

УДК 621.3

УГЛЕРОДНЫЕ НАНОТРУБКИ. ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ В ЭЛЕКТРОНИКЕ

Шемотульский А.Г.

Научный руководитель – ЖУКОВСКАЯ Т.Е.

Углеродные нанотрубки – протяженные цилиндрические структуры диаметром от одного до нескольких десятков нанометров и длиной до нескольких сантиметров состоят из одной или нескольких свернутых в трубку гексагональных графитовых плоскостей (графенов). Основу, которой составляют шестиугольники с расположенными в вершинах углов атомами углерода (во всех случаях расстояние между слоями равно 0,34 нм, то есть такое же, как и между слоями в кристаллическом графите), и заканчиваются обычно полусферической головкой. Для получения нанотрубки, графитовую плоскость надо разрезать по направлениям пунктирных линий и свернуть вдоль направления вектора R .

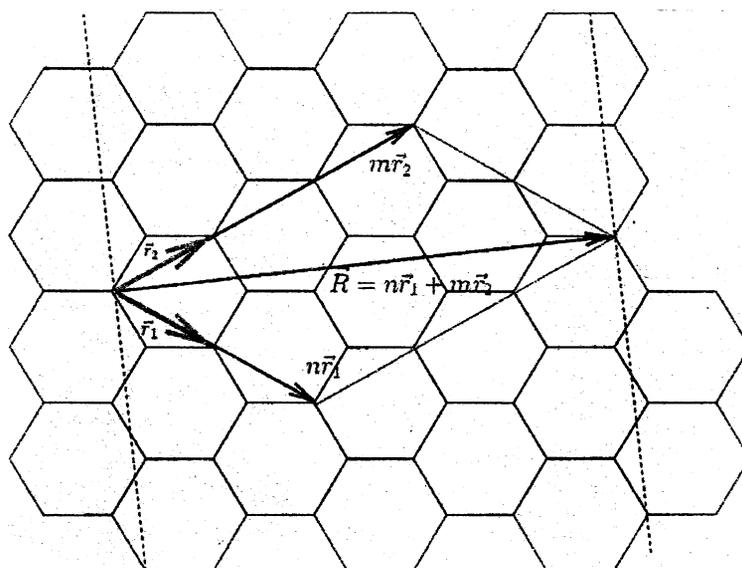


Рис. 1. Графитовая плоскость

Способ сворачивания нанотрубок – угол между направлением оси нанотрубки по отношению к осям симметрии графена (угол закручивания) – во многом определяет её свойства. Конечно, никто не изготавливает нанотрубки, сворачивая их из графитового листа. Нанотрубки образуются сами, например, на поверхности угольных электродов при дуговом разряде между ними. При разряде атомы углерода испаряются с поверхности и, соединяясь между собой, образуют нанотрубки самого различного вида – однослойные, многослойные и с разными углами закручивания. В зависимости от угла закручивания нанотрубки могут обладать высокой, как у металлов, проводимостью, а могут иметь свойства полупроводников. В наномире изменяются не только механические свойства, температуры плавления веществ, но и их электрические характеристики. Сопротивление R_0 нанорезисторов вообще не зависит от их размеров и вещества, из которого они сделаны, а определяется только двумя фундаментальными физическими константами:

$$R_0 = \frac{h}{(2e)^2} = 12,9 \text{ кОм},$$

где e – заряд электрона ($1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл);

h – постоянная Планка ($6,6 \cdot 10^{-34}$ Дж/с).

Величину R_0 назвали квантом электрического сопротивления. Эту необычную проводимость в наном мире, независящую от длины резистора, площади его поперечного сечения и не сопровождающуюся выделением теплоты, назвали *баллистической*. Благодаря действию механизма «баллистического электронного транспорта» нанотрубки проводят электрический ток с наименьшим сопротивлением. Поэтому они характеризуются электропроводностью в 1000 раз большей, чем у меди. Так как нагрев у нанотрубок отсутствует, они способны пропускать токи огромной плотности – более 10^7 А/см². Если бы у углеродных нанотрубок была обычная (не баллистическая) проводимость, то при токах аналогичной плотности их температура выросла бы до 20000 °К, что гораздо выше температуры их сгорания (700 °К).

Большинство из нас регулярно пользуются теми или иными достижениями нанотехнологий, даже не подозревая об этом. Например, современная микроэлектроника уже не микро-, а давно нано, т. к. производимые сегодня транзисторы – основа всех электронных схем имеют размеры порядка 100 нм. Только сделав их размеры такими маленькими, можно разместить в процессоре компьютера около 100 млн. транзисторов. Однако сейчас уже ведутся работы, чтобы размеры транзисторов сделать ещё на порядок меньше, заменяя их наноструктурами. Построенные схемы уже продемонстрировали способность хранить информацию и выполнять логические операции, то есть – заменять транзисторы.

Начнем с простого. Цилиндрические неизогнутые нанотрубки образуются из повторяющихся углеродных шестиугольников. Если углеродный шестиугольник заменить, например, на пятиугольник, семиугольник или на два таких дефекта, нанотрубка изогнется. С разных сторон относительно изгиба ориентация углеродных шестиугольников оказывается различной.

Но с изменением ориентации шестиугольников по отношению к оси нанотрубки меняется ее электронный спектр, положение уровня Ферми и ширина оптической щели и т. п. Таким образом, эта изогнутая нанотрубка должна представлять собой молекулярный гетеропереход металл-полупроводник.

Если рассматривать данные куски нанотрубки изолированно, с разных сторон относительно изгиба электроны на уровне Ферми обладают разной энергией. В единой системе выигрши в энергии приводит к перетеканию заряда и образованию потенциального барьера. Электрический ток в таком переходе течет только в том случае, если электроны перемещаются из области с большей энергией Ферми в область меньшей. Иначе говоря, ток может течь только в одном направлении. «Одностороннее» прохождение тока через нанотрубку с изгибом используется для создания выпрямляющего диода – одного из основных элементов электронных схем.

Как известно, различные нанотранзисторы существуют с 2001 г., когда IBM представила первый одноэлектронный

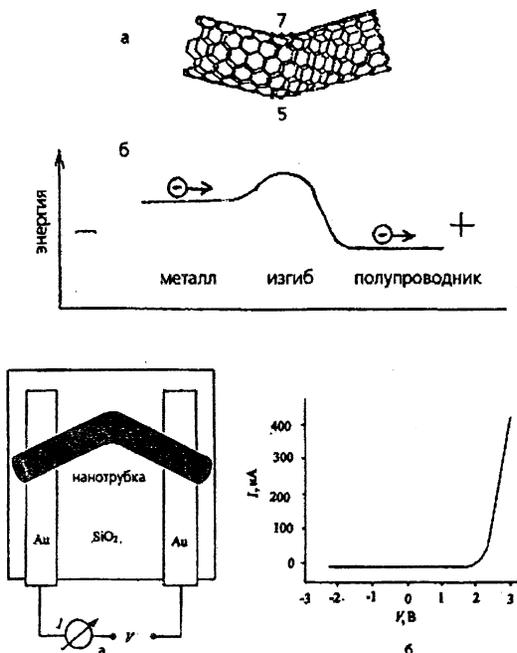


Рис. 2. Диод на основе нанотрубки

транзистор. С тех пор было сделано много инноваций в технологии одноэлектронных транзисторов на основе нанотрубок.

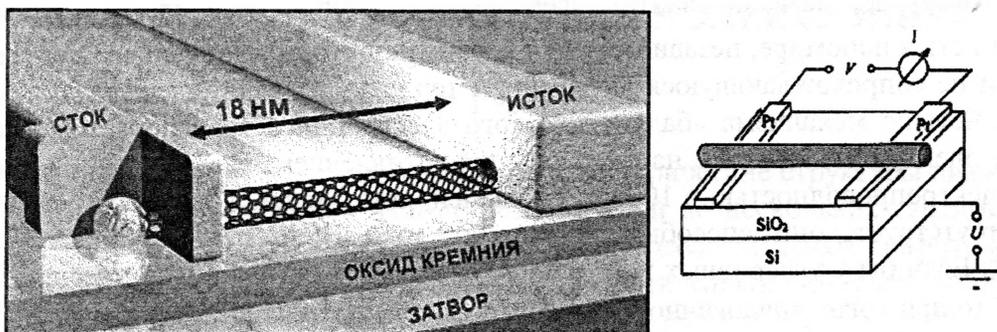


Рис. 3. Нанотранзистор

При создании полевого транзистора на металлической нанотрубке используются эффекты туннельного переноса электронов через нанотрубку по отдельным молекулярным орбиталям. Проводимость металлической нанотрубки в таких условиях обусловлена тем, что электроны перескакивают (туннелируют) с верхнего заполненного уровня катода на проводящий дискретный уровень нанотрубки, а затем с нанотрубки на нижний незаполненный уровень анода. В пределах нанотрубки туннелирование электрона происходит очень легко (практически без рассеяния и без потерь энергии) за счет p -электронных состояний, делокализованных на всю длину нанотрубки. Высокая металлическая проводимость в электрической цепи возможна в случае, если так же легко осуществляется перенос электронов между нанотрубкой и электродами. Это достигается, возможно, более точной подгонкой уровней Ферми электродов к энергии проводящего уровня нанотрубки. Включение внешнего электрического поля при подаче электрического потенциала на третий электрод смещает электронный уровень нанотрубки, и ее сопротивление возрастает. Теоретические расчёты, показывают, что частота прохождения сигнала через такой транзистор может превышать 40 гигагерц.

Дисплей – это первое, что мы видим, подходя к компьютеру. В настоящее время созданы и опробованы прототипы тонких плоских дисплеев, работающих на матрице из нанотрубок.

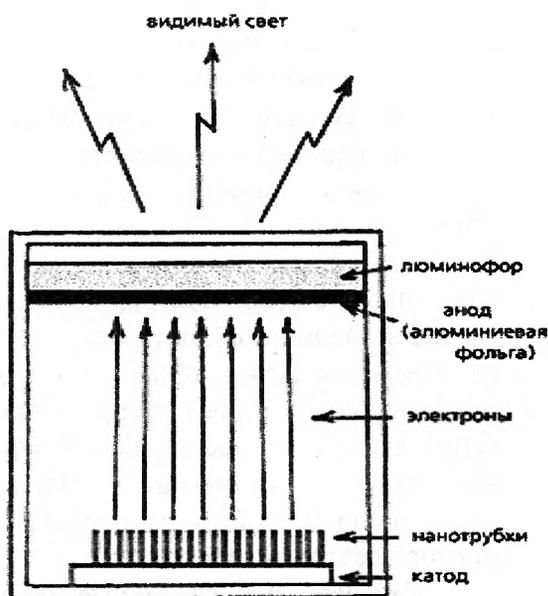


Рис. 4. Принцип работы дисплея на основе нанотрубок

Рассмотрим углеродную нанотрубку, закрепленную на катоде и ориентированную в направлении анода. Если на электроды подать напряжение соответствующей полярности, нанотрубка заряжается отрицательно, линии электрического поля вблизи заряженной нанотрубки искривляются и в окрестности острия нанотрубки напряженность поля становится огромной, причем тем больше, чем тоньше нанотрубка. Такое локальное поле может вырывать электроны из нанотрубки. Под действием внешнего поля летящие электроны формируются в пучок. Этот эффект называют автоэлектронной эмиссией.

Чтобы с помощью автоэлектронной эмиссии получить изображение, на аноде закрепляют люминофор. Электронный удар возбуждает молекулы люминофора, которые затем переходят в основное состояние, излучая фотоны. Например, при использовании в качестве люминофора сульфида цинка с добавками меди и алюминия наблюдается зеленое свечение, а при добавлении серебра – синее. Красный цвет получают с помощью легированного европием оксида иттрия. Получающееся при этом зерно изображения будет очень малым: порядка микрона. Расположив матрицу нанотрубок внутри плёнки из гибкого пластика, ученым удалось сделать гибкую электронную матрицу.

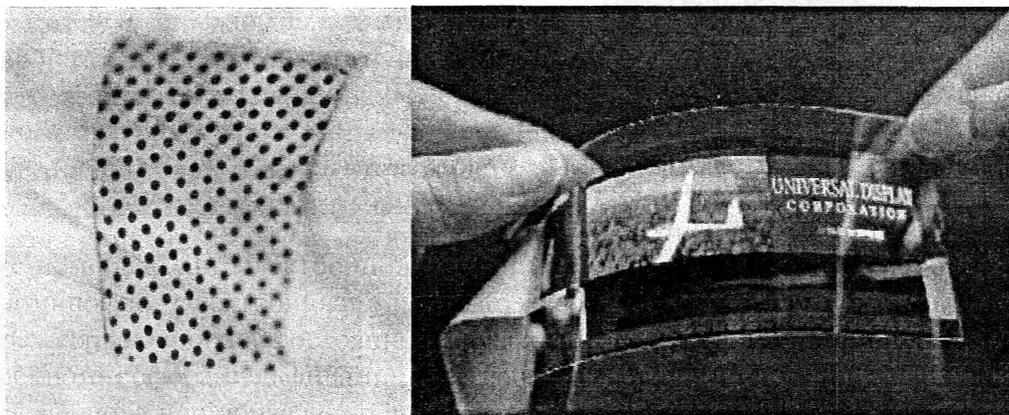


Рис. 5. Гибкая матрица (слева) и FOLED-диспей на ее основе

Сделав гибкие дисплеи, учёные решили одну из ключевых задач нанoeлектроники. Гибкие сверхчеткие цветные экраны, сделанные на основе плёнок с нанотрубками, могут стать логичной заменой современных газет, а может, даже и книг.

Литература

1. Богданов К.Ю. Что могут нанотехнологии. – <http://kbogdanov1.narod.ru/index.html>.
2. Богданов К.Ю. Закон Ома для углеродных нанотрубок. – www.nanometer.ru.
3. Сайт о нанотехнологиях. – <http://www.nanonewsnet.ru/>.
4. Сайт нанотехнологического сообщества «Нанометр». – <http://www.nanometer.ru/>.
5. Сайт издания о высоких технологиях «CNews». – <http://cnews.ru/>.

УДК 621.317.7

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ МИНСКОГО ПРИБОРОСТРОИТЕЛЬНОГО ЗАВОДА

Булыко Е.В., Буткевич Е.Н., Шишмарёв Д.И.
Научный руководитель – КУЦЫЛО А.В.

Мы решили исследовать эту тему, потому что она является интересной и в тоже время актуальной для учебы и последующей работы. Измерительные приборы широко используются в производствах и повседневной жизни и они имеют большой потенциал в своём дальнейшем развитии, как в точности измерений, так и в простоте использования всеми людьми без специальных навыков и умений работы с ними, а так же в уменьшении своих размеров и в увеличении возможностей и областей применения.

С нашей точки зрения, наиболее интересными для использования во время занятий и для научных исследований являются следующие измерительные приборы, которые выпускаются Минским приборостроительным заводом.