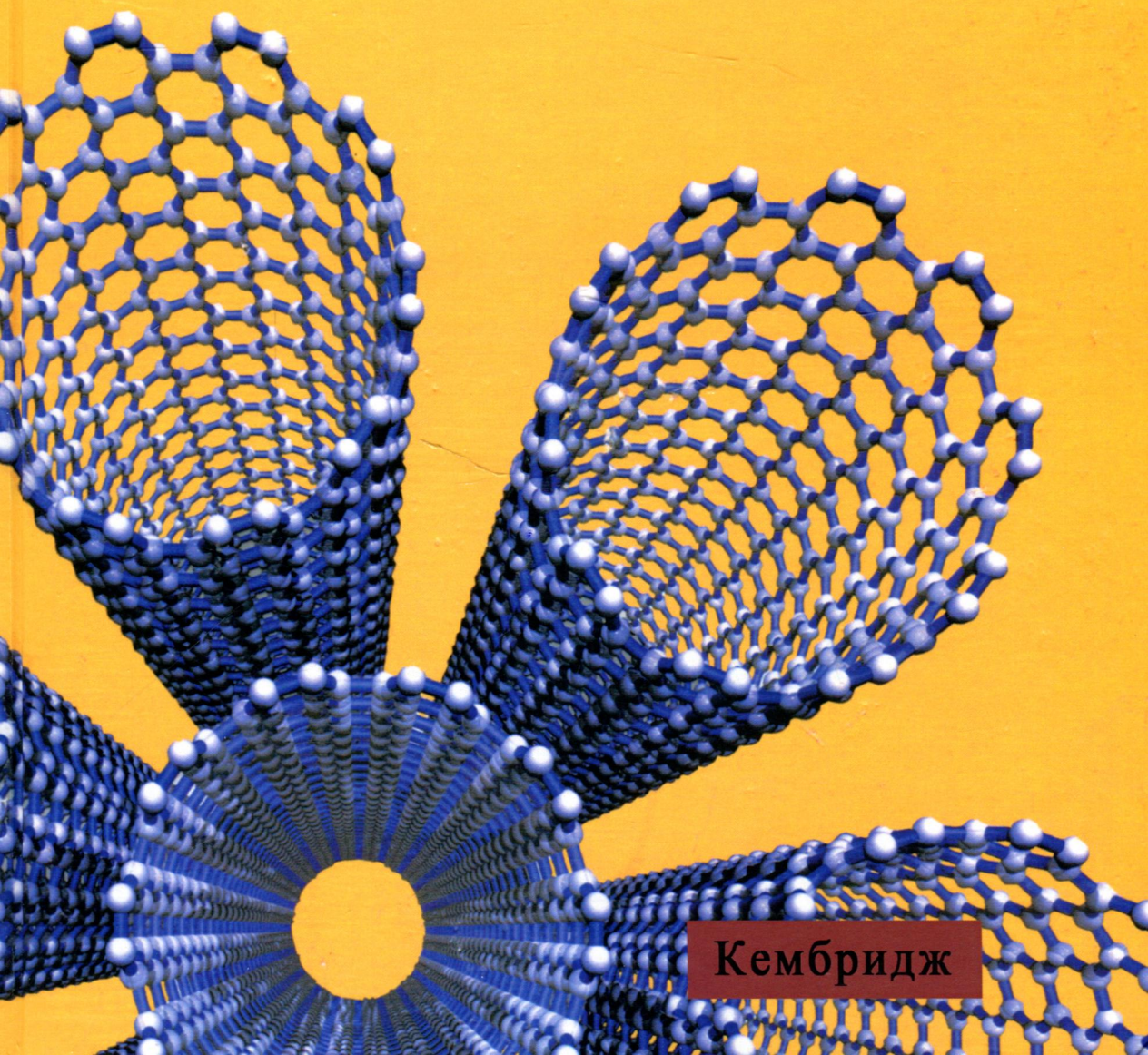


Питер Харрис

# Углеродные Нано- Трубки

Синтез, свойства, применение



Кембридж

Питер Харрис

# **Углеродные нано-трубки**

## **Синтез, свойства и применение**

Перевод с английского под редакцией  
*член-корр. РАН Двуреченского А. В.*

Переводчик  
*к. ф.-м. н. Ефимов В. М.*

Новосибирск  
2016

У25  
УДК 538.95

*Автор:*  
Питер Харрис

*Под редакцией:*  
член.-корр. РАН А. В. Двуреченского

*Переводчик:*  
к.ф.-м.н. В. М. Ефимов

**Углеродные нанотрубки. Получение, свойства, применение:**  
Пер. с англ. с сокращ. и доп./под ред. А. В. Двуреченского  
ООО «ОФСЕТ-ТМ», Новосибирск, 2016 г., 220 с., с илл.  
ISBN: 978-5-85957-133-8

В переведённой на русский язык монографии, кардинально переработанной при повторном издании английским физиком Питером Харрисом, подробно рассмотрены вопросы строения, физических свойств, модификации и применения квазиодномерных материалов - углеродных нанотрубок, обладающих уникальными свойствами: сверхпрочностью, высокой проводимостью, теплопроводностью и химической стойкостью.

Для специалистов в области физики, химии и технологии нанoeлектроники, а также студентов старших курсов и аспирантов соответствующих специальностей.

Переведено с разрешения **Cambridge University Press**  
Издано при финансовой поддержке **Фонда инфраструктурных  
и образовательных программ** (г. Москва)

ISBN-13: 978-0-521-82895-6  
ISBN: 978-5-85957-133-8

© Cambridge University Press 2009  
© Перевод на русский язык с дополнением  
ИФП СО РАН 2016

# Содержание

Предисловие автора к английскому изданию.....	5
Предисловие редактора перевода.....	6
<b>1 Введение.....</b>	<b>7</b>
1.1 Бакминстерфуллерен.....	8
1.2 Фуллерен-сопутствующие углеродные нанотрубки.....	9
1.3 Одностенные и двухстенные нанотрубки.....	10
1.4 Углеродные трубки, получаемые каталитическим методом.....	12
1.5 Кто открыл углеродные нанотрубки? .....	12
1.6 Публикации по нанотрубкам .....	14
1.7 Основное содержание по главам.....	15
Литература.....	16
<b>4 Очистка и способы применения.....</b>	<b>18</b>
4.1 Очистка многостенных нанотрубок.....	18
4.1.1 МУНТ, получаемые испарением в дуговом разряде.....	18
4.1.2 МУНТ, полученные каталитически.....	19
4.2 Очистка одностенных нанотрубок.....	20
4.2.1 Кислотная обработка и окисление.....	20
4.2.2 Модификация.....	22
4.2.3 Физические методики.....	22
4.2.4 Оценка чистоты углеродных нанотрубок.....	23
4.3 Применение многослойных нанотрубок.....	23
4.3.1 Подвешивание многослойных нанотрубок и сборка чистых МУНТ.....	23
4.3.2 Упорядочение и монтаж одностенных нанотрубок.....	24
4.3.3 Чистые МУНТ-волокна.....	26
4.3.4 МУНТ-листы.....	27
4.3.5 Резка и укорачивание нанотрубок.....	27
4.4 Применение одностенных углеродных нанотрубок.....	28
4.4.1 Упорядочение и монтаж ОСУНТ.....	28
4.4.2 Распределения чистых ОСУНТ.....	30
4.4.3 ОСУНТ-листы.....	31
4.4.4 Контроль длины ОСУНТ.....	33
4.5 Разделение металлических и полупроводниковых одностенных углеродных нанотрубок.....	34
4.5.1 Селективное удаление.....	34
4.5.2 Диэлектрофорез.....	34



4.5.3	Селективная модификация.....	35
4.6	Обсуждение.....	36
	Литература.....	36
<b>5</b>	<b>Структура</b> .....	<b>42</b>
5.1	Атомные связи в углеродных материалах.....	42
5.2	Структура углеродных нанотрубок: теоретический анализ.....	44
5.2.1	Определение вектора сворачивания углеродной нанотрубки	44
5.2.2	Элементарная ячейки нанотрубок .....	45
5.2.3	Классификация нанотрубок по симметрии.....	47
5.2.4	Дефекты гексагональной решётки.....	48
5.2.5	Послойная структура многостенных нанотрубок .....	50
5.2.6	Теория крышек нанотрубок.....	51
5.3	Экспериментальные исследования: многостенные нанотрубки, полученные в дуговом разряде.....	54
5.3.1	Структура слоёв: экспериментальные исследования.....	54
5.3.2	Электронная дифракция в МУНТ.....	57
5.3.3	Форма профиля многостенных нанотрубок .....	57
5.3.4	Структура крышек МУНТ.....	58
5.3.5	Коленчатые соединения и разветвлённые структуры.....	60
5.4	Экспериментальные исследования: многостенные нанотрубки, полученные каталитически.....	61
5.5	Экспериментальные исследования: одностенные нанотрубки.....	63
5.5.1	Общие закономерности.....	63
5.5.2	Электронная дифракция на ОУНТ.....	64
5.5.3	Исследования ОУНТ на ПЭМВР.....	66
5.5.4	Сканирующая туннельная спектроскопия ОУНТ.....	68
5.6	Дифракция нейтронов.....	69
5.7	Обсуждение всего набора методов.....	70
	Литература.....	71
<b>6</b>	<b>Физические свойства I: электронные</b> .....	<b>75</b>
6.1	Электронные свойства графита.....	75
6.2	Электронные свойства нанотрубок: теория.....	77
6.2.1	Зонная структура одностенных нанотрубок.....	77
6.2.2	Влияние изгиба и взаимодействие трубка-трубка.....	80
6.2.3	Электронный транспорт в нанотрубках.....	80
6.2.4	Влияние магнитного поля.....	81
6.3	Электронные свойства нанотрубок: экспериментальные результаты....	83
6.3.1	Ранние исследования многостенных нанотрубок.....	83
6.3.2	Корреляция между электронными свойствами и структурой одностенных нанотрубок.....	84
6.3.3	Квантовая проводимость.....	87
6.3.4	Электронные свойства нанотрубок в магнитном поле.....	90
6.3.5	Сверхпроводимость.....	91
6.4	Нанoeлектронные приборы.....	91
6.4.1	Диоды.....	91

6.4.2 Полевой транзистор.....	92
6.4.3 Логические схемы.....	94
6.5 Магнитные свойства нанотрубок.....	95
6.6 Полевые эммитеры на основе нанотрубок.....	96
6.7 Заключение.....	99
Литература.....	100
<b>7 Физические свойства II: оптические и тепловые.....</b>	<b>105</b>
7.1 Механические свойства углеродных нанотрубок.....	105
7.1.1 Теоретические предсказания.....	105
7.1.2 Экспериментальные наблюдения: многостенные нанотрубки.....	108
7.1.3 Экспериментальные результаты: одностенные нанотрубки.....	112
7.2 Оптические свойства углеродных нанотрубок.....	112
7.2.1 Спектроскопия оптического поглощения.....	113
7.2.2 Флуоресцентная спектроскопия.....	115
7.3 Рамановская спектроскопия.....	117
7.4 Тепловые свойства нанотрубок.....	120
7.5 Физическая стабильность нанотрубок.....	122
7.6 Обсуждение.....	122
Литература.....	123
<b>8 Химическое и биологическое взаимодействие с нанотрубками... 128</b>	
8.1 Ковалентная модификация.....	128
8.1.1 Модификация концов нанотрубок и их дефектов.....	129
8.1.2 Модификация боковых стенок.....	130
8.2 Нековалентная модификация.....	135
8.3 Анализ химически-модифицированных нанотрубок.....	137
8.4 Биологическая модификация.....	138
8.4.1 Протеины.....	138
8.4.2 Нуклеотиды.....	140
8.5 Токсичность нанотрубок.....	142
8.6 Обсуждение.....	143
Литература.....	144
<b>11 Зонды и сенсоры..... 150</b>	
11.1 Зонды из нанотрубок для атомно-силовой микроскопии.....	151
11.1.1 Изготовление зондов из нанотрубок: механическая сборка.....	151
11.1.2 Изготовление зондов из нанотрубок: выращиванием трубок химическим осаждением из газовой фазы (CVD).....	152
11.1.3 Получение изображения с использованием АСМ-зондов....	153
11.2 Газовые сенсоры.....	155
11.3 Биосенсоры.....	157

11.4 Физические сенсоры.....	158
11.5 Заключение.....	159
Литература.....	159
<b>Общее заключение</b> .....	162
Основные моменты по исследованию углеродных нанотрубок.....	163
Заключительные мысли.....	166
Литература.....	166
<b>Приложение</b> .....	168
<b>Литература по непереведённым главам (2,3,9,10)</b>	
Глава 2.....	168
Глава 3.....	173
Глава 9.....	180
Глава 10.....	185
<b>Дополнение</b>	
<b>В. М. Ефимов. Современное состояние по применению углеродных нанотрубок в нанoeлектронике (обзор)</b> .....	192
<b>Содержание</b> .....	217