

НАНОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ (*Nanoelectromechanical systems*)

«... кратчайшее выражение смысла жизни может быть таким: мир движется и совершенствуется. Главная задача – внести вклад в то движение, подчиниться ему и сотрудничать с ним».

Л.Н. Толстой



Предположим, что есть наноконструктор, состоящий из нескольких тысяч атомов разного вида. Что с его помощью можно собрать? На автомобиль или домик в деревне такого количества атомов, увы, не хватит. Зато можно с упоением собирать всевозможные молекулы различной формы: кольцеобразные (например, бензол), вытянутые (алканы) сферические (*фуллерены*)... Скучно. Особенно если хочется автомобиль. Впрочем, автомобили собирают из всевозможных дисков, шестеренок, цилиндров, поршней и прочих деталей, которых в нашем конструкторе, к сожалению, нет. Но если задуматься, почему бы нам не использовать вместо всех перечисленных деталей молекулы соответствующей формы и не собрать из них наноавтомобиль? Уже гораздо интереснее, не правда ли? Особенно если не за-

даваться вопросами относительно того, не развалится ли такой автомобиль, сможет ли он ездить и кого будет возить?

Проще сказать, чем сделать. Несмотря на все достижения *нанотехнологии*, любые работы на молекулярном уровне остаются чрезвычайно сложной задачей. Впрочем, современные ученые работают над созданием наносистем, которые являлись бы аналогами хорошо всем известных электромоторов. Эти объекты получили название «наноэлектромеханические системы» или НЭМС, поскольку они развивают наносилы под действием электрического поля или света, или, наоборот, при приложении внешней силы создают электромагнитный отклик.

В настоящее время одной из общих тенденций развития техники является миниатюризация функциональных устройств. В наиболее явном виде эта тенденция проявилась в процессе эволюции электронных компонентов. Если первые транзисторы были настолько велики, что их можно было взять пальцами, то теперь уже никого не удивляет, что процессор современного компьютера состоит из миллионов полевых нанотранзисторов. Вслед за электронными компонентами миниатюризация затронула и электромеханические устройства. Несмотря на то, что поведение однотипных механических устройств в макромире различно, усилия ученых и инженеров привели к созданию *микрорелектромеханических систем*, которые уже широко применяются даже в нашем быту. Однако сделать следующий шаг и осуществить перенос электромоторов в наномир оказалось еще сложнее. При уменьшении

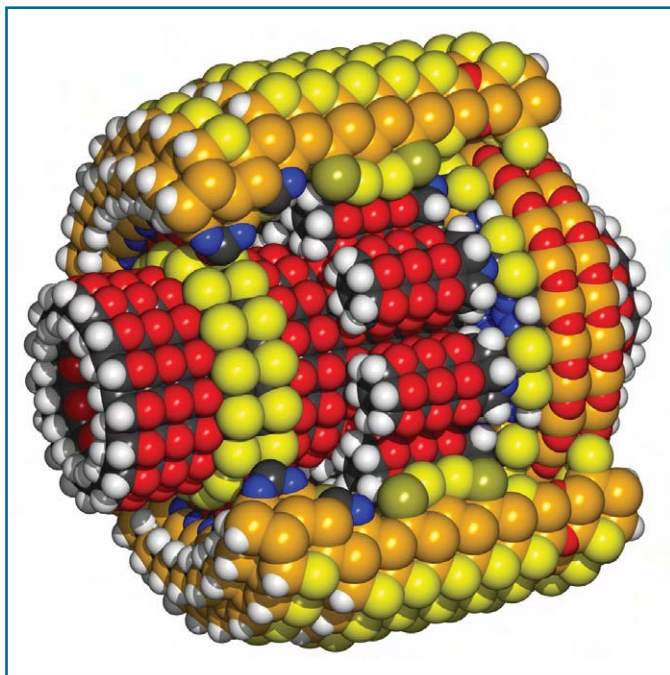


Рис. 1. Молекулярный редуктор. Институт молекулярной сборки. США, © IMM, www.imm.org

размеров объектов отношение их площади поверхности к объему заметно возрастает, что приводит к значительному увеличению вклада сил трения в механическое поведение наносистем и к доминированию сил трения над силами инерции. Так, время, затраченное на гашение инерции после придания вращательного движения (с одинаковым моментом вращения) мячу, лежаще-

му на поверхности стола, и молекуле фуллерена на поверхности монокристалла кремния, будет различаться на несколько порядков. Однако даже если теоретически возможно описать механическое поведение нанoeлектромоторов, возникает основной вопрос – как их изготовить?

На сегодня можно выделить две основные тенденции в создании НЭМС: уменьшение размера существующих микроэлектромеханических систем и разработка принципиально новых молекулярных двигателей и молекулярных электро-механических устройств. Первый подход связан с очевидными сложностями, поскольку методы, используемые для создания МЭМС (электронная литография, ионное травление и др.) имеют ограниченное разрешение, и поэтому их проблематично использовать для создания нанообъектов. Впрочем, как уже отмечалось во Введении, размер нанoeлектромоторов настолько мал, что для их конструирования вполне можно использовать отдельные молекулы и функциональные группы (рис. 1). В частности, описана возможность передачи вращения с одной нанотрубки на другую (по аналогии с шестеренками – см. рис. 2), а также создание механического осциллятора из группы концентрических нанотрубок. Другим ярким примером НЭМС являются *наномашинны*,

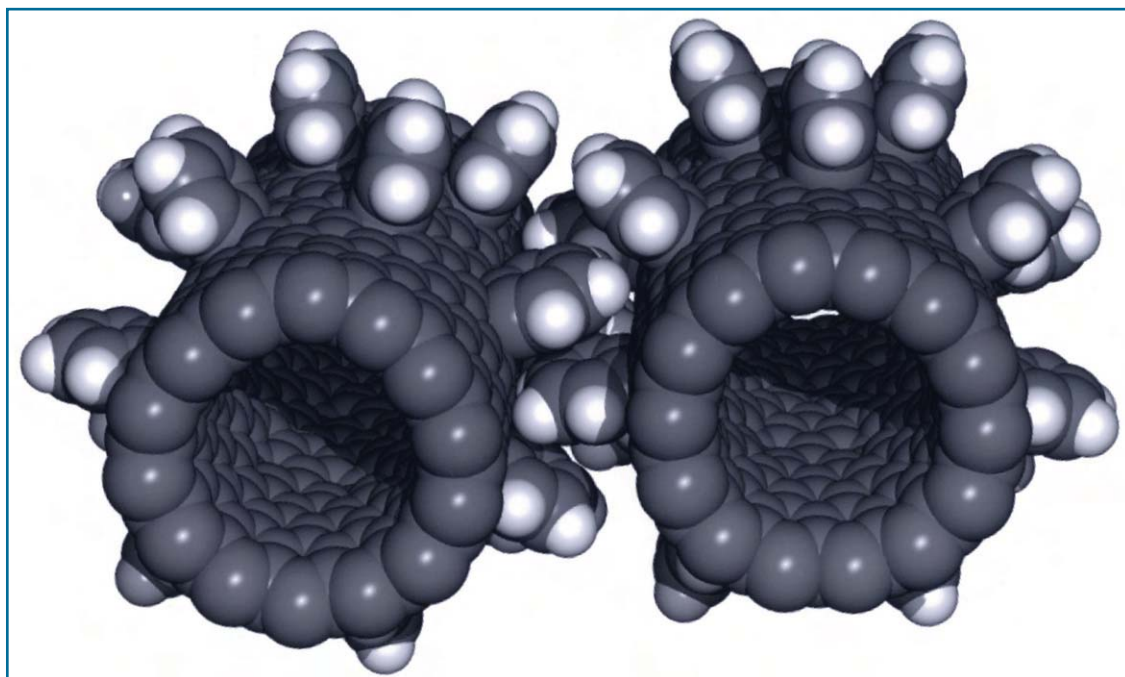


Рис. 2. Соединение «наншестеренок» на основе углеродных нанотрубок.

<http://www.ipt.arc.nasa.gov/carbonnano.html>

способные ездить под действием внешнего электрического поля или света.

Как ожидается, НЭМС произведут революцию в области метрологии, особенно при измерении чрезвычайно малых сил и смещений на молекулярном уровне. Как известно, механические системы колеблются с собственной частотой $\omega_0 = (k_{\text{эфф}}/m_{\text{эфф}})^{1/2}$, где $k_{\text{эфф}}$ – эффективная жесткость, а $m_{\text{эфф}}$ – эффективная масса системы. Если мы уменьшаем l – линейный размер устройства, сохраняя его форму, то ω_0 будет увеличиваться, поскольку $k_{\text{эфф}} \sim 1$, тогда как $m_{\text{эфф}} \sim l^3$. При этом высокие значения величины ω_0 соответствуют высоким скоростям отклика системы на внешние силы, что позволяет создавать на основе НЭМС чрезвычайно чувствительные измерительные устройства. Уже в настоящее время на основе НЭМС созданы нанорезонаторы с фундаментальной частотой колебаний выше 10 ГГц (10^{10} Гц), что еще не так давно казалось недостижимым. Такие резонаторы уже нашли применение в качестве *кантилеверов сканирующей зондовой микроскопии*, *нановесов* и *наносенсоров* био-

логических молекул и ДНК. Другим очевидным преимуществом НЭМС является их чрезвычайно низкое энергопотребление.

Следует отметить, что если для ученых создание НЭМС является сложнейшей задачей, решение которой, по-видимому, станет делом ближайшего будущего, Природа уже на протяжении миллионов лет легко создает различные наномеханические устройства. Многие известные биологические системы – *вирусы*, бактерии, одноклеточные микроорганизмы и др. – имеют различные приспособления, позволяющие им перемещаться в зависимости от поведения окружающей среды, в том числе под действием электрических импульсов нейронов. Поэтому одним из актуальных направлений в области создания НЭМС является не разработка принципиально новых, а мимикрия уже известных природных молекулярных моторов (см. *Биомиметика*). Возможно, Природа в очередной раз поможет нам решить задачу, еще не так давно казавшуюся невыполнимой.

Литература:

1. Cornelius T. Leondes Mems/Nems: (1) Handbook Techniques and Applications Design Methods; (2) Fabrication Techniques; (3) Manufacturing Methods; (4) Sensors and Actuators; (5) Medical Applications. Springer, 2007. P. 1350.
2. Poole C.P., Owens F.J. Introduction to Nanotechnology Wiley-Interscience. 2003. P. 400.
3. Рыбалкина М. Нанотехнологии для всех. М., 2005.
4. www.imm.org