

# РАЗРАБОТКИ ПО НАНОМАТЕРИАЛАМ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ ЛАБОРАТОРИИ ZETTL BERKELEY

Августинович А.Г.

Белорусский национальный технический университет, Минск

*In this article described a Zettl Research Group. They are currently investigating electronic, magnetic and mechanical properties of nanoscale materials such as fullerenes, carbon and non-carbon nanotubes. They also are investigate biological application of nanotechnology.*

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Zettl – это группа, которая занимается экспериментальной физикой во главе с ом, который является государственным профессором на кафедре физики в Университете Беркли и в отделе изучения материалов в Национальной лаборатории Беркли Лоренса. Они также связаны с центром наномеханической комплексной системы, междисциплинарным центром нанонауки. В исследованиях этой группы приняли участие исследователи из Беркли, Стэнфорда, Cal Tech и UC Merced. Зеттл является директором центра.

Исследовательская группа Zettl в настоящее время исследует электронные, магнитные и механические свойства наноразмерных материалов, таких как фуллерены, углеродные и Non-углеродные нанотрубки, и двумерные структуры листа графена, также и нитрида бора. Они также заинтересованы в необычных электронных состояниях при обычных и высоких температурах сверхпроводников. В лаборатории они обобщают эти материалы и исследуют их свойства, используя различные методы, включая и сканирующую электронную микроскопию, сканирующую зондовую микроскопию, высокое магнитное поле и высокие давления, ИК- и КР(комбинационного рассеяния) -спектроскопии. Они также исследуют биологические применения нанотехнологий.

## 2. НАНОРАЗМЕРНАЯ АРХИВНАЯ ПАМЯТЬ

Разработан новый механизм для хранения цифровой памяти, способный хранить данные с долгим сроком службы и высокой плотностью. Такое запоминающее устройство состоит из кристаллических наночастиц железа, заключенного в многослойных углеродных нанотрубках. Наночастица может двигаться через нанотрубки с применением низкого напряжения, устройство «записывает» бинарное состояние в виде позиции наночастицы. Состояние устройства может быть впоследствии прочитано простым измерением сопротивления.

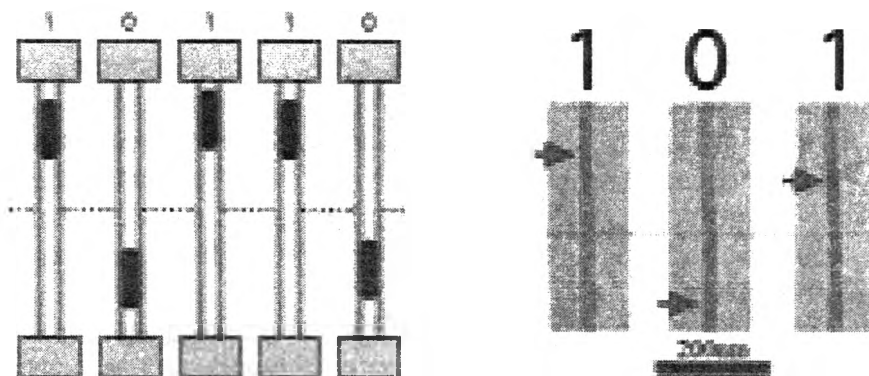


Рис. 1. Наночастицы железа, заключенные в многослойных углеродных нанотрубках

Цифровые устройства хранения данных стали повсеместно использоваться в нашей жизни, музыка, фотографии и даже написание слов перешли от своих традиционных аналоговых форматов в новые цифровые. Однако этот переход на цифровое хранение данных вызвал опасения о времени работы носителей. Хотя древние аналоговые носители (например, камень и калька) могут сохранить свои данные за тысячи лет, цифровые технологии хранения данных, такие, как оптические диски, магнитные диски и магнитные ленты, как полагают, на полвека (а во многих случаях намного меньше). Очевидно, камень и калька не хорошо подходят к объему сегодняшних данных: ячейки в дисках находятся на расстоянии около микрона друг от друга, резьба на камне имеет размеры ближе к сантиметру. Новым архивным технологиям придется объединить лучшие черты обоих, хранение данных на высокой плотности с большим временем службы.



*Рис. 2. Египетские иероглифы, которые долгое время хранятся на камне, но у них низкая плотность записи*

### **3. ПРОСМОТР АТОМОВ НА ГРАНИ ДВУХМЕРНОГО КРИСТАЛЛА**

Хотя физика материалов на поверхности и краях очень хорошо изучена, движение отдельных атомов непосредственно на изолированном краю не наблюдалось в реальном времени. С TEAM 0.5, просвечивающим электронным микроскопом, группа Zettl отразила динамику атомов углерода на краю отверстия в один атомный слой графена. Они определили стабильности и описали динамику различных конфигураций края.

Можем ли мы увидеть, как отдельные атомы перемещаются в реальном времени? Можем ли мы смотря на кристалл увидеть перерыв формы, как атомы изменяют сами себя? С появлением коррекции абберации просвечивающего электронного микроскопа (ТЭМ), такой как TEAM 0.5, ответ на эти вопросы «да». Этот микроскоп позволит изучить не только каждый отдельный атом в пробе, но он может сделать это за значительно короткие сроки. Впервые, можно сделать запись динамики атомов.

Идеальная система для изучения динамики атомов графена - один лист графита. Это атомный слой атомов углерода, оставленный концом карандаша для наблюдения в микроскоп TEAM. Нетронутая гексагональная решетка углерода прерывается отверстием, умышленно сделанным длительным облучением пучком электронов TEAM. Атомы на краю отверстия подвергаются действию постепенно

выбрасываемых электронов из пучка и размер отверстия растет. Атомы, которые потеряли своих соседей, являются крайне неустойчивыми, и передвигаются, стараясь быстро найти стабильную конфигурацию. Анализируя рост дыры и атомные перестройки, Zettl заключают, что конфигурация зигзаг является наиболее стабильной на открытой границе графена.

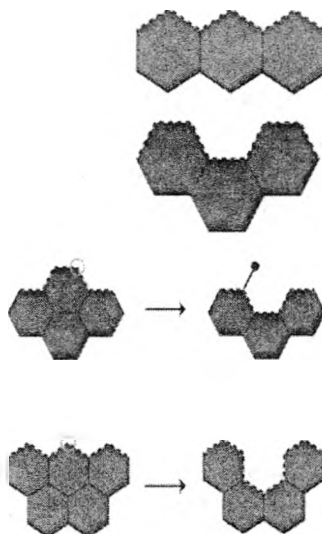


Рис. 3. Схема зигзаг (красный) и кресло (синий) конфигураций

Схема зигзаг (красный) и кресло (синий) EDGE конфигураций. Положение края обозначается белой штриховой линией. Хотя обе конфигурации показаны в фильме TEAM 0.5, зигзагообразные края более стабильные при облучении электронным пучком и они преобладают.

Схема стабильности края. Удаление атомов на краю кресла (синяя, сверху) оставляет за собой изолированный атом, в то время как удаление атома из края зигзагом (красный, низ) не оставляет.

#### 4. НАНОТРУБКИ В РАДИО



Рис. 4. Вибрирующая нанотрубка, при помощи которой можно слышать радиосигналы

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 вы-

сокочастотных *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 видеофильма 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 с передаваемым сигналом, нанотрубка начинает вибрировать, которая размывается в видео, и в то же время, музыка становится слышимой. Четыре песни, *которые прослушали с помощью нанорадио* The Beach Boys, *Ларго* из оперы Генделя Ксерке (это была первая песня), *Layla* Эрика Клэптона (Derek & The Dominos), и главный титул "Звездных Войн" Джон Уильямс.

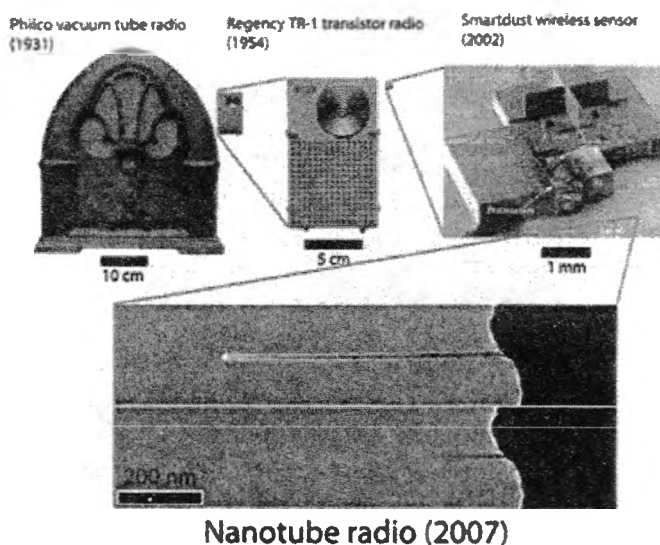


Рис. 5. Изменение размеров радио со временем

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!

### **5. ПРЯМОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СВЕТА В РАБОТУ**

Современная технология и исследования по преобразованию солнечной энергии зачастую неразрывно опирается на производство, хранение и распределение энергии для содействия производству полезной работы. Исследователи в лаборатории Zettl обнаружили механизм для преобразования солнечной энергии в работу. Они с помощью оптотермального отопления производят градиенты поверхностного натяжения, в результате которых на плавучие объекты действует движущие силы. Эти силы, по существу преобразование солнечной энергии непосредственно в полезную работу.



*Рис. 6. Небольшая самоходная лодка, плавающая на воде и управляемая с помощью оптотермального отопления*

Пример: небольшая самоходная лодка, плавающая на воде и управляемая с помощью этого процесса. Наноструктурированные композиционные материалы, состоящие из вертикально связанных полидиметилсилоксановых (PDMS), углеродных нанотрубок, встроенных в пластик, эффективно поглощают свет и преобразует его в тепло. При плавании на жидкости, это тепло локально уменьшает поверхностное натяжение жидкости. Когда объект асимметрично нагревается, создается градиент поверхностного натяжения и силы на объекте несбалансированы, в то возникает чистая движущая сила на объект.

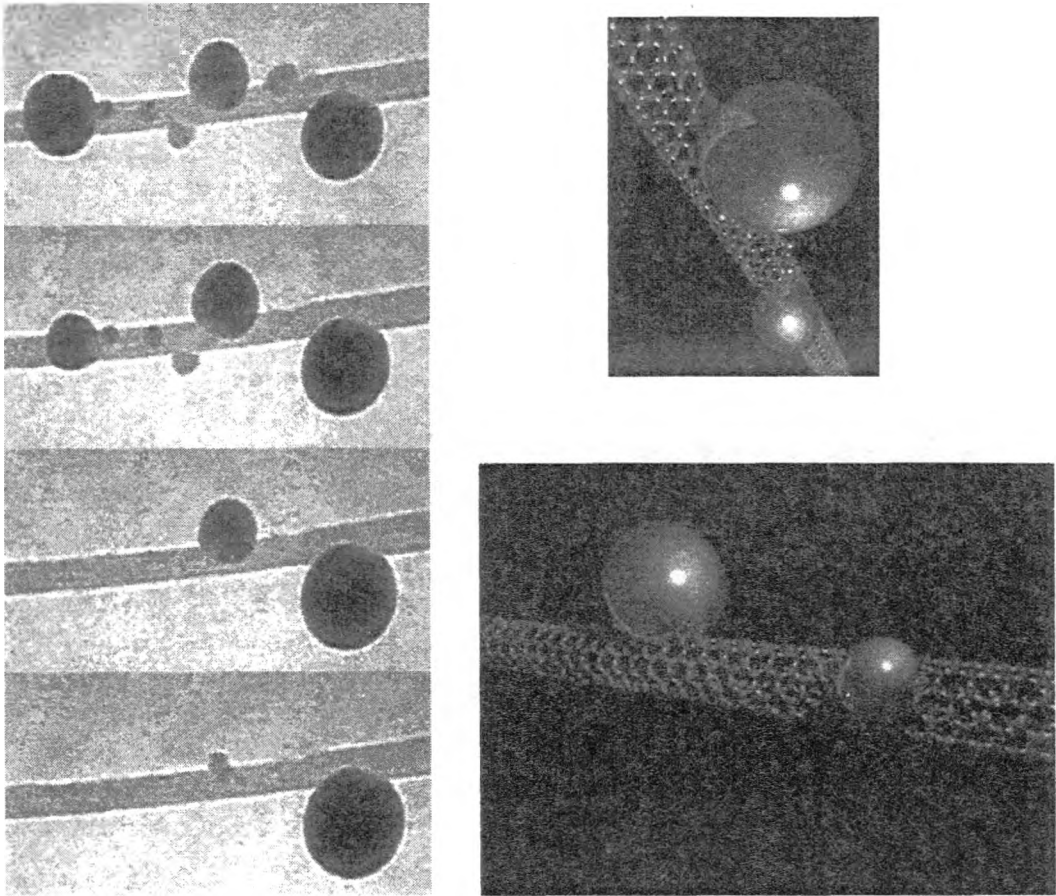
Определение пространственного облучения, ориентирование света могут быть использованы для контролируемого перемещения объектов на различных жидкостях. Этот метод двигателя обходит типичные ограничения, связанные с двигателем такие, как турбулентность. Вращательные движения также могут быть получены путем тщательного проектирования расположения света поглощающих материалов. При простоте использования поверхностного натяжения, на котором основан механизм создания движения, может быть использован для широкого применения.

### **6. ПЕРЕМЕЩЕНИЕ НАНОРАЗМЕРНЫХ ЧАСТИЦ**

Группа Zettl разработали технику для перемещения отдельных атомов вдоль углеродной нанотрубки и обратно. Общая масса сохраняется с высокой степенью точности ( 5%) во время транспортировки.

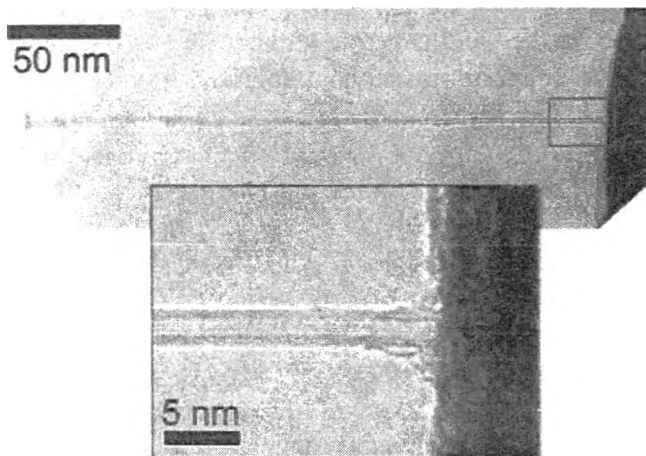
Градиент напряжения, а не тепловой градиент, определяет направление перемещения массы.

Концентрация влияет только на скорость передачи: наличие или отсутствие частиц, но не их размеры, влияет на рост своих соседей.



*Рис. 7. Перемещение наноразмерных частиц вдоль нанотрубки*

## 7. НАНОМЕХАНИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАСС ЧАСТИЦ АТОМНЫХ РАЗМЕРОВ



*Рис. 8. Нанотрубка, используемая как наномеханический датчик определения масс частиц атомных размеров*

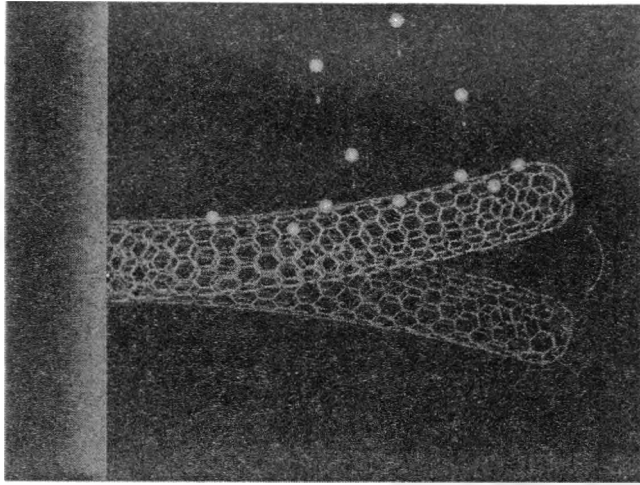


Рис. 9. Принцип действия наномеханического датчика

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

## 8. НАНОДВИГАТЕЛЬ

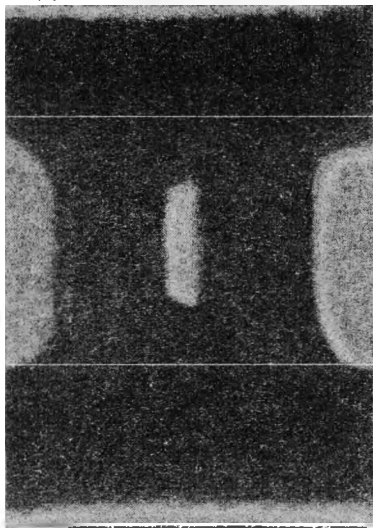


Рис. 10. Фотография нанодвигателя

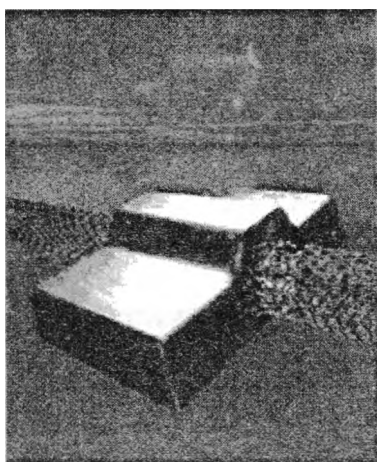


Рис. 11. Изображение металлической пластины с углеродной нанотрубкой

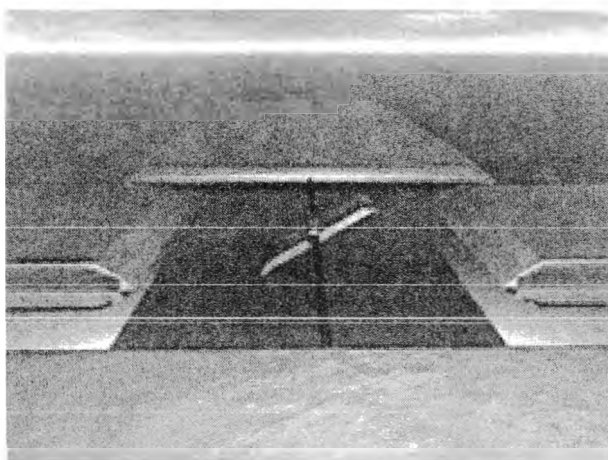


Рис. 12. Виртуальное изображение нанодвигателя: твердая прямоугольная металлическая пластина, кремниевая микросхема, фиксированные электроды статора

Для разрабатываемых сейчас микроскопических устройств, которые смогут, например, проплывать по кровеносным сосудам человека и очищать их стенки от отложений холестерина, нужны уж совершенно микроскопические двигатели - размером с молекулу. Группа Zettl смогла создать нанодвигатель с использованием многослойных углеродных нанотрубок.

Нанодвигатель представляет собой вращающуюся металлическую пластину с углеродной нанотрубкой.

Низкие внешние напряжения точно контролируют скорость работы и положения ротора пластины. Повторные колебания ротора пластины между позициями, а также повороты в 360 градусов были продемонстрированы без признаков износа или усталости.

В отличие от существующих химических биопроводов и двигателей, эта синтетическая электро-механическая система нанометровых размеров привода предназначена для работы в широком диапазоне частот, температуры, и экологических условий, в том числе в вакууме и жестких химических средах.



Концептуальный дизайн электромеханического вращательного привода. Вращательный элемент, твердая прямоугольная металлическая пластина, выступающая в качестве ротора, крепится к валу. Поддержка концов вала производится их опиранием на окисленной поверхности кремниевой микросхемы. Пластину-ротор окружают три фиксированных электрода статора: два горизонтальных сопротивления находятся на поверхности оксида кремния, а также третий статор находится под поверхностью. Они контролируют положение, скорость и направление вращения ротора.

## 9. Вывод

Благодаря исследовательской группе Zettl и их исследованиям, получены и открыты новые применения наноматериалов в различных областях: механике, электронике, биологии. Это еще один шаг в развитии и применении нанотехнологий.

1. Разработали новый механизм для хранения цифровой памяти, способный хранить данные с долгим сроком службы и высокой плотностью.

2. Zettl отразили динамику атомов углерода на краю отверстия в один атомный слой графена, определили стабильности и описали динамику различных конфигураций края.

3. Zettl построили полностью функциональное, со встроенным радиоприемником, во много раз меньше, чем любое предыдущее радио, из углеродных нанотрубок.

4. Zettl обнаружили механизм для преобразования солнечной энергии в работу.

5. Группа Zettl разработали технику для перемещения отдельных атомов вдоль углеродной нанотрубки и обратно.

6. Zettl разработали новый вид механического датчика, основанного на вибрирующей углеродной нанотрубке, которым можно определить массу одного атома.

7. Zettl смогли создать нанодвигатель с использованием многослойных углеродных нанотрубок.

## ЛИТЕРАТУРА

1. <http://www.physics.berkeley.edu/research/zettl/>
2. [www.nanonewsnet.ru](http://www.nanonewsnet.ru)
3. [www.popnano.ru](http://www.popnano.ru)
4. Рыбалкина М. Нанотехнологии для всех. – Nanotechnology News Network, 2005.
5. Перспективные материалы. – ТГУ, МИСиС, 2006.