

FULLERENES: PHYSICAL PROPERTIES

V. F. MASTEROV

Structure, electrical and magnetic properties of a new allotrope of carbon fullerene C_{60} are discussed. History of discovery of fullerenes is presented in the first part of the article. Having been doped with some metals, fullerenes acquire superconductor properties with phase transition temperature above 40 K. Alternatively, fullerene doped with some organic molecules or halogenes is ferromagnetic.

Рассмотрены структура, электрические и магнитные свойства новой аллотропной формы углерода – фуллерена C_{60} . Легирование фуллерена рядом металлов приводит к образованию сверхпроводящего состояния с температурой фазового перехода выше 40 К. В то же время фуллериды на основе некоторых органических молекул и галогенов являются ферромагнетиками.

© Мастеров В.Ф., 1997

ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ФУЛЛЕРЕНОВ

В. Ф. МАСТЕРОВ

Санкт-Петербургский государственный технический университет

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время понятие “фуллерены” применяется к широкому классу многоатомных молекул углерода C_n , где $n \geq 60$, и твердым телам на их основе. Однако еще шесть лет назад фуллереном (точнее, бакминстерфуллереном) называли молекулу C_{60} , то есть молекулу, состоящую из шестидесяти атомов углерода, расположенных на сферической поверхности, как показано на рис. 1. Как видно из рисунка, атомы углерода располагаются на поверхности сферы в вершинах пятиугольников (пентагонов) и шестиугольников (гексагонов). Эта мо-

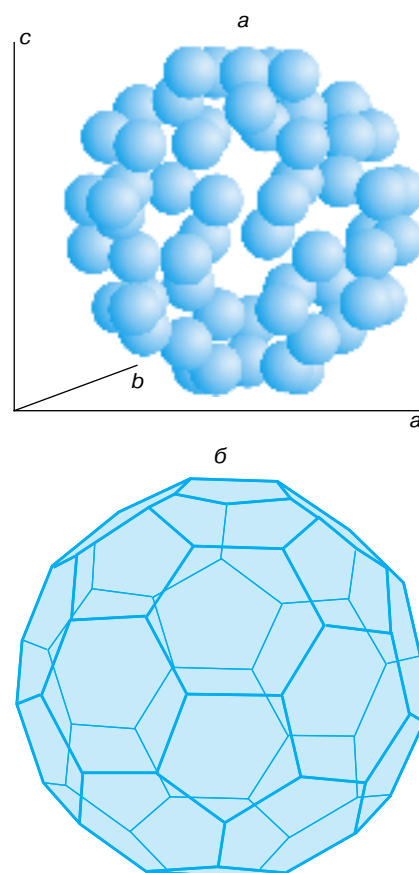


Рис. 1. Структура молекулы C_{60} : а – общий вид; б – структура связей в молекуле фуллерена

лекула напоминает футбольный мяч, имеющий 12 черных пентагонов и 20 белых гексагонов. Молекулы C_{60} могут кристаллизоваться, образуя кубическую решетку. Таким образом, фуллерен является четвертой аллотропной формой углерода (первые три — алмаз, графит и карбин). В дальнейшем для определенности *фуллереном* мы будем называть твердую фазу C_{60} , а отдельные молекулы C_{60} — *молекулами фуллерена*. Как мы уже отмечали, молекула C_{60} содержит фрагменты с пятикратной симметрией (пентагоны), которые запрещены природой для неорганических молекул. В связи с этим мы должны признать, что молекула фуллерена является органической молекулой, а сам фуллерен представляет собой молекулярный кристалл, являющийся связующим звеном между органической и неорганической материей.

Впервые возможность существования высокосимметричной молекулы углерода, напоминающей футбольный мяч, была предсказана японскими учеными Е. Осава и З. Йошида в 1970 году. Чуть позже российские ученые Д.А. Бочвар и Е.Г. Гальперн сделали первые теоретические квантовохимические расчеты такой молекулы и доказали ее стабильность. Только 15 лет спустя, в 1985 году, английскому ученому Крото с сотрудниками [1] удалось синтезировать молекулу C_{60} . Для этого твердая графитовая мишень подвергалась воздействию мощного лазерного излучения. В результате происходило образование хаотической плазмы, имеющей температуру 5000–10 000°C, в этой плазме и синтезировались молекулы C_{60} , которые идентифицировались методом масс-спектропии, то есть с помощью прибора, позволяющего сортировать атомы и молекулы по их массам. Процесс образования молекул фуллерена из плазмы представляет прекрасный пример организации упорядоченных структур из хаоса — одной из интереснейших областей современной науки!

Свое название молекулы фуллерена получили по фамилии архитектора Бакминстера Фуллера (Buckminster Fuller), сконструировавшего купол павильона США на выставке в Монреале в 1967 году в виде сочлененных пентагонов и гексагонов. Однако справедливости ради необходимо отметить, что подобная форма есть среди полурегулярных форм Архимеда. Кроме того, сохранился рисунок деревянной модели такой формы, выполненный Леонардо да Винчи, а Эйлер получил формулу, определяющую число многоугольников для различных поверхностей:

$$\sum_n N_n(6-n) = 12s, \quad (1)$$

где n — размерность многоугольников, N_n — число многоугольников размерности n , s — характеристика кривизны поверхности: $s = 1$ для сферы и $s = 0$ для плоскости. Из формулы (1) следует, что для образования сферической поверхности необходимо

12 пентагонов ($n = 5$) и сколь угодно много гексагонов ($n = 6$).

Следующий существенный шаг в направлении развития исследований фуллеренов был сделан в 1990 году, когда группе ученых под руководством В. Кретчера и Д.Р. Хоффмана удалось синтезировать твердый фуллерен в виде микрокристаллов [2]. Процесс синтеза кристаллического фуллерена оказался, как теперь представляется, очень простым. Сажа, получаемая при распылении углерода в электрической дуге между двумя угольными электродами, содержит определенное количество фуллерена. Вся проблема состояла в том, как отделить малые количества фуллерена от основной массы аморфного углерода, который получился при такой технологии. Кретчер и Хоффман использовали способность фуллерена в отличие от графита растворяться в органических растворителях, в частности в бензоле. Затем раствор фильтровали, чтобы отделить частички углерода, и нагревали. Подобно тому как после испарения молекул воды из соляного раствора на дне сосуда остаются кристаллики соли, так и после испарения бензола остаются кристаллики фуллерена. Существуют и другие способы выделения фуллерена из сажи, например нагревание сажи в вакууме. Энергия связи молекул фуллерена значительно меньше энергии связи атомов углерода в графите, поэтому уже при невысоких температурах (около 200°C) молекулы фуллерена вылетают из сажи и осаждаются на подложку, образуя микрокристаллическую пленку. Атомы же углерода при этом остаются в нагревателе.

Как выяснилось позже, существуют и природные фуллерены. В 1992 году их обнаружили в природном углеродном минерале — шунгите (свое название этот минерал получил от названия поселка Шуньга в Карелии). Правда, содержание фуллерена в шунгите незначительно, не превышает $10^{-3}\%$. Более того, в 1993 году в шунгитах были обнаружены и другие многоатомные молекулы и микрочастицы углерода — C_{70} , нанотрубы, матрешки, луковицы, о которых речь пойдет ниже.

Особый интерес вызвало в 1991 году сообщение группы ученых из Bell Laboratory (США) о том, что легированный калием фуллерен является сверхпроводником с температурой фазового перехода в сверхпроводящее состояние, равной приблизительно 18 К [3]. В дальнейшем было обнаружено, что фуллериды на основе других щелочных (кроме натрия) и щелочноземельных металлов также являются сверхпроводниками. При этом максимальная температура перехода оказалась равной 42 К, то есть некоторые металлофуллерены являются высокотемпературными сверхпроводниками. Работы, проводимые в развитие исследований по идентификации сверхпроводящей углеродсодержащей фазы, обнаруженной в шунгитах, привели в 1994 году к открытию еще более высокотемпературного

металлофуллерена C_{60} с температурой перехода выше температуры жидкого азота.

Другим интересным свойством легированных фуллеренов является ферромагнетизм, открытый также в 1991 году [4]. При этом был получен мягкий органический ферромагнетик C_{60} -ТДАЭ, где ТДАЭ – тетрадиметиламиноэтилен, с точкой Кюри $T_C = 16$ К. А в 1992 году был получен ферромагнетик с $T_C = 30$ К на основе фуллерена, легированного иодом и бромом.

Открытие уникальных углеродных структур и их свойств продолжается, так же как поиски путей применения фуллеренов в электронике, биологии, медицине и других прикладных областях деятельности человека. Но уже сейчас очевидно: фуллерен является мостиком между неорганическим веществом и органическим, между живой и неживой материей. И это является одной из причин широкомасштабных исследований свойств фуллеренов и фуллеридов, проводимых в научных лабораториях всего мира.

СТРУКТУРА ФУЛЛЕРЕНА C_{60}

В молекуле C_{60} атомы углерода связаны между собой ковалентной связью. Такая связь осуществляется обобществлением валентных (внешних) электронов атомов. Из рис. 1, б видно, что каждый атом углерода в молекуле C_{60} связан с тремя другими атомами, образуя при этом правильные пятиугольники (их 12) и неправильные шестиугольники (их 20). Длина связи С–С в пентагоне составляет $1,43 \text{ \AA}$ ($1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ см}$), такая же длина стороны гексагона, являющейся общей для обеих фигур, но сторона, общая для двух гексагонов, имеет длину около $1,39 \text{ \AA}$.

Фигура, изображенная на рис. 1, б, называется усеченным икосаэдром. Этот многогранник имеет высокую симметрию, наиболее близкую к сферической, поэтому молекулу C_{60} можно рассматривать как сферическую оболочку. Толщина этой оболочки составляет приблизительно 1 \AA , а ее радиус $3,6 \text{ \AA}$.

Как мы уже отмечали, при определенных условиях молекулы C_{60} упорядочиваются в пространстве, располагаясь в узлах кристаллической решетки, или, говорят, фуллерен образует кристалл. Для того чтобы молекулы C_{60} регулярным образом расположились в пространстве, они, как и атомы молекул, должны быть связаны между собой. Между молекулами фуллерена в кристалле существует слабая связь, называемая ван-дер-ваальсовой (по имени голландского ученого Ван-дер-Ваальса). Эта связь обусловлена тем, что в электрически нейтральной молекуле отрицательный заряд электронов и положительный заряд ядра разнесены в пространстве, в результате чего молекулы могут поляризовать друг друга, то есть приводить к смещению в пространстве центров положительного и отрицательного зарядов, что приводит к их взаимодействию.

При комнатной температуре (приблизительно 300 К) молекулы фуллерена образуют гранецентрированную кубическую (ГЦК) кристаллическую решетку с расстоянием между атомами $10,04 \text{ \AA}$ и постоянной решетки $a = b = c = 14,2 \text{ \AA}$. Поскольку силы взаимодействия между молекулами C_{60} в кристалле малы, а симметрия очень высока, то при температуре выше 260 К молекулы фуллерена вращаются и к ним вполне применима отмеченная выше модель шарового слоя. Именно так выглядят молекулы C_{60} при исследовании рассеяния рентгеновских лучей или нейтронов. Частота вращения, разумеется, зависит от температуры и при $T = 300$ К равна приблизительно 10^{12} с^{-1} . При понижении температуры ($T \leq 260$ К) вращение молекул фуллерена прекращается. При $T = 260$ К происходит изменение кристаллической структуры фуллерена (фазовый переход 1-го рода) с одновременным замораживанием вращательного движения молекул вследствие увеличения энергии межмолекулярного взаимодействия. Так называемая низкотемпературная фаза фуллерена имеет примитивную кубическую (ПК) решетку. Об увеличении взаимодействия между молекулами свидетельствует повышение частоты колебаний атомов в кристаллической решетке, подобно тому как увеличивается собственная частота колебаний грузика определенной массы на пружине при увеличении жесткости пружины.

Фуллериды щелочных металлов A_3C_{60} ($A = \text{K, Rb, Cs}$) также имеют гранецентрированную кубическую решетку, в то время как A_6C_{60} – объемно-центрированную кубическую решетку. В фуллеридах отсутствуют низкотемпературный фазовый переход и вращение молекул C_{60} при высоких температурах, поскольку связь молекул фуллерена с атомом металла практически чисто ионная, то есть щелочной металл отдает один валентный электрон молекуле C_{60} . Так что молекула становится отрицательно заряженной (C_{60}^-), а металлический ион приобретает положительный заряд (A^+), и между ними возникает электростатическое (кулоновское) взаимодействие. Подобный тип связи реализуется, например, в кристаллах NaCl. Ионная связь гораздо сильнее ван-дер-ваальсовой, поэтому возможные формы движения молекул фуллерена ограничены.

Элементарная ячейка ГЦК-решетки фуллерена (то есть наименьшая часть кристаллической решетки, повторением которой можно воспроизвести весь кристалл) содержит восемь тетраэдрических и четыре октаэдрические пустоты (межузлия). В первом случае центр межузлия окружен четырьмя молекулами C_{60} , находящимися в вершинах тетраэдра, во втором – шестью, находящимися в вершинах октаэдра. Октаэдрические пустоты, или межузлия, больше по объему тетраэдрических, поэтому атомы металла прежде всего занимают их. На элементарную ГЦК-ячейку приходятся четыре молекулы фуллерена. При этом необходимо учитывать, что молекулы в вершинах куба – их всего восемь –

только на $1/8$ принадлежат данной элементарной ячейке, а шесть атомов в центре граней куба – на $1/2$. В результате получаем $N = 8 \cdot 1/8 + 6 \cdot 1/2 = 4$. Следовательно, заполнение атомами только октаэдрических пустот должно приводить к фуллериду состава AC_{60} . Если же заполняются все пустоты, включая тетраэдрические, то состав должен соответствовать формуле A_3C_{60} . Эти простые соображения подтверждаются на опыте.

Последовательное заполнение межузлий в решетке фуллерена атомами металла показано на рис. 2. На рис. 2, а изображена элементарная ячейка (ГЦК) фуллерена C_{60} ; как уже указывалось, в ней имеются четыре межузлия октаэдрической симметрии и восемь – тетраэдрической. При подсчете числа межузлий следует пользоваться тем же методом, который изложен выше для подсчета числа атомов в элементарной ячейке, то есть одно октаэдрическое межузлие находится в центре куба и целиком принадлежит данной элементарной ячейке, в то время как другие, расположенные в центре ребер куба принадлежат данной ячейке только на $1/4$ и число таких межузлий, приходящихся на данную ячейку, оказывается $12 \cdot 1/4 = 3$, то есть всего $1 + 3 = 4$. Тетраэдрических межузлий, имеющих координаты $(1/4a, 1/4b, 1/4c)$; $(3/4a, 3/4b, 3/4c)$ и т.д., всего восемь, и они все находятся внутри ГЦК элементарной ячейки. Октаэдрические пустоты имеют больший объем, поэтому в первую очередь атом металла занимает именно эти межузлия, не оказывая существенного воздействия на параметры решетки фуллерена. Если все октаэдрические пустоты заполняются, то это будет соответствовать составу AC_{60} (рис. 2, а). Если бы была возможность заполнить только тетраэдрические пустоты, мы получили бы соединение A_2C_{60} (рис. 2, б), но трудно представить, что атомы металла будут заполнять только тесные тетрамежузлия, оставляя пустыми просторные октаэдрические. Наконец, если заполнить все межузлия атомами металла, то получим соединение A_3C_{60} (рис. 2, в). Дальнейшее увеличение атомов металла приводит к перестройке кристаллической структуры, при этом устойчивым соединением, как указывалось, является A_6C_{60} . Это не означает, что индекс n металла может принимать только значения, равные 1, 3, 6. Просто с этими значениями n получают упорядоченные кристаллические структуры или, говоря, стехиометрические составы металлофуллеренов. Может оказаться и так, что при полностью занятых октаэдрических межузлиях атомы металла (сверхстехиометрические) занимают часть тетраэдрических. В этом случае можно говорить о дефектных кристаллах AC_{60} или A_3C_{60} в зависимости от того, какая часть тетраэдрических межузлий (меньше или больше половины) занята атомами металла.

Таким образом, фуллерен и его производные – фуллериды имеют широко распространенные в мире неорганических минералов кристаллические решетки, что значительно облегчает анализ их

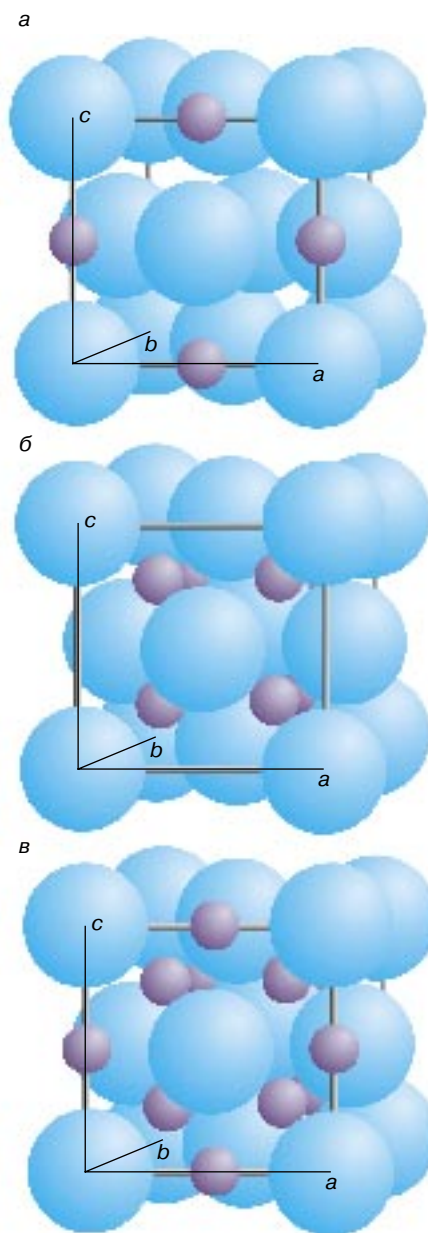


Рис. 2. Заполнение межузлий в решетке фуллерена C_{60} атомами металла: а – октаэдрических, б – тетраэдрических, в – октаэдрических и тетраэдрических

свойств по сравнению с другими органическими материалами.

Отметим, что существуют фуллерены C_{70} , C_{72} , C_{78} , C_{82} [5], теоретически предсказана возможность существования кристаллов, состоящих из молекул C_{168} , C_{192} , C_{216} [6] и с более высоким числом атомов углерода в молекуле.

ЭЛЕКТРОННАЯ СТРУКТУРА И СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ МЕТАЛЛОФУЛЛЕРЕНОВ

Чистый фуллерен при комнатной температуре является изолятором с величиной запрещенной зоны более 2 эВ или собственным полупроводником с очень низкой проводимостью. Известно, что в твердых телах электроны могут иметь энергию только в определенных интервалах ее значений — в зонах разрешенных энергий, которые образуются из атомных или молекулярных энергетических уровней. Зоны разрешенных значений энергий разделены зонами запрещенных значений энергий, которые электроны не могут иметь. Нижняя зона, как правило, заполняется электронами, участвующими в образовании химической связи между атомами или молекулами, и поэтому часто называется валентной зоной. Выше ее лежит запрещенная зона, затем следует пустая или не полностью заполненная зона разрешенных энергий, или зона проводимости. Она получила название от того, что в ней всегда существуют пустые электронные состояния, по которым электроны могут перемещаться (дрейфовать) в электрическом поле, осуществляя таким образом перенос заряда или, иначе говоря, обеспечивая протекание электрического тока (проводимость твердого тела).

Фуллериды щелочных металлов, имеющие состав A_3C_{60} , становятся сверхпроводящими при температуре ниже определенного значения T_C — температуры фазового сверхпроводящего перехода. При этом составе фуллерида зона проводимости заполнена электронами наполовину. Температура фазового перехода зависит от постоянной решетки фуллерида, как это показано на рис. 3, взятом из работы [5]. Максимальная температура T_C для фуллеридов щелочных металлов немного выше 30 К, но для

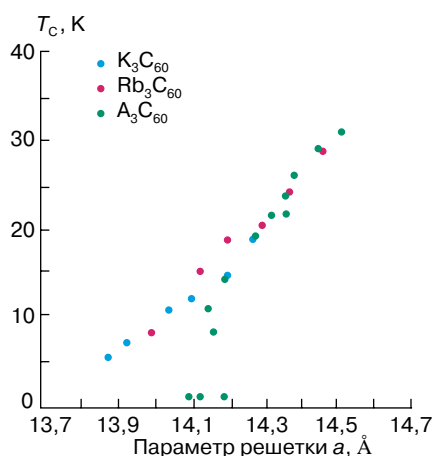


Рис. 3. Зависимость температуры сверхпроводящего фазового перехода фуллеридов A_3C_{60} от постоянной кристаллической решетки [5]

сложного состава $Rb-Tl-C_{60}$ она превышает 40 К, и есть основание предполагать, что пока неидентифицированный по составу фуллерид меди имеет значение T_C , равное 120 К. Таким образом, металлофуллерены являются высокотемпературными сверхпроводниками. В отличие от сложных оксидов меди это изотропные сверхпроводники, то есть параметры сверхпроводящего состояния оказываются одинаковыми по всем кристаллографическим направлениям, что является следствием высокой симметрии кубической кристаллической решетки фуллерена.

Следует признать, что проблема теоретического описания сверхпроводимости металлофуллеренов, как и традиционных высокотемпературных сверхпроводников на основе оксидов меди, в настоящее время далека от разрешения.

МАГНЕТИЗМ В ФУЛЛЕРИДАХ

Другим интересным свойством легированных фуллеренов является их ферромагнетизм. Впервые это явление было обнаружено при легировании фуллерена C_{60} тетрадиметиламиноэтиленом (ТДАЭ). Фуллерид C_{60} -ТДАЭ оказался мягким ферромагнетиком с температурой Кюри, равной 16 К [5]. Магнитная восприимчивость характеризует реакцию магнетика на воздействие внешнего магнитного поля и определяется известным соотношением

$$M = \chi H, \quad (2)$$

где M — намагниченность или магнитный момент единицы объема; χ — магнитная восприимчивость; H — напряженность внешнего магнитного поля.

Вследствие того что при охлаждении ферромагнетика вблизи температуры фазового перехода T_C происходит образование обменно-связанных групп атомов или молекул (кластеров) с большим магнитным моментом, восприимчивость резко увеличивается. Дальнейшее понижение температуры ($T < T_C$) приводит к уменьшению восприимчивости, поскольку при $T = T_C$ происходит полная магнитная поляризация образца и его намагниченность не так активно реагирует на внешнее магнитное поле.

В области парамагнетизма, то есть при температурах выше T_C , магнитная восприимчивость ферромагнетика зависит от температуры в соответствии с законом Кюри–Вейсса:

$$\chi = \frac{C}{T - T_C}, \quad (3)$$

где C — постоянная Кюри, равная $\mu^2 N / 3k$ (k — постоянная Больцмана). На рис. 4 приведена зависимость произведения χT от температуры для C_{60} -ТДАЭ. В соответствии с формулой (3) в парамагнитной области χT монотонно увеличивается с повышением температуры, однако надо помнить, что сама восприимчивость при этом уменьшается.

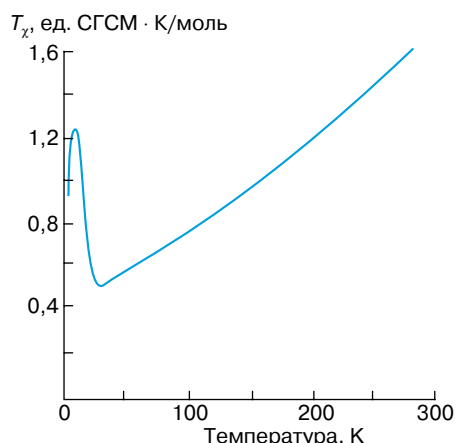


Рис. 4. Температурная зависимость магнитной восприимчивости фуллерида C_{60} -ТДАЭ [5]

Молекула ТДАЭ, как и щелочные металлы, является хорошим донором, то есть легко отдает один электрон. Однако низкосимметричная структура C_{60} -ТДАЭ, возможно, способствует дополнительному расщеплению зон фуллерида, что в совокупности с большими размерами и низкой симметрией молекулы ТДАЭ приводит к появлению электронных состояний молекулы C_{60} , в которых два электрона имеют одинаковые направления спинов, а следовательно, и магнитных моментов, так что суммарный спин некоторых молекул C_{60}^{2-} становится равным 1 (триплетное состояние). Однако это только предположение. Тем более что ферромагнетизм обнаружен и в другом фуллериде, имеющем высокосимметричную объемно-центрированную решетку. Этот фуллерид получается при легировании фуллерена C_{60} смесью брома и иода, которые смешиваются в одинаковых пропорциях (отношение I : Br = 1), а молекулярное отношение IBr к C_{60} составляет 2,5, что соответствует составу B_5C_{60} , где B – атом галогена. Кривые зависимости $M(T)$ свидетельствуют о том, что этот фуллерид не является чистым ферромагнетиком. Такие зависимости характерны для магнитонеупорядоченных систем. Это же подтверждается значением магнитного момента молекулы C_{60} , вычисленным по экспериментальным результатам. Оно оказалось уникально малым ($5,2 \cdot 10^{-3} \mu_B$, где μ_B – магнетон Бора, единица измерения магнитного момента в атомной физике); для сравнения укажем, что у C_{60} -ТДАЭ эта величина почти на два порядка больше. Одиночный электрон имеет магнитный момент, приблизительно равный $1 \mu_B$ ($\mu_B = e\hbar/2mc$, где e , m – заряд и масса электрона соответственно, c – скорость света, \hbar – постоянная Планка, деленная на 2π). Используя эту формулу, нетрудно получить значение магнетона Бора в общепринятых единицах измерения СИ или СГС, в частности в СГС $1 \mu_B \approx 10^{-20}$ эрг/Гс.

В заключение отметим, что проблема магнетизма фуллеридов также ждет своего решения.

УГЛЕРОДНЫЕ НАНОЧАСТИЦЫ И НАНОТРУБЫ

Вслед за открытием фуллеренов C_{60} и C_{70} при исследовании продуктов, получаемых при сгорании графита в электрической дуге или мощном лазерном луче, были обнаружены частицы, состоящие из атомов углерода, имеющие правильную форму и размеры от десятков до сотен нанометров и поэтому получившие название кроме фуллеренов еще и *наночастиц*.

Возникает вопрос, почему так долго не могли открыть фуллерены, получающиеся из такого распространенного материала, как графит? Существуют две основные причины: во-первых, ковалентная связь атомов углерода очень прочная: чтобы ее разорвать, необходимы температуры выше 4000°C ; во-вторых, для их обнаружения требуется очень сложная аппаратура – просвечивающие электронные микроскопы с высоким разрешением. Как теперь известно, наночастицы могут иметь самые причудливые формы. Авторы работы [7] представили различные углеродные образования в виде известных форм. Мы воспроизводим их зарисовки на рис. 5.

С практической точки зрения для нанoeлектроники, которая приходит сейчас на смену микроэлектронике, наибольший интерес представляют нанотрубы. Эти углеродные образования были открыты в 1991 году японским ученым С. Иджима. Нанотрубы представляют собой конечные графитовые плоскости, свернутые в виде цилиндра, они могут быть с открытыми концами или с закрытыми. Эти образования интересны и с чисто научной точки зрения, как модель одномерных структур. Действительно, в настоящее время обнаружены однослойные нанотрубы диаметром 9 \AA ($0,9 \text{ нм}$). На боковой поверхности атомы углерода, как и в графитовой плоскости, располагаются в узлах шестиугольников, но в чашках, которые закрывают цилиндры с торцов, могут существовать и пятиугольники и треугольники. Чаще всего нанотрубы формируются в виде коаксиальных цилиндров.

Основной трудностью при исследовании свойств нанотрубных образований является то, что в настоящее время их не удастся получить в макроскопических количествах так, чтобы аксиальные оси труб были сонаправлены.

Как уже отмечалось, нанотрубы малого диаметра служат прекрасной моделью для исследований особенностей одномерных структур. Можно ожидать, что нанотрубы, подобно графиту, хорошо проводят электрический ток и, возможно, являются сверхпроводниками. Исследования в этих направлениях – дело ближайшего будущего.

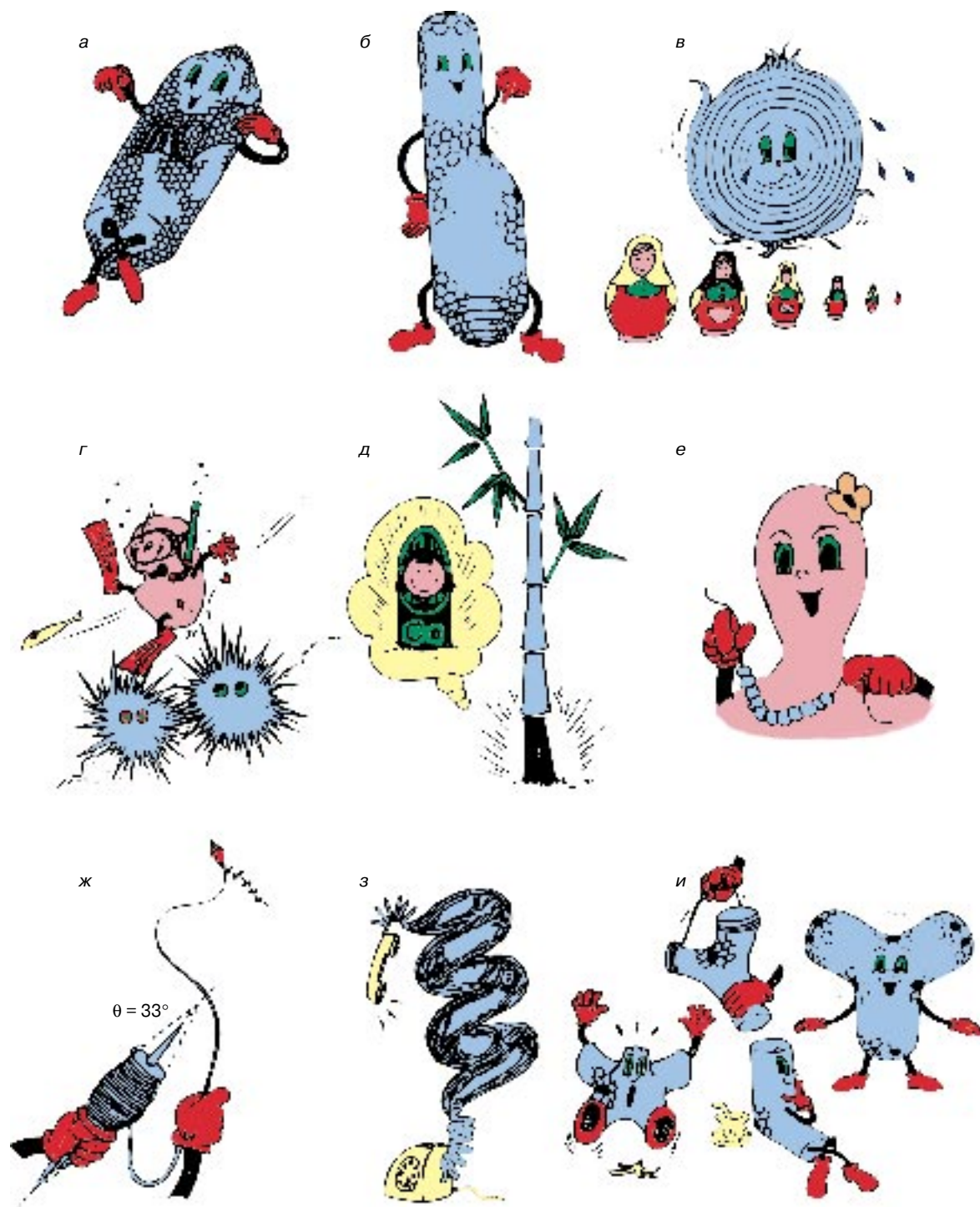


Рис. 5. Различные формы углеродных наночастиц: а – нанотруба с закрытыми концами, б – труба переменного диаметра, в – луковица, г – морской еж, д – бамбук, е – ожерелье, ж – веретено, з – спираль, и – колено и треножники [7]

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы рассмотрели далеко не все уникальные свойства фуллеренов, но я надеюсь, что даже этот небольшой экскурс в пограничную область между органической и неорганической природой, в область знаний, где тесно взаимодействуют химики, физики, биологи, специалисты по вычислительной физике и структурному анализу, позволил приоткрыть занавес над новым приоритетным направлением в науке — науке о фуллеренах.

Тот факт, что фуллерены обнаружены в естественных минералах, имеет большое значение для науки о Земле. Не исключено, что ряд неидентифицированных полос в спектрах оптического поглощения и рассеяния межзвездной пыли обусловлен фуллеренами. Еще в 60-х годах на основании теоретического анализа частот этих полос было высказано предположение о том, что они обусловлены углеродными частицами. Возможно, фуллерены помогут нам получить дополнительные сведения о возникновении и эволюции Вселенной.

Что касается практической деятельности человека, то здесь полезны способности фуллерена изменять свои свойства при легировании от диэлектрических до сверхпроводящих и от диамагнетизма до ферромагнетизма. Относительно простая технология получения фуллеридов с различными свойствами позволяет надеяться на создание в скором времени квантоворазмерных структур с чередующимися слоями сверхпроводник — полупроводник (или диэлектрик), металл — ферромагнетик, сверхпроводник — магнетик и т.д. Возможно, такие структуры станут основой создания новых электронных приборов. Активные исследования твердых фуллеренов ведутся только пять лет. Многие

еще не исследовано, и сейчас трудно предсказать все возможные применения этого необычного материала в практической деятельности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kroto H.W., Heath J.R., O'Brien S.C. et al. // Nature. 1985. Vol. 318. P. 162.
2. Kratschmer W., Lamb L.D., Fostiropoulos K., Hoffman D.R. // Ibid. 1990. Vol. 347. P. 354.
3. Hebard A.F., Rosseinsky M.J., Haddon R.C. et al. // Ibid. 1991. Vol. 350. P. 600.
4. Allemand P.M., Khemani K.C., Koch A. et al. // Science. 1991. Vol. 253. P. 301.
5. Rao C.N.R., Ram Seshadri // MRS Bull. 1994. Vol. 19, № 11. P. 28.
6. Козырев С.В., Поткин В.В. // ФТП. 1993. Т. 27, вып. 9. С. 1409.
7. Osawa E., Yoshida M., Fujita M. // MRS Bull. 1994. Vol. 19, № 11. P. 33.

* * *

Вадим Федорович Мастеров, доктор физико-математических наук, профессор, зав. кафедрой экспериментальной физики Санкт-Петербургского государственного технического университета. Член редколлегии журнала "Физика и техника полупроводников". Область научных интересов: физика полупроводников, легированных переходными и редкоземельными металлами, высокотемпературные сверхпроводники, исследование металлофуллеренов. Автор более 200 публикаций.