

УДК621.38

## УГЛЕРОДНЫЕ НАНОТРУБКИ

Быков К.Ю.

Научный руководитель - старший преподаватель Германович Е.И.

Углеродные нанотрубки – своеобразные цилиндрические молекулы диаметром примерно от половины нанометра и длиной до нескольких микрометров. На основе углеродных нанотрубок создаются электронные устройства нанометрового (молекулярного) размера.

### Классификация углеродных нанотрубок

Идеальная нанотрубка представляет собой свёрнутую в цилиндр графитовую плоскость, то есть поверхность, выложенную правильными шестиугольниками, в вершинах которых расположены атомы углерода. Углеродные нанотрубки характеризуются большим разнообразием форм. К примеру, они могут быть одностенными или многостенными (однослойными или многослойными), прямыми или спиральными, длинными и короткими, и т. д. Что важно, нанотрубки оказались необыкновенно прочными на растяжение и на изгиб. Под действием больших механических напряжений нанотрубки не рвутся, не ломаются, а просто перестраивается их структура.

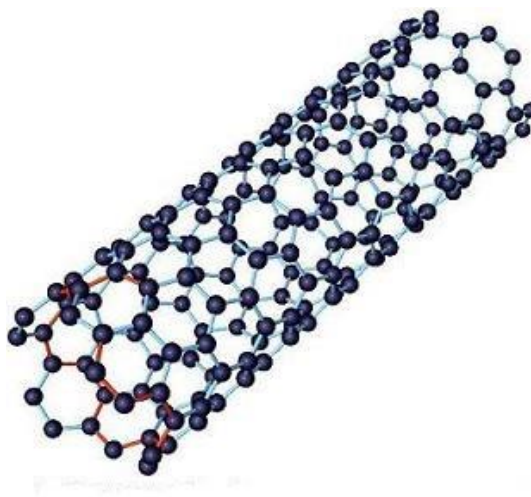


Рисунок 1 – Модель углеродной одностенной нанотрубки

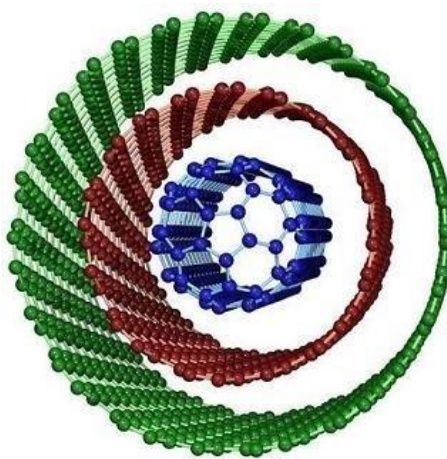


Рисунок 2 – Модель многостенной углеродной нанотрубки

## Свойства углеродных нанотрубок

Нанотрубки демонстрируют множество неожиданных электрических, магнитных, оптических свойств, которые уже стали объектами ряда исследований. Особенностью углеродных нанотрубок является их электропроводность, которая оказалась выше, чем у всех известных проводников. Они также имеют прекрасную теплопроводность, стабильны химически и, что самое интересное, могут приобретать полупроводниковые свойства. По электронным свойствам углеродные нанотрубки могут вести себя как металлы, либо как полупроводники, что определяется ориентацией углеродных многоугольников относительно оси трубки. Металлическим типом зонной структуры обладают треть нанотрубок. Остальные нанотрубки должны быть полупроводниками с шириной запрещенной зоны от нескольких десятых до примерно 2 эВ, возрастающей при уменьшении диаметра нанотрубки.

Цилиндрические неизогнутые нанотрубки образуются из повторяющихся углеродных шестиугольников. Если углеродный шестиугольник заменить, например, на пятиугольник, семиугольник или на два таких дефекта, как показано на Рисунок3, нанотрубка изогнется. С разных сторон относительно изгиба ориентация углеродных шестиугольников оказывается различной. Но при изменении ориентации шестиугольников по отношению к оси нанотрубки меняется ее электронный спектр, положение уровня Ферми, ширина оптической щели и т. п. В частности, для приведенного на Рисунок4 случая, слева относительно изгиба нанотрубка должна быть металлической, а справа – полупроводниковой. Таким образом, эта изогнутая нанотрубка должна представлять собой молекулярный гетеропереход «металл – полупроводник».

Если рассматривать данные куски нанотрубки изолированно, с разных сторон относительно изгиба, видим, что электроны на уровне Ферми обладают разной энергией. В единой системе выигрыш в энергии приводит к перетеканию заряда и образованию потенциального барьера.

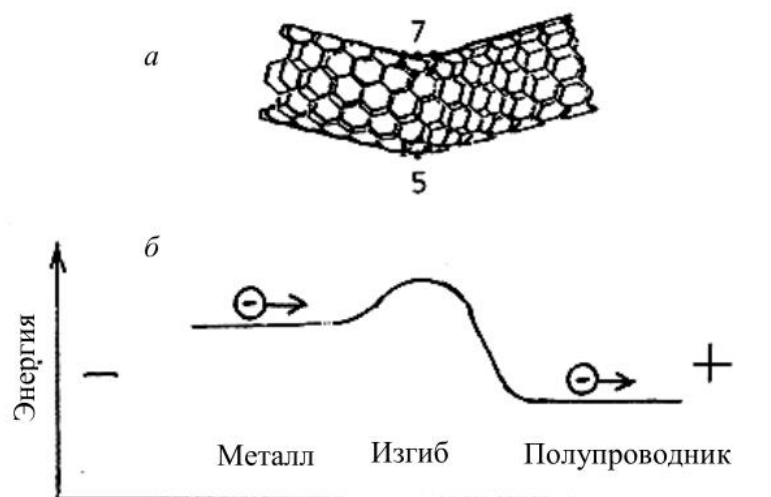


Рисунок 3. Влияние дефекта семиугольник-пятиугольник на геометрию нанотрубки (а) и энергию подвижных электронов (б)

Электрический ток в таком переходе течет только в том случае, если электроны перемещаются из области нанотрубки с большей энергией Ферми в область с 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 (Рисунок 4).

Нанотрубка лежит на непроводящей (кварцевой) подложке в контакте с двумя сверхтонкими проводами; вольтамперная характеристика для такой системы показана на Рисунок4, б.

На основе полупроводниковой или металлической нанотрубки удалось сделать полевые транзисторы, работающие при комнатной или сверхнизкой температуре.

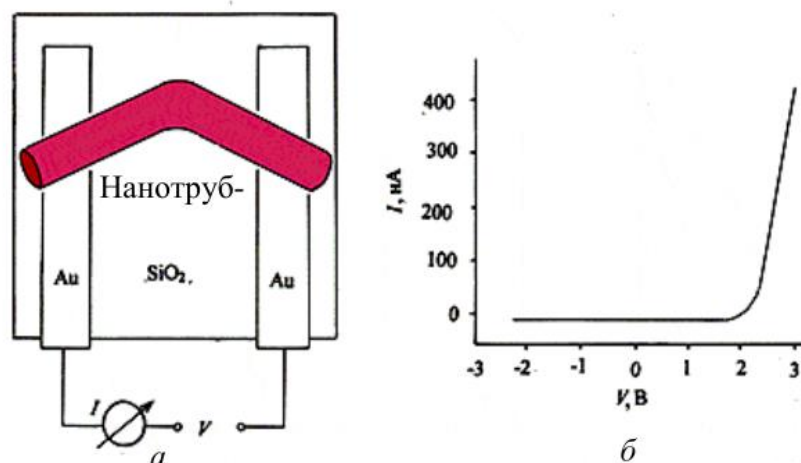


Рисунок 4. Выпрямляющий диод на изогнутой нанотрубке

Полевые транзисторы (триоды) – электронные устройства, на перенос заряда через которые оказывает сильное влияние внешнее (управляющее) электрическое поле, что используется в усилителях электрического сигнала, переключателях и т. п. (Рисунок 5). Нанотрубка лежит на непроводящей (кварцевой) подложке в контакте с двумя сверхтонкими проводами; в качестве третьего электрода (затвора) используется кремниевый слой (Рисунок 5, а); зависимость проводимости в цепи от потенциала затвора (Рисунок 5, б).

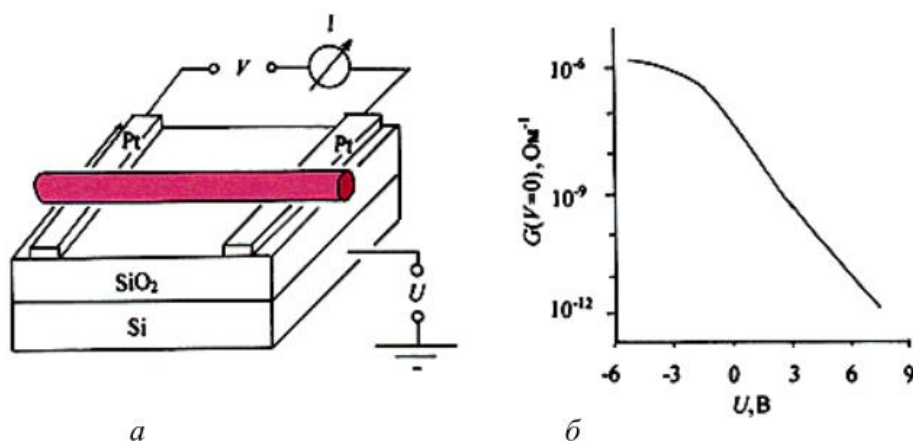


Рисунок 5. Полевой транзистор на полупроводниковой нанотрубке

В транзисторе на полупроводниковой нанотрубке электрическое поле управляет концентрацией носителей в зонах делокализованных состояний. В полупроводниковой нанотрубке состояния валентной зоны отделены от состояний зоны проводимости энергетической щелью – запрещенной зоной. Из-за наличия этой щели при обычных условиях концентрация носителей в зонах мала, и нанотрубка обладает высоким сопротивлением. При подаче на третий электрод (затвор) электрического потенциала  $U$  в области нанотрубки возникает электрическое поле, и изгиб энергетических зон изменяется. При этом концентрация дырок в валентной зоне (и соответственно электропроводность) возрастает по экспоненциальному закону со смещением края зоны относительно уровня Ферми. При потенциале затвора около минус 6 В концентрация дырок достигает максимального значения, сопротивление – минимального, а нанотрубка становится металлической.

### Перспективы использования углеродных нанотрубок

Углеродные нанотрубки могут быть полезны также и для создания дисплеев нового поколения. Рассмотрим углеродную нанотрубку, закрепленную на катоде и ориентированную в направлении анода (Рисунок 6). 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, называемый автоэлектронной эмиссией, используется для создания выпрямителей в дисплеях для формирования изображения и др. В обоих случаях берут два плоских электрода, один из которых покрывают слоем из углеродных нанотрубок, ориентированных перпендикулярно ко второму. Если на электроды подается такое напряжение, что нанотрубка заряжается отрицательно, из нанотрубки на второй электрод излучается пучок электронов: ток в системе идет. При другой полярности нанотрубка заряжается положительно, электронная эмиссия из нее невозможна и ток в системе не идет.

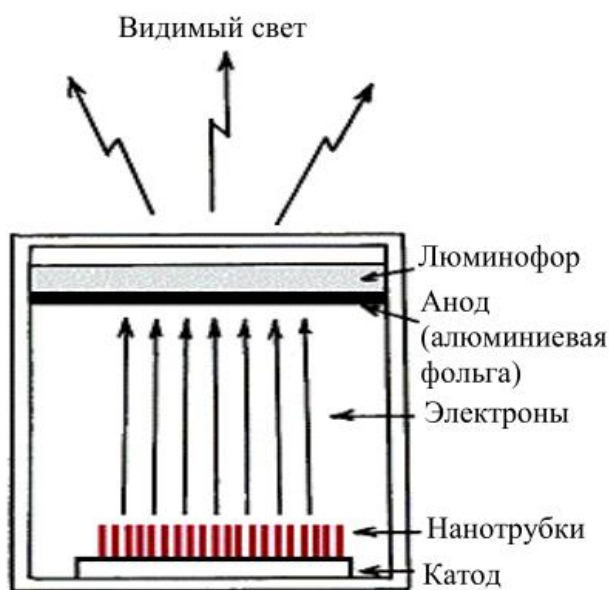


Рисунок 6. Схема дисплея, в котором используется автоэлектронная эмиссия нанотрубок

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.

Возможности использования нанотрубок в молекулярной электронике неизмеримо возрастают при переходе от чисто углеродных к химически модифицированным нанотрубкам. Например, наличие цилиндрической полости внутри углеродных нанотрубок позволяет внедрить различные элементы, включая тяжелые металлы. Возможно добавление примесей (например, атомов фтора) на внешнюю поверхность трубки. Кроме углеродных, сейчас умеют получать и бор-азотные нанотрубки. Во всех этих случаях должны получаться материалы с новыми и пока еще экспериментально не изученными свойствами.

### Литература

1. Шелованова, Г.Н. Актуальные проблемы современной электроники и наноэлектроники: курс лекций / Г.Н.Шелованова; ИПК СФУ. – Красноярск, 2009. – 220 с.
2. Интернет ресурсы: <http://www.ixbt.com/editorial/carbon.shtml>