

# ФУЛЛЕРЕНЫ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
Минск, Республика Беларусь

Панцулая Ш. Н.

Позняк А. А. — канд. физ.-мат. наук, доцент

Доклад посвящён краткому обзору одной из аллотропных модификаций углерода — фуллеренам, являющимся одновременно и углеродными каркасными структурами. Рассмотрены свойства и применение фуллеренов и их производных в различных отраслях нанотехнологий.

**Фуллерены, бакиболы или букиболы** представляют собой полые внутри частицы, образованные многогранниками из атомов углерода, связанных ковалентной связью (рис. 1). Особое место среди фуллеренов занимает частица из 60 атомов углерода —  $C_{60}$ , напоминающая микроскопический футбольный мяч. Фуллерены, принадлежащие классу аллотропных форм углерода, составлены из чётного числа трёхкоординированных атомов углерода. Своим названием эти соединения обязаны инженеру и дизайнеру Ричарду Бакминстеру Фуллеру, чьи геодезические конструкции построены по этому принципу.

Фуллерены интересны своими свойствами. Во-первых, фуллерен — единственная растворимая форма углерода, растворима в целом ряде органических растворителей, что исключительно важно для осуществления химических превращений. Во-вторых, фуллерены могут присоединять большое количество различных веществ, как с расширением углеродной основы, так и с её сохранением. Они могут вступать в химические реакции, и образовывать самые различные новые, неизученные соединения, с новыми физическими, и химическими свойствами. В-третьих, фуллерены также могут образовывать различные полимеры.

Итак, уникальной особенностью молекулы фуллерена является ее способность образовывать беспрецедентное количество разнообразных производных в химических реакциях. Функционализация может протекать как с образованием экзодральных производных, т. е. с присоединением функциональных групп к углеродному каркасу извне, так и эндофуллеренов, с гетероатомом, размещенным внутри каркаса (рис. 2), а также гетерофуллеренов, в которых один из атомов углеродного каркаса замещен на гетероатом. Синтезированы и выделены эндофуллерены, обладающие сегнетоэлектрическими, парамагнитными, и диамагнитными свойствами.

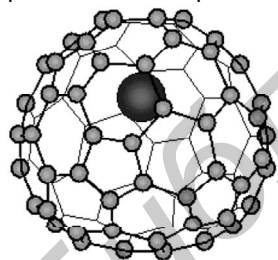


Рис. 2 – Пример структуры эндодрального комплекса фуллерена

Есть легированные фуллерены, обладающие свойствами очень хорошего электрического изолятора, есть фуллерены — замечательные проводники тока. Такие соединения пока мало изучены, но именно они открывают путь к новой электронике, к компьютерам, в тысячи раз превосходящим современные. Путем ионного напыления одного вида легированного фуллерена можно получить проводник, путем напыления другого вида легированного фуллерена — изолятор и резистор. Так можно получить простейшую электрическую схему, размер которой исчисляется отдельными молекулами. Это позволит создать в будущем настоящую фуллереновую электронику.

**Синтез фуллеренов.** Первые фуллерены выделяли из конденсированных паров графита, получаемых при лазерном облучении твёрдых графитовых образцов. Фактически, это были следы вещества. На первых порах все попытки экспериментаторов найти более дешёвые и производительные способы получения граммовых количеств фуллеренов (сжигание углеводородов в пламени, химический синтез и др.) к успеху не привели и метод «дуги» долгое время оставался наиболее продуктивным (производительность около 1 г/час). Впоследствии фирме *Mitsubishi* удалось наладить промышленное производство фуллеренов методом сжигания углеводородов, но такие фуллерены содержат кислород и поэтому дуговой метод по-прежнему остаётся единственным наиболее подходящим методом получения чистых фуллеренов.

**Фуллерен в качестве материала для полупроводниковой техники.** Молекулярный кристалл фуллерена является полупроводником с шириной запрещённой зоны ~1.5 эВ и его свойства во многом аналогичны свойствам других полупроводников. Поэтому ряд исследований был связан с вопросами использования фуллеренов в качестве нового материала для традиционных приложений в электронике: диод, транзистор, фотоэлемент и т. п. Здесь их преимуществом по сравнению с традиционным кремнием является малое время фотототклика (единицы нс). Однако существенным недостатком оказалось влияние кислорода на проводимость плёнок фуллеренов и, следовательно, возникла необходимость в защитных покрытиях. В этом смысле более

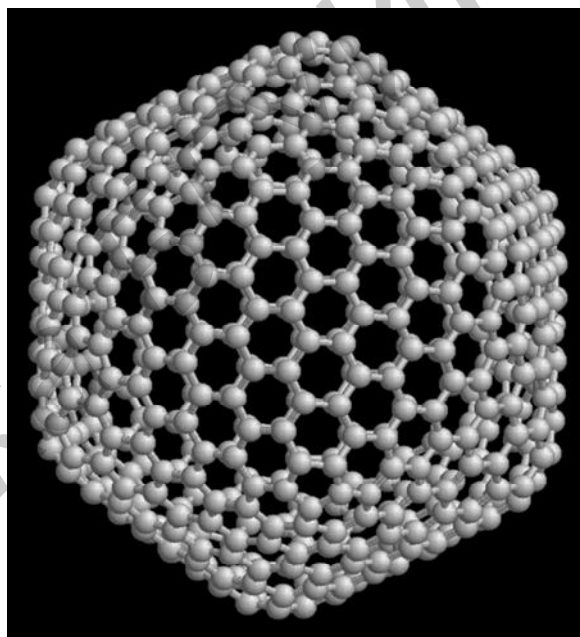


Рис. 1 – Трёхмерная модель молекулы фуллерена  $C_{60}$

перспективно использовать молекулу фуллерена в качестве самостоятельного наноразмерного устройства и, в частности, усилительного элемента.

**Фуллерен как фоторезист.** Под действием видимого (энергия фотонов более 2 эВ), ультрафиолетового и более коротковолнового излучения фуллерены полимеризуются и в таком виде не растворяются органическими растворителями. В качестве иллюстрации применения фуллеренового фоторезиста можно привести пример получения субмикронного разрешения (порядка 20 нм) при травлении кремния электронным пучком с использованием маски из полимеризованной пленки  $C_{60}$ .

**Сверхпроводящие соединения с  $C_{60}$ .** Молекулярные кристаллы фуллеренов — полупроводники, однако в начале 1991 г. было установлено, что легирование твердого  $C_{60}$  небольшим количеством щелочного металла приводит к образованию материала с металлической проводимостью, который при низких температурах переходит в сверхпроводник. Легирование  $C_{60}$  производят путём обработки кристаллов парами металла при температурах в несколько сотен градусов Цельсия. При этом образуется структура типа  $X_3C_{60}$  (X — атом щелочного металла). Переход соединения  $K_3C_{60}$  в сверхпроводящее состояние происходит при температуре 19 К. Вскоре установили, что сверхпроводимостью обладают многие фуллериты, легированные атомами щелочных металлов в соотношении либо  $X_3C_{60}$ , либо  $XY_2C_{60}$  (X, Y — атомы щелочных металлов). Рекордсменом среди высокотемпературных сверхпроводников указанного типа оказался  $RbCs_2C_{60}$  — его  $T_{кр} = 33$  К.

Помимо указанных приложений, фуллерены находят широкое применение и в других отраслях технологической науки: в создании новых смазок и антифрикционных покрытий, новых типов топлива, алмазоподобных соединений сверхвысокой твёрдости, датчиков и красок.

## ГЕНЕЗИС КОНЦЕПЦИИ «СЕРОЙ СЛИЗИ»

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
Минск, Республика Беларусь

Савич В. А.

Позняк А. А. — канд. физ.-мат. наук, доцент

Концепция «серой слизи» рассматривает гипотетический сценарий конца света как результат неконтролируемого размножения самореплицирующихся наноассемблеров (нанорепликаторов), сопровождаемого поглощением и переработкой в наномассу («серую слизь») всего доступного вещества на планете, в галактике, во Вселенной. Данная проблема представляет собой потенциальную опасность развития нанотехнологий и подлежит детальному рассмотрению.

Страх перед невидимой, всепроникающей и потому всеисильной опасностью возник, вероятно, с появлением человечества. Древнегреческие и древнеримские мыслители (Гиппократ, Варрон), высказавшие предположение о существовании мелких невидимых животных, вызывающих заразные болезни, положили начало эвристическому этапу развития микробиологии. Итальянский врач Д. Фракасторо, живший в XV в. н.э., сформулировал стройную гипотезу о живом контакти (*contagium vivum*). Эмпирическое подтверждение существования невидимых человеческого глазу микроорганизмов осуществил изобретатель микроскопа А. Левенгук в XVII в. В XVIII-XIX вв. было открыто великое множество возбудителей различных заболеваний. В 60-х годах XIX в. микробиолог Л. Пастер опроверг гипотезу о самозарождении микроорганизмов. В 1892 г. ботаник Д. И. Ивановский открыл вирусы.

Одним из первых идею реплицирующегося механизма, создающего свои уменьшенные копии и способного манипулировать с веществом на микроуровне, выдвинул писатель Б. Житков в фантастическом очерке «Микроруки» в 1931 г. [1].

Концепция самовоспроизводящихся из доступного материала машин, универсальных сборщиков, функционирующих по определенной программе и не нуждающихся в непосредственном контроле, была сформулирована в первой половине XX в. математиком Дж. фон Нейманом.

Идея машин фон Неймана была позднее развита до уровня самовоспроизводящихся космических кораблей, зондов фон Неймана. Крайне эффективным предполагается применение подобных механизмов в исследовании космоса. Существует также гипотеза о самовоспроизводящихся кораблях-сеятелях, способных к терраформированию и колонизации необитаемых миров. Ф. Саберхагеном в 1967 г. в цикле рассказов «Берсеркер» выдвинута гипотеза о боевых кораблях-репликаторах, запрограммированных на обнаружение и уничтожение жизненных форм в пределах галактик [2].

В 1959 г. в своей знаменитой лекции «*There's Plenty of Room at the Bottom*» физик Р. Фейнман высказал идею манипулирования отдельными атомами вещества механизмами-репликаторами, во многом близкую задумке Б. Житкова. Фейнман обратил внимание на сложности реализации подобного на практике в результате постепенного нивелирования определенных физических эффектов и возрастания роли иных при переходе в микро- и наномир. Он указал также и на такие преимущества данного подхода, как крайне высокая энергетическая эффективность, экономичность и универсальность [3].

В повести «Непобедимый», написанной в 1964 г., С. Лем обрисовал концепцию «умной пыли» — сети из малых беспроводных МЭМС или НЭМС, способных взаимодействовать между собой, получать данные о состоянии внешней среды и определенным образом реагировать на внешние раздражители. Лем описал феномен «мертвой эволюции» и пришел к выводу, что существование подобных неживых механизмов, подчиняющееся своим законам, ничем не хуже и не лучше существования живых белковых соединений [4].