Хранение водорода — самая сложная задача, которую только предстоит решить индустрии альтернативных источников энергии. Несмотря на то, что большие надежды на преодоление зависимости от ископаемого топлива возлагаются на водородные топливные элементы и эксперименты в области водородного сгорания, проблемы хранения водорода не дают этим технологиям выйти из лабораторных условий. Водород, сам по себе исключительно легкий, должен храниться с плотностью, превосходящей плотность жидкого водорода, чтобы соревноваться с бензином в плане расстояния, которое машина сможет преодолеть на одной заправке. Задача архисложная.

Исследование, которое будет опубликовано в мартовском выпуске *Nano Letters*, журнала Американского химического общества, финансировалось частично более чем миллиардным грантом на исследования в области хранения водорода от Министерства энергетики США и частично Центром военно-морских исследований. Руководитель проекта Борис Якобсон, профессор механического конструирования в Университете Райса, поражен результатом. «По нашим расчетам, некоторые бакиболлы способны удерживать настолько плотный объем водорода, что тот едва ли не переходит в металлическое состояние, — утверждает он. — Похоже, что при комнатной температуре они могут удерживать водород весом до 8 процентов от собственного, что значительно лучше, чем ориентир в 6 процентов, поставленный властями».

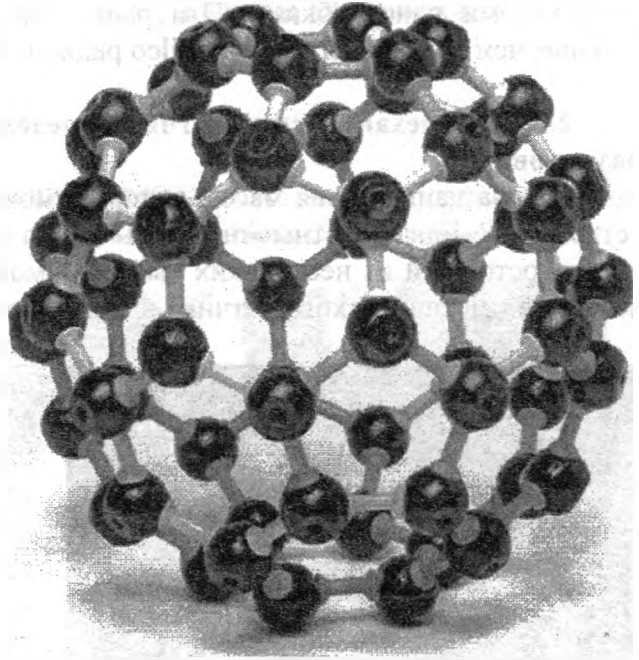


Рис. 10. Структура фуллерена C<sub>60</sub>



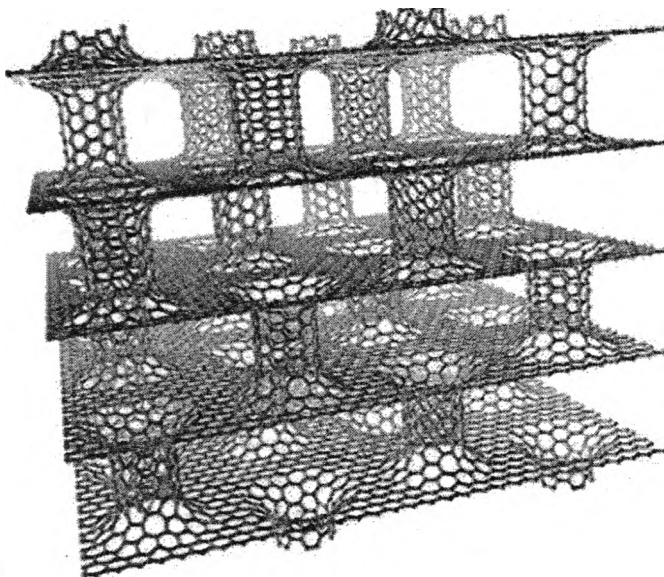
Якобсон признает, что идея хранения водорода в молекулярном контейнере не нова. Еще в прошлом, — соглашается он, — было известно, что бакиболлы могут хранить водород. Тем не менее, исследование Якобсона вместе с Ольгой Пупышевой и Амиром Фараяном, его бывшими аспирантами, впервые предложило метод точного вычисления объема водорода, который смогут, не ломаясь, выдержать микроскопические шары.

Место проведения исследования весьма символично, ведь именно в Университете Райс более 20 лет тому назад были открыты бакиболлы. Объясняя, как столь маленькие шарики могут хранить столько водорода, Якобсон говорит: «Связи между атомами углерода — одни из самых сильных химических связей в природе. Именно эти связи делают алмазы самой твердой в мире субстанцией, и наше исследование показывает, что для деформации или разрыва связей типа углерод-углерод в фуллерене требует колоссальное внутренне давление».

Новый метод вычисления вместительности задействует высокоточное компьютерное моделирование. Модель измеряет силу связей между атомами углерода в бакиболле по мере добавления атомов водорода. Модель универсальна в том смысле, что может быть масштабирована для фуллеренов любого размера. Она не только показывает, сколько водорода может вместить фуллерен, но и симулирует разрыв фуллерена, когда установленная величина оказывается превышена.

По словам Якобсона, наполненные водородом бакиболлы теоретически можно будет хранить в виде порошка. «Они, скорее всего, будут собираться в слабые молекулярные кристаллы или образуют мелкий порошок, — утверждает он. — Использовать их можно будет либо целыми, или же протыкать в определенных условиях для высвобождения чистого водорода для топливных элементов или двигателей другого рода».

## 2.4. Разработка топливного бака будущего



1. Структура высокотехнологической губки, основы топливного бака будущего

В поиске решения безопасного хранения водорода при большой плотности, учёные из Греции впервые получили структуру, которая, по их мнению, станет основой топливного бака будущего.

При одинаковом весе водород в три раза более энергонасыщенный, чем бензин, но газ сложно хранить. Даже в жидком виде он требует высокого давления

или сверхмощного охлаждения. Последний прототип автомобиля, который способен проехать только до 450 км на полном баке.

Возможность хранить больше водорода простым способом может продвинуть технологию вперёд одним махом. А топливные баки нового поколения для хранения газа внутри твёрдых тел или жидкостей теперь делают это возможным.

Учёные из Греции утверждают, что они спроектировали материал, способный ответить требованиям, установленным пять лет назад Департаментом Энергетики США, чтобы создать материалы, способные удерживать 6% своего веса в водороде.

Для сравнения, самые передовые существующие твёрдые аккумулирующие материалы, гидриды металла, имеют цифру в 2 %.

Исследователи из Университета Крита в прошлом году доказали, что углеродные наноспиральи могут удерживать до 3.31 % своего веса в водороде. Сейчас они спроектировали сходный материал, который теоретически может удерживать почти в два раза больше.

Новая разработка заключается в листах графена – углеродный пласт толщиной в атом – разделённых столбцами из нанотрубок толщиной в 1.2-нанометра.

Проводилось искусственное моделирование, для того, чтобы доказать, что молекулы водорода могут свободно диффундировать по всей массе вещества, которое ‘заправляется’ положительно заряженными ионами лития для того, чтобы усилить его свойства, позволяющие удерживать газ.

Модели показали, то новые материалы поглощают 6.1 % своего веса в водороде при комнатной температуре и давлении.

Это лучшие удерживающие свойства материалов на сегодняшний день. Фраудакис надеется, что пока теоретические материалы покажут прогнозируемые свойства на практике. На данный момент по меньшей мере две исследовательские группы, пытающиеся разработать новый материал.

## **2.5. Применение металлоорганической структуры для хранения водорода**

Материалы на основе углерода могут без давления хранить водород с большей плотностью, чем плотность твердого водорода. Чем выше интерес к так называемой «водородной экономике» и к транспорту, сжигающему водород или использующему его в топливных элементах, тем более насущным становится вопрос — как же хранить водород. Многие эксперты полагают, что для того, чтобы транспорт на водородном топливе мог соревноваться с бензиновым в дальности поездок, водород необходимо хранить с плотностью, превышающей плотность жидкого водорода. Такие уровни компрессии чреваты проблемами с безопасностью и высокой стоимостью.

Недавно мы рассказывали о планах хранения водорода в углеродных фуллеренах, таких как «бакиболлы». А в Центре нейтронных исследований Национального института стандартов и технологий (NIST) продемонстрировали многообещающую новую технологию хранения водорода с использованием еще одной экзотической разновидности углеродных материалов.

NIST, Университет Мэриленда и Калифорнийский технологический институт совместно проводили исследования металлоорганических решеток (MOF). Этот тип соединений считается очень перспективным, так как может с легкостью хранить и высвобождать водород благодаря простым изменениям условий хранения. Однажды на этой основе может быть даже разработано что-то наподобие топливного насоса.

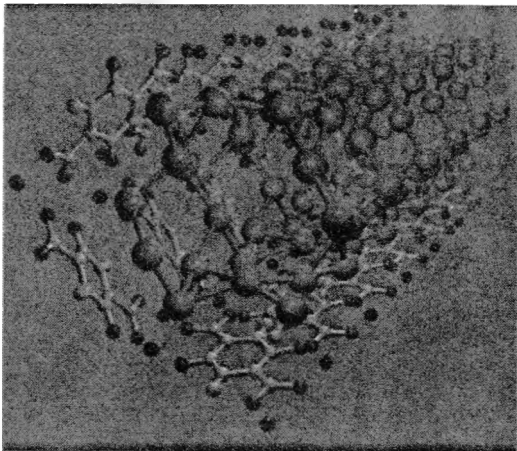


Рис. 12. Наноструктура MOF-74

по внутренним полостям которых бегают ионы цинка. Соломинки очень плотно упакованы, образуя порошкообразный материал. Благодаря уникальному устройству материала один грамм такой субстанции имеет площадь поверхности равную площади теннисного корта.

Данная структура удивительно хорошо упаковывает водород. Ученые установили, что при 77 градусах по Кельвину ( $-196^{\circ}\text{C}$ ) MOF-74 поглощает больше водорода, чем любой из известных на сегодня непрессованных материалов. Материал пакует водород с плотностью, превосходящей плотность твердого водорода. Чтобы придти к этому открытию ученые использовали смешанную технику нейтронного рассеивания и абсорбции газа.

Крейг Браун, ученый из Центра нейтронных исследований, сообщает, что исследователи не вполне уверены, что же помогает MOF-74 так здорово впитывать водород. По его словам, они склоняются к мнению о том, что это может происходить в результате взаимодействия водорода с ионами цинка. Браун воодушевлен перспективами MOF-74: «Когда мы начали наши эксперименты, мы поняли, что взаимодействие с металлом не только повышает температуру хранения водорода, но и увеличивает плотность до большей, чем у водорода в твердом состоянии. Это абсолютно первый случай, когда подобное было достигнуто без помощи компрессии».

Температура, необходимая для складирования в MOF-74 легко достигается с помощью дешевого жидкого азота. Это большое преимущество по сравнению с твердым азотом, нуждающимся в температурах ниже  $-269^{\circ}\text{C}$ . Исследователи надеются, что дальнейшие исследования позволят им либо модифицировать материал, либо найти похожие, чтобы складирование стало возможным при еще более высокой температуре. Тогда можно будет обойтись без систем охлаждения и/или изоляции, а значит снизить производственные затраты и улучшить экономию топлива.

## ЛИТЕРАТУРА

1. [www.nanometer.ru](http://www.nanometer.ru)
2. [www.nanonewsnet.ru](http://www.nanonewsnet.ru)
3. [www.nanodigest.ru](http://www.nanodigest.ru)
4. Рыбалкина М. Нанотехнология для всех.—Nanotechnology News Network, 2005.
5. EUR 21151 – Нанотехнологии – Новинки завтрашнего дня. Люксембург: Служба по официальным изданиям Европейского сообщества, 2006.