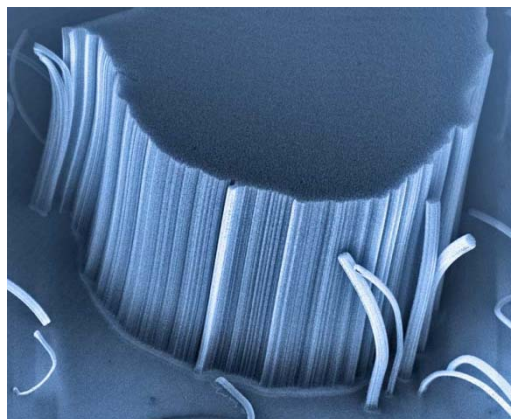


## 1. Введение

Они прочнее и в несколько раз легче стали, длиннее чем знаменитая Empire State Building (если говорить относительно). Они были обнаружены в маленькой кучке черной грязи если не случайно, то очень близко к этому. Их обнаружение породило гигантскую волну интереса и создало коммерческие продукты на много миллиардов долларов. Так что же это? Ответ прост – это углеродные нанотрубки (УНТ), уникальные наноструктуры с выдающимися электронными и механическими свойствами.



Идеальную нанотрубку можно представить в виде гексагональной сетки углеродных атомов, которые свернуты в бесшовный цилиндр. Имея в диаметре около 1 нанометра, такой цилиндр в длину может достигать миллиметровой длины. С торцов цилиндр обычно «запечатан» половинкой молекулы фуллерена.

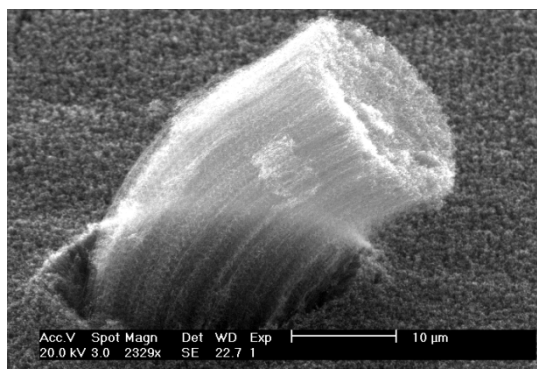
### Немного истории

Углеродные нанотрубки были синтезированы примерно 70-х или чуть ранее в СССР, но рост интереса к ним начал проявляться в мире с начала 90-х после публикации в 1991 году работы японского исследователя С. Ииджимы из компании NEC в журнале Nature. В процессе синтеза фуллерена C<sub>60</sub> –новой на тот период, необычной формы углерода Ииджима обнаружил углеродные формы в виде трубочек, вложенных одна в другую и числом от 2 до 50. После работы Ииджимы рост научных публикаций по углеродным нанотрубкам стал носить взрывной характер.

### Синтез УНТ

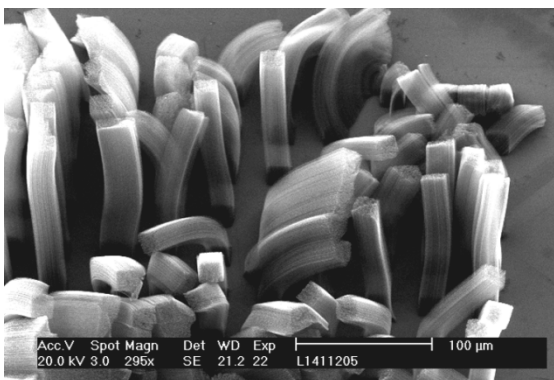
Как же можно получить эти необычные формы углерода?

Разные типы углеродных нанотрубок можно получить несколькими путями. Наиболее часто применяемые в настоящее время в мире технологии роста нанотрубок это: дуговой разряд, лазерная абляция и осаждение из газовой фазы. Очистка (пурификация) нанотрубок также подразделяется на несколько техник: обработка кислотами, окисление, отжиг, обработка ультразвуком, фильтрация.



### В чем интерес?

Чем же так привлекательны эти нанотрубки, что к ним такой широкий интерес и количество публикаций по ним растет в геометрической прогрессии?



Интерес к нанотрубкам возник из-за их электрических, механических, химических, оптических и других характеристик, которые сулят нанотрубкам большое будущее в различных применениях. Чего стоит одна только идея космического лифта для подъема на околоземную орбиту различных грузов!

Фундаментальные и прикладные исследования углеродных нанотрубок также указывают на

возможное применение нанотрубок в области хранения энергии, молекулярной электроники, наноустройств и композитных материалов, оптических устройств. Исследования по дальнейшему практическому применению нанотрубок все еще продолжаются.

## Весь фокус в структуре!

Откуда взялись у таких простых углеродных структур такие необычные свойства?

Все эти электрические, молекулярные, структурные особенности углеродных нанотрубок в большей степени определяются их почти одномерной структурой. Наиболее важные свойства нанотрубок следующие:

- **Химическая реактивность.** Химическая реактивность УНТ в сравнении с листом графена увеличена из-за кривизны поверхности УНТ.

- **Электропроводность.** В зависимости от угла ориентации графитовой плоскости, составляющей нанотрубку, относительно ее оси (вектора хиральности) углеродные нанотрубки могут быть проводниками или полупроводниками.

- **Оптические свойства.** Благодаря этим необычным свойствам могут быть созданы новые устройства микрооптики.

- **Механические свойства.** Согласно исследованиям УНТ относительно прочнее стали примерно в 100-300 раз и при этом сталь в 6 раз тяжелее. Эти свойства УНТ могут быть применены для производства легких и прочных композитов.

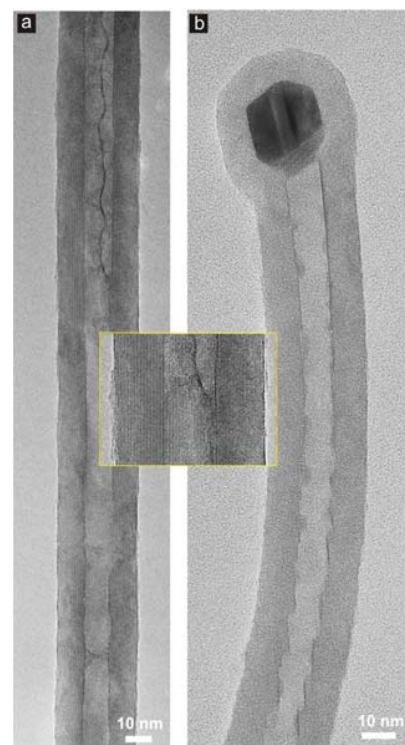
- **Высокая теплопроводность, химическая и термическая стабильность** также являются отличительными особенностями углеродных нанотрубок.

Если суммировать, то в основном свойства УНТ зависят от двух параметров – вектора хиральности и диаметра УНТ.

## 2. Механизмы роста

Вопрос формирования углеродных нанотрубок до конца все еще не исследован. Все еще продолжаются активные дискуссии по поводу наличия нескольких механизмов роста нанотрубок. Один из таких механизмов можно разделить на три стадии. Вначале для образования нанотрубки или фуллерена на поверхности частички металлического катализатора образуется прекурсор  $C_2$ . Из такой метастабильной карбидной частички начинает быстро расти стержнеподобный углерод. Затем наступает стадия медленной графитизации его стенок. Этот механизм исследован благодаря туннельному электронному микроскопу (ТЕМ).

Другая теория постулирует, что вначале металлические частички катализатора распределяются и удерживаются на подложке. Эта теория подразумевает сферическую или грушевидную форму частиц катализатора, осаждение углерода происходит только на половине поверхности частиц (это нижняя криволинейная сторона грушевидных частиц катализатора). Углерод диффундирует вдоль градиента концентрации и осаждается на другой половине, вокруг и ниже диаметра, делящего частицу пополам. Однако, он не



осаждается на верхушке полусферы, что приводит к образованию пустой сердцевины трубки.

Суммируя можно утверждать, что на осажденных металлических частичках нити нанотрубок формируются либо «экструзией (также известной как базовый или корневой рост)» при котором нанотрубка растет начиная с металлической частицы, которая остается в контакте с подложкой (Рис.1 А). Или механизм роста выглядит так, что металлическая частица отрывается от подложки и удерживается на растущей нанотрунке (Рис 1В). В зависимости от типа и размеров частиц-катализаторов, температуры процесса, подаваемых газов растут одностенные или многостенные нанотрубки. При дуговом разряде если частички катализатора не присутствуют в графите, то нанотрубки будут расти на, образующихся в плазме разряда, частицах углерода  $C_2$ .

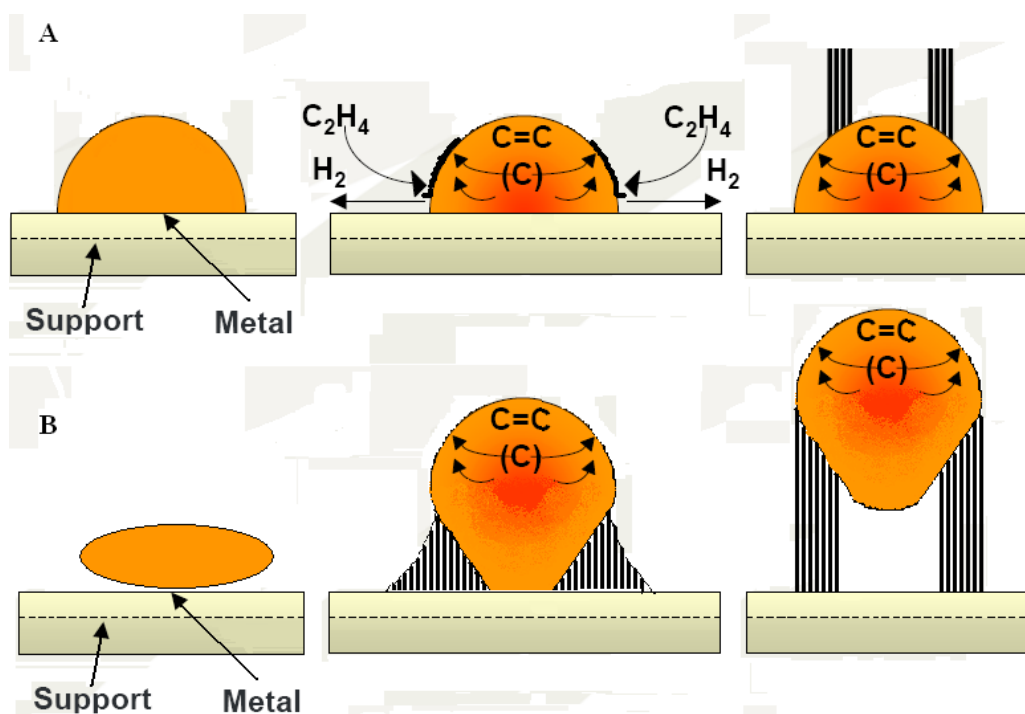


Рисунок 1. Примерная визуализация механизма роста УНТ.

## Синтез УНТ

Углеродные нанотрубки образуются как результат превращений химических веществ, содержащих углерод, при воздействии повышенной температуры. Существует несколько, наиболее часто упоминаемых в литературе, механизмов синтеза углеродных нанотрубок. Это дуговой разряд, лазерная абляция, синтез УНТ в пламени и метод осаждения из газовой фазы. Более подробно остановимся на последнем из них, потому что этот метод синтеза УНТ является простым, высокопроизводительным, легко масштабируемым в производство и дающим наиболее длинные и качественные нанотрубки на настоящий момент.

## Метод газофазного осаждения

В основе синтеза УНТ методом химического пароосаждения (осаждения из газовой фазы, CVD-метод) лежит подача углеродсодержащего газа в реактор и использование источника энергии, такого как плазма или резистивный нагрев с целью проведения реакций термохимического разложения углеродсодержащих соединений. Наиболее широко применяются такие углеродсодержащие газы как метан, этилен, оксид углерода  $CO$  и ацетилен. Источник энергии

используется для «разламывания» (термического разложения) молекул газа и получения атомарного углерода. Далее углерод распространяется к подогретой подложке, покрытой катализатором (обычно используют микрочастицы переходных металлов с низкой точкой плавления, которые абсорбируют углерод – железа, кобальта, никеля, молибдена), где он начинает оседать. Если выбраны и поддерживаются правильные параметры процесса – начинают образовываться углеродные нанотрубки.

Использование CVD метода осаждения из газовой фазы позволяет получить хорошо выровненные и сгруппированные массивы нанотрубок. Хорошо контролируются такие параметры как расположение на подложке, диаметр и скорость роста нанотрубок. Использование соответствующего катализатора позволяет получить как многостенные так и одностенные УНТ. Таким образом, CVD-метод синтеза УНТ состоит из двух этапов – подготовки катализатора и затем непосредственно синтеза.

Существует несколько методов нанесения катализатора на подложку - это нанесение из раствора, испарение или распыление. Далее осуществляется отжиг или химическое травление для индуцирования зародышеобразования частиц катализатора на подложке. При термоотжиге на подложке формируются кластеры из которых затем происходит рост нанотрубок. Окно температур для синтеза нанотрубок находится в интервале 650-900°C. Типичным выходом для CVD-метода является 30%.

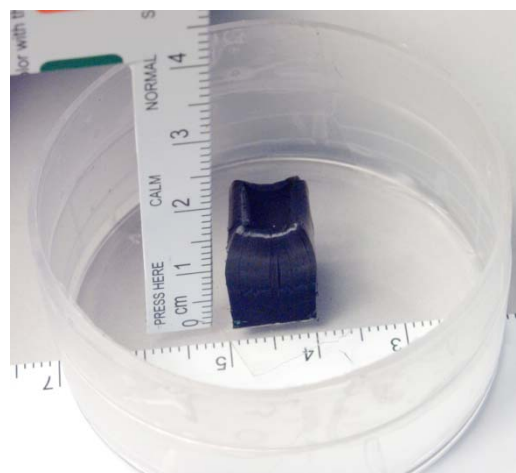
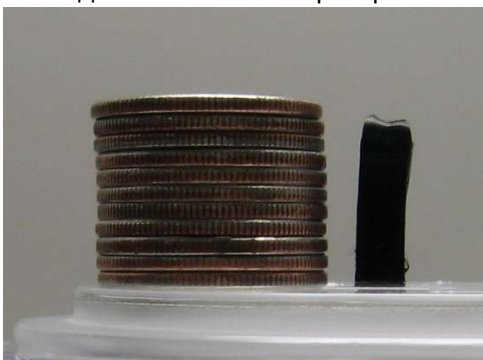
Метод газовой фазы осаждения для синтеза УНТ был модифицирован разными исследователями и в настоящее время он подразделяется на несколько методик:

- Химическое пароосаждение стимулированное плазмой
- Термо-химическое пароосаждение
- Спирто-каталитическое пароосаждение
- Рост из газовой фазы
- Пароосаждение с поддержкой аэрогелем
- Термо-химическое пароосаждение стимулированное лазером
- Процесс CoMoCat
- Непропорциональный процесс с высоким давлением CO

### 3. CVD-реакторы компании FirstNano

В настоящее время разработано много разных видов реакторов для разных методик роста УНТ. Для рассмотрения типичных схем построения реакторов можно обратиться к установкам синтеза нанотрубок известной американской компании FirstNano. Американская компания FirstNano специализируется в производстве инновационного высоко-качественного оборудования для синтеза многочисленных одно-размерных наноструктур и наноматериалов. First Nano поставляет системы осаждения в Университеты и исследовательские лаборатории по всему миру. Пройдя

по следующей ссылке



[http://nsf.gov/news/news\\_summ.jsp?cntn\\_id=108992](http://nsf.gov/news/news_summ.jsp?cntn_id=108992)

можно найти информацию о примере партнерства компании с Университетом Цинциннати (США), в результате которого были синтезированы самые длинные на сегодняшний день углеродные нанотрубки (УНТ) в мире (около 18 мм).

В 2001 году компания запустила на рынок свою серию систем для синтеза УНТ под маркой EasyTube™.

Первая установка в серии – EasyTube™ 2000 представляет собой модульную систему с горизонтальной рабочей камерой из кварца диаметром до 75 мм. Нагрев в реакторе такого типа осуществляется резистивно или с помощью инфракрасного излучения.

Эта конфигурация часто используется в методе термо-химического паросаждения, где, как пример, металлы-катализаторы – Fe, Ni, Co по отдельности или вместе в определенной пропорции осаждаются на подложке. Затем подложка помещается в камеру-реактор, где с помощью дополнительного травления частиц катализатора аммиаком NH<sub>3</sub> образуются нанометрового размера частички-зародыши будущих нанотрубок.

Схематично камера – реактор показана на **рис.2**

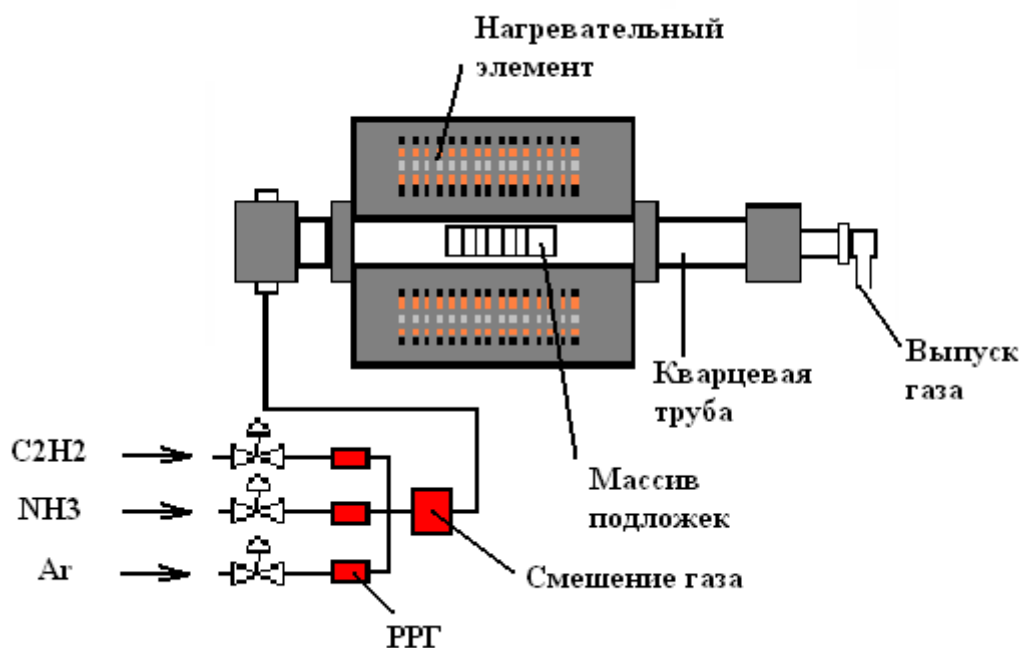


Рис. 2. Схема реактора установки EasyTube™ 2000

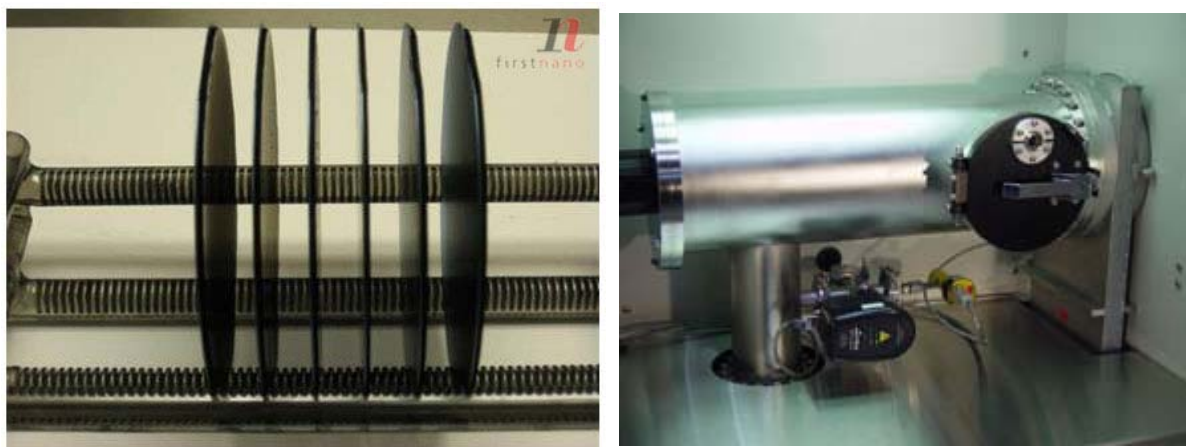


Рис. 3. Вертикальный массив подложек в реакторе установки EasyTube™ 3000 и внешняя загрузочная камера

Следующая серийная установка – EasyTube™ 3000 построена по той же схеме с горизонтальной кварцевой камерой, но она уже может работать с подложками от 100 мм диаметром и в нее возможно загружать до 20 подложек на цикл (Рис.4).

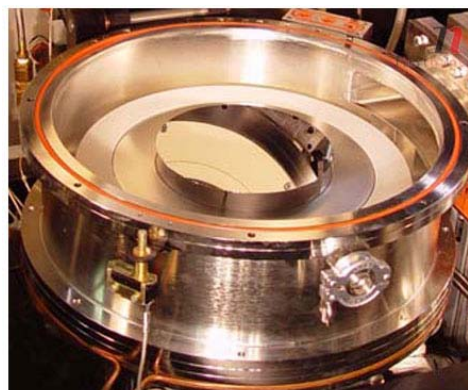
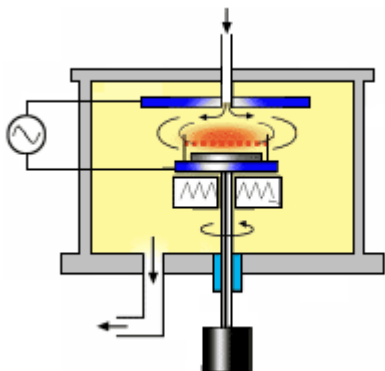


Рис.4 Схема горизонтального реактора и его фото на примере установки EasyTube™ 4000



Рис. 5. Внешний вид установки синтеза EasyTube™ 3000

Установка – EasyTube™ 4000 имеет несколько другое построение. Подложки в камере данной установки располагаются горизонтально. Для роста УНТ установке применяется источник плазмы. В этой установке можно синтезировать мириады материалов: не только нанотрубки и нанопровода, но и пленки аморфного кремния и поликремния, диэлектрические пленки и алмазоподобные пленки.

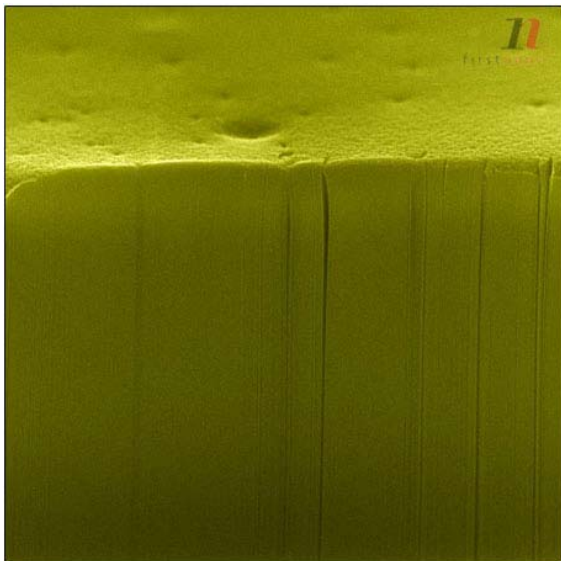
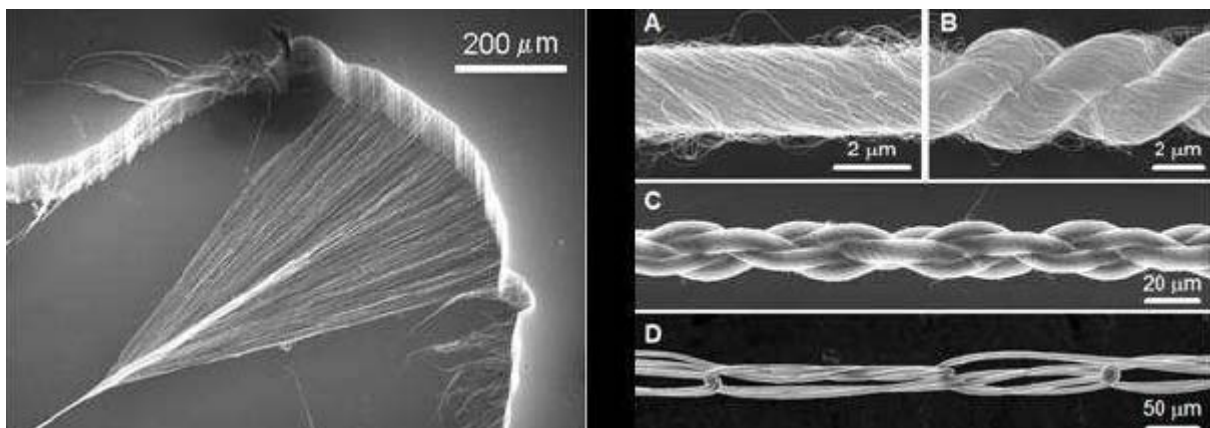


Рис. 6. Вертикально выращенный массив двухстенных/многостенных нанотрубок в установке EasyTube™ 2000 на слое Fe-катализатора. Высота массива около 100 мкм.

#### 4. Потенциальное применение УНТ

Нобелевский лауреат 1996 года в области химии Ричард Смайли однажды сказал: «Эти нанотрубки настолько прекрасны, что они просто обязаны где-то использоваться».

Смайли был совершенно прав, углеродные нанотрубки благодаря своим выдающимся свойствам находят применение в промышленности как ключевые компоненты многих электронных и микро-устройств и не только. Для того чтобы превратить эти устройства в коммерческие продукты для начала требуется практичная и малозатратная методика выращивания углеродных нанотрубок. Относительно низкие температуры процесса и возможность нанесения катализаторов согласно заданному трафарету прямо на подложке позволяет каталитическому CVD-методу быть наиболее предпочтительным методом для синтеза УНТ. Следующий вопрос после определения технологии синтеза УНТ – это вопрос применения и использования выдающихся свойств нанотрубок.



Первое место по потреблению займут, как ожидается, легкие и прочные композитные материалы для автомобильной, авиационной и аэрокосмической промышленности. Дополнительный рынок

обеспечат нанотрубки и композиты на их основе в качестве аккумуляторов водорода; материалов, поглощающих излучение радиолокаторов; заготовок для компакт-дисков; электромагнитных экранов для электронных систем; сверхемкостей в электрических батареях; химических и биологических датчиков; эмиттеров электронов для плоских экранов дисплеев, осветительных ламп и рентгеновских трубок; наноэлектронных интегральных схем; кантилеверов атомно-силовых микроскопов; материалов для спортивного снаряжения (теннисные ракетки, корпуса яхт, рыболовные снасти); технического текстиля.

Область потенциального применения УНТ можно разделить на 2 части – это область немедленного применения УНТ благодаря механическим, электрическим и электрохимическим (сверхконденсаторы) свойствам и область будущего применения нанотрубок, где некоторые их выдающиеся свойства, например оптические, все еще изучаются.

### **Эмиссия электронов (оптич св-ва)**

Подобно кремнию, который стал в 20-м веке материалом № 1 для компьютерной промышленности, углеродные нанотрубки в нашем 21-м веке с высокой вероятностью будут тем волшебным материалом, который позволит сделать следующий эволюционный шаг навстречу созданию новой элементной базы электроники.

Углеродные нанотрубки являются наиболее лучшими эмиттерами электронов среди всех известных материалов. Все это благодаря высокой электрической проводимости и невероятно малому диаметру нанотрубок. Чем меньше радиус кривизны кончика нанотрубки, тем большая концентрация электрического поля возможна на этом кончике, что приводит к увеличенной эмиссии электронов. Острота кончика нанотрубки также означает, что высокая эмиссия возможна при низком приложенном напряжении, а это важно при создании электрических устройств с низким потреблением энергии. Высокая плотность тока эмиссии наблюдается параллельно с его экстремальной стабильностью, и непосредственным воплощением этой особенности УНТ являются созданные катодолюминесцентные источники света и, как следствие, гибкие экраны дисплеев (NanoPage) очень большой площади с излучателем электронов на основе углеродных нанотрубок. NanoPage - гибкие, легкие, допускающие скручивание, с низкой потребляемой мощностью, относительно низкой стоимостью, при этом с высокой четкостью изображения. Каждый пиксель такого экрана представляет собой миниатюрную катодную лучевую трубку (Cathode Ray Tube) - MicroCRT, установленную на полимерную основу.

Другие применения этих свойств УНТ – кантилеверы электронных микроскопов, низковольтные световые источники с холодным катодом (LEDs).

Уникальное свойство УНТ состоит в выборе очень узкой длины волны эмиссии или детектирования света и возможность очень точной подстройки посредством изменения структуры УНТ. Есть исследования по применению УНТ в качестве чувствительного элемента болометра и при создании оптоэлектронной памяти.

### **Усиленные и проводящие ток пластики с интегрированными УНТ**

Пластики пришли в наш мир и одной из целей этого прихода была замена металлов. Но пластики большей частью хорошие изоляторы и ток не проводят, а существует много применений, где это необходимо. Токопроводящие наполнители – в этом разрешение этого противоречия. Также известно, что чем выше аспектное соотношение токопроводящих наполнителей, тем лучше. УНТ являются такими идеальными наполнителями для создания токопроводящих пластиков из-за их непревзойденного аспектного соотношения (отношения длины к диаметру трубок). Нанотрубки уже нашли свое применение для создания защитных композитов от электромагнитной



(радиочастотной) интерференции, защитных оболочек, антистатических материалов, прозрачных проводящих покрытий, материалов, поглощающих излучение радаров для военных применений.

В автомобильной промышленности США нанотрубки уже широко используются с 90-х годов. Проводящий нанотрубный композит, покрывающий корпус автомобиля, позволяет исключить необходимость предварительной грунтовки при электростатической распылительной окраске. К тому же, улучшается надежность окраски, снижается воздействие на окружающую среду летучих органических растворителей, используемых в традиционной окраске. Проводящий полимер в системе подачи топлива исключает риск повреждений, вызванных искрой от накапливаемых статических зарядов.

Включение УНТ в композитный материал для создания крыльев и других частей летающих аппаратов, подвергающихся высоким нагрузкам, позволяет мгновенно находить появление микротрещин и других видов нежелательных изменений материала композита, например его расслаивания методом измерения электросопротивления композита из нескольких точек. Этот метод не только позволяет распознать местонахождение микротрещин, но и залечить их, т.е. восстановить композит просто подав электрический ток в нужные точки. Специальный материал, включенный в композит расплавляется и восстанавливает его структуру и прочность.

### **УНТ для хранения энергии**

Некоторые характеристики УНТ требуются в материалах используемых как электроды в батареях или конденсаторах. Большая поверхностная площадь, высокая электропроводность и что особенно важно линейная геометрия УНТ делает их поверхность очень доступной для электролита. Нанотрубки как будто специально созданы, например, для производства литий-ионных батарей. Уже сегодня в этих батареях используются электроды механически стабилизированные внедрением многостенных УНТ. В дополнение нанотрубки являются прекрасным материалом для создания электродов в суперконденсаторах. Ячейки топливных элементов – еще одна область в которой применение УНТ стремительно развивается. Нанотрубки также материал номер один для создания сверх-эффективных катализаторов, в частности для кислородного электрода в топливных ячейках.

Углеродные нанотрубки благодаря их механическим свойствам используются для создания роторов сверхскоростных маховиков-накопителей энергии. Такие маховики-накопители энергии в ближайшее время могут прийти на смену аккумуляторных батарей в автомобилях, они будут накапливать энергию торможения и отдавать ее при начальном разгоне автомобиля и будут использоваться для накопления-отдачи избыточной энергии, которую вырабатывают электростанции, в часы наименьшей нагрузки.

### **Проводящие клеящие/связывающие компоненты и соединители**

УНТ как проводящие наполнители хороши для создания соединяющих материалов, таких как токопроводящие клеи, разные адгезивы, изолирующие компаунды, коаксиальные кабели и другие соединители.

### **Молекулярная электроника**

Несколько последних лет в передовых научных центрах не прекращаются разработка электронных схем и компонентов схем из мельчайших элементов – молекул. В любой электронной схеме, а в особенности такой, размеры которой находятся на наномасштабе, соединения между ключевыми компонентами становятся особенно важными. Геометрия этих межсоединений, их электрическая проводимость, возможность их точного выведения делают углеродные нанотрубки идеальными кандидатами в качестве таких межсоединений для молекулярной электроники. В дополнение

нанотрубки продемонстрировали, что они сами могут использоваться в качестве элементов переключения, так называемых нанотранзисторов.

Как пример использования углеродных нанотрубок в качестве элементов памяти для персональных компьютеров можно привести разработки компании Nantero из США. Nantero разработала прототипы энергонезависимых элементов памяти, которые будут работать при очень малом подаваемом напряжении и иметь миллионы циклов на очень высокой скорости переключения.

Невидимые глазу электрические схемы, основанные на прозрачных транзисторах, выполненных на основе УНТ найдут применение в военных и промышленных областях. Эти устройства создаются на гибких пластиковых подложках с помощью послойного наращивания матрицы одностенных нанотрубок в немного модифицированном CVD-процессе. Созданы первые прототипы таких прозрачных схем, они заменят существующие на сегодня прозрачные электроды, созданные на основе оксидов Индий-Олово (ITO) и будут использованы в первую очередь для создания «тач-скринов» и в производстве солнечных батарей.

### **Термоматериалы**

Рекордная анизотропная теплопроводимость УНТ позволяет использовать это свойство в применениях, где требуется передача тепла из одной точки в другую. Например, в электронике как теплоотводы для чипов. Недавно появились композиты с нанотрубками, также демонстрирующие высочайшую температурную проводимость

### **УНТ в структурных композитах**

Удивительные свойства углеродных нанотрубок не ограничиваются только высокими значениями электропроводности и теплопроводности, но также включают механические свойства, такие как жесткость, прочность, стабильность. Эти свойства используются при создании композитных материалов с требуемым набором механических свойств. Возможно, что когда будет найден процесс производства нанотрубок достаточной длины, они заменят сталь во многих применениях. Однако, следует заметить, что нанотрубки пока не являются волокнами, которые несут основную нагрузку, пока здесь применяют обычные углеродные волокна, но добавляют композитам новые прочностные свойства в направлении перпендикулярном плоскости ориентации углеродных волокон.

### **Волокна и ткани с встроенными УНТ**

Уже никого не удивить волокнами, свитыми полностью из углеродных нанотрубок. В США и других развитых странах есть компании, предлагающие коммерческие волокна и нити из чистых УНТ или из композитов с включенными нанотрубками. Такие сверхпрочные волокна могут быть использованы во многих отраслях промышленности, например, в оборонной для создания сверхпрочных бронежилетов, брони, кабелей.

### **УНТ как основание для катализаторов**

Углеродные нанотрубки имеют чрезвычайно высокую поверхностную площадь. Например, в одностенных нанотрубках каждый атом являет собой не одну, но две поверхности – снаружи и внутри нанотрубки. Такая развитая поверхность в сочетании с возможностью присоединения к ней любых химических веществ дают уникальное использование УНТ как основания для удержания катализаторов. Также можно использовать высокую электропроводность УНТ в создании новых катализаторов.

## **Керамика с интегрированными УНТ**

Керамические материалы, усиленные введением нанотрубок, гораздо прочнее, проводят электричество и могут проводить или не проводить тепло, в зависимости от ориентации нанотрубок внутри керамики. Такие керамические материалы очень прочны, могут выдержать высокие тепловые нагрузки и имеют высокую химическую стойкость, что позволяет использовать их, к примеру, для покрытий лопаток турбин или как внешнюю обшивку космических спускаемых аппаратов.

Композитная керамика, состоящая из оксида алюминия, 5-10 % УНТ и 5% ниобия в 5 раз эффективнее против образования трещин под нагрузкой чем широко-применяемый оксид алюминия, имеет электропроводность в 7 раз выше чем просто керамика с нанотрубками и проводит тепло в одном направлении – вдоль направления ориентации нанотрубок и служит хорошим барьером для тепла в направлении перпендикулярном ориентации нанотрубок в композите.

## **Биомедицинские применения УНТ**

Применение УНТ в биомедицине развивается стремительными темпами. Большая часть тела человека состоит из углерода, что наталкивает исследователей на мысль о биосовместимости УНТ с живыми тканями человека. Проводились исследования по росту нанотрубок из живых клеток, что говорит об отсутствии токсического эффекта. Клетки не сражаются с нанотрубками из углерода и это дает возможность создания протезов и хирургических имплантов на основе УНТ. УНТ также могут применяться для создания катетеров или артериальных трубочек для предотвращения сужения артерий (стентов). Было также продемонстрировано, как отдельная спираль ДНК была присоединена к углеродной нанотрубке и затем введена в живую клетку. Это может быть использовано в генной терапии. Есть исследования по созданию искусственных мускулов – через тонкие листы, сделанные из нанотрубок пропускали микротоки и наблюдали их удлинение и сокращение

Исследователи в МИТ (Массачусетс) недавно продемонстрировали использование УНТ как сенсоров, определяющих воздействие лекарств на раковые клетки или определяющих наличие повреждающих ДНК веществ. Такой сенсор определяет наличие и расположение отдельных молекул введенных веществ в клетке. Каждая отдельная УНТ имеет присоединенную ДНК, которая в свою очередь при введении в клетку захватывает молекулы агрессивного к ДНК вещества. Это присоединение изменяет интенсивность или длину волны флуоресценции нанотрубок в ближней инфракрасной области. Таким образом, можно распознать любые молекулы вещества проникшие в клетку.

Другое применение нанотрубок связано с использованием их как транспортных средств, доставляющих лекарственные вещества в нужное место организма, хотя механизмы проникновения УНТ в клетки все еще не понятны.

## **Фильтрация воды, воздуха и газообразных веществ с помощью УНТ**

В промышленности развитых стран уже давно используют специальные фильтры воды и воздуха на основе УНТ. Было продемонстрировано, что такие фильтры не только захватывают очень мелкие частички фильтруемых веществ, но и убивают большинство бактерий. Создаются и уже используются фильтры для топлива, смазочных материалов и разных газообразных продуктов.

Нет сомнений, что углеродные наноматериалы, в особенности углеродные нанотрубки (УНТ), можно использовать для защиты окружающей среды. Уникальные сорбционные свойства

позволят использовать их для фильтрации разных вредных примесей, например, тяжелых металлов (свинца, кадмия) и др.

Было показано, что функционализация путем обработки нанотрубок кислотами увеличивает сорбцию ионов урана на порядок. Более того, обеспечив нужные поверхностные группы и подобрав матрицу для композита, можно создать сорбенты с неограниченным количеством циклов сорбции/десорбции, которые будут обратимо сорбировать нужные ионы при высоком pH среды и десорбировать при низком. Таким образом, УНТ могут быть использованы в атомной промышленности как сорбенты (более эффективные, чем активированный уголь) и фильтры, а также для инкапсулирования и отверждения радиоактивных отходов.

### **Другие применения УНТ**

Сфера применения нанотрубок настолько широка, что ее не описать в пределах данной статьи. Есть примеры использования УНТ в текстильной промышленности при создании тканей не боящихся загрязнений, усиленные теннисные ракетки и бейсбольные биты – это простые примеры использования УНТ при создании спортивных товаров. Широкое применение УНТ находят в упаковке, т.к. введение нанотрубок в материал упаковки позволяет увеличить сопротивление упаковки проникновению атмосферы, что увеличивает срок хранения продуктов. Одна пивная компания в США профинансировала работы по созданию пластиковой упаковки с УНТ. В этой упаковке пиво остается холодным длительное время, чем в обычной. УНТ уже давно применяются при создании плоских дисплеев и ожидается появление коммерческих продуктов с прозрачными токопроводящими покрытиями на основе УНТ.

Одностенные нанотрубки могут использоваться как миниатюрные датчики для обнаружения молекул в газовой среде или в растворах с ультра высокой чувствительностью - при адсорбции на поверхности нанотрубки молекул ее электросопротивление может изменяться на 3 порядка в течение нескольких секунд. Такие нанодатчики могут использоваться для мониторинга окружающей среды, в военных, медицинских и биотехнологических применениях.

Есть исследование, обнаружившее воспламенение листа с УНТ при его попытке сфотографировать с фотовспышкой – это свойство можно использовать при создании, например, новых запалов в военной промышленности. Недавно китайские ученые обнародовали исследование по созданию плоских громкоговорителей из листов УНТ, простейшее коммерческое применение этого электроакустического эффекта состоит в замене пьезоэлектрических динамиков в поздравительных открытках.

### **Будущее**

Основные применения УНТ в настоящий момент касаются использования многостенных углеродных нанотрубок (MWCNT). Потенциальное применение их собратьев – одностенных (SWCNT) и двухстенных (DWCNT) нанотрубок не так хорошо исследованы и связано это в первую очередь с тем, что многостенные нанотрубки были получены гораздо раньше и не создано еще недорогого и надежного процесса выращивания одностенных нанотрубок с хорошей чистотой (отсутствие фракций аморфного углерода и частиц катализатора) и заранее заданной хиральностью, хотя существуют заявления о создании такого процесса компанией Toray Industries из Японии. Когда такой процесс будет широко использован, можно ожидать взрывного роста коммерческих применений где будет использована, например, высочайшая специфическая поверхность (SSA – specific surface area, cm<sup>2</sup>/gram) одностенных углеродных нанотрубок.

Другой вызов связан с созданием процесса выращивания длинных УНТ – сотни миллиметров в длину. Когда это произойдет, фантазии связанные с созданием космического лифта станут явью.

В заключение можно суммировать, что углеродные нанотрубки имеют множество уникальных и нужных свойств. Хотя для определенных применений требуются значительные инвестиции и время, чтобы довести дело до коммерческих продуктов, УНТ уже широко применяются и их применение дает значительную экономическую выгоду при относительно низких затратах.