

# ЭЛЕМЕНТАРНОЕ НАНОРАДИО

## НАНОТРУБКИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В РАДИОЭЛЕКТРОНИКЕ

**Многие открытия и перспективные исследования в нанотехнологиях связаны с нанотрубками. Несмотря на кажущуюся простоту и даже примитивность, нанотрубки обладают множеством уникальных электрических и механических свойств. Они могут служить как материалом для постройки сверхпрочных конструкций, так и основой для создания высокочастотных транзисторов и миниатюрных радиопередающих систем.**

Нанотрубка – это цилиндр диаметром от одного до нескольких десятков нанометров, свернутый из гексагональной графитовой плоскости (графена), т.е. решетки с шестиугольными ячейками, в вершинах которых находятся атомы углерода, и заканчивающийся правильной полусферой аналогичной структуры. Так как нанотрубка является, по сути дела, одной длинной молекулой, ее прочность определяется не межмолекулярными, а межатомными взаимодействиями, которые на порядки сильнее. Не исключено, что на основе нанотрубок в ближайшем времени будут созданы материалы, во много раз прочней стали.

Однако столь впечатляющая механическая прочность нанотрубок – всего лишь начало списка их удивительных свойств. Особый интерес для зарождающейся наноэлектроники представляет удивительная универсальность нанотрубок как основы для создания сверхминиатюрных радиокомпонентов и даже приемопередающих систем. В частности, в зависимости от ориентации графитовой решетки относительно оси нанотрубки (хиральности), она может быть и проводником, и полупроводником. Более того, если в процессе роста в каркасе нанотрубки создать структурный дефект, т.е. заменить шестиугольную ячейку пятиугольной, то одна часть такой нанотрубки будет металлической, а другая – полупроводниковой, что позволит создавать структуры «металл–полупроводник» без «сваривания» двух различных материалов. Таким образом можно изготовить, например, простейший нанодиод.

Нанотрубку можно с успехом использовать в качестве канала полевого транзистора (рис.1). Она находится на оксид-

М.Шейкин  
max.shaking@gmail.com

ной подложке, а проводящее основание служит затворным электродом. Благодаря высокой подвижности электронов в нанотрубке – около  $100000 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$  (для кремния этот параметр равен  $1400 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ ) граничная рабочая частота таких транзисторов на сегодняшний день достигает 30 ГГц [1].

Другое интересное решение – реализация полевого транзистора на нанотрубке, выращенной в форме буквы Y. Такая структура сама по себе может выполнять функции транзистора без каких-либо дополнительных конструктивных элементов. При приложении напряжения к стволу нанотрубки (затвор) ток через ветви («сток–исток») прекращается. Такие транзисторы имеют размеры порядка 30 нм [2].

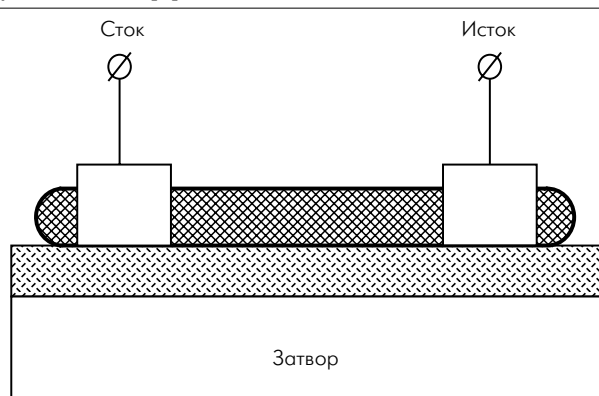


Рис.1. Схема и внешний вид нанотранзистора

Еще одно очень интересное свойство нанотрубок – способность вибрировать под действием радиоволн – позволило создать миниатюрные приемопередающие системы.

Типичный радиоприемник состоит из нескольких основных компонентов – антенны, которая принимает радиосигнал, фильтра для выделения из всего спектра принятых сигналов нужного, усилителя и демодулятора, который отделяет информационный сигнал от высокочастотного. Замечательной особенностью наноприемника является то, что одна нанотрубка может выполнять функции селективной антенны, усилителя и демодулятора одновременно. В отличие от «традиционного» радио, где процессы приема и обработки сигнала полностью электрические, в наноприемнике электромагнитные колебания преобразуются в механические и наоборот. Частоты механического резонанса нанотрубок лежат в пределах 50 МГц – 5 ГГц, что перекрывает спектр частот, используемых в беспроводных системах связи.

Устройство простейшего наноприемника показано на рис.2. Основа его – нанотрубка, жестко закрепленная одним концом на основании. На некотором расстоянии от ее конца расположен электрод. Конструкция находится внутри стеклянного баллона, из которого откачан воздух.

Источник постоянного напряжения (~200 В) создает разность потенциалов  $U_0$  между трубкой и электродом. Из-за электронной эмиссии на конце трубки в цепи начинает течь ток  $I_0$  (аналогичный процесс имеет место в электронных лампах). Кроме этого, на конце нанотрубки появляется отрицательный заряд, который делает ее чувствительной к электромагнитным колебаниям. Нанотрубка начинает вибрировать на резонансной частоте под действием приходящего извне радиосигнала  $f_{вч}$  в случае, если частота этого сигнала совпадает с частотой собственных колебаний трубки. Таким образом выполняется «настройка» на частоту приема. В зависимости от девиации частоты принимаемого ЧМ-сигнала изменяется амплитуда механических колебаний нанотрубки – в этом случае она играет роль узкополосного фильтра. Из-за нелинейности поля эмиссии (форма поля изменяется в зависимости от отклонения нанотрубки от среднего положения) ток  $I_0$  в цепи тоже изменяется, так сигнал демодулируется. Поскольку ток эмиссии вызывается источником питания, а не маломощным принятым радиосигналом, можно говорить и об усилении принимаемого сигнала.

В 2008 году группе ученых из университета Беркли во главе с Алексом Зеттлом удалось создать действующий образец наноприемника, который уверенно принимал АМ и ЧМ радиотрансляции в диапазонах 40–400 МГц. С помощью него ученые смогли прослушать музыкальную трансляцию с весьма хорошим качеством [3].

Кроме очевидных преимуществ – малых размеров и простоты конструкции – данная схема имеет и существенные недостатки. Как было указано выше, для работы такого при-

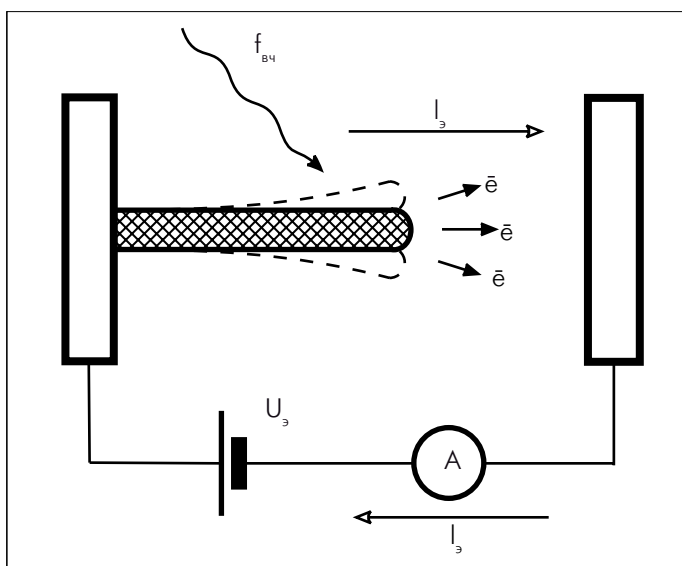


Рис.2. Схема наноприемника

емника необходимо высокое напряжение питания – около 200 В. Размеры источника питания или батареи, которые могут обеспечить такое напряжение, очевидно, будут значительно больше самого приемника, что сводит на нет миниатюрность конструкции. Снизить напряжение, при котором начинается электронная эмиссия, на 20–25% можно, если покрыть кончик нанотрубки тонкой кремниевой пленкой с алмазоподобной структурой [4], однако такое незначительное снижение питающего напряжения не решает проблему громоздкого источника.

Кроме того, не существует простого способа перестраивать резонансную частоту нанотрубки в широких пределах, и, следовательно, настраивать приемник на разные частоты. При высоком токе эмиссии возникает эффект «выгорания» нанотрубки из-за потери электронов, и ее резонансная частота изменяется. Однако этот процесс необратим, поэтому такой способ приемлем лишь для однократной подстройки частоты. Эти проблемы были решены в схеме туннельного наноприемника (рис.3).

В этой схеме расстояние между концом нанотрубки и анодом очень мало – порядка 5 нм, поэтому электроны могут перемещаться (туннелировать) от катода к аноду при небольшой по сравнению с предыдущей схемой разнице потенциалов. Благодаря туннельному эффекту в цепи течет ток  $I_T$  – около 1 мА при напряжении питания 10 В. Также, как и в предыдущей схеме, нанотрубка вибрирует под воздействием радиосигнала на своей резонансной частоте. Из-за изменения расстояния между анодом и концом нанотрубки при ее вибрации изменяется и туннельный ток  $I_T$  в цепи. Таким образом происходит демодуляция радиосигнала.

В этой схеме также реализована возможность настройки приемного «контура» в достаточно широких пределах. Для этого служит второй электрод, расположенный парал-

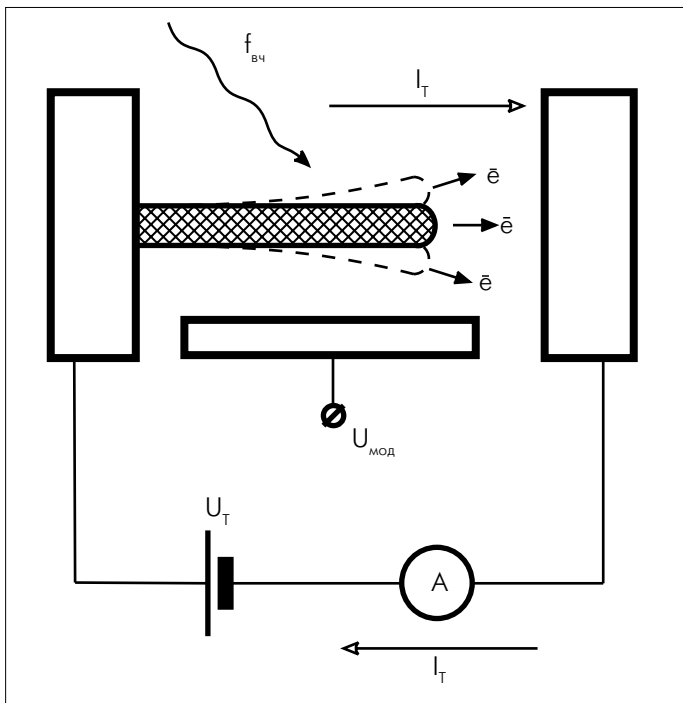


Рис.3. Туннельный наноприемник

лельно нанотрубке, который электростатически «подтягивает» последнюю, уменьшая тем самым ее резонансную частоту.

Следует отметить, что подобные устройства с нанотрубкой в качестве основного элемента способны детектировать как АМ-, так и ЧМ-сигналы.

Для того чтобы создать полноценную радиолинию, одного приемника недостаточно. Устройство элементарного нанотрубчатого передатчика во многом схоже со схемой приемника (рис.4).

Так же, как и в рассмотренных выше схемах, нанотрубка может одновременно выполнять функции всех основных уз-

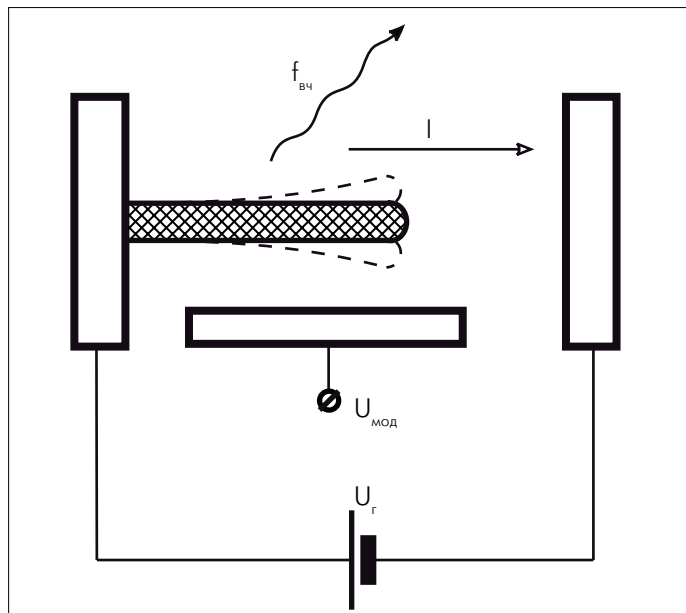


Рис.4. Схема нанопередатчика

лов передатчика – в том числе и генератора высокочастотных колебаний [5]. Это важное свойство автогенерации позволяет отказаться от дополнительного генератора и ощутимо уменьшить размеры и сложность устройства. Для возбуждения автоколебаний напряжение  $U_T$  должно составлять около 220 В. Из-за концентрации заряда на конце трубки механическая вибрация порождает высокочастотные электромагнитные колебания. Амплитуда колебаний зависит от приложенного напряжения  $U_T$ , следовательно, изменяя его, можно модулировать радиосигнал по амплитуде. Изменяя напряжение  $U_{\text{мод}}$  на модулирующем электроде, можно изменять резонансную частоту нанотрубки и, как следствие, частоту излучаемого радиосигнала. Так можно настроить передатчик на нужную частоту и произвести частотную модуляцию передаваемого сигнала.

Как видно из схем, устройства радиосвязи на нанотрубках чрезвычайно просты по своей конструкции, а благодаря их микроскопическим размерам появилась возможность применять электронику там, где она до сих пор не применялась или применялась ограниченно – например, для мониторинга процессов, происходящих внутри живого организма. Такие радиосистемы – один из необходимых компонентов для создания наносетей [6].

Однако для успешной организации радиосвязи в наном мире необходимо разрешить ряд принципиально важных проблем. В первую очередь это касается источников питания, так как на сегодняшний день проблематично создать вписывающийся в наномасштаб источник питания с требуемыми параметрами. Наномир открывает перспективы, до недавних пор казавшиеся научной фантастикой, например, интеграция электронных устройств и клеток живого организма. В мае 2010 года в журнале Nanoletters был описан нанотранзистор, который управляется энергией живой клетки [7]. На базе таких транзисторов можно создать наноустройства, постоянно находящиеся внутри живого организма и не требующие внешних источников питания или сменных батарей. Бионанотранзисторы могут выступать в роли датчиков внутриклеточного метаболизма или согласующих элементов между нервной системой и электронными цепями.

Кроме этого, промышленное производство нанотрубок на сегодняшний день ограничено из-за технологических проблем. Процесс выращивания нанотрубок пока что сложен и дорог, особенно если необходимо получить нанотрубки без структурных дефектов. В процессе роста нанотрубки сложно контролировать ее хиральность, а, как было сказано выше, она определяет электрические свойства нанотрубки. Тем не менее, прогресс не стоит на месте. В 2004 году китайским ученым удалось получить нанотрубки рекордной длины – 18,5 см, причем процесс синтеза был полностью контролируемым. [8].

Практика неоднократно показывала, что в области современных технологий нет ничего невозможного. Описанные в этой статье простейшие радиоприемные системы на нанотрубках – всего лишь первый шаг для наноэлектроники, так же, как и в начале прошлого века примитивные детекторные приемники стали первым шагом на пути создания совершенных приемопередающих систем наших дней.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **A. Le Louarn et al.** Intrinsic current gain cutoff frequency of 30GHz with carbon nanotube transistors. — *Phys. Lett.*, 2007, 90, 233108.
2. **Prabhakar R. Bandaru et al.** Novel electrical switching behaviour and logic in carbon nanotube Y-junctions. — *Nature Materials*, 2005, 4 (9), p. 663–666.
3. **K. Jensen, J. Weldon, H. Garcia, and A. Zett.** Nanotube Radio — *Nano Lett.*, 2007, 7 (11), p. 3508–3511.
4. **M. Dragoman, D. Dragoman.** The Carbon Nanotube Radio, National Institute for Research and Development in Microtechnology – IMT Bucharest Bucharest, Romania.
5. **A. Ayari et al.** Self-Oscillations in Field Emission Nanowire Mechanical Resonators: A Nanometric dc-ac Conversion. — *Nano Lett.*, 2007, 7 (8), p. 2252–2257.
6. **B. Atakan, Ozgur B. Atakan.** Carbon Nanotube-Based Nanoscale Ad Hoc Networks. — *IEEE Communication Magazine*, June 2010, p. 129–135.
7. **A. Noy et al.** Carbon Nanotube Transistor Controlled by a Biological Ion Pump Gate. — *Nano Lett.*, 2010, 10 (5), p. 1812–1816.
8. **L.X. Zheng et al.** Ultralong single-wall carbon nanotubes. — *Nature Materials*, 2004, v. 3, p. 673–676.