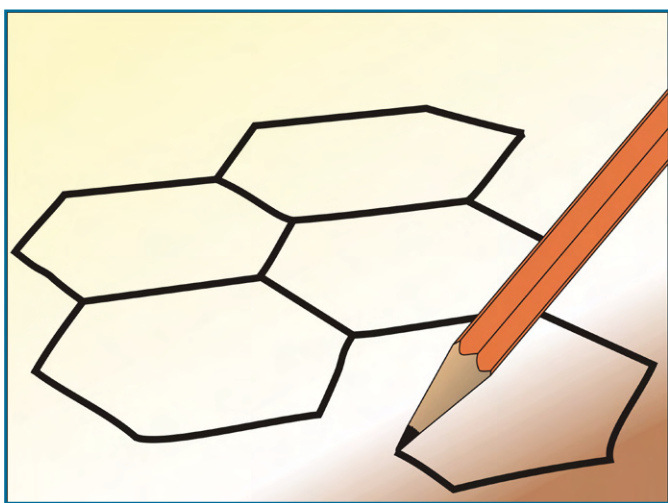


# ГРАФЕН

## (Graphene)

«Мы часто не замечаем важного в том, что кажется нам привычным и простым».

Людвиг Витгенштейн,  
австрийский философ XX века



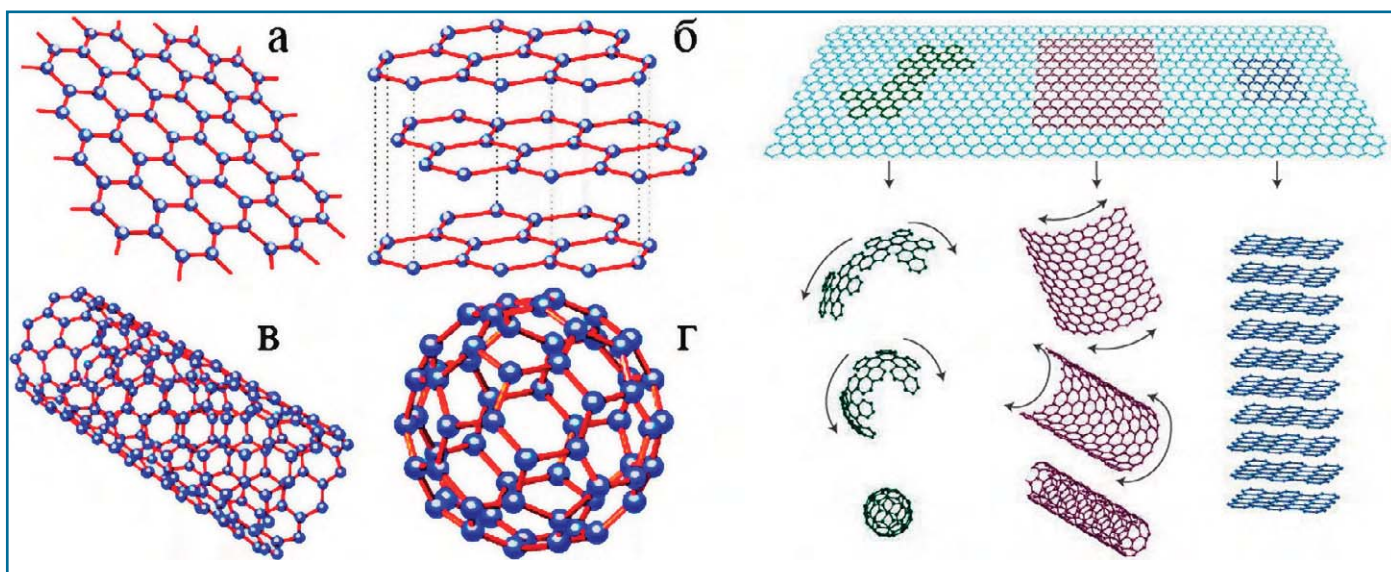
Идея рисунка из A.C. Neto, Fr. Guinea and N.M. Peres. Drawing conclusions from graphene. Physics World November 2006.

Каждый из нас в своей жизни регулярно сталкивается с графитом – делая наброски рисунков или заметки в тексте, наверняка вы пользуетесь «простыми» карандашами с графитовыми стержнями. Действительно, это очень удобно – сделав ошибку или неверно проведя линию, достаточно воспользоваться ластиком – и порядок! А знаете ли вы, что это возможно благодаря тому, что графит имеет слоистую структуру. В этой структуре каждый слой, сформированный атомами углерода, сложен из плоских шестиугольников, напоминающих ячейки пчелиных сот. Химические связи между соседними слоями весьма слабые, поэтому даже при легком нажатии графитовый стержень оставляет серый след на бумаге. Удивительно то, что из такого, казалось бы, знакомого нам графита можно получить материал, обладающий принципиально новыми свойствами. Воз-

можно, именно благодаря этому открытию многие фантастические идеи, витающие в области современной **нанoeлектроники**, станут реальностью. Этот уникальный материал называется графеном и представляет собой всего лишь один углеродный слой, выделенный из структуры графита (рис. 1).

Углерод, один из наиболее интересных элементов в Периодической таблице Менделеева, играет уникальную роль в природе – способность его атомов образовывать сложные органические молекулы является основой жизни на нашей планете. Даже атомарный углерод демонстрирует необычайно сложное поведение, которое выражается в образовании весьма различающихся по свойствам структур. До недавнего времени были известны трехмерные (3D, алмаз, графит), одномерные (1D, нанотрубки) и нульмерные (0D, фуллерены) аллотропные формы углерода (рис. 1). Как видно, в этой последовательности явно не хватает двумерной формы углерода и, казалось бы, неспроста – теоретические расчеты указывают на невозможность существования идеальных 2D-структур, которые должны распаться или скручиваться при толщине даже в несколько атомных слоев.

Несмотря на то, что уникальные свойства неуловимой двумерной модификации углерода – графена, теоретически изучены еще в 30–40-х годах, проблема ее получения была решена только в 2004 г. Первооткрывателями стали физики из Манчестерского университета (Великобритания) во главе с А. Геймом (Andre Geim) совместно с группой К. Новоселова из российского Институ-



**Рис.1.** Графен (а) является самым простым по строению среди других модификаций углерода и может рассматриваться в качестве их структурного блока. Например, если слои графена расположить друг над другом с небольшим смещением по плоскости, то получится обыкновенный графит (б). Графен можно свернуть в цилиндр и тогда получится однослойная углеродная нанотрубка (в). Если же лист графена определенной формы свернуть так, чтобы образовалась сфера, то получится похожий на футбольный мяч фуллерен  $C_{60}$  (г).

та проблем технологии микроэлектроники и особенно чистых металлов в г. Черноголовка (Россия). Источником углерода служила пластина монокристалла графита, из которого двумерные слои выделяли по технологии микромеханического скалывания. Успеху ученых во многом помогла способность графена давать слабую интерференционную картину и становиться видимым в оптический микроскоп, если его разместить на поверхности кремниевой подложки с тщательно выбранной толщиной слоя  $SiO_2$  (рис. 2).

Является ли графен исключением из правила о неустойчивости двумерных кристаллов? Нет,

потому что он не является идеально плоским. В этом можно убедиться, если зафиксировать графен в виде изолированной пленки на металлическом каркасе. Вооружившись комплексом современных методов исследования поверхности, ученые показали, что графеновый слой имеет волнообразную структуру (рис. 2).

Теперь перейдем к самому интересному, а именно, к удивительным свойствам графена, которые пророчат ему большое будущее в области **нанозлектроники**. В квазидвумерной кристаллической структуре графена электроны ведут себя как релятивистские частицы с нулевой эф-



**Рис.2.** Пленки графена, полученные на окисленной кремниевой подложке и на золотом каркасе. Модель искаженной графеновой пленки толщиной в один атом.

фактивной массой, при этом их скорость всего лишь в 300 раз меньше скорости света в вакууме. В 2006 году на графеновой основе был сконструирован первый полевой транзистор, который работал при комнатной температуре в обычных условиях и в котором подвижность электронов была на порядок выше, чем в современных кремниевых транзисторах. Однако говорить об изготовлении таких устройств в промышленных масштабах пока рано. Существующие в настоящее время разработки предполагают целый ряд возможных применений графена: от газовых сенсоров и электронных линз до наполнителей для

электропроводящих пластиков и электрических батарей.

Графен, помимо своих уникальных проводящих свойств, обладает еще и великолепными механическими характеристиками – он очень гибок и прочен. Кусочки графена при своей сверхмалой толщине могут достигать в длину до 10 микрон, и нет никаких принципиальных ограничений для создания таких тканей размером в сантиметры. Графен можно, например, использовать как *нановесы*, с помощью которых можно проводить высокоточные измерения массы микроскопических объектов.

#### *Литература:*

1. Katsnelson M.I. Mater. Today. 2007. Jan.–Feb. Vol. 10. №1–2.
2. Neto A.C., Guinea Fr., Peres N.M. Phys. World. Nov. 2006.