

В этом выпуске:

СВЕРХПРОВОДНИКИ

О сверхпроводимости сероводорода

Открытие сверхпроводимости сероводорода, имеющего $T_c = 203$ К под давлением $P = 155$ ГПа [1], зародило надежду, что эра комнатнотемпературной сверхпроводимости (пусть пока в экстремальных условиях) настанет еще при нашей жизни. Устойчивая при атмосферном давлении фаза H_2S с ростом P становится метастабильной, и формируется тригидрид серы H_3S , ответственный за сверхпроводимость. Расчеты показывают, что при 112 ГПа $< P < 175$ ГПа это соединение имеет гексагональную решетку с симметрией $R3m$, а при $P > 175$ ГПа его структура является кубической с симметрией $Im\bar{3}m$ (рис. 1). В фазе $R3m$ каждый атом водорода образует с ближайшими к нему атомами серы как ковалентные, так и более слабые водородные связи, длины которых различаются. При переходе в фазу $Im\bar{3}m$ происходит “симметризация” этих связей, их длины сравниваются, и атомы водорода оказываются расположенными строго посередине между атомами серы. На первый взгляд, наибольший интерес для сверхпроводимости представляет фаза $R3m$, поскольку именно она находится в минимуме поверхности энергии Борна-Оппенгеймера при $P = 155$ ГПа, когда T_c максимальна, а фаза $Im\bar{3}m$ при таком давлении является, согласно расчетам из первых принципов, метастабильной (рентгеноструктурный анализ не различает эти фазы).

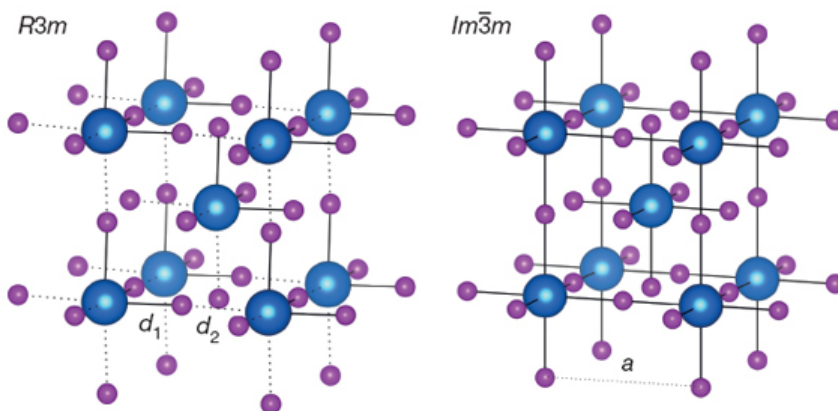


Рис. 1. Кристаллические структуры фаз $R3m$ и $Im\bar{3}m$ тригидрида серы. Синие и розовые шарики – атомы серы и водорода, соответственно. Сплошные линии – ковалентные связи H-S длиной d_1 , пунктирные линии – водородные связи H-S длиной $d_2 > d_1$.

Однако следует иметь в виду, что приведенные выше теоретические сведения о структуре H_3S получены без учета квантовых эффектов. А они могут быть весьма существенными в силу малой массы атомов водорода. И действительно, принимая во внимание энергию нулевых колебаний и ангармонизм, авторы работы [2] (Испания, Франция, Великобритания, Китай, США, Италия)

И далее ...

- 2 Сверхпроводимость атомарно тонких кристаллов MoS_2

ГРАФЕН

- 3 Магнетизм гидрированного графена

НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ

- 3 Уроки природы. Фрактальная геометрия серебристых рыб

КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

- 5 Одноатомная магнитная память

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

- 5 Достойная замена бакиболу

КОНФЕРЕНЦИИ

- 6 American Graphene Forum, 4 - 9 December 2016, Royal Caribbean Cruise, Miami, USA
- 7 The International Conference Modern Development of Magnetic Resonance 2016, 31 October – 4 November 2016, Kazan, Russian Federation
- 7 По ком звонит колокол...

показали, что переход $R3m \rightarrow Im\bar{3}m$ происходит при давлении на 72 ГПа ниже, чем считалось ранее, то есть при $P = 155$ ГПа тригидрид серы находится в фазе $Im\bar{3}m$. Выполненные для этой фазы расчеты говорят о том, что ангармонизм приводит к сильной перенормировке фоновых спектров и усилению электрон-фононного взаимодействия. Критические температуры H_3S и D_3S , найденные путем численного решения изотропных уравнений Мигдала-Элиашберга, прекрасно согласуются с экспериментом (рис. 2).

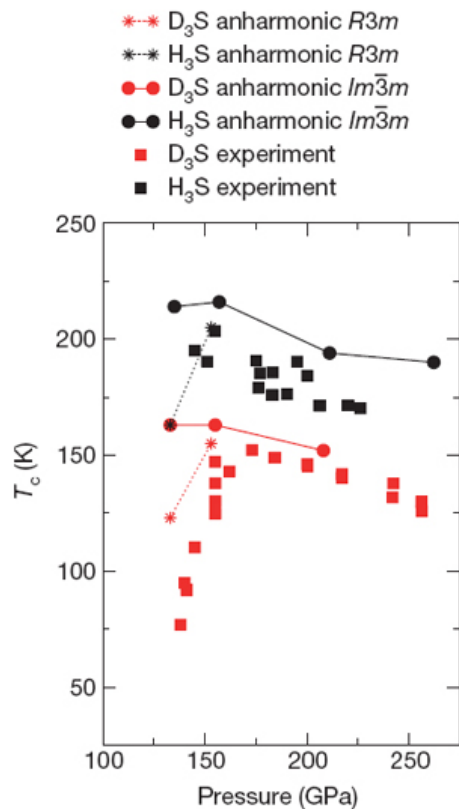


Рис. 2. Теоретические и экспериментальные зависимости критических температур H_3S и D_3S от давления.

Показатель степени α изотопического эффекта при замещении $H \rightarrow D$ оказывается равным примерно 0.4. Итак, механизм сверхпроводимости H_3S – однозначно фононный, в чем, собственно, мало кто сомневался.

Л.Опенев

1. A.P.Drozdo et al., *Nature* **525**, 73 (2015).
2. I.Errea et al., *Nature* **532**, 81 (2016).

Сверхпроводимость атомарно тонких кристаллов MoS_2

Уменьшение толщины сверхпроводящей пленки ведет к усилению квантовых и тепловых флуктуаций, нарушающих дальний сверхпроводящий порядок. В предельном случае одного монослоя сверхпроводимость оказывается либо полностью подавленной, либо возникает при гораздо более низкой, чем в объемном образце, критической температуре T_c . Эволюция T_c при уменьшении числа атомных

слоев MoS_2 от шести до одного изучена в работе [1]. Пленки MoS_2 получали путем механического отщепления от кристалла, а сверхпроводимость в них индуцировали путем накопления свободных носителей тока до концентрации $\sim 10^{14} \text{ см}^{-2}$ в конфигурации полевого транзистора, у которого функцию одного из электродов выполняла ионная жидкость (рис. 1). Хотя по мере уменьшения числа слоев величина T_c быстро падает, но все-таки не обращается в нуль, составляя около 2 К в монослое (рис. 2).

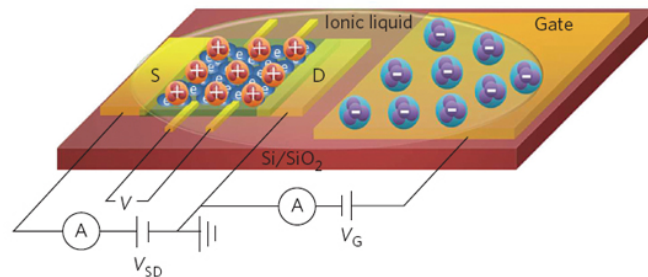


Рис. 1. Накопление электронов в MoS_2 .

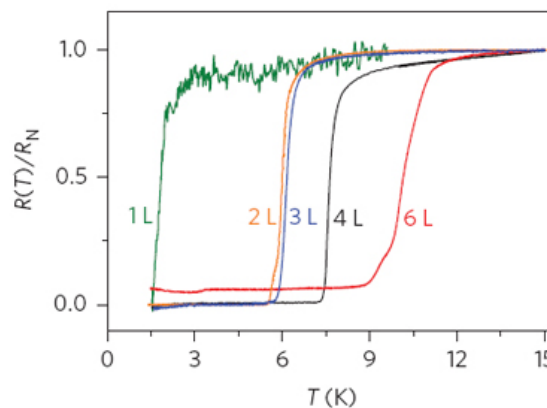


Рис. 2. Резистивные переходы пленок MoS_2 толщиной 1, 2, 3, 4 и 6 атомных слоев.

Наиболее сильное уменьшение T_c имеет место при переходе от двухслойной пленки к однослойной. Почему? Дело в том, что при использованном авторами способе допирования MoS_2 электроны скапливаются в поверхностном слое толщиной около 1 нм. Это относится как к объемным образцам, так и к пленкам, но только в том случае, когда толщина последних превышает 1 нм (например, толщина бислоев MoS_2 составляет 1.5 нм). А вот в монослое MoS_2 для всех желающих мигрировать в него электронов просто нет места. Следовательно, его сверхпроводимость – не поверхностная, и описывать ее надо как-то по-другому.

Высокая химическая устойчивость моно- и бислоев MoS_2 существенно облегчает их использование для конструирования различных вандерваальсовских гетероструктур в комбинации с другими материалами.

Л.Опенев

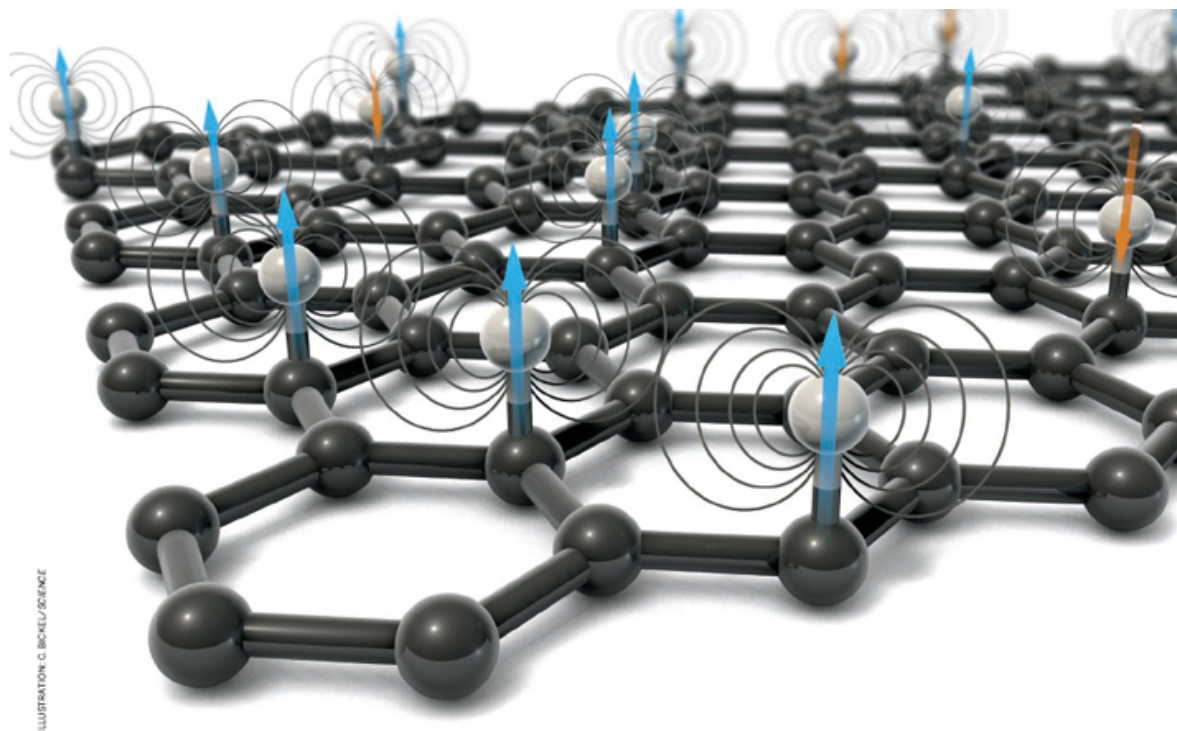
1. D.Costanzo et al., *Nature Nanotech.* **11**, 339 (2016).

ГРАФЕН

Магнетизм гидрированного графена

Теория предсказывает, что адсорбированные на графене атомы водорода индуцируют локальные магнитные моменты. В работе [1] (Испания, Франция, Египет) это подтверждено экспериментально. Используя СТМ, авторы [1] установили, что размеры области модуляции спиновой текстуры такими моментами составляют несколько нанометров.

В результате даже сравнительно далеко отстоящие друг от друга моменты взаимодействуют между собой – либо ферромагнитно, либо антиферромагнитно (см. рис.) – в соответствии с расчетами в рамках теории функционала плотности. Ждет проверки и еще одно предсказание – ферромагнетизм графена выше комнатной температуры.



Магнитные моменты, формирующиеся при адсорбции на графен атомарного водорода, сонаправлены (синий цвет), если находятся на одной подрешетке и противоположно направлены (оранжевый цвет) – если на разных.

По материалам заметки
“Painting magnetism on a canvas of graphene”,
S.M.Hollen and J.A.Gupta, *Science* 352, 415 (2016).

I. H.González-Herrero et al., *Science* 352, 437 (2016).

НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ

Уроки природы. Фрактальная геометрия серебристых рыб

Биофотонные наноструктуры, состоящие из элементов с разными показателями преломления, отвечают за “структурную” (в отличие от пигментной) окраску наружного покрова многих живых организмов.



ПерсТ уже рассказывал о том, что синий цвет у птиц возникает благодаря наличию в перьях губчатой 3D структуры из белка кератина и воздуха, а

разноцветные жуки и синие пауки-птицееды “окрашены” с помощью поликристаллических, квазиупорядоченных и аморфных наноструктур из хитина, белков и воздуха [1]. У хамелеона в верхнем слое кожи имеются нанокристаллы азотистого основания гуанина, окруженные цитоплазмой. При изменении геометрии фотонного кристалла (расстояний между нанокристаллами гуанина) резко меняется цвет хамелеона [2]. Серебристый металлический блеск сельди, сардинам и многим другим рыбам придают находящиеся в коже и чешуе параллельные слои нанокристаллов гуанина, разделенные цитоплазмой. По данным ТЕМ кристаллы представляют собой тонкие пластинки толщиной в диапазоне 6-100 нм (для разных рыб), длиной 10 мкм и шириной 3 мкм. Показатель преломления для пластинок гуанина (1.83) гораздо больше, чем для цитоплазмы (1.33). Такая структура работает как одномерный биофотонный кристалл. Свет отражается в очень широком диапазоне длин волн (от видимого до УФ), обеспечивая рыбам маскировку и средство коммуникации с сородичами.

Исследования зеркальной системы серебристых рыб ученые ведут уже много десятилетий. Сначала

идентифицировали гуанин, а после появления электронной микроскопии предложили разные варианты объяснения высокой отражательной способности. Наиболее популярной в последнее время стала модель “хаотического” отражателя, сверхрешетки, состоящей из чередующихся слоев гуанина и цитоплазмы со случайным распределением толщин [3]. Однако, исследователи из Penn State Univ. (США) считают, что в основе природной “хаотичности” должен быть порядок [4]. Они не только объяснили серебристость рыб с помощью фрактальной геометрии (“геометрии Природы”), но и теоретически воспроизвели такие отражатели в полупроводниковых материалах. Для представления сверхрешетки авторы [4] использовали один из старейших фракталов – множество Кантора (описанное Георгом

Кантором ещё в 1883 г.). На рис. 1а показан классический (детерминистический) вариант построения множества. На первом этапе из отрезка линии удаляется средняя треть, на следующих этапах средняя треть часть удаляется из каждого оставшегося отрезка. Полученная картина слишком упорядочена, но если в итерационный процесс вводить случайные изменения, то возникают объекты, более похожие на природные. На рис. 1б показан вариант с использованием трех генераторов (вариантов “замены” исходного отрезка), при этом каждый отрезок на всех этапах заменяется на один из генераторов случайным образом. Используя 5 этапов итерации и 5 генераторов, авторы успешно аппроксимировали отражающие слои в коже серебристой ремень-рыбы (рис. 2).

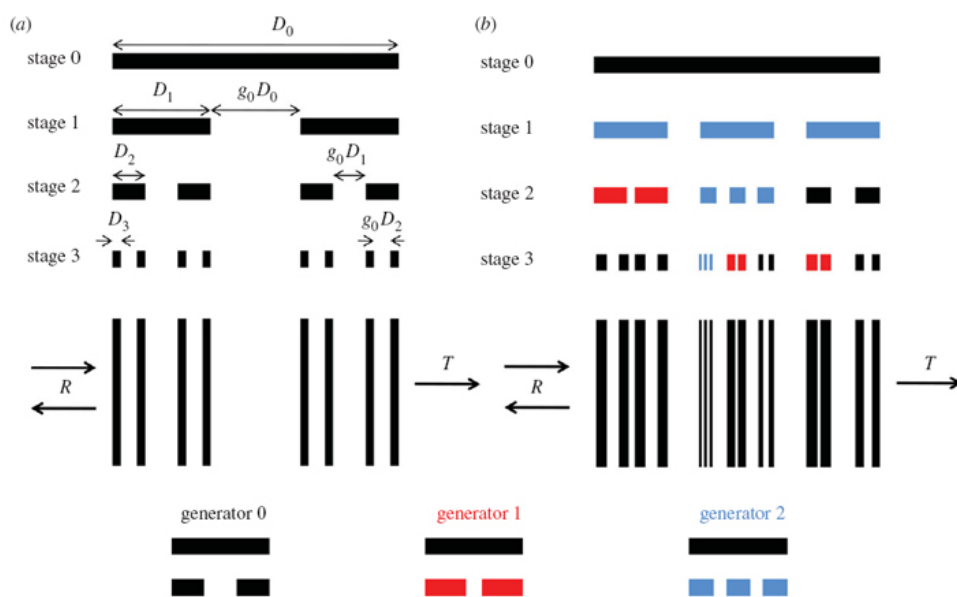


Рис. 1. Фракталы Кантора и соответствующие сверхрешетки *a* - детерминистический вариант, *b* - стохастический вариант с использованием 3 генераторов (каждый отрезок на всех этапах заменяется на один из генераторов случайным образом).

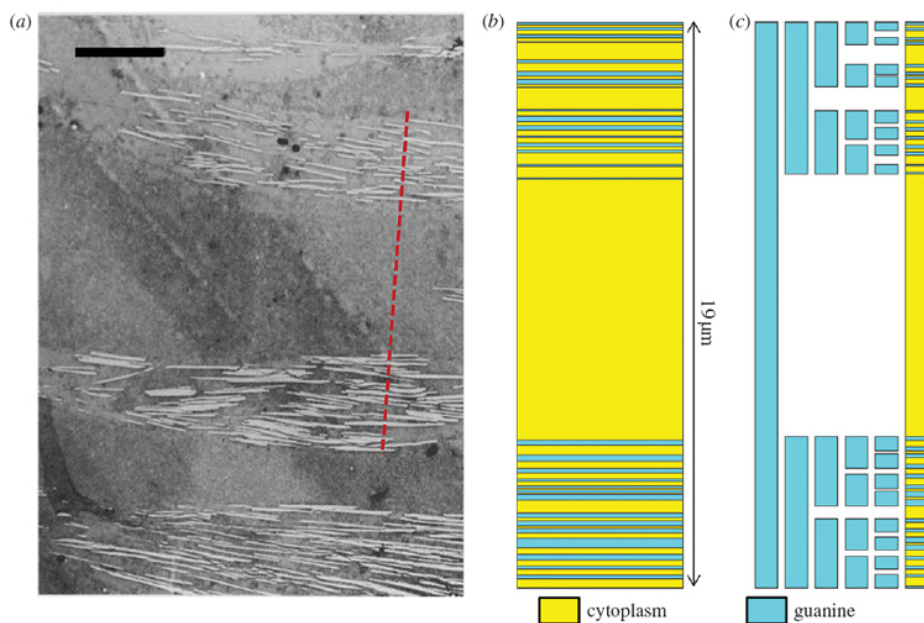


Рис. 2. *a* - ТЕМ изображение сечения кожи ремень-рыбы (“сельдяного короля”). Шкала 5 мкм. *b* - Сверхрешетка из слоев цитоплазмы и гуанина, соответствующая участку в 19 мкм, показанному красной штриховой линией. *c* - Аппроксимация сверхрешетки с помощью фрактала Кантора (5 этапов итерации и 5 генераторов).

Однако целью авторов было не только объяснить, как и почему рыбы сверкают серебром, но и сконструировать сверхрешетки с заданными оптиче-

скими свойствами. Для этого к фракталу Кантора они добавили генетический алгоритм поиска оптимального решения, моделирующий естественный

эволюционный процесс. Алгоритм включает скрещивание, селекцию лучших решений и формирование нового поколения с нужными свойствами. В качестве материалов, подходящих для практического применения, исследователи выбрали α -Si и SiO₂ и теоретически продемонстрировали возможность создания из них как широкополосных отражателей, так и фильтров с нужными полосами пропускания и затухания в ИК диапазоне. Один из примеров приведен на рис. 3.

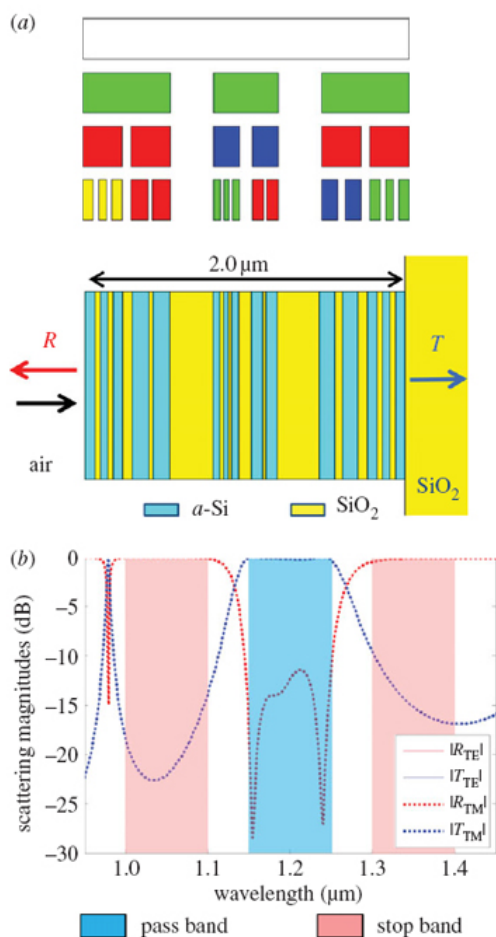


Рис. 3. Дизайн фильтра с одной полосой пропускания, окруженной двумя полосами затухания в ближнем ИК диапазоне.

a - Рост стохастического (случайного) фрактала и соответствующая сверхрешетка. Использовано 4 генератора. *b* - Моделирование рассеяния при нормальном падении на полученную структуру.

Авторы [4] считают, что их методика может быть использована для разработки отражателей и фильтров различных оптических и фотоэлектрических устройств.

О. Алексеева

1. [ПерстТ 23, вып. 3/4, с. 5 \(2016\).](#)
2. [ПерстТ 22, вып. 19, с. 2 \(2015\).](#)
3. *D.R.McKenzie et al., Proc. R. Soc. Lond. A 451, 579 (1995).*
4. *J.A.Bossard et al., J. R. Soc. Interface 13: 20150975 (2016).*

КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

Одноатомная магнитная память

Постоянные магниты потому и называются постоянными, что обладают намагниченностью даже в отсутствие внешнего магнитного поля. А способны ли на такой подвиг отдельные магнитные атомы? На практике это крайне сложно реализовать из-за неизбежного взаимодействия локального магнитного момента с флуктуациями окружающей среды. Тем не менее группа авторов из Швейцарии, Сербии, Катара и Франции [1] экспериментально продемонстрировала остаточную намагниченность отдельных атомов гольмия, осажденных на ультратонкие диэлектрические слои Mg(100), которые защищали атомные магнитные моменты от электронов и фононов подложки Ag(100). Эффект наблюдается при температурах вплоть до 30 К. При $T = 10$ К время релаксации “одноатомной намагниченности” составляет несколько минут. Результаты могут пригодиться для дальнейшей миниатюризации устройств магнитной памяти.

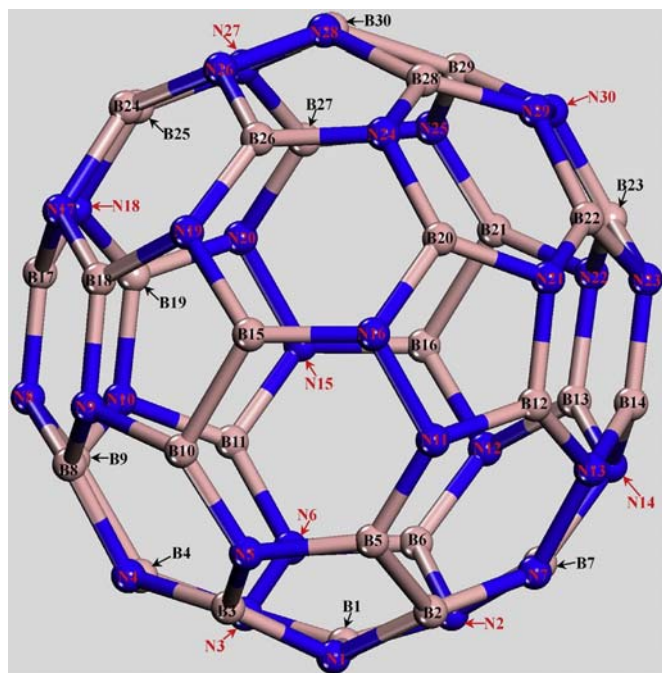
I. F. Donati et al., Science 352, 118 (2016).

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

Достойная замена бакиболу

Все чаще исследователи обращаются к различным молекулярным аналогам углеродных систем с целью получения новых функциональных характеристик. Например, хорошо известно, что нитриды бора обладают феноменальным сходством с соответствующими углеродными наноструктурами, начиная от квазиодномерных (нанотрубки) и квазидвумерных (нанослои, “графен”) и заканчивая целыми кристаллическими фрагментами типа алмаза. Встречаются и нитрид-борные фуллерены. Так, в теоретической работе [1] авторы, взяв за основу самый популярный фуллерен – бакибол C₆₀, построили его VN-аналог посредством замещения атомов углерода на атомы бора и азота. К слову, такую подстановку можно сделать различными способами, и авторы, конечно, предусмотрели несколько возможностей построения, выбрав для последующих исследований из всего семейства термодинамически наиболее устойчивый изомер, содержащий по шесть N–N и B–B связей (см. рис.). Вопрос о термодинамической устойчивости решался посредством определения полной энергии молекулы и вычисления частотного спектра. Все расчеты исследователи выполняли в рамках теории функционала плотности с помощью программного пакета VASP. Дальнейший анализ электронных характеристик B₃₀N₃₀ показал, что они значительно отличаются от таковых для углеродных систем. Это, по мнению авторов, сильно повлияет на химические свойства нитрид-борных фуллеренов. Так, благодаря анизотропному распределению зарядовой плотности, они должны обладать повышенной

химической активностью, что позволит использовать их в катализе, а также в качестве молекулярных сенсоров и переключателей.



Нитрид-борный “фуллерен” $B_{30}N_{30}$

Авторы нацелены на практическое применение уже сейчас и предлагают пару простых реакций экспериментального получения $B_{30}N_{30}$, где в качестве прекурсоров используются боразол ($B_3N_3H_6$) и его химический аналог $B_5N_5H_8$. Однако, несмотря на высказанный оптимизм, поверить в столь легкий синтез затруднительно, поскольку даже для традиционных фуллеренов у экспертов пока не сложилось единого мнения насчет механизмов их формирования. С другой стороны, техника эксперимента не стоит на месте, будем следить за новостями.

М. Маслов

I. D. Yin et al., Carbon 102, 273 (2016).

КОНФЕРЕНЦИИ

***American Graphene Forum,
4 - 9 December 2016, Royal Caribbean Cruise,
Miami, USA***

American Graphene Forum (AGF) is a six-day international event organized by the International Association of Advanced Materials (IAAM) with the collaboration of VBRI Press AB and Scrivener Publishing LLC, USA cruising from Miami (USA) - Nassau (Bahamas) - Cozumel (Mexico) - Miami (USA) on the Royal Caribbean Cruise Ship "Navigator of the Seas". The aim of the event is to cover the latest technology developments, applications, commercialization progress, end user requirements and challenges of Graphene and related 2D Materials.

Topics of Forum

- Fundamentals of graphene and 2D materials
- Growth, synthesis and integration methods
- Composites – characterization and properties
- Large scale production and characterization
- Applications in the Electronics/flexible electronics
- Energy: photovoltaics, energy storage, fuel cells & hydrogen storage
- Photonics, spintronics and optoelectronics
- Biomedical, sensors and environmental research
- New technologies, commercialization and market

Important Dates

- Abstract submission deadline :
30 May 2016
- Confirmation of abstract acceptance:
10 June 2016
- Registration starts:
15 April 2016
- Early-Bird Registration closed:
30 June 2016
- Registration closed:
30 August 2016

Parallel Symposiums

- [American Advanced Materials Congress](#)
- [Smart Energy Technologies](#)
- [Biosensors and Bioelectronics](#)

Web: <http://vbripress.com/aamc/agf/>

***The International Conference Modern
Development of Magnetic Resonance 2016,
31 October – 4 November 2016, Kazan, Russian
Federation***

The Scope of the Conference

- Perspectives of magnetic resonance in science and spin technology
- Theory of magnetic resonance
- Low-dimensional systems and nanosystems
- Electron spin based methods for electronic and spatial structure determination in physics, chemistry and biology
- Molecular magnets and liquid crystals
- Spin-based information processing
- Strongly correlated electron systems
- Chemical and biological systems
- Medical physics
- Magnetic resonance imaging
- Other applications of magnetic resonance
- Modern methods of magnetic resonance
- Magnetic resonance instrumentation
- Related phenomena

Important Dates

Registration and submission of abstracts

September 1, 2016

Notification of the report acceptance

September 15, 2016

Online Registration & Abstract Submission is to be open at www.kfti.knc.ru/mdmr/2016

E-mail: mdmr@kfti.knc.ru

Web: <http://www.kfti.knc.ru/mdmr/2016>

По ком звонит колокол...

27 апреля 2016 года ушла из жизни выдающийся физик-экспериментатор в области микроволновой спектроскопии конденсированных сред, член-корреспондент Российской академии наук Людмила Андреевна Прозорова.



Работы Людмилы Андреевны внесли весомый вклад в развитие современных представлений о сверхпроводимости и магнитоупорядоченных структурах.

Вся жизнь Людмилы Андреевны была связана с Институтом физических проблем им. П.Л. Капицы: здесь она училась в аспирантуре, здесь она состоялась как ученый.

На протяжении всей работы в институте Людмилу Андреевну окружали ученики и молодые сотрудники, которым она передавала свой опыт. Научная школа Людмилы Андреевны известна во многих городах России и за рубежом, где существуют низкотемпературные и магнитные лаборатории.

Много лет Людмила Андреевна вела педагогическую работу на кафедре физики низких температур Московского физико-технического института и большую научно-организационную работу на посту председателя секции “Магнетизм” Научного совета РАН по проблеме “Физика конденсированных сред”.

Людмила Андреевна была не только замечательным ученым, но и прекрасным человеком с необыкновенным личным обаянием, душевной теплотой и очарованием.

Светлая память о Людмиле Андреевне навсегда останется в сердцах ее друзей, коллег и учеников.

Экспресс-бюллетень ПерсТ издается совместной информационной группой
ИФТТ РАН и НИЦ «Курчатовский институт»

Главный редактор: И. Чугуева, e-mail: ichugueva@yandex.ru

Научные редакторы К.Кугель, Ю.Метлин

В подготовке выпуска принимали участие: О. Алексеева, М. Маслов, Л. Опенов,

Выпускающий редактор: И.Фурлетова

Адрес редакции: 119296 Москва, Ленинский проспект, 64^а