

В этом выпуске:

СВЕРХПРОВОДНИКИ

Сверхпроводимость BaFe_2S_3 под давлением

Кристаллическая структура моттовского диэлектрика BaFe_2S_3 имеет квазиодномерный характер и включает в себя “лестницы” из атомов Fe (рис. 1). В этих лестницах атомные спины упорядочены ферромагнитно в одном направлении и антиферромагнитно в другом (рис. 2).

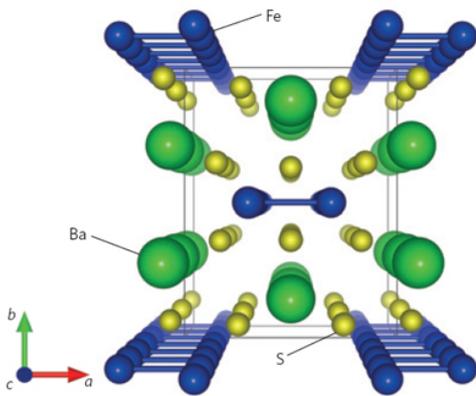


Рис. 1. Структура BaFe_2S_3 .

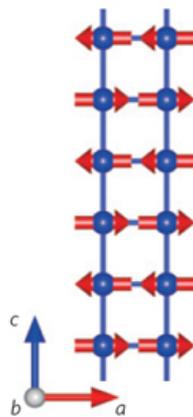


Рис. 2. Упорядочение спинов в лестнице.

Температура Нееля $T_N = 119$ К. В работе [1] (Япония, Австралия, Китай) обнаружено, что при увеличении давления BaFe_2S_3 переходит сначала в металлическое состояние, а затем – в сверхпроводящее с $T_c = 14$ К (рис. 3).

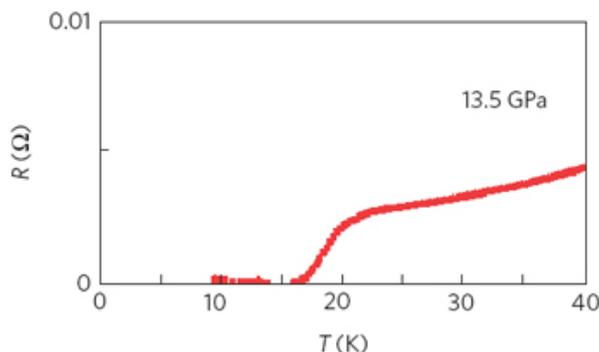


Рис. 3. Температурная зависимость сопротивления BaFe_2S_3 при $P = 13.5$ ГПа.

Есть надежда, что при допировании BaFe_2S_3 соответствующими элементами (“химическое давление”) удастся добиться сверхпроводимости при атмосферном давлении.

Л.Опенов

1. H.Takahashi et al., *Nature Mater.* **14**, 1008 (2015).

И далее ...

НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ, НАОЭЛЕКТРОНИКА

- 2 Туннельный полевой транзистор с атомарно тонким каналом

Уроки природы. Как управляет цветом хамелеон

НАНОМАТЕРИАЛЫ

- 4 Ультратонкие эпитаксиальные пленки станена

- 5 На гребне волны

ТОРЖЕСТВО

Нобелевская премия по физике

КОНФЕРЕНЦИИ

- 6 XI международный семинар “Магнитные фазовые переходы”, посвященный 80-летию чл.-корр. РАН И.К. Камилова, 19-21 ноября 2015г., г. Махачкала, Республика Дагестан

ДЛЯ ПРАЗДНОГО УМА

Десять крупнейших открытий в физике за последние 10 лет по версии журнала *Nature Physics*

НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ, НАНОЭЛЕКТРОНИКА

Туннельный полевой транзистор с атомарно тонким каналом

Полевые транзисторы используются в интегральных схемах, составляющих основу современных электронных устройств. Дальнейшему улучшению характеристик этих устройств за счет миниатюризации транзисторов препятствует фундаментальное ограничение на скорость изменения силы тока I_{DS} в канале от под действием управляющего напряжения V_{GS} : при комнатной температуре величина $SS = dV_{GS}/d\log_{10}I_{DS}$ не может быть меньше 60 мВ в расчете на десятикратное увеличение тока (то есть для увеличения тока в 10 раз нужно повысить напряжение как минимум на 60 мВ). По этой причине напряжение не уменьшается пропорционально длине канала, и потребляемая мощность растет, что приводит к перегреву. Для выхода из этой ситуации требуется принципиально иной подход к конструкции транзисторов и организации электронного транспорта. Один из вариантов – замена обычного канала на туннельный барьер, то есть использование другого механизма переноса тока (туннелирования).

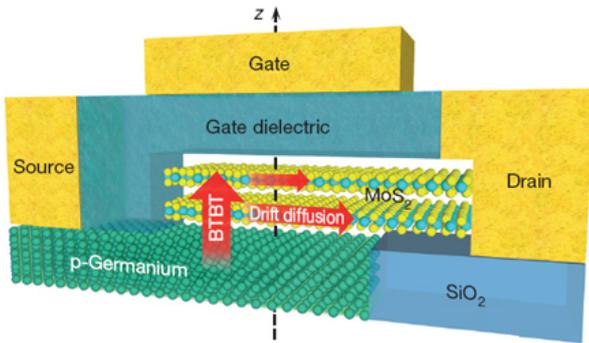


Рис. 1. Схематическое изображение поперечного сечения туннельного полевых транзистора с каналом из ультратонкой пленки MoS₂. Красные стрелки показывают направление электронного транспорта. BTBT (band-to-band tunneling) – межзонное туннелирование.

В работе [1] продемонстрирован туннельный полевой транзистор, в котором функцию канала выполняет туннельный барьер из двухслойной пленки MoS₂ толщиной 1.3 нм на германиевой подложке (рис. 1). Германий выбран из-за относительно низкой энергии сродства к электрону E_A и сравнимой с другими полупроводниками IV группы ширины запрещенной зоны, а MoS₂ – из-за большой (по сравнению с другими дихалькогенидами переходных металлов) величины E_A (рис. 2). В результате взаимное расположение разрешенных и запрещенных зон оказывается таким (рис. 3), что носители заряда переходят из валентной зоны Ge в зону проводимости MoS₂. При этом величина SS составляет 3.9 мВ – намного меньше теоретического предела. Немаловажно и то, что с технологической точки зрения планарные гетероструктуры гораздо перспективнее, чем квантовые провода и нанотрубки.

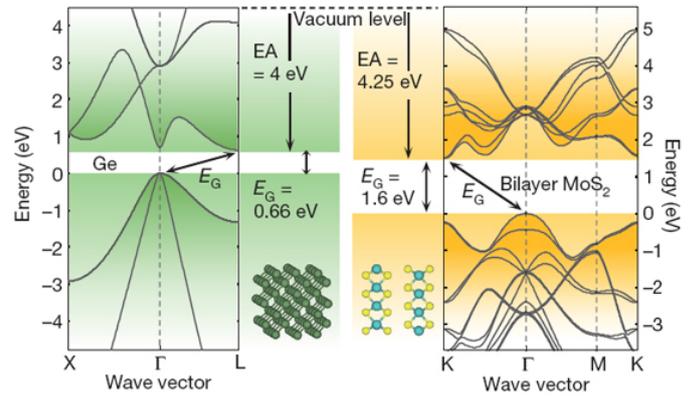


Рис. 2. Электронная зонная структура Ge и бислоя MoS₂. Указаны энергии сродства к электрону E_A и ширины запрещенных зон E_G . Вставки иллюстрируют кристаллическую структуру материала.

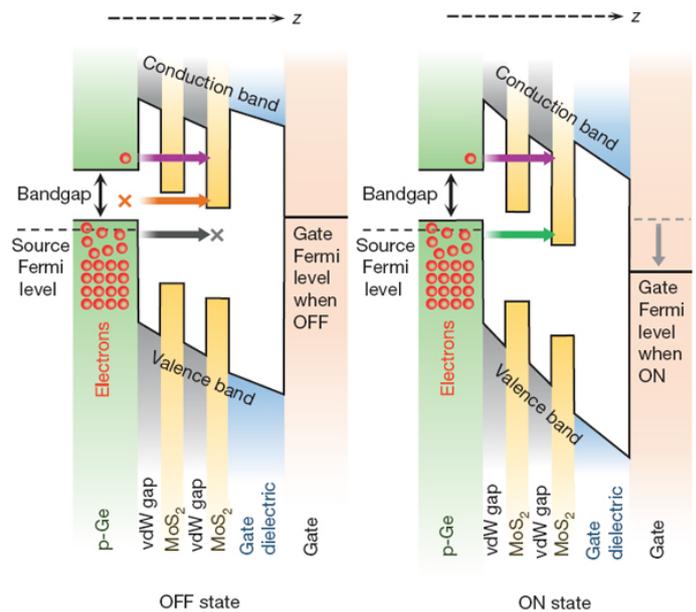


Рис. 3. Зонная диаграмма вдоль вертикальной штриховой линии на рис. 1 в закрытом (слева) и открытом (справа) состояниях. vdW gap – вандерваальсова щель (слои MoS₂ связаны между собой и с подложкой слабыми вандерваальсовыми силами, что обеспечивает минимизацию структурных искажений).

По материалам заметки
 “Flat transistor defies the limit”,
 K.Tomioka, Nature 526, 51 (2015).

1. D.Sarkar et al., Nature 526, 91 (2015).

Уроки природы. Как управляет цветом хамелеон

Используя интерференционные и дифракционные явления в нанопленках и 3D наноструктурах, ученые создают сложные оптические покрытия для разных целей. Недавно ПерсТ рассказывал об “окрашивании” материала путем нанесения нанопленок, поглощающих свет [1]. Цвет меняется в зависимости от толщины покрытия – при нанесении на золотые подложки Ge пленок толщиной от 5 до 25 нм образцы становились розовыми, фиолетовыми,

синими. Такие “окрашивающие” нанопокрyтия можно наносить на различные материалы, в том числе на гибкие [2]. Другой, более сложный, но эффективный подход к управлению цветом предложили исследователи из California Univ., Berkeley (США) [3]. Используя УФ литографию с мягким штампом, они создали новую гибкую высококонтрастную метаструктуру НСМ (high-contrast metastructure), цвет которой можно менять с помощью небольшой деформации. Схема гибкой метаструктуры показана на рис. 1а. Структура состоит из пикселей, внедренных в прозрачную гибкую мембрану из полидиметилсилоксана (ПДМС). Цвет пикселя зависит только от геометрии НСМ, конфигурация которой представлена на рис. 1б. Приведена также микрофотография образца 1см×1см, состоящего из пикселей 100 мкм x100 мкм, и SEM изображение НСМ (вид сверху).

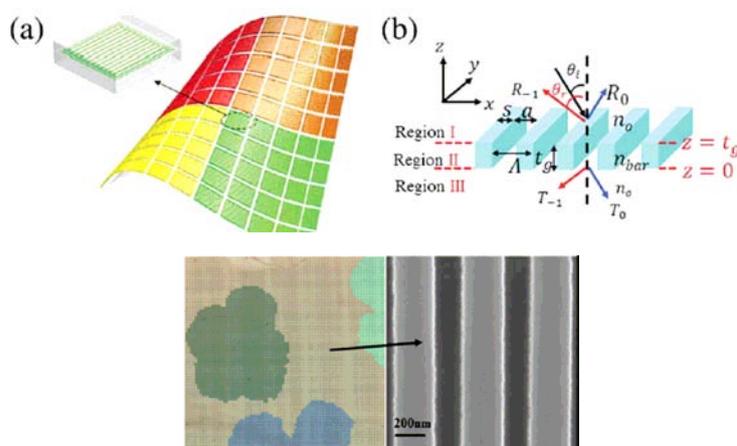


Рис. 1. а - Схема цветного дисплея из НСМ, внедренных в гибкую мембрану. Дисплей состоит из отдельных пикселей требуемого цвета. б - Конфигурация НСМ. Наноразмерные бруски материала с высоким показателем преломления n_{bar} (в данном случае Si) полностью окружены материалом с низким показателем преломления n_0 . Ключевые параметры, определяющие цвет – период Λ , высота t_g и ширина s бруска Si.

Внизу – микрофотография образца и SEM изображение НСМ (вид сверху).

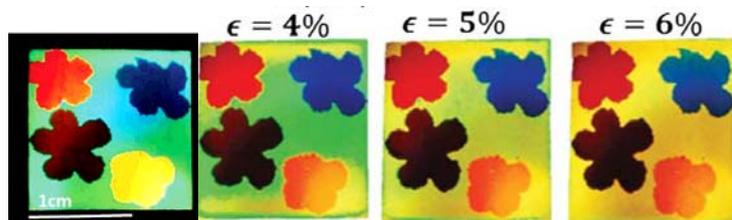


Рис. 2. Фотография образца дисплея при облучении дневным светом и изменение расцветки при небольшой деформации.

Авторы [3] обнаружили и использовали новый эффект. Они продемонстрировали, что резкое отличие показателей преломления материалов НСМ приводит к аномальному отражению и преломлению на границах раздела. Это позволяет получать яркие цвета при освещении дневным светом (рис. 2). Не-

большое растяжение меняет период НСМ и, соответственно, восприятие цвета.

Область возможного применения новых гибких НСМ довольно широка – от макроуровня (изобразительное искусство, маскировочные средства) до микроизображений (например, биометок).

Авторы [3] для своих разработок, возможно, воспользовались подсказкой природы. Разнообразную окраску живых организмов – насекомых, птиц, хамелеонов – создают не только биологические пигменты, которые избирательно рассеивают, поглощают и отражают свет определенных длин волн, но и биофотонные наноструктуры. Интерференция (дифракция) и рассеяние света на элементах этих структур, имеющих разные показатели преломления, приводят к возникновению “структурной” окраски. О некоторых исследованиях биофотонных наноструктур рассказывал ПерсТ (например, [4, 5]). Однако восхищает не только великолепная, в том числе и радужная, окраска живых организмов, но и способность многих из них (насекомых, головоногих моллюсков, ящериц, некоторых рыб, лягушек и др.) быстро менять цвет под действием температуры, света или различных эмоций. Конечно, самый известный пример – это хамелеон. Ученые из Швейцарии недавно выяснили, что изменение его окраски происходит не только благодаря перераспределению или перемещению пигментов, содержащихся в клетках-хромофорах. Хамелеон может управлять своей окраской, регулируя расстояния между нанокристаллами, которые имеются в клетках поверхностного слоя кожи! [6].

Комбинируя биологические методы, электронную микроскопию и фотометрию, авторы [6] изучили механизм изменения цвета пантерного хамелеона (*Furcifer pardalis*), обитателя Мадагаскара. В экспериментах *in vivo* с помощью видеосъемки проследили, как меняется окраска при встрече с потенциальным противником. В течение пары минут произошла смена цвета от синего к зеленому и затем к оранжевому (рис. 3а). Изменения обратимы. Такое явление трудно объяснить дисперсией/агрегацией пигментов. Результаты гистологии и ТЕМ показали, что в коже хамелеона имеется два слоя иридофоров – клеток, содержащих нанокристаллы азотистого основания гуанина (рис. 3с). В клетках поверхностного слоя (S-иридофоры) содержатся мелкие (~ 130 нм) плотноупакованные кристаллы гуанина (рис. 3д). Показатель преломления гуанина $n_g=1.83$, а показатель преломления окружающей его цитоплазмы $n_c=1.33$. Такая структура может действовать как фотонный кристалл. Изучение ТЕМ изображений кожи спокойного хамелеона и хамелеона в возбужденном состоянии показало, что размер нанокристаллов в S-иридофорах не меняется, но расстояния между ними в коже спокойного хамелеона примерно на 30% меньше. Изменение геометрии фотонного кристалла приводит к резкому измене-

нию цвета. Когда хамелеон спокоен, плотная решетка нанокристаллов отражает голубой цвет, а более свободная конфигурация нанокристаллов дает желтые и красные цвета. Для подтверждения своих выводов авторы погрузили образцы кожи “возбужденного” хамелеона в высококонцентрированный раствор соли. Под действием осмотического давления вода из клеток выходит наружу, клетки сжимаются, соответственно, уменьшается расстояние между нанокристаллами гуанина. Такая обработка действительно привела к изменению отражательной способности, и окраска из желтоватой стала зеленой и синей, как в спокойном состоянии хамелеона.

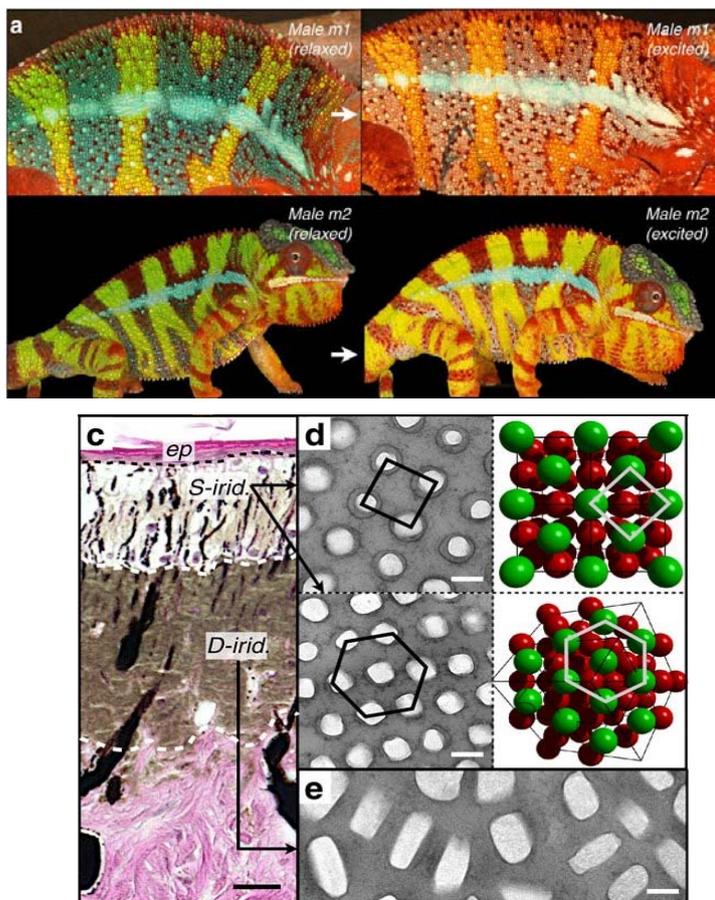


Рис. 3. *a* - Изменение окраски двух взрослых самцов хамелеона при возбуждении.
c - Сечение кожи, показывающее 2 слоя иридофоров (поверхностный S-irid и глубокий D-irid).
d - ТЕМ изображение нанокристаллов гуанина в S-иридофорах хамелеона в возбужденном состоянии и модель решетки (в двух ориентациях).
e - ТЕМ изображение нанокристаллов гуанина в D-иридофорах. Шкала 20 мкм.

Глубокий слой иридофоров содержит менее упорядоченные и более крупные кристаллы (длиной 200-600 нм, высотой 90-150 нм) (рис. 3e). Этот слой отражает свет в более широком диапазоне длин волн, включая заметную долю инфракрасного излучения. Авторы [6] полагают, что он действует как защита от теплового излучения.

Возможность активно управлять восприятием цвета объектов очень важна для множества применений от

камуфляжа до сенсорных устройств и дисплеев. Природа предоставляет ученым замечательные примеры. Некоторое сходство фотонных кристаллов кожного покрова хамелеона с гибкой метаструктурой, разработанной авторами [3], конечно, есть. В обоих случаях имеются материалы с разными показателями преломления, управление цветом происходит благодаря изменению расстояния между элементами с высоким показателем преломления. Но как же еще далеко до уровня, достигнутого ящерицами...

О.Алексеева

1. [ПерсТ 22, вып. 5, с. 5 \(2015\).](#)
2. *M.A.Kats et al., Appl. Phys. Lett.* **105**, 131108 (2014).
3. *L.Zhu et al., Optica* **2**, 255 (2015).
4. [ПерсТ 19, вып. 21, с. 3 \(2012\).](#)
5. [ПерсТ 22, вып. 17, с. 5 \(2015\).](#)
6. *J.Teyssier et al., Nature Commun.* **6**, 6368 (2015).

НАНОМАТЕРИАЛЫ

Ультратонкие эпитаксиальные пленки станена

Вслед за графеном были получены и другие квазидвумерные материалы из элементов IV группы: силицен (из кремния) и германен из германия. А вот приготовить станен (из олова) долго не удавалось. В работе [1] (Китай, США) ультратонкие пленки станена толщиной 0.35 нм на подложках $\text{Vt}_2\text{Te}_3(111)$ выращены путем молекулярно-лучевой эпитаксии (рис. 1).

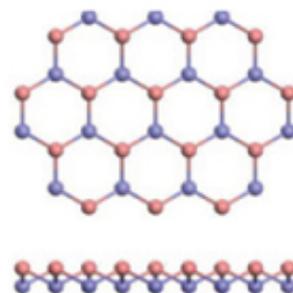


Рис. 1. Кристаллическая структура станена. Виды сверху и сбоку.

Их кристаллическая структура исследована с помощью сканирующей туннельной микроскопии, а электронная – посредством фотоэлектронной спектроскопии с угловым разрешением. Теоретики предсказывают наличие в станене квантового спинового эффекта Холла, аномального квантового эффекта Холла, сильного термоэлектрического эффекта, топологической сверхпроводимости и пр.

1. *F.Zhu et al., Nature Mater.* **14**, 1020 (2015).

На гребне волны

Квантово-химические расчеты раз за разом демонстрируют неисчерпаемые способности углерода к формированию экзотических, казалось бы, “невозможных”, наноматериалов. По-видимому, вдохновленные свободой, океаном и серфингом исследователи из Японии и Швейцарии предложили очередной удивительный его аллотроп – волнистый углерод (wavy carbon) [1], обладающий квазидвумерной волнообразной структурой, в основу которой положены четырехчленные углеродные кольца. Волнистый углерод (в зависимости от количества таких колец, образующих волну) имеет широкий спектр модификаций. Сами авторы классифицируют их следующим образом: wavy- C_n обозначает, что лист волнистого углерода содержит n атомов в элементарной ячейке. Например, на рис. 1 показаны фрагменты wavy- C_2 , C_6 и C_8 углерода, геометрические и энергетические характеристики которых авторы детально изучили.

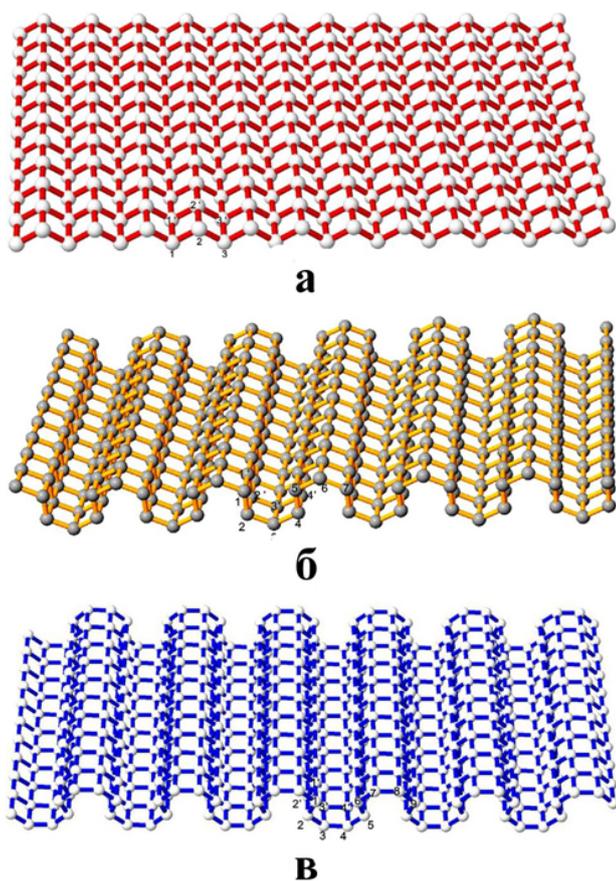


Рис. 1. Различные квазидвумерные наноструктуры волнистого углерода: *a* - wavy- C_2 , *б* - wavy- C_6 и *в* - wavy- C_8

Отметим, что основные расчеты они проводили с помощью программного пакета Gaussian 09 на достаточно элементарном уровне теории с минимальным базисом RHF/STO-3G, используя периодические граничные условия. Полученные результаты авторы ожидаемо сравнивали с графеном. Так, энергетическая щель для всех рассматриваемых образцов составила около 8 эВ, что относит волнистый углерод скорее к классу диэлектриков, в отличие

Перст, 2015, том 22, выпуск 19

от графена, который, как известно, является бесщелевым полупроводником. Все длины связей C-C оказались незначительно больше графеновых, а вот по энергии “wavy carbon” лежит гораздо выше графена, что, по мнению авторов, позволит использовать его (в случае успешного синтеза) в качестве энергозапасяющего материала. Любопытно, что, сворачивая волнистый углерод в трубочку (фантазия исследователей не ограничилась лишь “квазиплоскими” структурами), можно получить своеобразные аналоги углеродных нанотрубок (рис. 2), у которых, к слову, величина диэлектрической щели также около 8 эВ (напомним, что электронные характеристики традиционных нанотрубок определяются индексами хиральности).

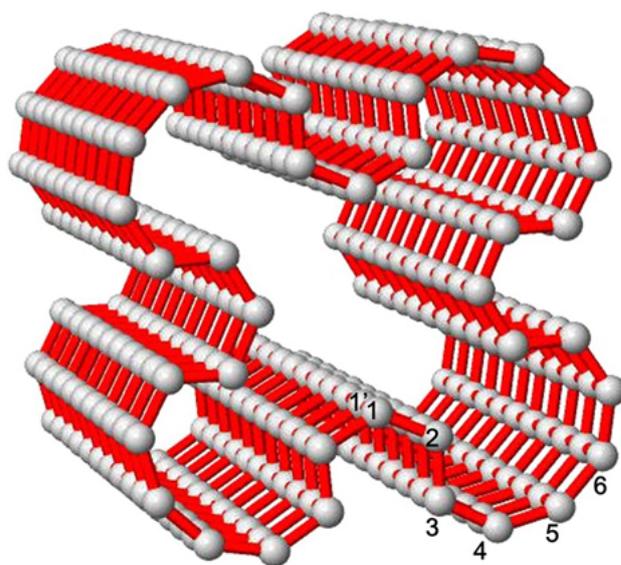


Рис. 2. Нетрадиционная углеродная нанотрубка wavy- C_{36}

Примечательно, что увлекшись квазиодномерными и квазидвумерными системами, авторы совершенно не коснулись нульмерных наноструктур, поэтому очень может быть, что следующая их публикация будет посвящена волнистым фуллеренам.

М. Маслов

I. K. Ohno et al., Chem. Phys. Lett. 639, 178 (2015).

ТОРЖЕСТВО

Нобелевская премия по физике

Нобелевской премии по физике за 2015 г. удостоились канадец Артур Макдоналд и японец Такааки Кадзита “за открытие нейтринных осцилляций, показывающих наличие у них массы”.



Артур Брюс Макдональд (Arthur Bruce McDonald) и Такааки Кадзита (Takaaki Kajita).

В природе нейтрино распространены столь же широко, как и фотоны – кванты электромагнитного поля. Нейтрино образуются в недрах Солнца (солнечные нейтрино) и других звезд при ядерных реакциях и в результате распадов пионов и каонов в верхних слоях атмосферы Земли под влиянием космического излучения (атмосферные нейтрино).

В физике элементарных частиц все нейтрино относятся к классу лептонов (бесструктурных частиц) и участвуют в электрослабом и гравитационном взаимодействиях. Всего различают три типа нейтрино – электронное, мюонное и тау-нейтрино.

Нейтринные осцилляции (превращения трех типов нейтрино друг в друга) могут возникать только в случае ненулевой массы частиц (которая до сих пор точно не определена), а также важны для решения проблемы солнечных нейтрино – недостаточного (по сравнению с теоретическими расчетами) количества электронных нейтрино, достигающих Земли от светила.

КОНФЕРЕНЦИИ

XI международный семинар “Магнитные фазовые переходы”, посвященный 80-летию чл.-корр. РАН И.К. Камилова, 19-21 ноября 2015г., г. Махачкала, Республика Дагестан

Тематика семинара:

1. Магнитные фазовые переходы
2. Междисциплинарная секция

В программу семинара будут включены доклады, содержащие новые, ранее не опубликованные результаты исследований. Принятые доклады будут опубликованы в сборнике трудов. Отобранные оргкомитетом доклады планируется опубликовать в журналах “ФТТ” и “Известия РАН. Серия физическая”.

Доклады принимаются только в электронной версии по e-mail: dagconference@mail.ru

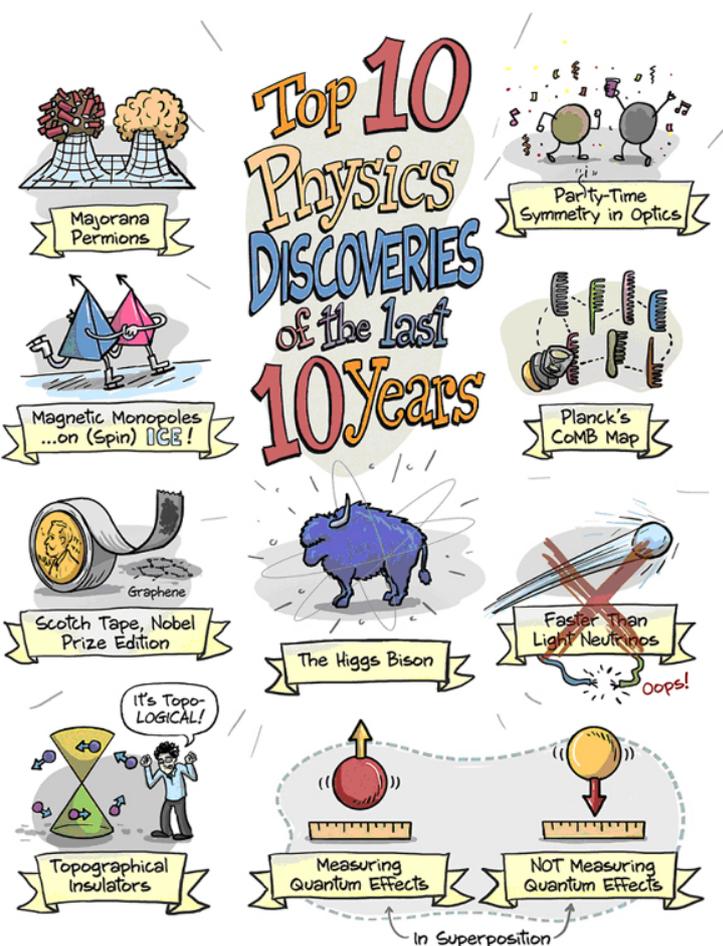
Прием докладов – до **10 ноября 2015 г.**

Детальная информация находится на сайте:

<http://www.dagphys.ru>

ДЛЯ ПРАЗДНОГО УМА

Десять крупнейших открытий в физике за последние 10 лет по версии журнала Nature Physics



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

Главный редактор: И.Чугуева, e-mail: irina@issp.ras.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