

УДК 520.6.05+53.091

Ю. А. Клименко, В. А. Яценко, Ю. В. Шатохина,  
Ю. В. Пруцко, О. В. Семенив

Институт космических исследований НАНУ і НКАУ, Київ

## О возможной реализации спутникового датчика микроускорений на основе нанотрубок

Представлено 03.09.07

Запропоновано ідею використання нанотрубок для створення чутливого елементу супутникового датчика мікроприскорень (наноакселерометра) нового типу. Функціонування пристрою забезпечується зміною електричної провідності нанотрубки під впливом зовнішніх інерційних сил. Обговорюється механізм роботи датчика мікроприскорень та приводяться рекомендації стосовно його реалізації.

### ВВЕДЕНИЕ

Важнейшей тенденцией в области развития современного космического приборостроения является миниатюризация компонентов и систем [1]. В процессе миниатюризации уже удалось существенно снизить габариты космических аппаратов (КА), что привело к созданию микро-, нано- и пикоспутников (10—100, 1—10 и 0.1—1 кг соответственно). Доля этих аппаратов в космических исследованиях сейчас составляет примерно 10 % и продолжает увеличиваться.

Проблема миниатюризации изделий для микроспутников дает толчок к развитию нанотехнологий [1]. В последние годы обострился интерес исследователей и инженеров к разработке нано-электромеханических систем (НЭМС), действие которых основано на использовании взаимосвязи электрических и механических характеристик нанометровых объектов [2]. Миниатюрность изделий НЭМС обуславливает исключительно важные свойства изделий — портатив-

ность, высокий срок службы, минимизацию вибрационных и инерционных перегрузок, низкое потребление энергии, простоту в обслуживании и в замене. В качестве примеров успешного применения НЭМС в космической технике следует упомянуть кремниевые гироскопы, клапаны, микроисточники энергии, ячейки памяти, сенсоры для химического и биологического анализа, высокочастотные оптические и механические фильтры и пр. [4].

В настоящее время существенная часть нанотехнологических программ ведущих стран мира базируется на развитии и применении материалов с использованием углеродных нанотрубок (УНТ) [4, 5]. Нанотрубки характеризуются гигантским отношением их длины к диаметру ( $10^4 \dots 10^7$ ), обладают высокой упругостью (модуль Юнга порядка 1 ТПа), прочностью (в 50 раз прочнее стали) и уникальными электрическими характеристиками (по типу проводимости могут быть металлами либо полупроводниками). В то же время нанотрубки являются

чрезвычайно стабильными и обладают достаточно высокой радиационной устойчивостью.

В данной работе обсуждается возможность реализации датчика микроускорений на основе нанотрубок. Традиционные подходы к решению задач измерения ускорений и микрогравитации на борту космических аппаратов основаны на использовании механических гироскопов и пьезодатчиков. Такие системы весьма громоздки и энергоемки, а также подвержены влиянию электромагнитных помех и действию ионизирующих излучений. Популярными ныне волоконно-оптические датчики ускорений требуют наличия источника когерентного оптического излучения и системы трансформации оптического сигнала в электрический ток. Эти типы датчиков имеют большие габариты, массу, высокую стоимость и не вполне пригодны для использования в спутниках сверхмалых размеров и массы.

Несмотря на то, что идея использования нанотрубок в качестве базовых элементов разнообразных приборов и сенсоров не является новой [6], только в настоящее время наблюдается переход от исследования физических характеристик УНТ к созданию прототипов будущих приборов, действие которых основано на необычных свойствах углеродных нанотрубок. Предлагаемый здесь вариант датчика микроускорений на нанотрубках основывается на экспериментально обнаруженной зависимости электрической проводимости нанотрубок от степени их изгиба, что, в свою очередь, обеспечивается за счет приложения к нанотрубке внешних инерционных сил.

#### ДАТЧИК МИКРОУСКОРЕНИЙ

Электрические характеристики УНТ в значительной степени зависят от степени их изгиба; после снятия внешней нагрузки, вызывающей деформацию нанотрубки, происходит полное восстановление ее первоначальной формы [7]. Как показано в работе [3] на основании квантовомеханических расчетов, электрический ток через нанотрубку с металлическим типом проводимости уменьшается при ее изгибе, а проводимость нанотрубки полупроводникового типа, наоборот, растет. Такая необычная связь между электрическими и механическими характери-

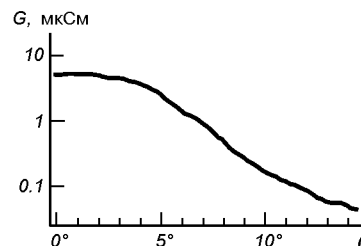


Рис. 1. Зависимость электрической проводимости  $G$  нанотрубки от угла  $\theta$  ее изгиба (по данным [7])

стиками УНТ с различными типами проводимости обусловлена в первую очередь изменениями электронной структуры нанотрубки — под воздействием механической нагрузки изменяется положение уровня Ферми, ширина запрещенной зоны, концентрация носителей в УНТ, что и приводит к изменению тока.

Изменение проводимости УНТ под воздействием внешней механической нагрузки может быть положено в основу действия датчика микроускорений (наноакселерометра), преобразующего механическое усилие в электрический сигнал. Для обоснования возможности создания такого прибора мы будем использовать результаты работы [7], где экспериментально обнаружено, что электрический ток через нанотрубку с металлическим типом проводимости уменьшается на два порядка при ее деформации на угол в  $15^\circ$ .

Кривая зависимости проводимости нанотрубки от угла ее изгиба приведена на рис. 1. Как видно, наиболее сильное изменение проводимости наблюдается в интервале углов  $5 \dots 15^\circ$ , где электрическая проводимость нанотрубки достаточно чувствительна к изменению угла изгиба даже в  $0.1^\circ$ .

Будем считать, что сила  $F$  деформации нанотрубки вызывается инерциальной массой  $M$ , воздействующей на нанотрубку под влиянием ускорения  $a$ . Чтобы оценить силу, которая вызывает деформацию нанотрубки в интересующей нас области углов  $5 \dots 15^\circ$ , воспользуемся данными из работы [7], которые представлены на рис. 2. Здесь приведена зависимость между внешней силой  $F$ , вызывающей изгиб нанотрубки, и ее смещением  $\delta$  вдоль направления действия силы. По порядку величин видим, что изменение

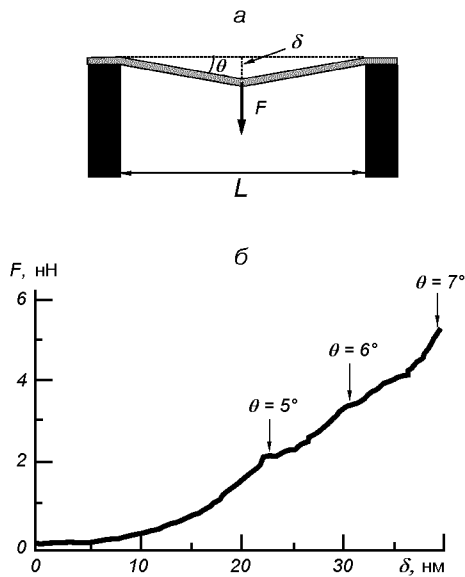


Рис. 2. Зависимость внешней силы  $F$ , вызывающей изгиб нанотрубки, от ее смещения  $\delta$  вдоль вертикальной оси [6];  $L = 605$  нм — длина нанотрубки

внешней силы  $\Delta F$  на 1 нН приводит к изменению угла изгиба нанотрубки на угол, меньший  $1^\circ$ . Это изменение силы может возникать за счет изменения  $\Delta a$  микроускорения, воздействующего на прибор. Предполагая, что  $\Delta a \sim 10^{-5}$  м/с<sup>2</sup> (типичные значения для датчика микроускорений), получим значение инерционной массы  $M \sim 0.1$  г, которая обеспечивает работу датчика в интересующей нас области микроускорений.

На рис. 3 представлен макет предлагаемого прибора. Нанотрубка 4 с металлическим типом проводимости помещена между двумя металлическими контактами 5. Пружина 2 обеспечивает исходную деформацию нанотрубки на угол  $5^\circ < \theta < 15^\circ$ , где наблюдается наиболее сильная зависимость между изгибом нанотрубки и током через нее. Под воздействием микроускорений внешняя масса 3 вызывает дополнительную деформацию нанотрубки и изменяет электрический ток между металлическими контактами.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нанотрубки, которые обладают уникальными механическими и электрическими характеристиками, и в то же время являются стабильными

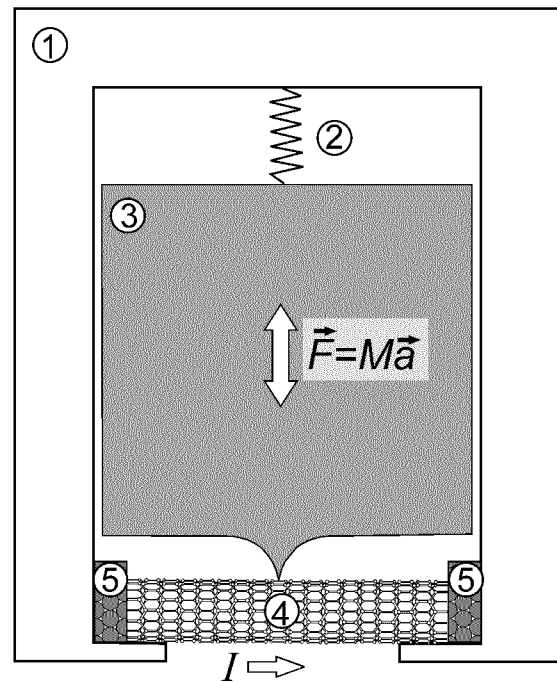


Рис. 3. Макет предлагаемого акселерометра: 1 — корпус, 2 — пружина, обеспечивающая исходный изгиб нанотрубки, 3 — инерционная масса, воздействующая на нанотрубку, 4 — нанотрубка, 5 — внешние металлические контакты. Движение массы под воздействием микроускорений вызывает изгиб нанотрубки и приводит к изменению тока между металлическими контактами

и радиационно устойчивыми. Высокая чувствительность электронных характеристик УНТ по отношению к внешним силам, рекордная величина их модуля упругости делают углеродные нанотрубки перспективной основой для создания сверхминиатюрных датчиков микроускорений. В данной работе предложен акселерометр, принцип работы которого основан на изменении проводимости нанотрубки под влиянием внешних инерционных сил.

1. Клименко Ю. А., Черемных О. К., Яценко В. А., Маслова Н. В. Состояние и перспективы создания микроспутников новых поколений: новые материалы, нанотехнология и архитектура // Космічна наука і технологія.—2001.—7, № 2/3.—С. 53—65.
2. Ekinci K. L., Roukes M. L. Nanoelectromechanical systems // Rev. Sci. Instrum.—2005.—76.—Art. N 061101.
3. Farajian A. A., Yakobson B. I., Mizuseki H., Kawazoe Y. Electronic transport through bent carbon nanotubes:

- nanoelectromechanical sensors and switches // *Phys. Rev. B.*—2003.—67.—Art. N 205423.
4. Globus A., Bailey D., Han J., et al. NASA applications of molecular nanotechnology // *J. Brit. Interplanetary Soc.*—1998.—51.—P. 145—152.
  5. Sapmaz S., Blanter Y. M., Gurevich L., van der Zant H. S. J. Carbon nanotubes as nanoelectromechanical systems // *Phys. Rev. B.*—2003.—67.—Art. N 235414.
  6. Sinha N., Ma J., Yeow T. W. Carbon nanotube-based sensors // *J. Nanosci. and Nanotechnology.*—2006.—6.—P. 573—590.
  7. Tomblor T. W., Zhou C., Alexseyev L., et al. Reversible electromechanical characteristics of carbon nanotubes under local-probe manipulation // *Nature.*—2000.—405, N 15.—P. 769—772.

**ON THE POSSIBILITY OF REALIZATION  
OF SATELLITE MICROACCELERATION TRANSDUCER  
BASED ON NANOTUBES**

*Yu. A. Klymenko, V. A. Yatsenko, Yu. V. Shatokhina,  
Yu. V. Prutsko, O. V. Semeniv*

The idea to use nanotubes for making a sensitive element of a satellite microacceleration transducer (a nanoaccelerometer) is proposed. The device performance is provided by a variation of the nanotube electroconductivity under the influence of external inertial forces. The working mechanism for the microacceleration transducer and some recommendations towards its realization are discussed.