

В этом выпуске:

## НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ

### Уроки природы. Бабочки опять помогают учёным

Для создания эффективных биомиметических материалов (то есть разработанных на основе реализованных в природе принципов) нужны знания о структуре и функциях прообраза. Перст уже рассказывал, какую пользу приносят ученым и технологам бабочки. Например, изучение микро/нано структуры переливчатых крыльев бабочек рода *Morpho* позволило синтезировать из полимера сверкающую пленку, сочетающую свойства фотонного кристалла и супергидрофобность (что важно для оптических устройств) [1], а обнаружение гироидов\* в чешуйках зеленой бабочки *Callophrus rubi* помогло разработать метод создания гироидных фотонных наноструктур с регулируемыми оптическими свойствами [2]. Исследователи из Швейцарии, Германии и Австралии недавно попытались выяснить механизм формирования гироидной наноструктуры на примере зелёной бабочки *Thecla opisena* [3]. Использовали оптическую, электронную и рентгеновскую микроскопию высокого разрешения. На рис. 1 представлена фотография бабочки и изображение чешуйки с зелеными доменами, полученное с помощью оптического микроскопа.



Рис. 1. Слева: бабочка *Thecla opisena*. Справа: микроизображение чешуйки зеленого крыла.

Дальнейшие исследования показали, что зеленые домены – это изолированные гироидные нанокристаллы, расположенные вблизи поверхности чешуйки между её нижним и верхним хитиновыми слоями (рис. 2, 3). Нижний слой представляет собой пленку, а верхний слой состоит из продольных ребер, соединенных поперечными “жилками”. В гироидных нанокристаллах, в отличие от хитинового каркаса, присутствует небольшое количество пигмента, поглощающего излучение с длиной волны 430 нм (синий цвет).

И далее ...

### ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

- 4 “Новогодние” фуллерены для водородной энергетики
- 5 Структура и электронные характеристики чаши  $C_{20}$

### ГРАФЕН

- 6 Мембраны из оксида графена для фильтрации органических растворителей

### НАНОМАТЕРИАЛЫ

- 7 Акция: две дифракционные решетки по цене одной
- 9 Механические свойства многослойных наногетероструктур различной морфологии

### МАГНИТЫ

- 10 “Стратегия 20/20” оптомагнитной записи

### КОНФЕРЕНЦИИ

- 12 International School-Workshop on Actual Problems of Condensed Matter Physics (IWCMP-2018), April 06-10, 2018, Norilsk, Krasnoyarsk Region

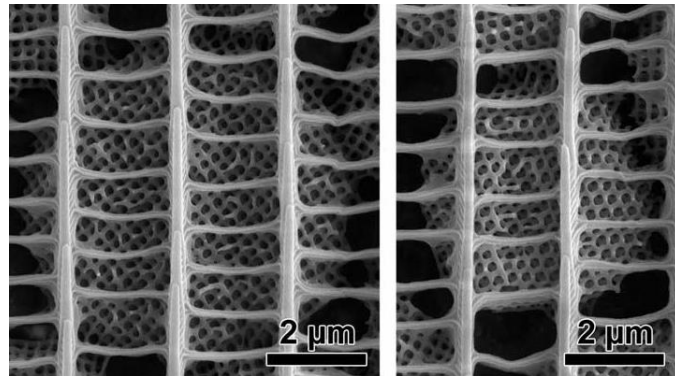
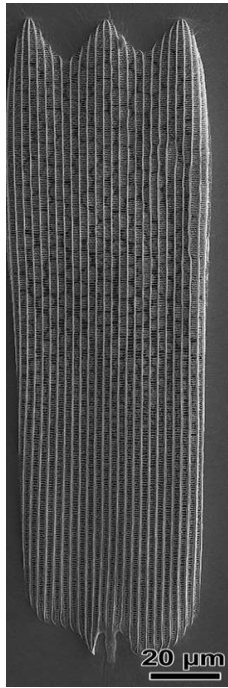


Рис. 2. SEM изображения отдельной чешуйки зеленого крыла (слева) и двух гироидных нанокристаллов разного размера “за решеткой” из хитиновых ребер и поперечных “жилок” (справа).

Для того чтобы изучить 3D форму кристаллов и их крепление к хитиновой оболочке, авторы отделили нижнюю хитиновую пленку с помощью клейкой ленты. Кристаллиты остались закрепленными вверху на хитиновой решетке из ребер и перемычек. На рис. 3 (А и В) приведены SEM изображения перевернутой на “решетку” чешуйки.

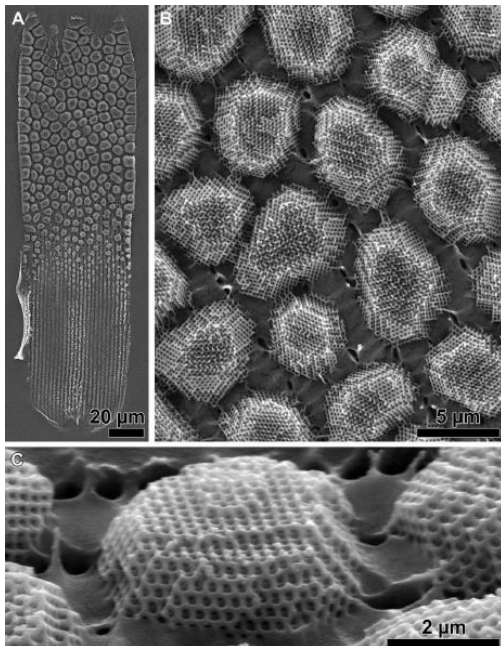


Рис. 3. SEM изображения ограниченных гироидов: А - перевернутая чешуйка с удаленной нижней хитиновой пленкой; В - изображение области чешуйки вблизи свободного кончика; С - гироиды под углом  $\sim 50^\circ$ .

Авторы отметили, что нанокристаллы крупнее около свободного кончика чешуйки. В направлении вдоль продольной оси чешуйки к её основанию они становятся мельче, а вблизи места крепления чешуйки к крылу их вообще нет (рис. 3А). На SEM изображениях высокого разрешения видно, что гироидные кристаллиты изолированы друг от друга. Они не круглые или цилиндрические, а хорошо ограниченные, причем грань, обращенная к хитиновой решетке (которая на изображениях внизу), шире, чем грань у нижней хитиновой пленки.

Данные, полученные с помощью рентгеновской томографии, подтвердили монокристалличность, ограниченную форму гироидов и наличие более прочного крепления к верхнему слою (рис. 4).

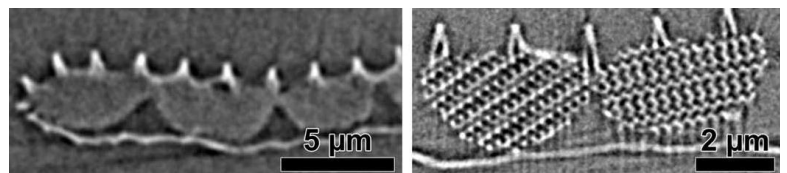


Рис. 4. Рентгеновская томография поперечного сечения гироидов подтверждает их монокристалличность.

Исследования показали, что чешуйка состоит из двух различных компонентов: гироидных доменов, содержащих небольшое количество пигмента, и прозрачного каркаса, состоящего из нижней пленки и решетки из ребер и попе-

речных жилок. Это подтверждает гипотезу о двухстадийном образовании чешуйки – сначала возникает каркас, а затем формируется внутренняя гироидная структура. Авторы [3] полагают, что эти результаты помогут разработать методы наносборки для получения новых оптических и фотоэлектрических материалов.

Кому-то нравится изучать зеленых или голубых бабочек, а кому-то – очень чёрных... Такие бабочки могут подсказать, как повысить эффективность поглощения солнечного света. Ученые из Германии и США воспроизвели микро-наноструктуру крыла черной бабочки

*Pachliopta aristolochiae* в тонкопленочных солнечных батареях на основе аморфного кремния a-Si:H [4]. С помощью электронной микроскопии авторы работы выяснили, что продольные ребра и перемиčky верхней хитиновой оболочки чешуйки крыла образуют 2D сетку разупорядоченных нанопор (рис. 5). Сетка находится над внутренней областью чешуйки, состоящей из композита хитин/пигмент меланин. От поверхностных нанопор в этот композит спускаются заполненные воздухом каналы соответствующего диаметра (на глубину ~ 800 нм).

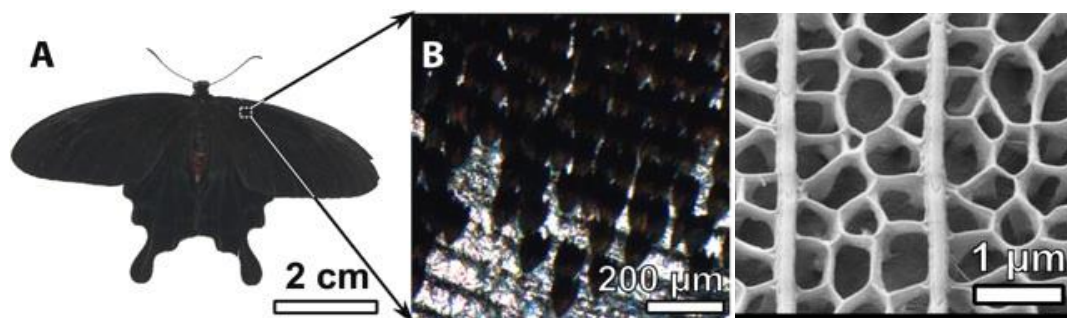


Рис. 5. А - Бабочка *Pachliopta aristolochiae*. В - Увеличенное изображение черной матовой области (справа – SEM изображение сетки разупорядоченных нанопор на верхней поверхности чешуйки).

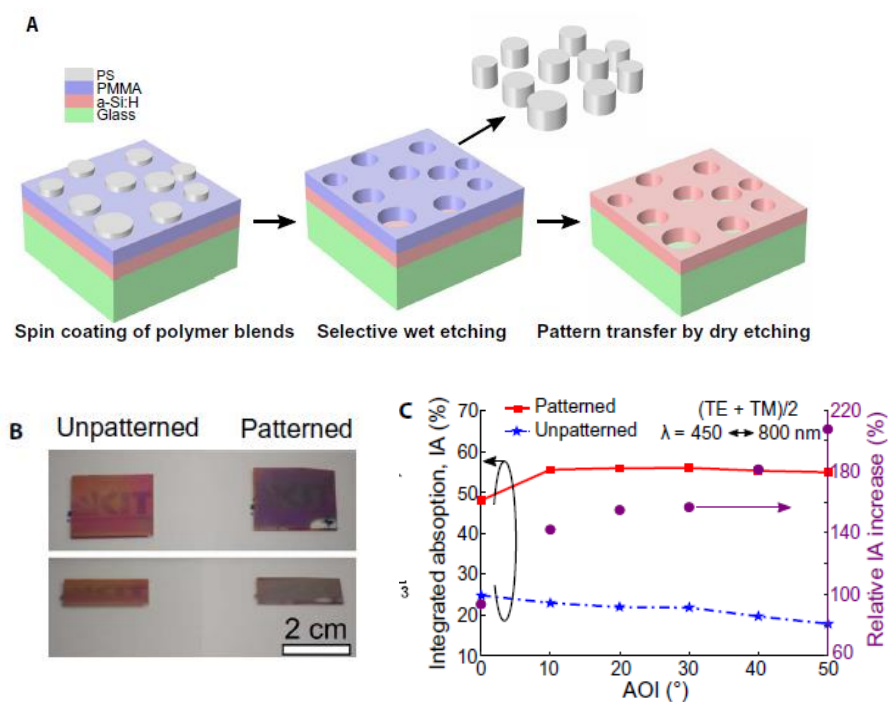


Рис. 6. А - Схема этапов изготовления поглотителей: нанесение раствора смеси полиметилметакрилата (PMMA) и полистирола (PS) в метилэтилкетоне (MEK) на тонкий слой a-Si:H на стеклянной подложке; селективное мокрое травление PS; перенос структуры в a-Si:H сухим травлением. В - Фотография структурированной пленки a-Si:H на стеклянной подложке демонстрирует сильное поглощение света в сравнении с гладким образцом (угол наблюдения 30° (вверху) и 80° (внизу)). С - Зависимость интегрального поглощения света от угла падения (AOI) для структурированного (красный цвет) и гладкого (синий цвет) образцов (относительное увеличение поглощения для структурированной пленки показано фиолетовым цветом (правая шкала)).

Используя компьютерное моделирование, авторы [4] выяснили, что именно разупорядоченные каналы разных диаметров – такие, как у черной бабочки – обеспечивают наиболее стабильное поглощение света в широком диапазоне длин волн при разных углах падения. Вдохновленные этим результатом исследователи перешли к изготовлению структурированных тонкопленочных поглотителей для солнечных батарей. Предложенный способ основан на фазовом разделении бинарной полимерной смеси, которое, по мнению авторов, сходно с разделением фаз, происходящим при самосборке биофотонных наноструктур в природе. Для получения полимерного покрытия использовали метод распыления раствора на вращающуюся подложку (spin-coating). На пленку a-Si:H толщиной 130 нм наносили раствор смеси полиметилметакрилата (PMMA) и полистирола (PS) в растворителе метилэтилкетоне (MEK). Из-за различной растворимости полимеров во время центрифугирования в слое PMMA образовались “островки” PS. Их вытравили, после чего с помощью реактивного ионного травления структуру перенесли в пленку аморфного кремния (рис. 6). Нужные диаметры каналов (в диапазоне 133-343 нм) получили, регулируя соотношение компонентов раствора. Авторы статьи отмечают, что процесс получения поглощающего материала легко масштабировать.

Поглощение света (A) определяли по результатам измерения отражения (R) и пропускания (T) как  $A = 1 - R - T$ . Относительное увеличение поглощения в диапазоне длин волн 450-800 нм для структурированной пленки достигло 93% при нормальном падении и 207% при угле падения  $50^\circ$  (рис. 5C). Это важный результат, особенно для наших широт, ведь существующие солнечные панели наиболее эффективно работают, когда их поверхность перпендикулярна солнечным лучам.

Общий вывод авторов [3, 4] – необходимо продолжить изучение природных наноструктур для разработки новых методов получения фотозлектронных устройств и оптимизации их характеристик.

---

*\*Гироид – непрерывная (без самопересечений) бесконечно повторяющаяся в трёх измерениях структура с минимальной поверхностью. Впервые гироиды были описаны в 1970 г американским ученым Аланом Шоэном, в то время работавшим в NASA.*

О. Алексеева

1. [ПерсТ 19, вып. 24, с.3 \(2012\).](#)
2. [ПерсТ 23, вып. 17, с.2 \(2016\).](#)
3. [B.D.Wilts et al., Sci. Adv.3, 1603119 \(2017\).](#)
4. [R.H.Siddique et al., Sci. Adv. 3, 1700232 \(2017\).](#)

## ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

### *“Новогодние” фуллерены для водородной энергетики*

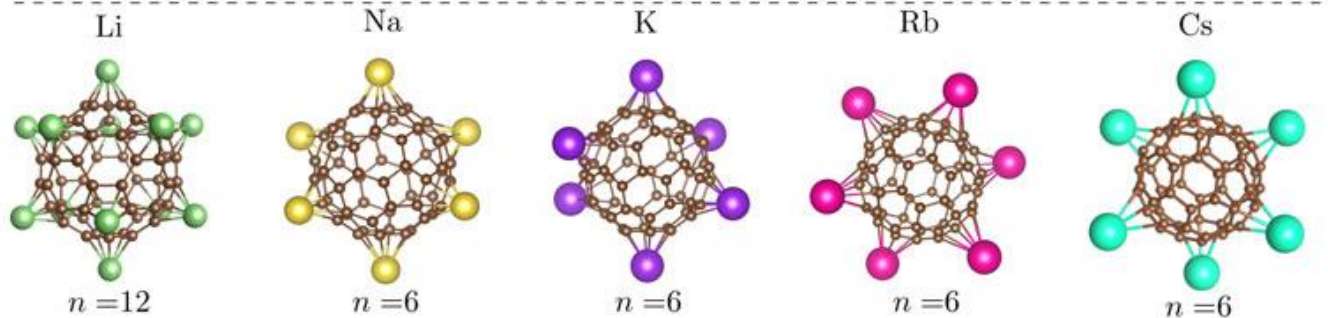
Важными характеристиками материалов, пригодных для хранения и транспортировки водородного топлива, являются их способность адсорбировать водород в значительных концентрациях и высокая устойчивость. Производные углеродных фуллеренов, особенно металлофуллерены, часто отмечают как наиболее перспективных кандидатов на эту роль. Желая более глубоко разобраться в этом вопросе, авторы работы [1] рассмотрели целый набор экзофуллеренов, а именно фуллеренов  $C_{60}$ , покрытых различными щелочными и щелочноземельными металлами, а также некоторыми другими элементами. Нельзя не отметить, что в преддверии Нового года эти объекты очень напоминают яркие елочные шары (см. рис.).

Однако помимо создания новогоднего настроения авторы поставили перед собой задачу определить наиболее энергетически выгодные конфигурации металлофуллеренов и посчитать максимальное число атомов металла одного сорта, которые способны равномерно покрыть фуллереновую клетку, что является одной из ключевых характеристик для использования металлизированных  $C_{60}$  в водородной энергетике. Для этого они перебрали сотни конфигураций, используя теорию функционала плотности, а точнее ее реализацию в программных пакетах BigDFT и VASP. В конечном счете оказалось, что ряд экзофуллеренов, считавшихся до настоящего времени основным состоянием (ground state) с минимальной энергией, таковыми на самом деле не являются. Более того, анализ поверхностей потенциальной энергии привел к появлению массы новых возможных низкоэнергетических конфигураций для большого числа различных металлов. На рисунке приведено максимальное число атомов каждого рассматриваемого в работе [1] элемента, которые способны декорировать поверхность  $C_{60}$  до того, как сама структура фуллерена не разрушится, или же легирующие атомы не начнут образовывать кластеры в определенной области поверхности. Авторы отмечают, что для ще-

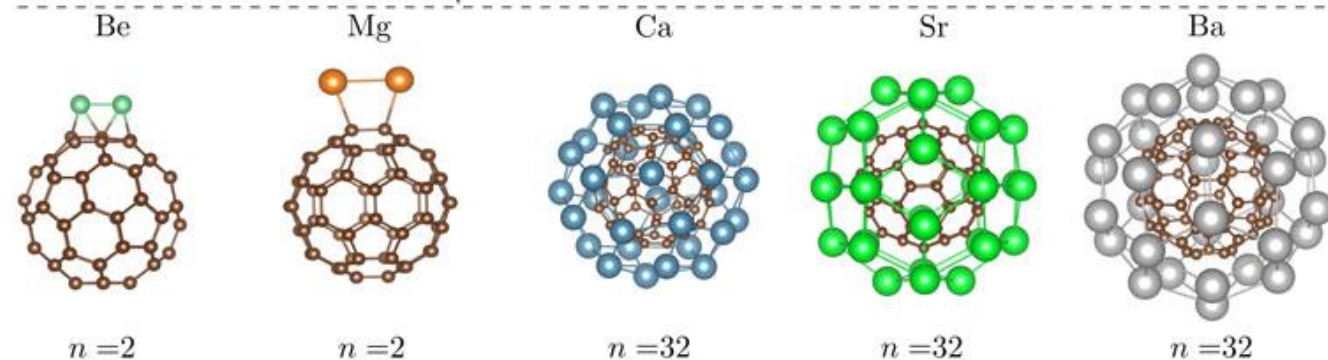
лочных металлов максимальным покрытием обладает литий: двенадцать атомов на клетку, в то время как для щелочноземельных металлов максимальное декорирование в тридцать два атома возможно уже для трех металлов: кальция, стронция и бария. Скандий и лантан также обеспечивают однородное покрытие фуллереновой клетки в тридцать два атома, а вот такие

элементы как, например, алюминий и титан равномерного покрытия не образуют. Таким образом, экзофуллерены  $C_{60}$  в перспективе пригодные для водородной энергетики могут быть получены только с помощью определенных металлов, и ряд Li, Na, K, Rb, Cs, Ca, Sr, Ba, Sc, Y, La, по прогнозам авторов, для этого идеально подходит.

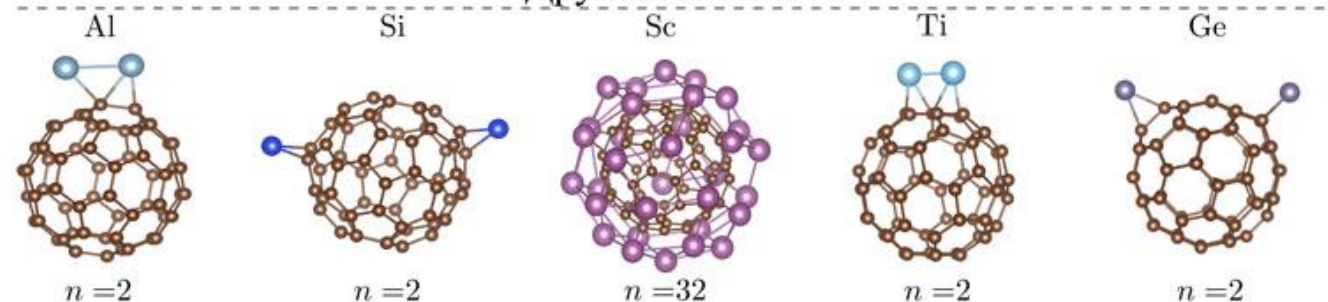
### Щелочные металлы



### Щелочноземельные металлы



### Другие элементы



Атомные структуры экзофуллеренов  $C_{60}$  с декорирующими фуллереновую клетку атомами различных элементов. Равномерное распределение декорирующих атомов по поверхности фуллерена, при котором они отстоят друг от друга на максимально возможном расстоянии, известно как “смачивание”.

*М. Маслов*

1. D.S.De et al., Carbon (2017).

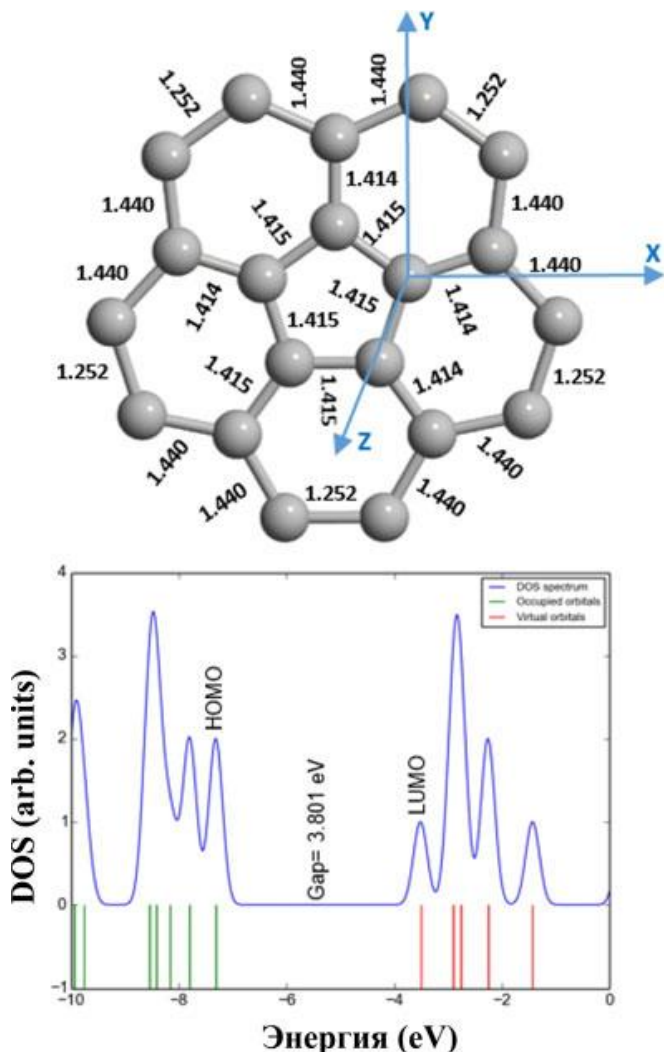
<https://doi.org/10.1016/j.carbon.2017.11.086>

#### Структура и электронные характеристики чаши $C_{20}$

На страницах научной периодики нередко можно встретить полемику о сравнительной термодинамической устойчивости изомеров  $C_{20}$ . До настоящего времени исследователи так

и не пришли к единому мнению о том, какая же модификация: кольцо, чаша или клетка самая низкоэнергетическая [1]. Являясь наименьшим из возможных фуллеренов, клетка  $C_{20}$  традиционно вызывает повышенный интерес, в то время как оставшиеся две модификации по отдельности рассматриваются достаточно редко. Работа [2] призвана исправить сложившуюся ситуацию, ее авторы постарались детально изучить геометрические, энергетические и электронные характеристики как чистой, так и

допированной атомами германия чаши  $C_{20}$  (см. рис.). При этом они варьировали не только количество замещающих атомов германия (от одного до четырех), но и относительное их расположение на поверхности изомера.



Атомная структура “чаши”  $C_{20}$  и ее плотность электронных состояний (DOS). Длины углерод-углеродных связей приведены в ангстремах.

Все расчеты авторы выполняли с помощью теории функционала плотности в программе Gaussian 09W. К сожалению, нельзя не отметить невысокий уровень теории: авторы использовали всего лишь B3LYP/3-21G, который на современном этапе развития компьютерного моделирования нельзя отнести даже к рутинным вычислениям. Что касается структуры допированных систем  $C_{20-n}Ge_n$ , то авторы отмечают, что атомы германия не разрушают чашу и встраиваются в углеродный каркас достаточно легко. Однако длины связей Ge-C и Ge-Ge допированных наноструктур, превышают первоначальные углерод-углеродные связи. Результат, в принципе, ожидаемый, гораздо более интересными представляются электронные

свойства. Авторы рассчитали целый набор характеристик: плотность электронных состояний, энергии Ферми, НОМО-LUMO щели, дипольные моменты и многое другое. В то время как сама структура чаши в целом остается неизменной, электронные свойства допированных германием структур с увеличением числа допантов меняются от полупроводниковых до почти металлических. Так, например, НОМО-LUMO щель уменьшается от 3.80 эВ в “чистой” чаше  $C_{20}$  до 0.66 эВ в изомере  $C_{17}Ge_3$ . Авторы рассчитывают, что полученные результаты позволят на наноуровне контролировать ширину диэлектрической щели в  $C_{20}$  для нужд наноэлектроники и фотовольтаики. Однако, учитывая общий уровень вычислений, эти предсказания нуждаются в дополнительной проверке с помощью современных теоретических подходов или экспериментальных методов.

М. Маслов

1. *ПерсТ* 22, вып. 13/14, с. 4 (2015).

2. F.N.Ajeel, *Chinese J. Phys.* 55, 2134 (2017).

## ГРАФЕН

### Мембраны из оксида графена для фильтрации органических растворителей

Оксид графена (GO) зарекомендовал себя как перспективный материал, на основе которого могут быть изготовлены производительные и селективные мембраны для обессоливания воды, а также её очистки от вирусов, бактерий, макромолекул [1]. Однако для органических растворителей до настоящего времени не существовало мембран, сочетающих высокую проницаемость и отсеивание примесей на уровне нескольких ангстрем. Британские исследователи из Univ. of Manchester (при участии коллег из Китая), впервые продемонстрировали, что из оксида графена можно сделать и такие мембраны [2].



Новая ультратонкая (8 нм) мембрана состоит из нескольких слоев крупных в поперечном размере (10-20 мкм) плоских чешуек GO (рис. 1a). В процессе самосборки чешуйки перекрываются случайным образом, образуя единую мембрану с порами между чешуйками в каждом слое (рис. 1b). При увеличении толщины

*ПерсТ*, 2017, том 24, выпуск 23/24

мембраны последующие слои чешуек закрывают поры.

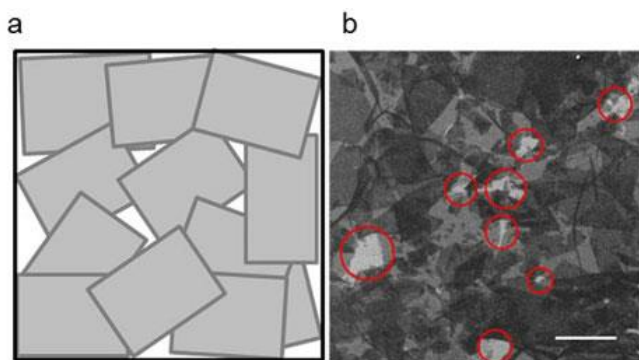


Рис. 1. а - Схема образования слоя при случайном перекрытии чешуек GO; б - SEM изображение мембраны толщиной ~3 нм. Показаны поры (в красных кружках)

Сначала авторы [2] изучили фильтрацию водных растворов, содержащих различные соли и крупные молекулы. В качестве подложки GO мембраны использовали анодированный оксид алюминия. Проницаемость оказалась чрезвычайно высокой, а все ионы радиусом более 4.5 Å были блокированы. Затем исследователи перешли к органическим растворителям (метанол, гексан, ацетон, изопропанол и др.). В качестве примера на рис. 2 приведена фотография метанола с различными красителями до и после фильтрации через мембраны толщиной 8 нм. Красители удалены на 99.9% (точность измерений 0.1%), при этом проницаемость даже выше, чем у новейших полимерных мембран. Дополнительные исследования показали, что GO-мембраны стабильны на воздухе более года, а также стабильны в различных органических растворителях в отличие от полимерных мембран.

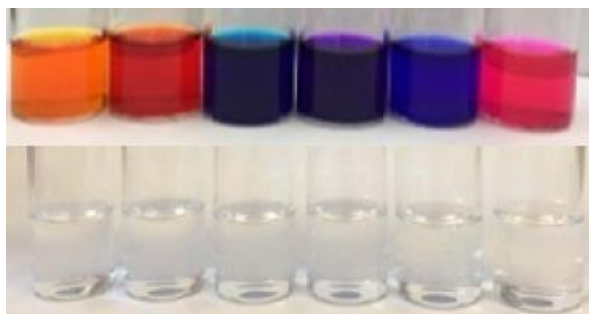


Рис. 2. Фотография метанола, содержащего различные красители, до и после фильтрации через мембраны толщиной 8 нм.

Авторы полагают, что быструю фильтрацию органических растворителей обеспечивает наличие 2D пор между чешуйками в слое и, конечно, малая толщина всей мембраны. Но

*ПерсТ, 2017, том 24, выпуск 23/24*

для очень тонких мембран с малым количеством слоев такие поры станут сквозными, и селективности не будет. Как показали эксперименты, критическая величина ~ 8 нм. Для мембран толщиной  $\geq 8$  нм жидкости продолжают быстро заполнять 2D поры, но не этот процесс является лимитирующим. Для того, чтобы найти пору в следующем слое, молекулам приходится перемещаться в плоскости между слоями на расстояние порядка размера чешуйки. Это, по мнению авторов, и обеспечивает селективность на уровне нескольких ангстрем. В целом полученные результаты расширяют возможности использования мембран на основе оксида графена.

Закончив с серьезными экспериментами, исследователи “просто ради смеха” решили профильтровать виски и коньяк [3]. После мембраны напитки потеряли свой янтарный цвет, сохранив похожий запах. В лаборатории пить запрещено, но, как сообщил R.R. Nair, один из основных создателей мембраны, “мы устроили веселый эксперимент вечером в пятницу” [3].

Ценители виски и коньяка подобные эксперименты вряд ли одобряют ...

*О. Алексеева*

1. [ПерсТ 24, вып. 7/8, с.1 \(2017\).](#)
2. Q.Yang et al., *Nature Mater.* **16**, 1198 (2017).
3. <http://www.manchester.ac.uk/discover/news/graphene-water-filter-turns-whisky-clear/>

## НАНОМАТЕРИАЛЫ

### *Акция: две дифракционные решетки по цене одной*

Метаматериалы в последнее десятилетие находятся на пике интереса, и то и дело появляются интригующие новости с заголовками “плащ-невидимка” или “оптическая черная дыра”. Попутно “опровергаются” классические законы дифракционной и геометрической оптики. Однако многим красивым и необычным эффектам в метаматериалах очень далеко до практического применения. Недавно вышедшая статья американских исследователей в *Physical Review X* [1] не отличается броским заголовком, но предлагает интересную и с фундаментальной, и с практической точек зрения концепцию оптического дифракционного элемента, позволяющего получать принципиально разный оптический отклик на излучение, падающее под разными углами.

В традиционном оптическом элементе, будь то дифракционная решетка или голограмма, отклик определяется геометрическими размерами элементов и длиной волны, но не углом падения. Особенность же данных устройств авторы называют угловым мультиплексированием (angle multiplexing), по аналогии с известным в оптике спектральным мультиплексированием. При спектральном мультиплексировании в системе независимо распространяются и обрабатываются сигналы на разных длинах волн, а при угловом – падающие под разными углами. Правда, в представленной

авторами [1] системе есть только два таких угла, но принципиально можно создать систему, поддерживающую большее количество “несущих углов”.

Учеными из Калтеха смоделированы и выращены поверхности из метаматериала. Метаатомы, представляющие собой U-образные кремниевые элементы, образуют квадратную решетку на подложке. Высота, ширина, глубина и длина ножек элементов может варьироваться, чтобы сформировать нужную дифракционную картину.

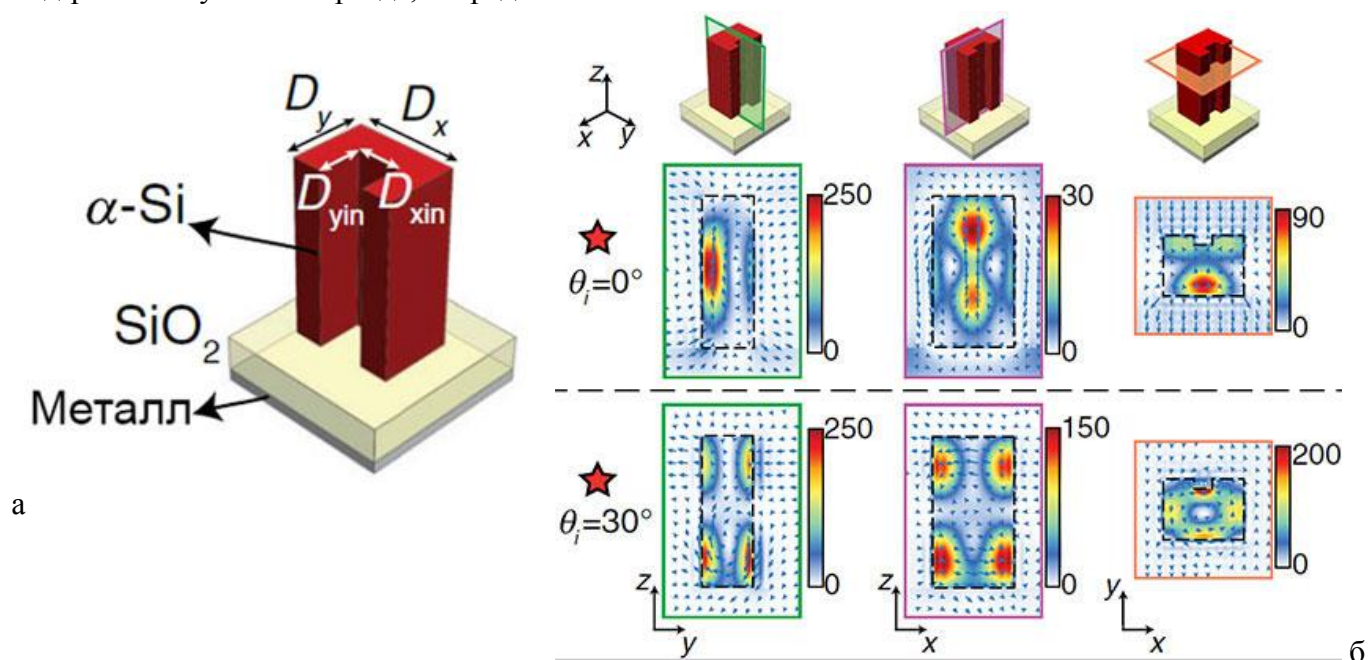


Рис.1. а - Схематическое изображение элемента и варьируемых геометрических параметров.б - Результаты расчета конфигурации полей внутри элемента, возбуждаемых электромагнитной волной, падающей под разными углами: цветом показано распределение плотности энергии электромагнитного поля, синими стрелочками направления электрического поля в плоскости сечения.

В эксперименте геометрические параметры элементов выбраны так, чтобы получать разные дифракционные картины при падении поляризованного света под двумя углами:  $\varphi_1=0^\circ$  и  $\varphi_2=30^\circ$ . Но в принципе могут быть получены любые комбинации  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ , путем подбора геометрических параметров метаатомов  $D_x$ ,  $D_y$ ,  $D_{xin}$ ,  $D_{yin}$  (рис. 1а), и в статье приведены соответствующие расчеты.

На основе таких метаатомов авторы разработали, изготовили и исследовали два оптических прибора:

1) дифракционная решетка, работающая на длине волны  $\lambda=915$  нм, которая для угла падения  $0^\circ$  имеет эффективный период  $31\lambda$ , а для угла падения  $30^\circ$  -  $21\lambda$  (что интересно, здесь не происходит перемешивания

дифракционных порядков – в области  $30^\circ$  отсутствуют высокие порядки от 0-градусной решетки, и наоборот);

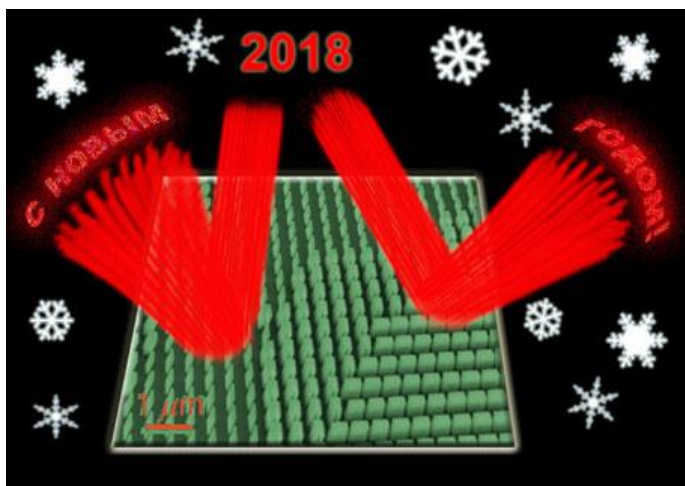
2) голограмма, которая работает на длине волны 915 нм и проецирует логотип Калтеха при падении света под углом  $0^\circ$  и логотип исследовательского центра LMI (Light-Material Interactions in Energy Conversion) при  $30^\circ$ .

Чем же объясняются такие необычные свойства исследуемого метаматериала? Здесь нельзя все списать на сложную геометрию исследуемой системы. Для понимания механизмов необходимо иметь представление о структуре электромагнитных полей, возбуждающихся в метаматериале. Авторами статьи были проведены расчеты электрического поля, возбуждающегося в метаатоме при падении



электромагнитной волны под разными углами. Результаты этих расчетов приведены на рис. 1б, на котором показано распределение плотности энергии электромагнитного поля в наиболее характерных сечениях элемента. Видно, что при падении под углом  $30^\circ$  в системе возбуждаются более высокие пространственные гармоники, то есть для этого угла характеристики системы будут принципиально другими, чем для  $0^\circ$ . Именно из-за этого не происходит смешивания изображений – получается, что система автоматически переключается в другой режим работы при изменении угла падения. Сам процесс перехода в данной работе изучен не был, скорее всего это предмет дальнейших исследований.

В целом, реализованный в рассматриваемой работе принцип может найти много полезных применений для создания компактных оптических устройств. Например, в области аэрокосмического приборостроения вес и габариты устройства являются критическим параметром, и возможность объединения двух устройств в одно без лишних движущихся деталей представляет огромный интерес. А мы нашли еще одно применение данной оптической системы и создали на ее основе новогоднюю открытку для читателей бюллетеня “ПерсТ”.



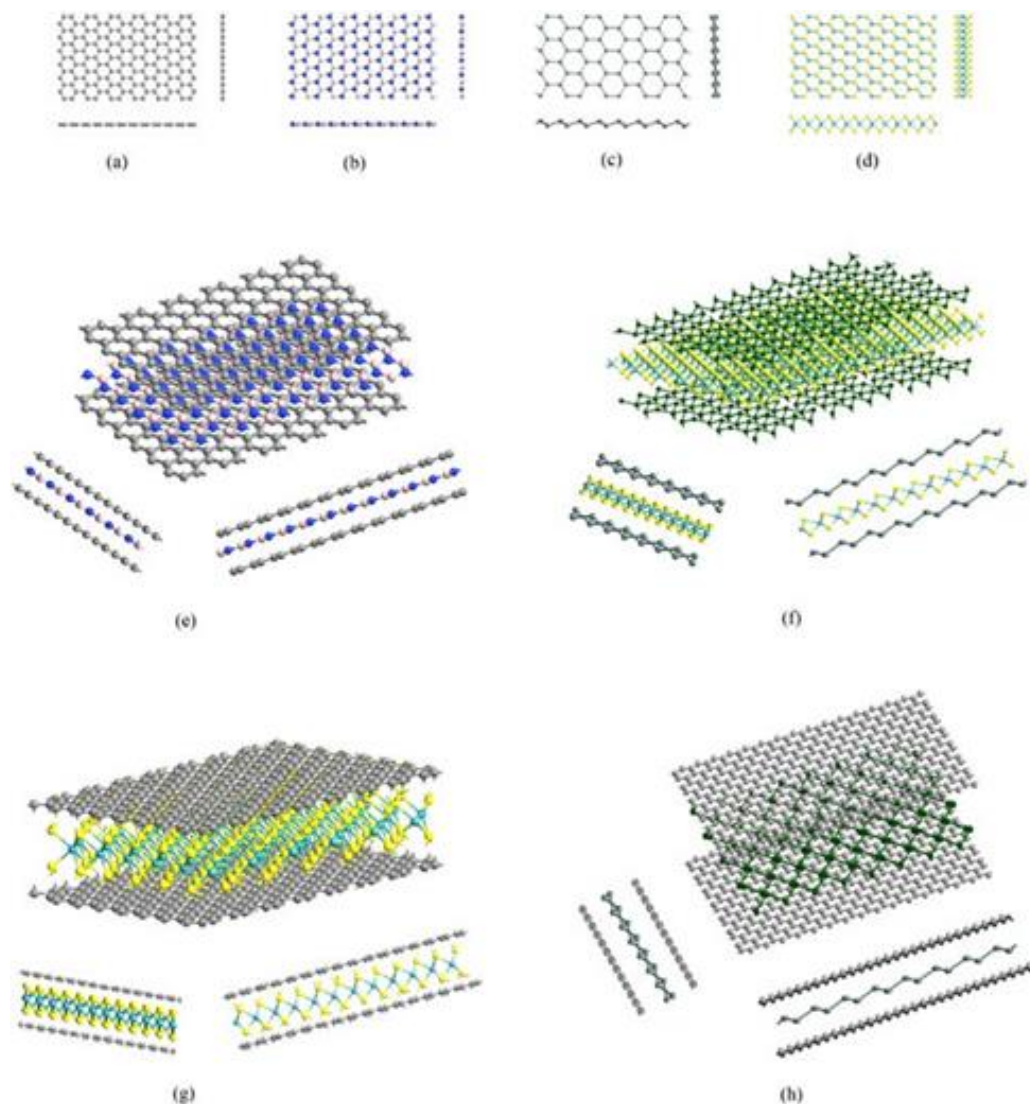
З. Пятакова

1. S.M.Kamali et al., *Phys. Rev. X* 7, 041056 (2017).

### **Механические свойства многослойных наногетероструктур различной морфологии**

В настоящее время двумерные материалы с гексагональной укладкой атомов, такие как графен,  $\text{MoS}_2$ ,  $\text{MoSe}_2$ , станен, силицен и многие др., привлекают серьезное внимание исследователей. На основе этих двумерных структур может быть создано большое многообразие многослойных гетероструктур, скомбинированных различным образом и обладающих уникальными свойствами (см. рис.). Каждый слой таких гетероструктур обладает при этом собственными свойствами, которые могут довольно сильно отличаться от свойств соседних слоев. Например, прочность на разрыв в плоскости графена и  $\text{MoS}_2$  различаются в разы, и, поэтому, создание гетероструктуры с приемлемыми механическими свойствами остается сложной задачей, хотя подобные гетероструктуры при этом имеют отличные электронные, тепловые и химические характеристики. Эффективными методами исследования свойств наноразмерных гетероструктур являются моделирование из первых принципов и метод молекулярной динамики, однако подобные исследования затрудняются отсутствием эффективных эмпирических потенциалов и дают не всегда достоверные результаты. Аналитические модели при этом позволяют описывать лишь свойства 2D гексагональных структур.

В работе [1] предложена аналитическая модель, описывающая механические свойства гетероструктур различной морфологии на основе гексагональных 2D материалов. На примере четырех типичных гетероструктур – графен-нитрид бора, графен- $\text{MoS}_2$ , графен-станен и станен- $\text{MoS}_2$  – предложены и успешно применены формулы расчета модуля Юнга и коэффициента Пуассона в двух направлениях, которые позволяют учитывать количество слоев, межатомное расстояние и другие параметры каждого слоя, общую толщину гетероструктуры. При этом входящие в формулу параметры хорошо известны для всех 2D структур с гексагональной укладкой атомов, либо могут быть легко рассчитаны дополнительными методами. Все полученные в работе результаты хорошо согласуются с экспериментом.



a-d - Примеры однослойных структур с гексагональной решеткой: графен, нитрид бора, силицен и  $\text{MoS}_2$ , соответственно. e-h - Примеры гетероструктур с различной укладкой слоев: графен-нитрид бора, станен- $\text{MoS}_2$ , графен- $\text{MoS}_2$  и графен-станен, соответственно.

Таким образом, предложенная формула расчета модуля Юнга и коэффициента Пуассона может успешно применяться для оценки механических свойств гетероструктур на основе большого многообразия 2D материалов с гексагональной решеткой, учитывая их различные комбинации и структурные особенности.

Ю. Баимова

I. T. Mukhopadhyay et al., *Sci. Rep.* 7, 15818 (2017).

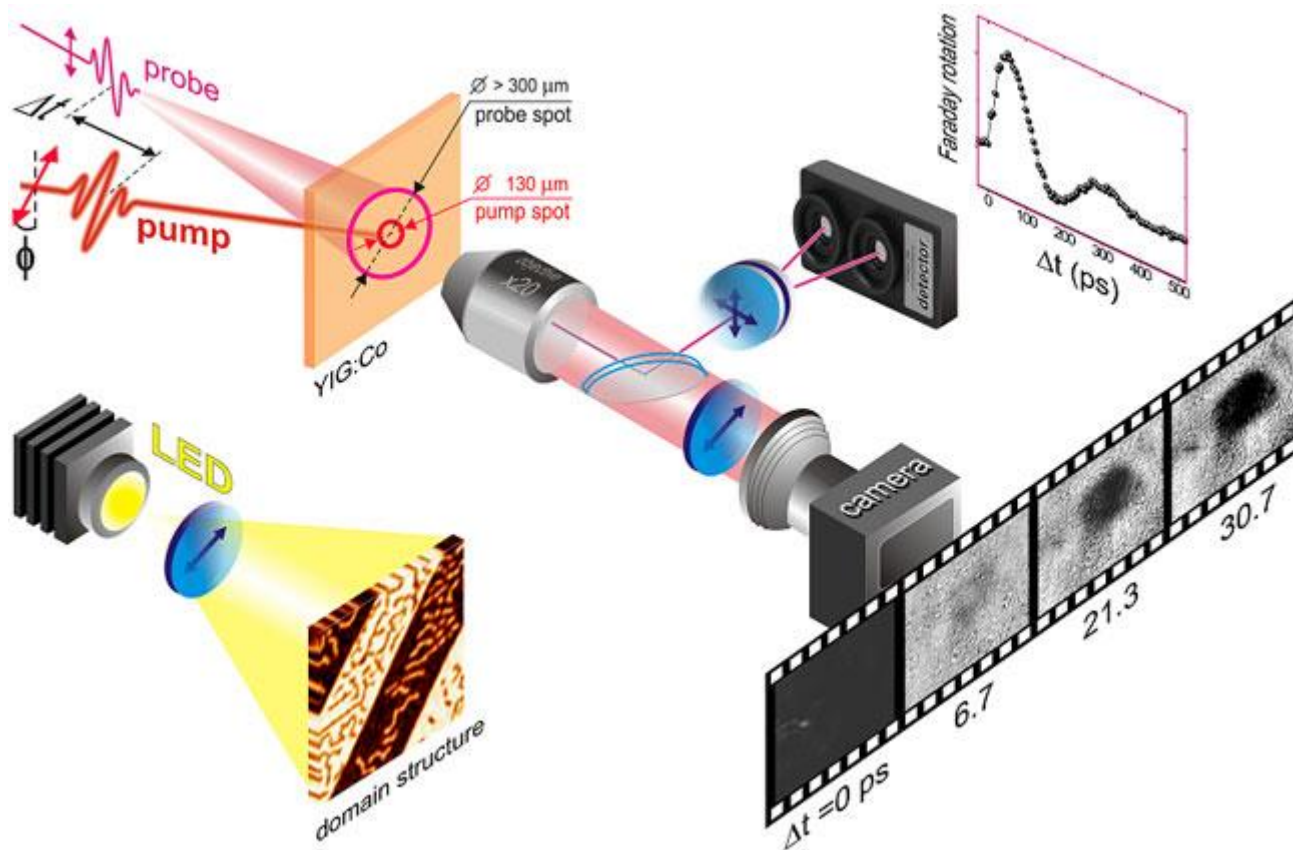
## МАГНИТЫ

### “Стратегия 20/20” оптомагнитной записи

Магнитная запись информации остается самой дешевой среди различных видов компьютерной памяти, если оценивать ее стоимость в расчете на один бит информации. Однако в плане быстродействия и энергосбережения традиционная запись на магнитных дисках отстает от своих полупроводниковых конкурентов: для

записи одного бита информации на жесткий диск требуется около 100 нДж, а в флеш-память – в 10 раз меньше, не говоря уже о том, что механика жесткого диска делает для него принципиально недостижимым быстродействие, характерное для полупроводниковых устройств.

Оптические методы воздействия на намагниченность, которые активно начали изучать лишь в последнее десятилетие с появлением фемтосекундных лазеров, обещают в будущем стать лидирующей технологией как по быстродействию, так и по энергосбережению. Как показано в работе группы проф. А.В. Кимеля [1], фотиндуцированная прецессия спина позволяет переключать магнитные биты с беспрецедентными для компьютерной памяти характеристиками: временем записи, меньшим 20 пикосекунд, и энергией диссипации 20 аттоджоулей.



Наблюдение фотоиндуцированной динамики на масштабе пикосекунд с помощью метода накачки-зондирования [1]: импульс накачки (pump) на длине волны 1.15-1.45 мкм и длительностью 40 фс возбуждает динамику намагниченности, которую наблюдают с помощью 40 фс-импульса зондирования (probe) на длине волны 0.8 мкм, следующего за импульсом накачки с регулируемой задержкой. Записанные домены также визуализируют в белом свете с помощью светодиода (LED).

В отличие от схожего явления в магнитных металлах, недавно рассмотренного в Перст [2], воздействие света на прозрачный материал (железо-иттриевый гранат) не приводит к поглощению тепловой энергии и разрушению магнитного упорядочения. Механизм перемагничивания иной: спиновая прецессия в эффективном поле анизотропии, наведенной световым излучением. Время жизни такой наведенной анизотропии исчисляется несколькими десятками пикосекунд. Если подобрать период прецессии спина почти в четыре раза больший, то за время существования наведенной анизотропии намагниченность успеет повернуться на угол немногим более  $90^\circ$ , и переключение намагниченности в новое положение станет неизбежным, что и наблюдается в эксперименте.

Больше вопросов вызывает оценка энергии, рассеянной при переключении. Интенсивность света, необходимая для наведения анизотропии составляет  $30 \text{ мДж/см}^2$ , что при масштабировании на объем бита в жестком диске  $20 \times 20 \times 10 \text{ нм}^3$  и с учетом малого поглощения в среде как

раз дает заветные 20 аДж. Однако нельзя не отметить лукавства этих цифр: фокусировка световой энергии на таких масштабах средствами классической оптики невозможна – придется прибегнуть либо к методам сканирующей зондовой микроскопии ближнего поля, либо к использованию плазмонных концентраторов. И то и другое неизбежно влечет дополнительные потери энергии, на многие порядки превышающие номинальные 20 аДж. Поэтому результат в [1], конечно, следует рассматривать не как целевой показатель на ближайшее десятилетие, а, скорее, как путеводную звезду современных технологий записи.

*А. Пятаков*

1. *A. Stupakiewicz et al., Nature 542, 71 (2017).*
2. [Перст 24, вып. 21/22, с.5 \(2017\).](#)

## КОНФЕРЕНЦИИ

### *International School-Workshop on Actual Problems of Condensed Matter Physics (IWCMP-2018), April 06-10, 2018, Norilsk, Krasnoyarsk Region*

Kirensky Institute of Physics and Research Institute of Agriculture and Ecology of the Arctic-Branch of the Federal Research Center "Krasnoyarsk Science Center" Siberian Branch of the Russian Academy of Science, and Siberian Federal University, Krasnoyarsk, announce that International School-Workshop on actual problems of Condensed Matter Physics (IWCMP-2018) will be organized for the active exchange of new ideas and information on the latest results obtained in the field of advanced condensed matter physics with special focus to magnetic phenomena and for the establishment of direct links between scientists and students from various countries throughout the world.

#### *Subject categories:*

- Magnetic nanoparticles
- Magnetic nanostructures for spintronics
- Magnetic nanomaterials for biology and medicine
- Magnetic properties in optically excited states
- Magnetic properties of strongly correlated systems

#### *Important dates:*

Deadline for abstract submission **February 1, 2018**

#### **Contacts:**

Kirensky Institute of Physics, Krasnoyarsk, 660036, Russia

Tel. +7-3912-43-07-63, +7-3912-43-26-35, Fax +7-3912 43-89-23

E-mail: [mainoffice@iph.krasn.ru](mailto:mainoffice@iph.krasn.ru),  
[sgo@iph.krasn.ru](mailto:sgo@iph.krasn.ru)

## *ДОРОГИЕ НАШИ ЧИТАТЕЛИ!*



*Поздравляем Вас и ваших близких с наступающим Новым годом и Рождеством!*

*Пусть 2018 год станет для всех мирным, светлым, принесет стабильность и уверенность в завтрашнем дне!*

*Волшебная ночь как чудесная сказка:  
Сюрпризы, подарки, сиянье свечей!  
Пусть праздник придет карнавалом прекрасным  
И ждет впереди много радостных дней!  
Пусть в доме всегда будет ясной погода,  
От добрых улыбок на сердце тепло!  
Успехов! Счастливого Нового года!  
И чтоб обязательно в жизни везло!*

*Редакция и авторы ПерсТа*

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

Главный редактор: И.Чугуева, e-mail: [ichugueva@yandex.ru](mailto:ichugueva@yandex.ru)

Научные редакторы К.Кугель, Ю.Метлин

В подготовке выпуска принимали участие О.Алексеева, Ю.Баимова, М.Маслов, А.Пятаков, З.Пятакова

Выпускающий редактор: И.Фурлетова

Адрес редакции: 119296 Москва, Ленинский проспект, 64<sup>а</sup>