

УГЛЕРОДНЫЕ НАНОТРУБКИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В ЭЛЕКТРОНИКЕ

Автор: Дементьева Н.

Руководитель: доцент каф. Телекоммуникаций Морозова В.И.

Технический Университет Молдовы

Аннотация: Описание уникальных электрических, механических и других свойств углеродных нанотрубок и примеры их реализации в приборных структурах.

Ключевые слова: углеродные нанотрубки, хиральность, фуллерен, гетеропереход, нанoeлектроника.

В 1991 году ученым Симио Иияма (Simio Iijama) были обнаружены длинные, цилиндрические углеродные образования, получившие названия нанотрубок. Нанотрубка представляет собой свернутую в трубку гексагональную сетку с атомами углерода в узлах. Как правило, верхние концы трубок заканчиваются полусферическими “крышками”, составленных из пятиугольников и шестиугольников и напоминающих половинку молекулы фуллерена. Наименьший и наибольший диаметры одностенной УНТ составляют соответственно около 0,3 и 50 нм, диаметр зависит от метода получения. Углеродные нанотрубки обладают уникальными физико-химическими и электрическими свойствами, что делает их очень перспективным материалом с широкой областью применения. Многие направления в нанoeлектронике связываются именно с нанотрубками.

Структура.

Если мысленно представить, что нанотрубка получена сворачиванием вокруг некоторой оси, то структура ее будет зависеть от направления этой оси. Взаимная ориентация гексагональной сетки графита вдоль оси сворачивания называется хиральностью. Хиральность—это свойство объекта быть несовместимым со своим отражением в идеальном плоском зеркале. В зависимости от хиральности, нанотрубки могут быть кресельными, зигзагообразными и хиральными (рис.1, а, б, в соответственно). Нанотрубки могут быть однослойными и многослойными.

Свойства нанотрубок.

В зависимости от структуры, свойства УНТ могут различаться.

Механические свойства. Углеродные нанотрубки очень прочны. Модуль Юнга УНТ лежит в пределах 1,21-1,8 ТПа, а это почти на порядок меньше,

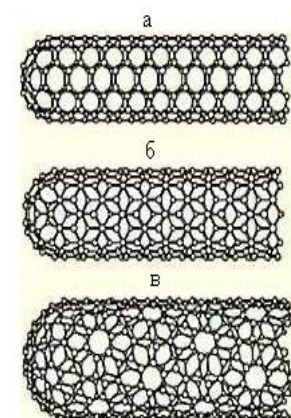


Рис. 1. Структура нанотрубок⁵

чем у стали - 0,21 ТПа. Также углеродные нанотрубки обладают большой гибкостью. Предел прочности на разрыв полученных в лаборатории нанотрубок составляет около 45 ГПа. Для сравнения, у стали этот показатель равен всего 2 ГПа. Эта прочность частично объясняется почти отсутствием структурных дефектов и тем, что при изгибах углеродные кольца стенок нанотрубок не ломаются, а лишь перестраивают свою структуру. Благодаря этому свойству, нанотрубки используются в качестве датчиков-зондов при исследовании поверхностей.

Электрические свойства. В зависимости от хиральности и диаметра, нанотрубки могут обладать полупроводниковыми или металлическими свойствами. При их производстве получается смесь на 2/3 состоящая из полупроводниковых структур и, соответственно, на 1/3 из нанотрубок-проводников.

Металлические трубки характеризуются очень высокой электропроводностью и теплопроводностью, которая объясняется бездефектностью УНТ. Как показали исследования, нагрев нанотрубок не наблюдается при плотностях тока порядка 10^9 А/см², при этом медный провод плавится уже при плотности тока 10^6 А/см². Эти свойства позволяют использовать их в качестве идеальных квантовых соединителей и проводов.¹ Де Гиром из Университета Лозанны (Швейцария) было обнаружено еще одно интересное свойство: резкое (около двух порядков величины) изменение проводимости при небольшом, на 5-10°, изгибе однослойной нанотрубки.

Капиллярные свойства. Как показали эксперименты, открытая нанотрубка обладает капиллярными свойствами, то есть ее можно заполнять жидкостью. Применяя специальные технологии, были получены нанотрубки, заполненные никелем, кобальтом и железом.

Применение углеродных нанотрубок.

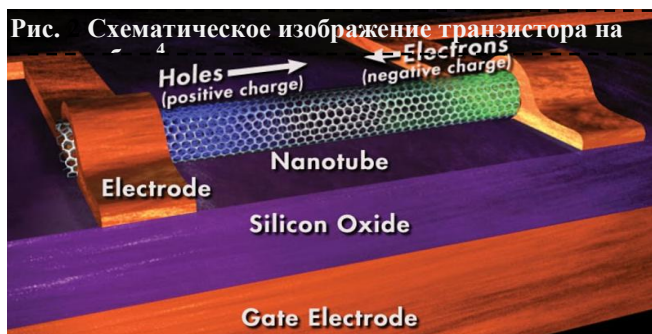
Особые свойства нанотрубок делают их перспективным материалом для электроники. Ниже приведены только некоторые варианты их использования.

Гетеропереход.

Цилиндрические прямые УНТ состоят из повторяющихся углеродных шестиугольников. Если в процессе роста трубки заменить такой шестиугольник на пятиугольник или семиугольник, или сделать это одновременно, то трубка изогнется. С разных сторон относительно изгиба ориентация будет различной, а следовательно будут разными и свойства. В частности, в случае замены шестиугольника пятиугольником с одной стороны цилиндра и семиугольником с противоположной, то слева нанотрубка будет металлической, а справа-полупроводниковой. Таким образом, данная трубка будет представлять собой молекулярный гетеропереход металл-полупроводник.²

Транзистор на нанотрубке.

В простейшем случае транзистор с нанотрубкой выглядит следующим образом (рис 2). На подложку из кремния, которая сама является управляющим электродом (затвором), наносится тончайшая пленка защитного слоя — оксида кремния. На этой пленке расположены сток и исток в виде тонких проводящих рельсов. Между этими рельсами располагается сама нанотрубка с полупроводниковой проводимостью. В обычном состоянии концентрация свободных носителей зарядов (дырок и электронов) в нанотрубке мала, то есть она является диэлектриком. Зона проводимости в данном случае отделена от валентной зоны запрещенной зоной шириной в несколько электрон-вольт. Однако при



помещении нанотрубки в электрическое поле ширина запрещенной зоны меняется и концентрация свободных носителей зарядов увеличивается. В этих условиях УНТ становится проводником. Электрическое поле, управляющее проводимостью УНТ, создается затвором, которым, как уже отмечалось, является кремниевая подложка. При потенциале затвора порядка 6 В концентрация свободных носителей заряда в валентной зоне достигает максимума, и нанотрубка становится хорошим проводником. Таким образом, меняя напряжение на затворе, можно управлять проводимостью нанотрубки и соответственно открывать или запирают транзистор.³ Транзисторы на УНТ имеют ряд преимуществ, по сравнению с кремниевыми. Во-первых, скорость их работы намного превосходит быстродействие кремниевых транзисторов. Согласно оценкам, нанотрубка может работать на частоте в 1 ТГц. В настоящее время уже созданы устройства на основе нанотрубок, работающие на частотах до 30 ГГц, что на порядок больше тактовой частоты хорошего современного процессора. Это достигается за счёт высокой подвижности электронов в УНТ (в кремнии она составляет $1400 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, а в нанотрубках – около $10^6 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$). Во-вторых, транзисторы на нанотрубках почти в 500 раз меньше тех, что используются в современных микросхемах, что открывает новые возможности для миниатюризации приборов. В-третьих, более простой процесс изготовления благодаря технологии печати транзисторов краской, состоящей из углеродных нанотрубок. Уже сегодня возможна печать транзистора целиком, включая электроды, слои изоляции из УНТ.⁴

ВЫВОД: Уникальные свойства УНТ делают их одним из самых перспективных материалов электроники с неограниченными возможностями применения, начиная с транзисторов на УНТ и заканчивая дисплеями, оптическими переключателями, солнечными элементами и проч.

Литература и ссылки.

1 Шука А.А., Нанoeлектроника, изд. "Физматкнига", Москва, 2007, стр. 79-80

2 Дьячков П.Н. Углеродные нанотрубки, изд. БИНОМ. Лаборатория знаний, Москва, 2006, стр. 25-26

3 http://www.nanometer.ru/2008/04/18/karbododekaedr_42038.html

4 <http://worldofdiscovery.info/transistors-based-on-nanotubes.html>

5 Хатуль Л., Журнал „Химия и жизнь”, изд. "НаукаПресс", 2004, выпуск №6.