

## НАНОАКТЮАТОРЫ (Nanoactuators)

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

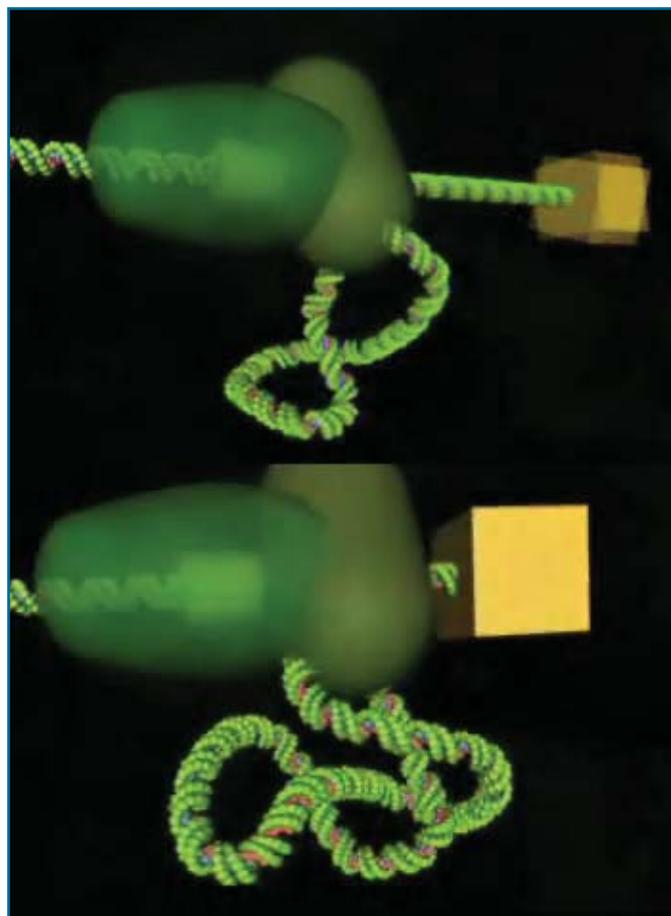
*Л.Н. Толстой*

Слово «наноактюатор» является калькой с английского nanoactuator – что-то очень маленькое, что может действовать (act в переводе означает «действовать»). Действовать можно, конечно, по-разному, но когда говорят о наноактюаторах, речь, как правило, идет о механическом действии – например, о линейном перемещении или вращении чего-либо. Наноактюаторы очень востребованы в различных наноустройствах. Например, **наномашина** не смогла бы ездить без наноактюатора – своего молекулярного мотора, а **нанороботы** не могли бы делать шаги.

Очевидно, что для движения какого-либо объекта нужно подвести к нему и затратить некоторое количество энергии, точно так же как для человека необходима еда, чтобы двигаться и жить. На сегодняшний день известно много способов преобразования химической и электрической энергии в механическую. По сравнению с традиционно используемым в макроскопических масштабах электромагнитным методом, в нанотехнологии существует возможность применения и других принципов, которые в случае макротехнологии не имело смысла использовать по функциональным или ценовым характеристикам (см. табл. 1).

Очевидно, что выбор принципа активации следует проводить с учетом максимальной эффективности, мощности и быстродействия наноустройств. Кроме того, одной из наиболее важных характеристик принципа действия устройства является максимальная сила, развиваемая в процессе преобразования энергии  $F = \eta \frac{dW}{ds}$ , которая в общем случае зависит от масштаба системы.

Так как энергия однородной системы пропорциональна ее объему ( $R^3$ ), максимальная сила, развиваемая актюатором, пропорциональна  $R^2$ . В случае непотенциальных полей взаимодействия элементов системы может оказаться нелинейным, что приводит к отклонению показателя степени от 2 – то есть энергия будет теряться



**Рис. 1.** Биологический молекулярный мотор. На нижнем изображении шток, представляющий собой молекулу ДНК, полностью втянут, на верхнем изображении – частично вытолкнут

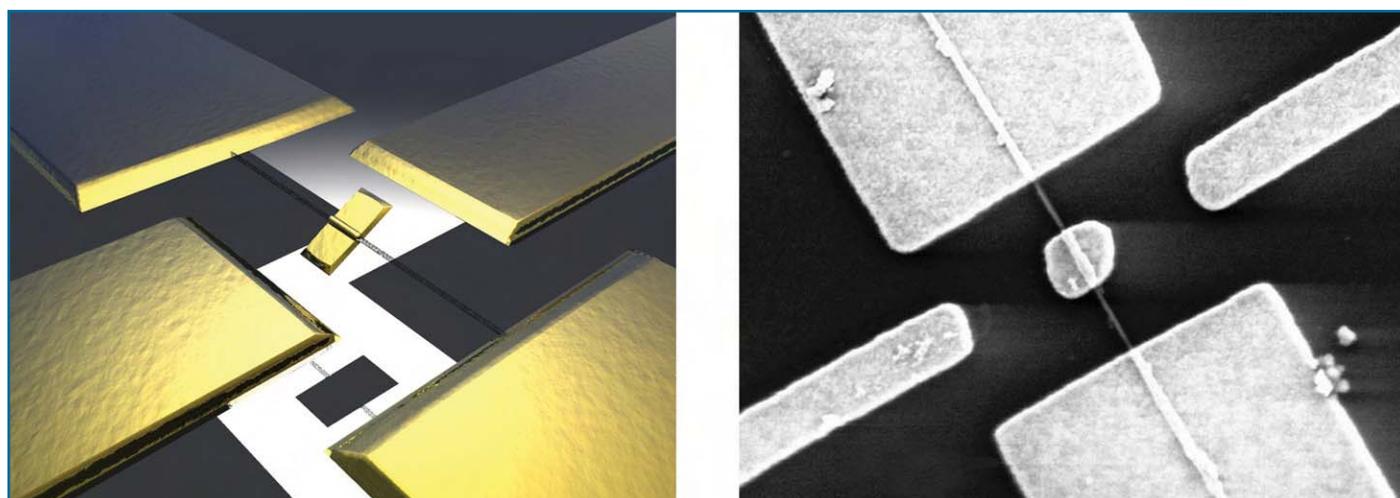
**Таблица 1.** Типичные значения плотности энергии, показатели степени зависимости силы от масштаба системы, времена отклика и коэффициенты полезного действия различных принципов преобразования энергии актюаторов.

Метод активации	Плотность энергии, Вт·с/м <sup>3</sup>	Показатель степени для $F \sim R^n$	Время отклика, $\tau$ [мс]	КПД, %
Электростатический	$10^4$	2	$\ll \tau_{\text{мех}}^*$	0,5
Электромагнитный	$10^5$	от 2 до 4	$\ll \tau_{\text{мех}}$	<0,01
Пьезоэлектрический	$2 \cdot 10^5$	2	$\ll \tau_{\text{мех}}$	0,3
Памяти формы	$3,5 \cdot 10^5$	2	<50	0,01
Термопневматический	$<5 \cdot 10^5$	2	10	0,1
Биметаллический	$10^6$	2	<50	$10^{-4}$
Молекулярный	$2 \cdot 10^7$	-	$\ll \tau_{\text{мех}}$	0,5
Биологическое преобразование энергии	$6 \cdot 10^7$	-	<50	0,6

\*  $\tau_{\text{мех}}$  – время механического отклика системы зависящее от вязкоупругих свойств материала (~1 мкс).

впустую. В общем случае взаимосвязь между силой и размером системы может быть описана соотношением  $F \sim R^n$ , где показатель степени  $n$  во многом определяет эффективность конкретного способа преобразования энергии, который может изменяться при переходе от макро- к микро- и нанодиапазону. Действительно в микро- и наносистемах вместо электромагнитного принципа преобразования энергии, используемого повсеместно в макроэлектронике, часто используют пьезоэлектрический или электростатический эффекты (табл. 1). Очевидно, что в зависимости от выбора принципа работы наноустройств подвод энергии к микро- или *«нанoeлектромеханической системе»* может осуществляться электрически, термически или химически.

Электрические наноактюаторы управляются наиболее просто – приложением внешней разности потенциалов или электромагнитного поля. Простейшие типы таких актюаторов включают *пьезодвигатели* и электростатические актюаторы на основе плоскопараллельных конденсаторов, однако возможны и более сложные и интересные решения. Исследователи из Беркли, США, например, создали электрический наноактюатор, очень похожий на обычный электромотор (рис. 2). Вращающаяся часть, называемая ротором, – крошечная золотая пластинка размером около 250 нм, которая закреплена на оси – *углеродной нанотрубке*. Вокруг ротора расположено три электрода – два по бокам и один снизу. Подавая на электроды переменное электрическое



**Рис. 2.** Наноактюатор-мотор. Слева приведена схема, а справа – изображение, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа

напряжение с амплитудой около 5 В, ученые заставляют наномотор вращаться.

Тепловые актюаторы обычно создают на эффектах теплового расширения или деформации контакта двух материалов (часто – пары металл–диэлектрик) за счет различия в коэффициентах теплового расширения. Разогрев элементов производят, пропуская через них электрический ток или нагревая окружающую среду. Такие актюаторы могут создавать достаточно большие силы, однако эффективность использования энергии оказывается весьма низкой. Увеличение разницы коэффициентов теплового расширения материалов позволяет несколько увеличить КПД, однако общая эффективность этих устройств обычно не превышает 0,1%.

Химическое управление наноактюаторами осуществляется при помощи изменения состава окружающей среды, ее кислотности и других факторов. Иногда (как например, в моторе наномашин) используют свет, который, воздействуя на химические молекулы, приводит актюатор в движение. К химическим наноактюаторам относятся и так называемые биологические молекулярные моторы. Примером такого мотора может быть F<sub>1</sub>CoR124I – это крошечное устройство способно выталкивать и втягивать сделанный из молекулы ДНК стержень со скоростью почти 190 нм в секунду, а общее перемещение может достигать 3 мкм!!! Диаметр этого стержня – всего 2 нм. Вместо *нанобатарейки* такой молекулярный мотор использует молекулы АТФ – источник энергии, которым пользуются живые клетки (и наши клетки в том числе). Таким образом, чтобы включить мотор, нужно впрыснуть порцию молекул АТФ.

Другой молекулярный мотор – АТФ-синтетаза, предназначенный для синтеза или гидролиза молекул АТФ, а также для переноса протонов (H<sup>+</sup>) через мембрану клетки, работает в клеточных мембранах животных, обеспечивая стабильность внутриклеточного рН цитоплазмы. Он преобразует энергию, запасенную в протонном градиенте, в химическую энергию. За объяснения

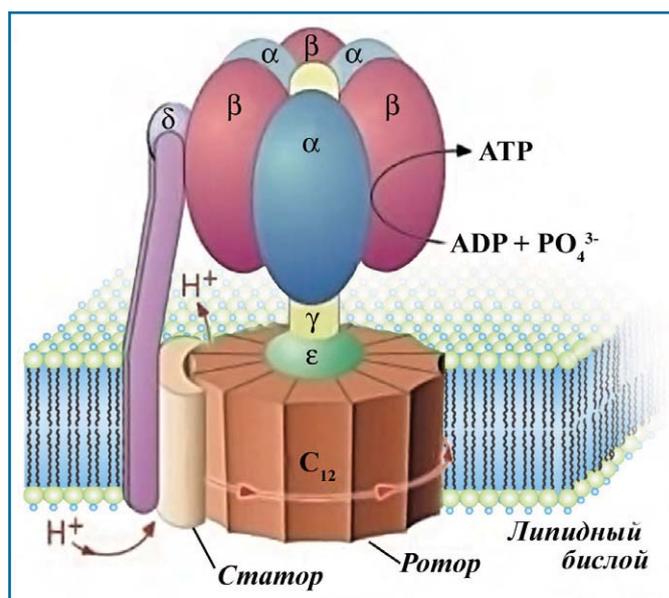


Рис. 3. АТФ-синтетаза

его функционирования внутри клетки Е. Скоу, П. Бойер и Дж. Уолкер (J.C. Skou, P. Boyer и J. Walker) получили Нобелевскую премию в 1997 году. Интересно, что при синтезе или гидролизе АТФ одна из частей энзима совершает вращательное движение по или против часовой стрелки, впуская протоны внутрь клетки или выпуская их наружу (рис. 3). По эффективности работы и развиваемой силе АТФ синтетаза существенно превосходит все известные в природе молекулярные моторы. Типичная сила, продуцируемая такой молекулярной турбиной, составляет около 1 пкН, а мощность – порядка 1 аВт ( $1 \cdot 10^{-18}$  Вт).

Существует множество других наноактюаторов, созданных на основе биологических молекул, полимеров, кремния и других материалов. И все они по-своему оригинальны и необходимы. Ведь если не будет наноактюаторов, то у нас не останется никаких возможностей внести свой вклад в движение наномира.

См. также: *Микроэлектромеханические системы, Нанозлектромеханические системы.*

#### Литература:

1. Köhler M., Fritzsche W. Nanotechnology: An Introduction to Nanostructuring Techniques, Wiley-VCH, 2004
2. Fennimore A.M. et al. Nature. 2003. Vol. 424, July. P. 408–410.