

Объединение независимых экспертов в области минеральных ресурсов,
металлургии и химической промышленности



Обзор рынка графена в мире и в России

Москва
май, 2017

Демонстрационная версия

С условиями приобретения полной версии отчета можно ознакомиться на странице сайта по адресу: <http://www.infomine.ru/research/32/520>

Общее количество страниц: 111 стр.
Стоимость отчета – 60 000 рублей

Этот отчет был подготовлен экспертами ООО «ИГ «Инфомайн» исключительно в целях информации. Содержащаяся в настоящем отчете информация была получена из источников, которые, по мнению экспертов ИНФОМАЙН, являются надежными, однако ИНФОМАЙН не гарантирует точности и полноты информации для любых целей. Информация, представленная в этом отчете, не должна быть истолкована, прямо или косвенно, как информация, содержащая рекомендации по инвестициям. Все мнения и оценки, содержащиеся в настоящем материале, отражают мнение авторов на день публикации и подлежат изменению без предупреждения. ИНФОМАЙН не несет ответственность за какие-либо убытки или ущерб, возникшие в результате использования любой третьей стороной информации, содержащейся в настоящем отчете, включая опубликованные мнения или заключения, а также последствия, вызванные неполнотой представленной информации. Информация, представленная в настоящем отчете, получена из открытых источников либо предоставлена упомянутыми в отчете компаниями. Дополнительная информация предоставляется по запросу. Этот документ или любая его часть не может распространяться без письменного разрешения ИНФОМАЙН либо тиражироваться любыми способами.

Copyright © ООО «ИГ «Инфомайн».

Содержание

Аннотация.....	7
Введение	8
1. Основные характеристики графена, виды промышленных продуктов, требования к качеству (стандарты)	9
Товарные формы	15
Стандарты.....	17
2. Сырьё и технологии производства графена	19
3. Мировой рынок графена	22
3.1 Уровень мирового производства в 2010-2016 гг. и основные производители графена	23
3.2. Области применения и основные тенденции на рынке графена	47
3.3. Основные центры НИОКР	50
3.4. Области применения графена в 2010-2016 гг.	60
<i>Сенсорные экраны</i>	61
<i>Литий-ионные аккумуляторы</i>	64
<i>Защитные покрытия</i>	66
<i>Композиты</i>	67
<i>Суперконденсаторы</i>	68
<i>Шины</i>	69
<i>3D принтинг</i>	71
<i>Биомедицина и здравоохранение</i>	73
3.5. Ценовой анализ	78
3.5.1. <i>Цены на графеновые порошки</i>	78
3.5.2. <i>Цены на графеновые нано-частицы</i>	79
3.5.3. <i>Цены на графеновые плёнки</i>	81
4. Рынок графена в России в 2010-2016 гг., производители и потребители	82
4.1. Производители графена в РФ в 2010-2016 гг.	83
4.2. Внешнеторговые операции РФ с графеном в 2014-2016 гг.....	97
4.3. Потребители графена в РФ в 2010-2016 гг.....	99
5. Перспективы развития графеновой индустрии в России, прогноз на 2017-2022 гг.	101
Приложение 1. Основные производители графена в мире в 2016 г.....	103
Приложение 2. Основные производители графена в России в 2016 г.	109
Источники информации	110

Список таблиц

- Таблица 1: Основные свойства монослойного графена (МГ), многослойных графеновых нано-частиц (ГНЧ) и дроблёного графита
- Таблица 2: Анализ графеновых нано-частиц на содержание примесей семи элементов, ppm
- Таблица 3: Технические характеристики марок графеновых нано-частиц производства компании Angstrom Materials (США)
- Таблица 4: Области применения марок графена производства компании Angstrom Materials (США)
- Таблица 5: Основные характеристики марок графена производства компании Knano (Китай)
- Таблица 6: Основные характеристики марок графена производства компании The Sixth Element (Changzhou) Materials Technology Co. Ltd. (Китай)
- Таблица 7: Основные характеристики марок оксида графена производства компании The Sixth Element (Changzhou) Materials Technology Co. Ltd. (Китай)
- Таблица 8: Основные свойства марок графена производства компании Tangshan Jianhua Industrial Group (Китай)
- Таблица 9: Технические характеристики графеновых нано-пластин марки xGnP®
- Таблица 10: Основные характеристики марок графена компании AzTrong (США)
- Таблица 11: Основные характеристики марок оксидов графена компании AzTrong (США)
- Таблица 12: Характеристики графеновых порошков производства компании Fanglin Minerals (Китай)
- Таблица 13: Области применения мирового рынка графена
- Таблица 14: Цены на графеновые порошки иностранных производителей на 31.03.2017 г., \$/кг
- Таблица 15: Цены на графеновые нано-пластины иностранных производителей на 31.03.2017 г., \$/кг
- Таблица 16: Цены на графеновые плёнки на медных или кремниевых подложках на 31.03.2017 г., \$/см²
- Таблица 17: Характеристики водных паст графеновых нано-пластин
- Таблица 18: Прейскурант графеновых продуктов ООО «Нанотехцентр» (Тамбов) на 29.05.2015 г.
- Таблица 19: Основные свойства марок графена производства компании АО «ЗАВКОМ»
- Таблица 20: Основные финансовые показатели ООО «Карболайт» в 2010-2015 гг., тыс. руб.
- Таблица 21: Импорт графена в 2014-2016 гг., грамм, \$

Список рисунков

- Рисунок 1: Схематичное изображение графена
- Рисунок 2: Монокристаллический графен (слева) и аморфный графен (справа)
- Рисунок 3: Дефекты в однослойном графене типа «вакансия», «топологический дефект Стоуна-Уэльса» и «нанопора»
- Рисунок 4: Структура графена с инкорпорированными молекулами краун эфира
- Рисунок 5: Электронные фотографии помпонов оксида графена
- Рисунок 6: Схема CVD процесса синтеза графена на подложке
- Рисунок 7: Схема получения графена из графита через промежуточное образование оксида графита
- Рисунок 8: Доля разных технологий в мировом производстве графена в 2016 г.
- Рисунок 9: Динамика мирового производства графена в 2010-2016 гг., тыс. т
- Рисунок 10: Географическое распределение производителей графена по регионам мира в 2016 г., штук
- Рисунок 11: Топ-10 мировых производителей графена в 2016 г., тонн в год
- Рисунок 12: Семейство графеновых нано-частиц производства компании Angstrom Materials (США)
- Рисунок 13: Цех по производству графена китайской компании The Sixth Element (Changzhou) Materials Technology в 2016 г.
- Рисунок 14: Графеновое антикоррозионное покрытие на колонне ветрогенератора в Жёлтом море
- Рисунок 15: Цех по производству графена компании Tangshan Jianhua Industrial Group (Китай)
- Рисунок 16: Схема трёхстадийного процесса производства графеновых нано-пластин компании XG Sciences, Inc. (США)
- Рисунок 17: Образцы порошков графена компании Hengli Shengtai (Китай)
- Рисунок 18: Схема непрерывной эксфолиации графеновой плёнки с медной подложки на промежуточный полимерный слой согласно разработке компании Graphene Square (Ю. Корея)
- Рисунок 19: Технологическая схема производства графеновых сенсорных экранов для смартфонов компании Graphene Square (Ю. Корея)
- Рисунок 20: Цех по производству графена компании Graphenea
- Рисунок 21: Схема применимости графена в 9-ти узлах легкового автомобиля
- Рисунок 22: Внешний вид механического хронометра с корпусом из графенового композита Graph TPT™
- Рисунок 23: Схема композита «графен/полимер» разработки Окриджской национальной лаборатории ORNL (США)
- Рисунок 24: Графеновый громкоговоритель, состоящий из 16 звуковоспроизводящих модулей, разработки института KAIST (Ю. Корея)
- Рисунок 25: Графеновый шлем для мотоциклистов Grafene разработки Graphene Labs (Италия)

- Рисунок 26: Схема графенового датчика диоксида азота и аммиака, созданного в Fujitsu Laboratories Ltd. в 2016 г.
- Рисунок 27: Структура областей потребления графена в 2016 г., %
- Рисунок 28: Внешний вид экранов для смартфонов производства Wuxi Graphene Electronic Film Technology Co (Китай).
- Рисунок 29: Внешний вид гибких смартфонов-браслетов с графеновым экраном компании Moxi (Китай)
- Рисунок 30: Гибкий настольный дисплей на основе графена компании FlexEnable (Англия)
- Рисунок 31: Внешний вид литий-ионного аккумулятора компании Dongxu Optoelectronic Co., Ltd. (Китай)
- Рисунок 32: Внешний вид суперконденсаторов на основе графеновых электродов разработки ООО «Нанотехцентр» (Тамбов) совместно с ОАО ВСКБ «Рикон» (Воронеж)
- Рисунок 33: Автомобильные шины с графеном производства компании Shangdong Hengyu Technology (Китай)
- Рисунок 34: Автомобильные шины, упрочнённые графеном компании Nanjing SCF Nanotechnology Ltd. (Китай)
- Рисунок 35: Нить термопластика для 3D принтинга (упрочнённая графеном) компании Nanjing SCF Nanotechnology Ltd. (Китай)
- Рисунок 36: Образцы 12-ти разноцветных пластмассовых композитов, упрочнённых графеном, производства компании Nanjing SCF Nanotechnology Ltd. (Китай)
- Рисунок 37: Модельная система графен – вода – липидный бислой для биосенсоров
- Рисунок 38: Схема взаимодействия двух пептидов через стадию сорбции одного из них на поверхности оксида графена
- Рисунок 39: Схема физико-химических процессов получения из графита графеновых нано-пластин и их химических производных
- Рисунок 40: Графеновая плёнка на никелевой фольге 20x100 мм производства ООО «Русграфен» (Москва)
- Рисунок 41: Изменение свойств компаунда эпоксидной смолы при модифицировании графеном в количестве 0,001; 0,01 и 0,05%
- Рисунок 42: Базовый прогноз производства графена в мире и РФ на 2017-2022 гг., тыс. т
- Рисунок 43: Оптимистичный прогноз производства графена в мире и РФ на 2017-2022 гг., тыс. т

Аннотация

Настоящий отчет является **первым изданием** исследования рынка графена в мире и в России.

Цель исследования – анализ мирового и российского рынка графена.

Объектом исследования является графен и его производные, в первую очередь оксид графена.

Данная работа представляет собой **кабинетное исследование**. В качестве **источников информации** использовались данные научной, отраслевой и региональной прессы, годовых и квартальных отчетов эмитентов ценных бумаг, интернет-сайтов производителей графена, опрос отечественных и зарубежных специалистов по производству и использованию графена.

Хронологические рамки исследования: 2010-2016 гг., прогноз на 2017-2022 гг.

География исследования: страны мира и Российская Федерация.

Отчет состоит из **5** глав, содержит **111** страниц, в том числе **21** таблицу, **43** рисунка и **2** приложения.

В **первой главе** дана информация о графене, его основных свойствах и подходах к стандартизации графеновых материалов. Выборочно указаны уровни примесей на отдельных промышленных марках графена.

Во **второй главе** описаны используемое сырье и основные промышленные технологии производства графеновых плёнок и графеновых порошков.

В **третьей главе** дана характеристика мирового рынка в 2010-2016 гг. Подробно рассмотрены основные производители графена, сформулированы главные драйверы рынка, указаны ведущие научно-исследовательские центры по графену, кратко описаны области применения графена и осуществлён ценовой анализ графена от разных производителей.

В **четвёртой главе** рассмотрено состояние графеновой индустрии в России в 2010-2016 гг.

В **пятой главе** рассмотрены перспективы развития индустрии графена и дан прогноз производства и потребления до 2022 года.

В **приложениях** приведены адреса и контактная информация иностранных и российских производителей графена.

Целевая аудитория исследования:

- участники рынка графена в России и странах СНГ – производители, потребители, трейдеры;

- потенциальные инвесторы.

Предлагаемое исследование претендует на роль **справочного пособия** для специалистов, принимающих управленческие решения, работающих на данном рынке.

Введение

Международный союз теоретической и прикладной химии, International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC), определяет графен как единичный слой углеродных атомов графитоподобной структуры. Англоязычное определение звучит так: «A single carbon layer of the graphite structure, describing its nature by analogy to a polycyclic aromatic hydrocarbon of quasi infinite size».

Согласно ГОСТ Р 55417-2013 «Нанотехнологии. Часть 3. Нанообъекты углеродные. Термины и определения», графен – это монослой атомов углерода, в котором каждый атом связан с тремя соседними, образуя таким образом сотовую структуру.

Многие эксперты предсказывают графену и его производным феноменальный рост коммерческого потребления. Например, в отчёте «The Graphene and 2D Materials Global Opportunity and Market Forecast 2017-2027» даны вполне оптимистичные прогнозы (документ опубликовала компания Future Markets в январе 2017 г. [1]).

Высокоскоростной транспорт электронов и их высокая подвижность ($2,5 \cdot 10^5 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$) делают графен идеальным материалом для нано-электроники, в особенности для высокочастотных применений. Его оптические (оптическое поглощение одним слоем $\approx 2,3\%$), термические (коэффициент теплопроводности $3000\text{-}5000 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$) и механические свойства (модуль Юнга 10^{12} Па , собственная прочность на разрыв $\sim 1,3 \cdot 10^{11} \text{ Па}$) привлекательны для микро- и нано-механических систем, тонкопленочных транзисторов, прозрачных и проводящих композитов и электродов, гибкой и печатаемой оптоэлектроники и фотоники. Большая удельная площадь поверхности (до $2400 \text{ м}^2/\text{г}$), химическая чистота (до $99,999\%$) и возможность изменения функциональных свойств присоединением различных молекул и соединений делают графен и его популярные производные – оксид графена и фторид графена – перспективными материалами для биотехнологии и медицины.

Вследствие обнадёживающих научно-технических перспектив, графеновый бизнес привлекает всё больше и больше коммерческих структур по всему миру, в том числе в России. Существующие на рынке инновационные компании срочно включают графеновые продукты в свои стратегии. Число научных публикаций по графенам в мире превысило 10 тыс. штук в год. Из них 44% приходится на Китай, 18% на США и 10% на Южную Корею. Российские публикации составляют менее 1%.

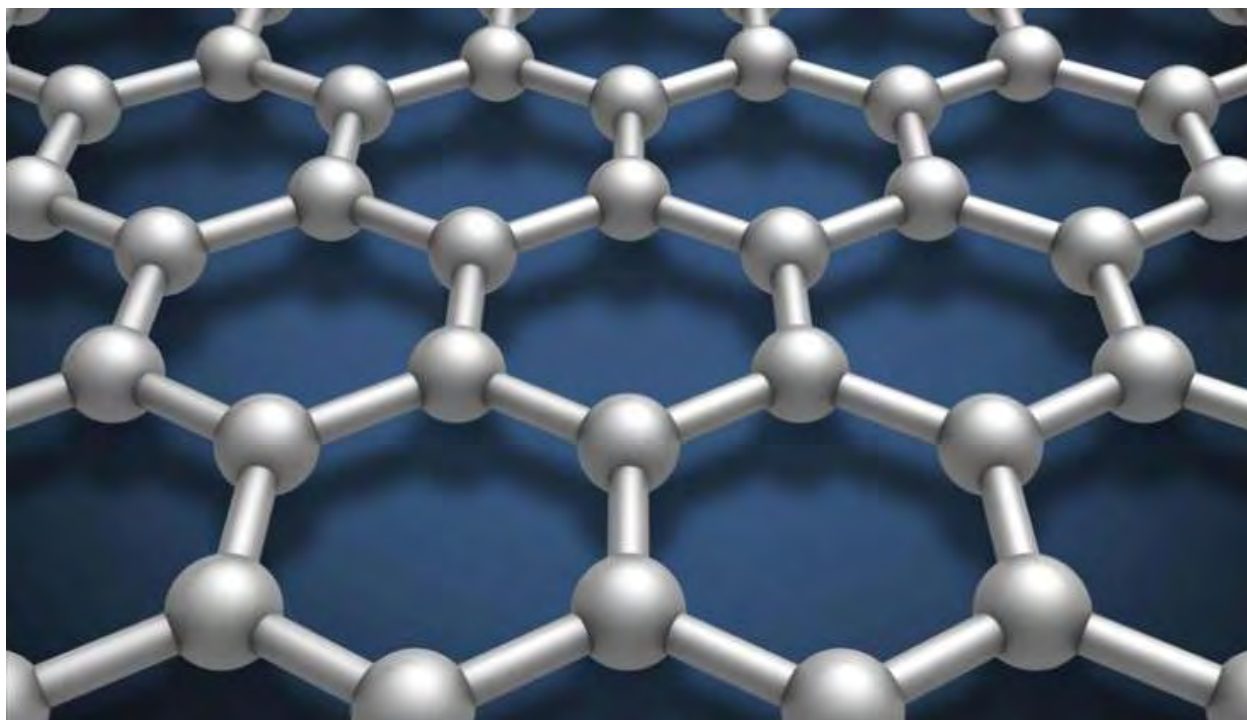
При этом публикуется около 5 тыс. штук в год патентов, в основном по литиевым батареям, конденсаторам, топливным ячейкам, запоминающим устройствам и сенсорным/дисплейным экранам. Лидерами в патентах являются Samsung Electronics (Ю. Корея), Ocean's King Lighting (Китай), IBM (США), Hon Hai Precision (Китай), SanDisk (США), Xerox (США), Bayer Material Science (Германия), BASF (Германия), Samsung Techwin (Ю. Корея), Sony (Япония).

1. Основные характеристики графена, виды промышленных продуктов, требования к качеству (стандарты)

Принципиально, что графен имеет одноатомную толщину (рисунок 1).

Число атомов углерода в отдельной частице графена, площадь пластины, её форма, наличие дефектов и легирующих элементов, а также химическое состояние крайних атомов углерода никак не регламентируется.

Рисунок 1: Схематичное изображение графена

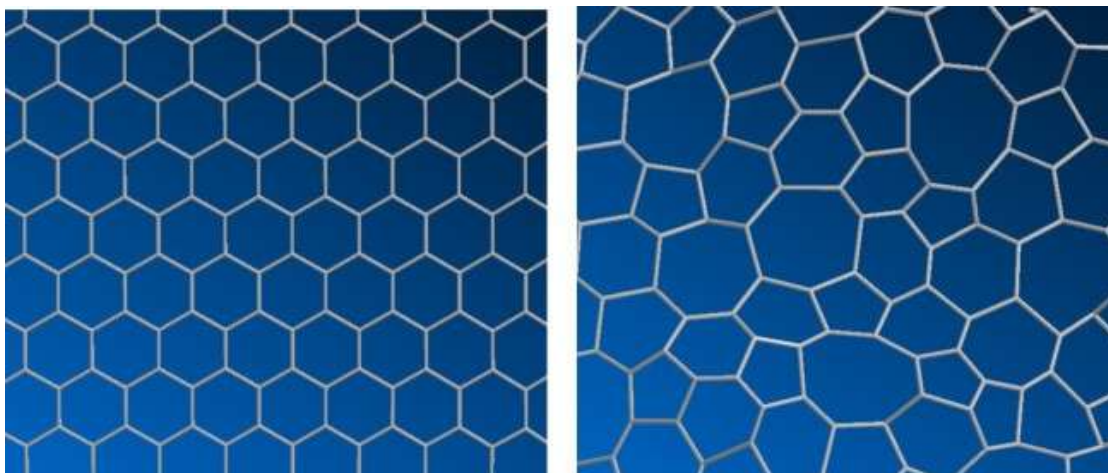


Источник: [2]

На практике к графенам относят не только монослои и монослойные ленты, но и сдвоенные слои **билэйеры** (bilayer), строенные слои **трилэйеры** (trilayer) и **графеновые нано-частицы** (пакеты из 5-10 слоёв), которые часто называют многослойным графеном, МСГ (multilayer graphene) или графеновые нано-пластины, ГНП (graphene nano plateles).

В 2012 г. введён термин «**аморфный графен**» [3]. Он отличается от монокристаллического графена со строго равнобедренными шестигранными ячейками атомов углерода тем, что его ячейки имеют и 5, и 6, и 7 атомов углерода, а форма многогранников сильно перекошена (рисунок 2).

**Рисунок 2: Монокристаллический графен (слева)
и аморфный графен (справа)**



Источник: данные компании Samsung Electronics

Аморфный графен имеет низкую электрическую проводимость, что расширяет возможные сферы его использования за пределы электроники.

Малодефектный монокристаллический монослойный графен является большой редкостью и вследствие своей дороговизны используется только в отдельных исследованиях. Более 99,999% поступающего на мировой рынок графена – это несовершенный материал с разного рода дефектами и примесями.

Исследования графена находятся на стыке физики конденсированных сред и физики высоких энергий. Уникальные свойства графена выделяют его среди других материалов:

- химическая стабильность,
- высочайшая подвижность электронов,
- высокая теплопроводность,
- исключительная прочность и упругость,
- почти полная прозрачность.

Основные свойства монослойного графена (МГ) и ГНЧ в сопоставлении с графитом представлены в таблице 1.

Таблица 1: Основные свойства монослойного графена (МГ), многослойных графеновых нано-частиц (ГНЧ) и дроблёного графита

Характеристика	МГ	ГНЧ	Графит
Подвижность электронов, $\text{см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$	$2,5 \cdot 10^5$	н.д.	н.д.
Оптическое поглощение, %	2,3*	99,9	99,9
Коэффициент теплопроводности, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$	3000-5300	3000-4000	280-2435**
Модуль Юнга, Па	10^{12}	10^{10}	10^6
Прочность на разрыв, Па	$\sim 1,3 \cdot 10^{11}$	10^9	10^5
Удельная площадь поверхности, $\text{м}^2/\text{г}$	до 2400	150-750	До 100
Удельная электропроводность, См/м	1738	1500	1000
Химическая чистота, %	до 99,999	98-99	до 99,999

* - в широком интервале волн от 350 до 1000 нм

** - параллельно базисной плоскости

н.д. - нет данных

Источник: [4]

В графене реализуются «релятивистские» уровни Ландау и «получелое» квантование холловской удельной проводимости. Известен эффект туннелирование в графене (прозрачность высоких барьеров). Но двухслойный графен полностью непрозрачен.

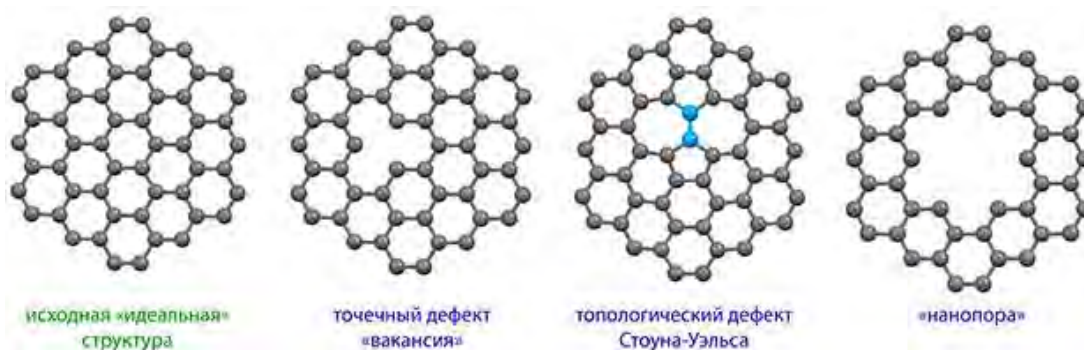
Удельная проводимость графена никогда не падает ниже кванта проводимости независимо от дефектов и количества слоев.

Коэффициент фотопоглощения для одного слоя графена равен в точности $\pi\alpha$. Для N слоев – $N \cdot \pi\alpha$.

Изучение графена при помощи электронной дифракции показало, что нормали к поверхности отклоняются от вертикали в среднем на 10° .

Свойства разновидностей графена, по мере искажения структуры, в той или иной степени приближаются к свойствам графита. Граница между высокорасщепленными графитами и многослойными графенами точно не определена. Однако считается, что она находится вблизи числа 10 (пакет из 10 графеновых слоёв).

Типичные дефекты в однослойном графене представлены на рисунке 3.

Рисунок 3: Дефекты в однослойном графене типа «вакансия», «топологический дефект Стоуна-Уэльса» и «нанопора»

Источник: [5]

Двухслойный графен (билэйер) является уникальным представителем 2D систем в физике конденсированного состояния вещества, обладающий выдающимися механическими и транспортными свойствами. Известны бислои графена с муровой структурой, бислои с адсорбированными атомами водорода, фтора и кислорода, бислои с сеточной структурой.

Идеальный графен состоит исключительно из шестичленных колец. Отсутствие одного или появление лишнего атома углерода не приводит к разрыву всей π -системы, поскольку ароматические пяти- и семичленные кольца также обладают определённой энергией сопряжения. Однако накопление таких дефектов приводит к образованию в структуре графена определённых напряжений и, соответственно, к искривлению плоской поверхности. Так, появление некоторого числа пятичленных колец приводит к сворачиванию атомной плоскости сначала в конус, а когда число таких «дефектов» становится равным 12 – возникает замкнутая сферическая молекула, известная под названием фуллерен. Возможно также свёртывание графена в углеродные нанотрубки.

Присутствие семичленных колец приводит к образованию седловидных искривлений атомной плоскости. В то же время протяжённая π -система сопряжённых ароматических колец делает графен достаточно устойчивым к появлению дефектов по сравнению с другими нано-объектами.

Интересно строение краёв графенового листа. Имея вполне конечные размеры (как правило, несколько сот нанометров), графен ограничивает свободу перемещения носителей заряда внешними границами (краями) графенового листа. Концевые атомы шестичленных колец, будучи координационно ненасыщенными, легко «подхватывают» реакционные молекулы из окружающей среды (чаще всего – воду и продукты её диссоциации H^+ и OH^- , а также кислород). При этом они могут переходить в sp^3 -гибридизацию и тем самым исказить плоское строение концевых ароматических колец. Установлено, что образцы графенов проявляют разнообразие электронных свойств в зависимости от структуры краев. Эту структуру можно целенаправленно менять. Чем меньше латеральные размеры графеновых чешуек, тем сильнее влияние краевых искажений на их электронные свойства.

Недавно обнаружено полезное нарушение хирального порядка в графене (монослой на медной подложке). Специфическая кристаллическая и, как следствие, электронная структура графена приводит к тому, что носителями заряда в нем являются безмассовые дираковские фермионы с коническим законом дисперсии, а щель в электронном спектре отсутствует. Для технологических приложений было бы желательно придать этим носителям конечную массу, потому что тогда в спектре графена появилась бы запрещенная зона, и он стал бы полупроводником. В работе [6] показано, что

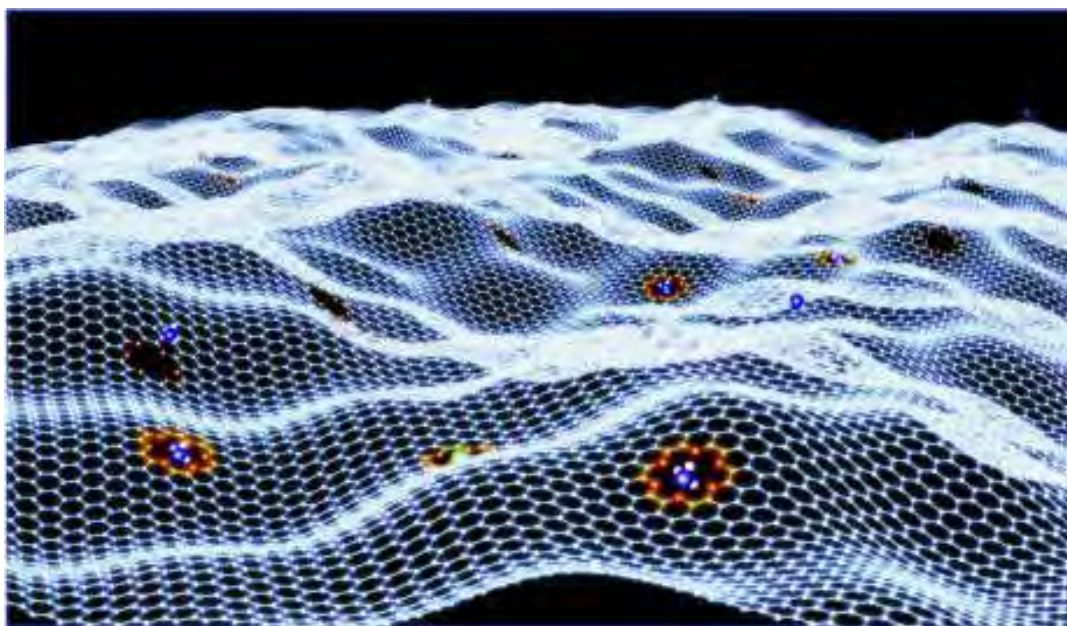
открыть в дираковских точках запрещенную зону можно, если нарушить эффективную хиральную симметрию графена. В графене на медной подложке это достигается за счет искажения связей С–С медными вакансиями, в результате чего формируется волна плотности связей (так называемый порядок Кекуле), которая нарушает симметрию относительно поворота монослоя на угол $\pi/3$. Порядок Кекуле сохраняется при комнатной температуре и атмосферном давлении.

Одним из перспективных подходов к управлению свойствами графена является его способность к легированию. Замещение атомов углерода примесями азота или бора позволяет превратить графен в полупроводник n- или p-типа, соответственно. Интересно, что внедрение золота под слой N-графена позволяет значительно повысить эффективность допирования путем изменения конфигурации химических связей азота в слое графена при повышенной температуре.

Для практических применений особо полезны оксиды графена. Это частицы графена с присоединёнными кислородсодержащими функциональными группами и/или молекулами. Присоединение возможно по краям или в плоскости углеродной сетки; в отверстиях углеродной сетки; в «клещах» углеродной сетки. Номенклатура этих кислородных групп обширна: гидроксильные, фенольные, карбонильные, карбоксильные, арильные, эфирные и т. п. Разновидностью являются оксиды графена, модифицированные полимерами, такими как полиэтиленгликоль, полиэфир, поливинил, полиакрил и т. д. Еще одну группу оксидов графена составляют легированные соединения. В частности, известны оксиды графена, содержащие в своей структуре один или несколько атомов бора, азота, алюминия, фосфора, кремния, серы, или же группы на их основе, например меламин, фосфин, силан, полисилоксан, сульфиды и т. д.

Самые красивые оксиды графена получают при инкорпорации молекулами краун-эфиров (рисунок 4).

Рисунок 4: Структура графена с инкорпорированными молекулами краун эфира



Источник: [7]

Такие структуры получили в знаменитом ядерными разработками научном центре США – Ок-Риджской Национальной Лаборатории (Oak Ridge National Laboratory). Размер и форма полости, сформированной молекулой краун эфира, зависят от его состава. Поэтому новый материал может сорбировать ионы строго определённого диаметра. Сильные электростатические связи молекул эфира, инкорпорированных в графеновую сеть, открывают заманчивые перспективы в биотехнологиях, для химической сепарации, экстракции металлов, очистки от радионуклидов, рециклинга редкоземельных металлов и хранения данных.

Для удобства применений оксиды графена зачастую «лакируют» поверхностно-активными веществами. Используют, например, додецилсульфат натрия (SDS), додецилбензолсульфат натрия, Triton X-100.

На практике важна **растворимость** – способность оксидов графена образовывать устойчивые коллоидные дисперсии в воде и широко распространённых органических растворителях.

Напомним, что графен плохо смачивается жидкостями, нерастворим в воде и органических растворителях и способен образовывать лишь очень разбавленные растворы за счет слабых взаимодействий с растворителями.

Оксид графена по сорбционной емкости значительно превосходит ионообменные смолы на полимерной основе и другие традиционные сорбенты.

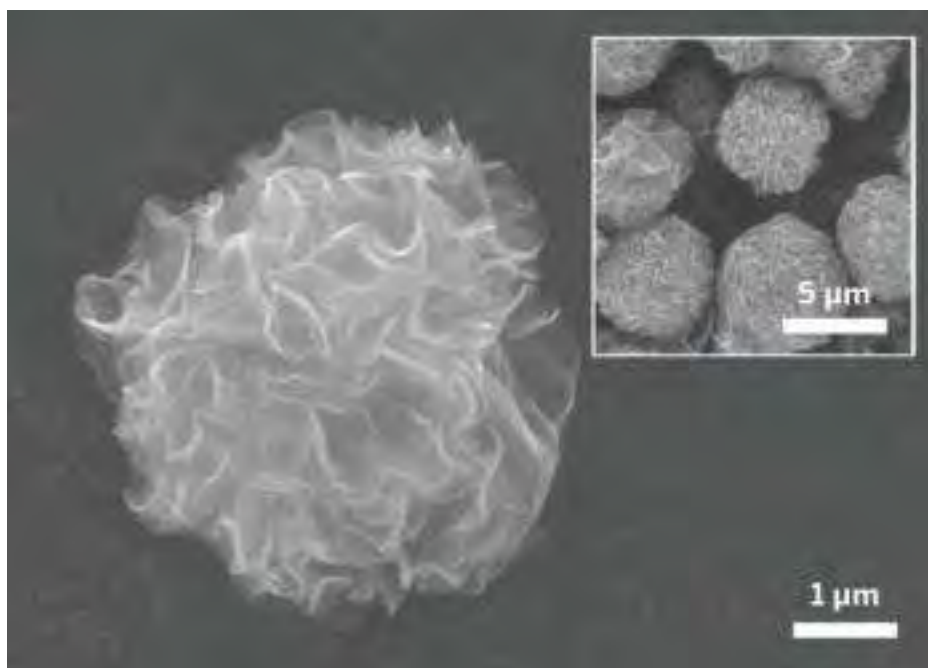
Специалистам известно пять основных разновидностей оксидов графена по форме частиц:

- 1) Пленки на инертных подложках;
- 2) Нано-порошки с размером плоских частиц (чешуек) порядка 905 нм;

- 3) Хлопья с размером частиц 1-5 мкм;
- 4) Ленты (с отношением длины к ширине более 10);
- 5) Помпоны с размером сфероподобных частиц диаметром 3-6 мкм.

Самые необычные – помпоны, то есть сrostки лепестков графена в форме помпона или в форме детских шаров из гофрированной бумаги (рисунок 5), которые были получены в 2014 г. в Университете Ёнсе (Сеул, Южная Корея).

Рисунок 5: Электронные фотографии помпонов оксида графена



Источник: [8]

По степени окисления оксиды графена сильно различаются и могут содержать от 3 до 40% кислорода по массе. Широкие пределы химического состава (с учётом дополнительных легирующих атомов и групп) делают непростой задачу классификации и стандартизации оксидов графена. Тем более что состав может меняться не дискретно, а непрерывно. Однако для коммерческих нужд можно взять опыт классификаций природных алмазов, где международная классификация состоит из 3 тыс. сортов, абсолютно понятных профессионалам.

Товарные формы

В деловых кругах устоялась следующая терминология товарных форм графенов:

- SLG single-layer graphene – однослойный графен;
- Pristine graphene – графен, полученный диспергированием природного графита;
- FLG few-layer graphene – многослойный графен;