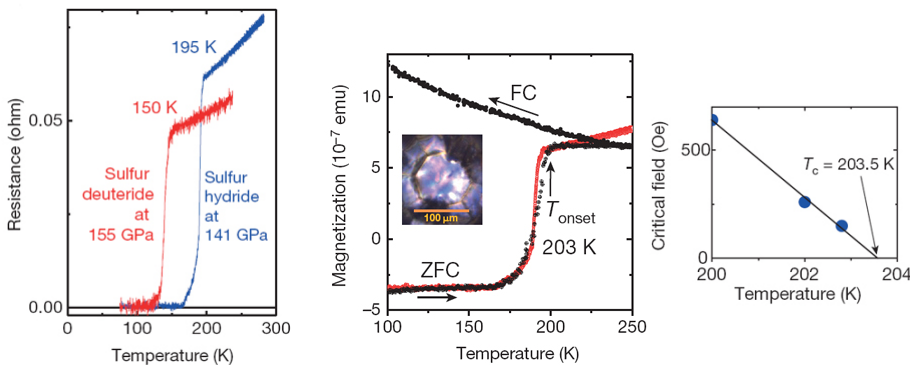


В этом выпуске:

СВЕРХПРОВОДНИКИ

Обычная сверхпроводимость при 203 К

После того как в 1911 г. Камерлинг-Оннес открыл сверхпроводимость ртути при $T_c \approx 4.2$ К, начался поиск сверхпроводников с более высокой T_c . Но к моменту создания в 1957 г. микроскопической теории БКШ, объяснившей эффект сверхпроводимости спариванием электронов за счет взаимодействия с фононами и бозеконденсацией этих электронных пар, величину T_c удалось поднять лишь до ≈ 10 К, и на этом дело застопорилось. Широкое распространение получила точка зрения, что фононный механизм в принципе не может дать T_c выше примерно 30 К из-за неустойчивости кристаллической решетки при сильном электрон-фононном взаимодействии. Не все были с этим согласны. Так, например, Гинзбург и Ашкрофт предложили поискать высокотемпературную сверхпроводимость (ВТСП) в металлическом водороде. Однако не получилось. А в 1986 г. были открыты купратные ВТСП с максимальной $T_c = 133$ К. Механизм спаривания электронов в купратах, по видимому, нефононный, за что их прозвали “необычными” сверхпроводниками. Еще один класс необычных ВТСП – пниктидов и селенидов железа – открыт в 2008 г. Хотя их T_c заметно меньше, чем у купратов, но больше максимума для “обычных” сверхпроводников с фононным механизмом спаривания (40 К в дибориде магния, 2001 г.). В итоге внимание искателей высоких T_c практически полностью переключилось с обычных сверхпроводников на необычные.



История, как известно, развивается по спирали. В области сверхпроводимости ее очередной виток пришелся на 2015 год: в работе [1] сообщается об обычной сверхпроводимости сероводорода при рекордной $T_c = 203$ К (хотя и при огромном давлении $P \approx 90$ ГПа). Вообще-то первая информация об этих результатах появилась еще год назад, но была представлена в форме электронного препринта, потому и отношение к ней было соответствующее – скептически-недоверчивое. Теперь же она украшает страницы престижного журнала “Nature”, славящегося не только своим огромным импакт-фактором, но и доходящей иногда до идиотизма придирчивостью рецензентов. Поскольку использованный в качестве исходного материала сероводород (H_2S) при

И далее ...

КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

- 2 Универсальная линейная оптика

ГРАФЕН

Свет из графена

Синтез графена методом электрохимической эксфолиации

- 3 Электроды на основе графена для литий-ионных батарей

ПЕРВЫЕ СООБЩЕНИЯ

- 4 Найден полуметалл Вейля

НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ, НАОЭЛЕКТРОНИКА

- 5 Наноструктуры в природе. Разноцветные жуки

МУЛЬТИФЕРРОИКИ

- 7 Сверхпроводящее “решето” и магнитоэлектрический эффект

НАНОМАТЕРИАЛЫ

- 8 Новое поколение азотных олигомеров

сильном сжатии разлагается с выделением элементарной серы, авторы предполагают, что за сверхпроводимость, по-видимому, ответственно соединение H_3S (расчеты *ab initio* дают для него $T_c = 190-200$ К при $P = 200$ ГПа). Сверхпроводящий переход в [1] наблюдали как по сопротивлению, так и по намагниченности. Увеличение магнитного поля приводило к уменьшению T_c . При замене водорода на дейтерий величина T_c существенно понижалась. Этот так называемый изотопический эффект является прямым указанием на фононный механизм спаривания электронов. Таким образом, обычные сверхпроводники вернули себе первенство. Чем ответят их необычные сродственники?

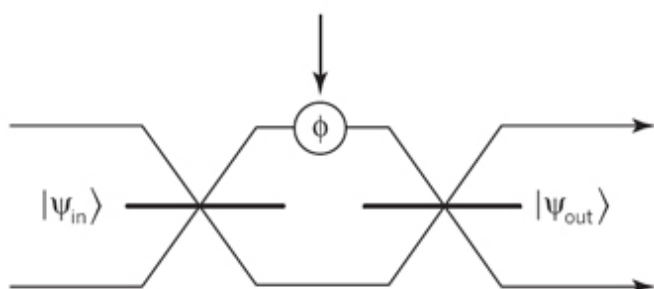
По материалам заметки
 “Extraordinarily conventional”,
 I.I.Mazin, *Nature* **525**, 40 (2015).

I. A.P. Drozdov et al., *Nature* **525**, 73 (2015).

КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

Универсальная линейная оптика

После того как в начале прошлого века были сформулированы основные принципы квантовой механики, стало ясно, что необычайная сложность квантовых систем делает расчеты их характеристик трудноосуществимыми. Позднее Р. Фейнман первым осознал, что “квантовую сложность” можно использовать себе во благо, для изготовления компьютеров нового типа, функционирующих на основе тех же самых квантовомеханических принципов и позволяющих экспоненциально повысить эффективность классических алгоритмов. Такие компьютеры стали называть квантовыми. На стыке фундаментальной физики и информатики возникло новое направление – квантовая информатика и квантовые вычисления.



Основной квантовый блок оптического процессора. Сдвиг фазы входного состояния.

В принципе основу квантового компьютера может составить любая достаточно хорошо контролируемая квантовая система. На практике же удобнее иметь дело с оптикой: фотонные состояния сравнительно легко приготовить, ими можно управлять и проводить измерения. Кроме того, фотоны долго сохраняют когерентность. В работе [1] (Великобритания, Япония) продемонстрирована шестимодовая перепрограммируемая оптическая цепь из волново-

дов. Она включает 15 интерферометров, 12 однофотонных детекторов и позволяет реализовать все линейные оптические протоколы. Точность операций близка к единице. Фактически это – прообраз масштабируемого оптического квантового компьютера.

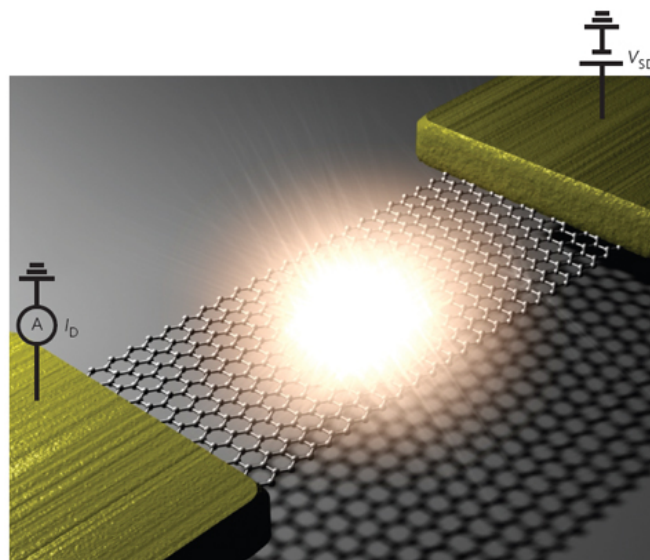
По материалам заметки
 “The on-ramp to the all-optical
 quantum information processing highway”,
 P.P.Rohde, J.P.Dowling, *Science* **349**, 696 (2015).

I. J.Carolan et al., *Science* **349**, 711 (2015).

ГРАФЕН

Свет из графена

Графен и некоторые другие квазидвумерные материалы являются перспективными кандидатами для использования в атомарно тонких, гибких и прозрачных оптоэлектронных устройствах. А недавно пришло сообщение [1] (Ю.Корея, США, Великобритания) об испускании “подвешенным” (suspended) графеном яркого света в видимом диапазоне.



Этот эффект не связан с электрон-дырочной рекомбинацией, а имеет тепловую природу и возникает при токовом нагреве графена. В электрическом поле ≈ 0.4 В/мкм горячие электроны ($T \approx 2800$ К) локализуются в центре образца, что усиливает яркость теплового излучения примерно в 1000 раз. Масштабируемость таких эмиттеров сулит им широкое практическое применение.

I. Y.D.Kim et al., *Nature Nanotech.* **10**, 676 (2015).

Синтез графена методом электрохимической эксфолиации

Разнообразие физико-химических свойств графена позволяет надеяться на развитие прикладных направлений, основанных на использовании этого замечательного материала. Подобные надежды стимулируют исследования, направленные на разработку новых эффективных методов синтеза графена в макроскопических количествах. Недавно к десятку хорошо известных и уже детально описанных в

Перст, 2015, том 22, выпуск 15/16

литературе методов прибавился еще один, получивший название “электрохимическая эксфолиация”. Этот метод основан на использовании электрохимических реакций, происходящих в пространстве между слоями графита, заполненном электролитом. Выделение газов, образующихся в результате протекания таких реакций, приводит к расщеплению (эксфолиации) графеновых листов, которые затем окончательно разделяются с помощью поверхностно-активных реагентов.

В работе [1], опубликованной недавно группой ученых из National Cheng Kung Univ. (Тайвань) исследована возможность функционализации графеновых листов, полученных методом электрохимической эксфолиации. В качестве исходного материала использовали естественный графит в виде мелкодисперсного порошка. Порошок смешивали с поливинилиденфторидом (PVDF), играющим роль связующего материала и 1-метил-2-пирролидоном (NMP), который служил в качестве растворителя. Массовое соотношение компонентов в полученной пасте составляло: графит (38%), PVD (2%), NMP (60%). Эту пасту наносили на лист вольфрамовой фольги площадью $\sim 1 \text{ cm}^2$.

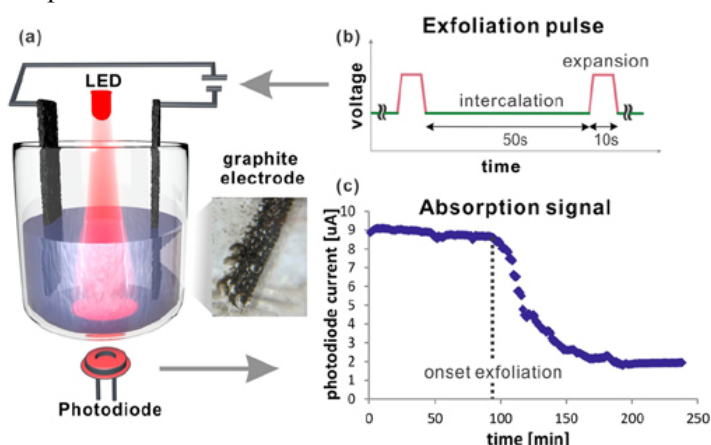


Рис. 1. а - Схема эксперимента по исследованию динамики эксфолиации; на вставке приведена фотография графитового электрода в процессе эксфолиации; б - напряжение, приложенное к образцу в процессе эксфолиации (минимум = 2.5 В, максимум = 5 В); с - динамика поглощения оптического излучения образцом, определяемая динамикой процесса эксфолиации.

Процедура электрохимической эксфолиации графена содержит две стадии, первая из которых (IP) соответствует интеркаляции ионов в пространство между графеновыми листами, а вторая (EP) включает расслоение материала в результате протекания электрохимической реакции. С целью исследования особенностей процесса электрохимической эксфолиации на протяжении каждой из перечисленных стадий к образцу прикладывали импульсное напряжение с частотой повторения 1 мин^{-1} . При этом продолжительность импульса на стадии IP составляла 50 с, а на стадии EP – 10 с. Динамику процесса эксфолиации изучали на основании данных по поглощению оптического излучения исследуемым

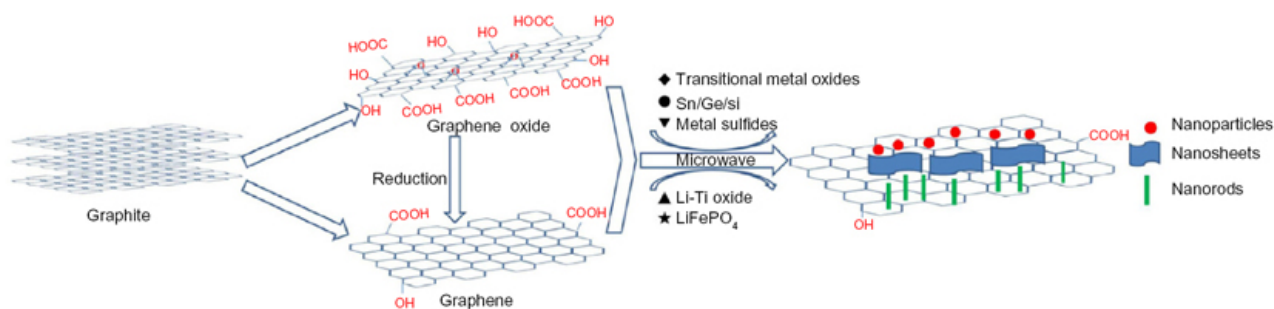
образцом, согласно схеме, показанной на рис. 1а. Как видно из рисунка 1с, начало эксфолиации регистрируется по резкому увеличению поглощения света, которое сопровождается снижением уровня сигнала фотодиода. Результаты измерений указывают на сильную зависимость начала эксфолиации от амплитуды приложенного EP напряжения. Повышение амплитуды способствует сокращению времени, требуемого для эксфолиации.

А. Елецкий

I. M. Hofmann et al., Nanotechnology 26, 335607 (2015).

Электроды на основе графена для литий-ионных батарей

Литий-ионные батареи (ЛИБ) являются одним из наиболее распространенных компактных накопителей энергии, что обусловлено присущей им высокой плотностью энергии, отсутствием эффектов памяти и большим числом циклов зарядки-разрядки. Важным элементом ЛИБ являются электроды, материал которых должен сочетать в себе достаточно высокую проводимость с максимально высокой удельной поверхностью. Графит, традиционно используемый в коммерческих устройствах, уже не удовлетворяет постоянно растущим требованиям к таким материалам, так что необходима разработка новых материалов для электродов. В этом отношении внимание исследователей привлекает графен, сочетающий рекордную максимально достижимую удельную поверхность ($2600 \text{ м}^2/\text{г}$) с хорошими электропроводностью и механической гибкостью при высокой прочности. Согласно недавним сообщениям, обратимая энергетическая емкость анода из графена достигает величин $\sim 1000 \text{ мА}\cdot\text{час}/\text{г}$, однако при этом число циклов зарядки-разрядки остается весьма невысоким, что связано с агломерацией графеновых листов в процессах зарядки-разрядки. Преодоление этой проблемы стало возможным в результате использования при синтезе графена СВЧ излучения. Детальное описание этого подхода и полученные при этом результаты содержатся в недавней работе [1], выполненной в Shanghai Univ. (Китай). Схема, иллюстрирующая использование СВЧ излучения для получения графена из графита, представлена на рисунке. Согласно этой схеме, СВЧ излучение используется для восстановления оксида графена, полученного стандартным методом Хаммера в результате окисления графита. В этом случае роль излучения сводится к локальному нагреву листов оксида графена, приводящему к термическому отделению радикалов $\text{OH}\cdot$, $\text{COOH}\cdot$ и др. Добавление в раствор, содержащий листы оксида графена, оксидов и других соединений металлов, позволяет получать трехмерные структуры на основе графена, не склонные к агрегации и обладающие большой величиной удельной поверхности.



Схематическое представление процесса синтеза графена и структур на его основе с помощью СВЧ излучения.

Преимущества использования СВЧ излучения при синтезе графена (по сравнению с традиционной процедурой химического восстановления графена) связаны с относительной простотой и краткостью процедуры синтеза, с отсутствием необходимости применения дорогостоящих химических реагентов, с многократным увеличением размера синтезируемых графеновых листов и с более высоким качеством структуры синтезируемых образцов графена.

Наиболее привлекательным с точки зрения повышения операционных характеристик ЛИБ представляется использование графена в качестве каркаса в электродах на основе соединений переходных металлов (кобальт, железо, медь). При получении материала электрода с помощью СВЧ излучения (рис.) образуется трехмерная структура, в которой слои графена отделены друг от друга наночастицами оксида металла размером 60 – 100 нм. Подобная структура весьма благоприятна как с точки зрения повышения зарядовой емкости материала электрода, так и с точки зрения увеличения числа циклов зарядки-разрядки. Так, при использовании сочетания листов графена с частицами оксида Co_3O_4 была достигнута емкость 1235 мА час/г, которая после 30 циклов зарядки-разрядки снизилась до 1065 мА час/г.

А. Елецкий

1. *W.Sun, H.Li, Y.Wang, Reports in Electrochemistry 5, 1 (2015).*

ПЕРВЫЕ СООБЩЕНИЯ

Найден полуметалл Вейля

В квантовой физике частицы со спином 1/2 описываются уравнением Дирака. В 1929 г. Герман Вейль (Hermann Weyl) показал, что уравнение Дирака для безмассовых фермионов можно представить в виде системы двух уравнений, решения которых различаются спиральностью (проекцией спина частицы на направление ее движения). До недавнего времени эти вейлевские фермионы ни разу не наблюдались (в качестве кандидатов рассматривались нейтрино, но у них была обнаружена масса, пусть и очень маленькая, $\sim 10^{-6}$ массы электрона).

Теория предсказывает, что вейлевские фермионы могут существовать (как квазичастицы) в так назы-

ваемых вейлевских полуметаллах – кристаллах, проводимость которых определяется топологическими свойствами волновых функций в объеме образца. При этом, в отличие от топологических диэлектриков, валентная зона и зона проводимости касаются друг друга в вейлевских точках, а спин-поляризованные поверхностные состояния образуют фермиевские дуги, соединяющие два объемных вейлевских узла противоположной спиральности (см. рис.).

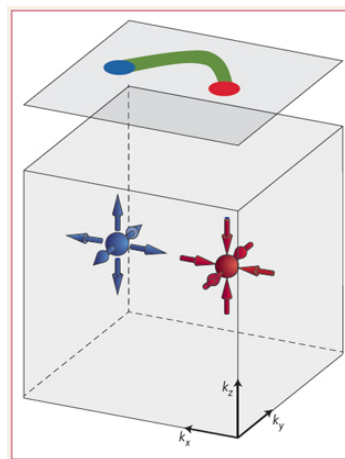


Иллюстрация особенностей зонной структуры вейлевского полуметалла. Красная и синяя сферы – вейлевские точки. Зеленым цветом показана фермиевская дуга.

В работе [1] методами ультрафиолетовой и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии с угловым разрешением доказано, что монопниктид TaAs обладает всеми перечисленными особенностями электронной структуры, то есть является вейлевским полуметаллом. Ранее сообщалось, что свойствами вейлевского полуметалла обладают и такие соединения, как Cd_3As_2 [2] и Na_3Bi [3]. Можно надеяться, что вслед за этими первыми ласточками прилетят и другие. Необычные транспортные и оптические свойства вейлевских полуметаллов вне всякого сомнения найдут применение в электронике, оптоэлектронике и, возможно, квантовой информатике.

По материалам заметки "Massless yet real",

D.Ciudad, Nature Mater. 14, 863 (2015).

1. *S.-Y.Xu et al., Science 349, 613 (2015).*

ПерГТ, 2015, том 22, выпуск 17

2. *M. Neupane et al., Nature Commun. 5, 3786 (2013).*
3. *Z.K. Liu et al., Science 343, 864 (2014).*

НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ, НАНОЭЛЕКТРОНИКА

Наноструктуры в природе.

Разноцветные жуки

Разнообразная окраска живых организмов – насекомых, птиц, хамелеонов – обусловлена как наличием пигментов, селективно поглощающих свет определённой длины волны, так и биофотонными наноструктурами (см. ПерсТ [1,2]). У наземных членистоногих, в особенности насекомых, биофотонными наноструктурами часто являются тонкие пленки или дифракционные решетки в жёстком наружном покрове – хитиновой кутикуле. Однако многие жуки, пауки, пчёлы, некоторые бабочки имеют щетинки или чешуйки различной окраски на крыльях, брюшках, ножках. Эти структурные цвета обусловлены трёхмерными биофотонными наноструктурами, состоящими из полисахарида хитина, кутикулярных белков и воздуха [3]. Количество исследований этих структур растёт с каждым годом, но точные данные получены лишь для нескольких видов членистоногих. Разобраться в причинах разнообразия окраски насекомых ученые из Сингапура, Австралии, США и Великобритании решили с помощью метода малоуглового рассеяния рентгеновского синхротронного излучения SAXS, дополненного электронной микроскопией [4]. Авторы изучили 140 образцов разного цвета, принадлежащих жукам (98 видов), пчёлам (3 вида), паукам (6 видов), одной бабочке и одной мухе-жужжале. Насекомые были предоставлены музеями США, Австралии и Великобритании. Некоторые из объектов исследований показаны на рис. 1.



Рис. 1. Некоторые объекты исследований [4]. Слева направо. Верхний ряд: жуки *Hopila coerulea* (Drury 1773), *Eupholus sp.*, *Entiminae: Celeuthetini*, *Pachyrrhynchus reticulatus* (Waterhouse 1841), *Phosphorus jansonii* (Chevrat 1861), *Coptomma mirabilis* (Fabricius 1775). Нижний ряд: паук-скакунчик *Arachnida: Salticidae*, бабочка *Lycaena kasyapa* (Moore 1865), пчела *Thyreus nitidulus* (Fabricius 1804).

Неудивительно, что красота жуков во все времена восхищала поэтов. “Живыми сапфирами” называл

их Набоков и так писал в своем стихотворении “Жук”:

“Я тронул выпуклый, алеющий огонь,
огонь цветка, и жук священный,
тяжелый, гладкий жук мне выпал на ладонь,
казалось: камень драгоценный”

Однако авторов [4] больше интересовала не внешняя красота, а красота биофотонных наноструктур. С помощью SAXS и электронной микроскопии раньше им уже удалось разгадать секреты синей птицы (см. ПерсТ, [2]). Они показали, что синяя, голубая, бирюзовая окраски обусловлены 3D аморфными биофотонными наноструктурами, находящимися в центральной части боронок, отходящих от стержня пера. Измерения SAXS позволили получить количественную информацию о двух основных типах биофотонных наноструктур (переплетение палочек β -кератина и воздушных каналов и квазиупорядоченная плотная упаковка заполненных воздухом сфер со стенками из кератина). Но какое же разнообразие поликристаллических, квазиупорядоченных, аморфных фотонных наноструктур обнаружили исследователи у жуков и некоторых других насекомых!

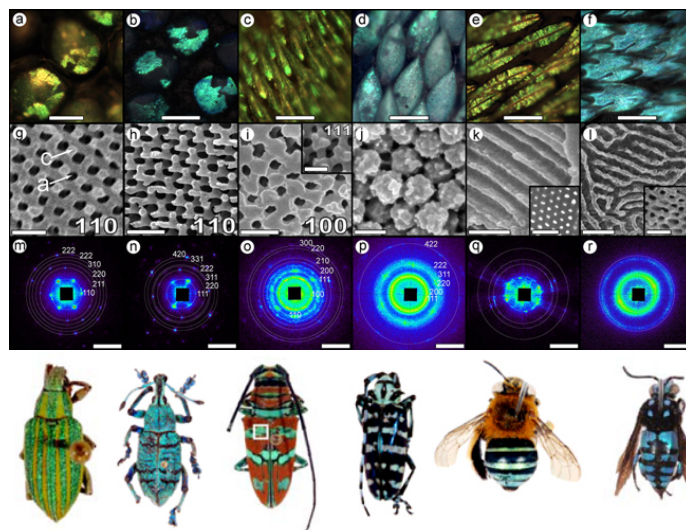


Рис. 2. Образцы типичных бионаноструктур членистоногих. (a-f) – Оптическая микроскопия, (g-l) – электронная микроскопия, (m-r) – 2D SAXS. (a,g,m) – Жук-долгоносик *Platyaspistes venustus*, простой гироид, (b,h,n) – жук-долгоносик *Eupholus quintaenia*, структура алмаза + гранецентрированная орторомбическая, (c,i,o) – жук-усач (дровосек) *Sternotomis pulchra*, простая кубическая, (d,j,p) – жук-усач (дровосек) *Anoplophora graafi*, квазиупорядоченная + структура опала, (e,k,q) – пчела *Amegilla cingulata*, инверсная 2D гексагональная колончатая структура, (f,l,r) – пчела *Thyreus nitidulus*, инверсная 2D извилистая колончатая структура.

Шкала: 25 мкм (a), 50 мкм (b-f), 500 нм (g,h), 250 нм (i, врезка – 100 нм), 100 нм (j), 250 нм (k, врезка – 1 мкм), 600 нм (l, врезка – 500 нм), 0.05 нм (m-r).

На рис. g : c - хитин; a - воздушные поры.

Это разупорядоченные губчатые, перфорированные ламеллярные, инверсные колончатые (воздушные

поры в хитине) структуры, плотноупакованные хитиновые сферы, гироиды* и др. Даже у одной особи цвет разных участков покровных щетинок или чешуек обусловлен разными наноструктурами. Выборочные результаты [4] вместе с изображениями соответствующих насекомых представлены на рис. 2.

Исследователи обратили внимание на то, что такие же структуры характерны для амфифильных макромолекул – блок-сополимеров, поверхностно-активных соединений, лиотропных липидных систем. Известно, что липиды в водной среде способны самоорганизоваться в различные фазы, включая сферические образования, ламеллярные (слоистые) структуры, структуры из цилиндрических мицелл с гексагональной симметрией, гироидные фазы (см. рис. 3). Однако их размеры ≤ 20 нм, то есть существенно меньше, чем у биофотонных наноструктур с параметрами решеток 50-500 нм.

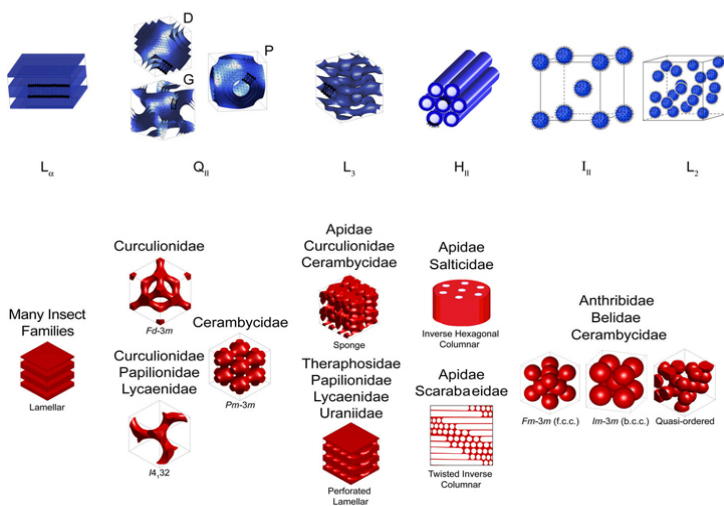


Рис. 3. Вверху – изображения лиотропных систем липиды-вода. Показаны ламеллярные (L) и перфорированные ламеллярные (L₃) фазы, непрерывные (Q), включая гироидные (G), инверсные колончатые (H), сферические упорядоченные (I) и аморфные (L₂).

Внизу – разнообразные фотонные наноструктуры членистоногих (ламеллярные, гироидные, инверсные колончатые, состоящие из сфер).

Русские названия насекомых: Curculionidae – жуки долгоносики (слоники), Cerambycidae – жуки-усачи (дровосеки), Papilionidae – бабочки парусники, Lycaenidae – бабочки голубянки, Apidae – пчёлы, Theraphosidae – пауки-птицееды, Uraniidae – бабочки Урании, Salticidae – пауки-скакуны, Scarabaeidae – жуки пластинчатоусые, Anthribidae – жуки ложнослоники, Belidae – белиды (жесткокрылые насекомые).

Такое сходство – не простая структурная или геометрическая аналогия. Авторы [4] полагают, что возникновение и развитие различных фотонных наноструктур у насекомых происходило именно на базе липидных мембран. Возможны два механизма. По первому из них самосборка начинается на одном бислое липидов в изгибе плазматической мембраны, разделяющей внешнюю среду и содержимое клетки (рис. 4, внизу слева). Образуются квазиупо-

рядоченные губчатые, перфорированные ламеллярные, инверсные колончатые структуры, квазиупорядоченные и упорядоченные структуры из сфер. По второму механизму самосборка происходит на шаблоне, состоящем из двух параллельных изогнутых бислоев клеточной и внутриклеточной мембраны гладкой эндоплазматической сети (ЭПС). Мембраны разделяют внешнюю среду, внутриклеточную среду и среду внутри ЭПС (рис. 4, вверху слева). Образуются гироидные и алмазные структуры. В обоих случаях на шаблонах идет самосборка лиотропных прекурсоров на клеточном уровне, затем во внеклеточное пространство откладывается образующийся хитин, и после высыхания и отмирания ненужных клеток формируется окончательная наноструктура. Возможно, разнообразие структур обусловлено кривизной мембран, которая зависит от формы, молекулярного веса и других свойств, связанных с ней белков. Авторы [4] проиллюстрировали предложенный сценарий развития фотонных наноструктур, проведя аналогию с микрофазным разделением блок-сополимеров (рис. 4). Как известно, в результате такого разделения могут образоваться структуры с различной морфологией, например, сферические и цилиндрические мицеллы, ламеллярные и биконтинуальные структуры. Целью будущих экспериментов, по мнению исследователей [4], должен быть поиск белков, определяющих и контролирующих кривизну мембраны, необходимую для формирования определенных структур.

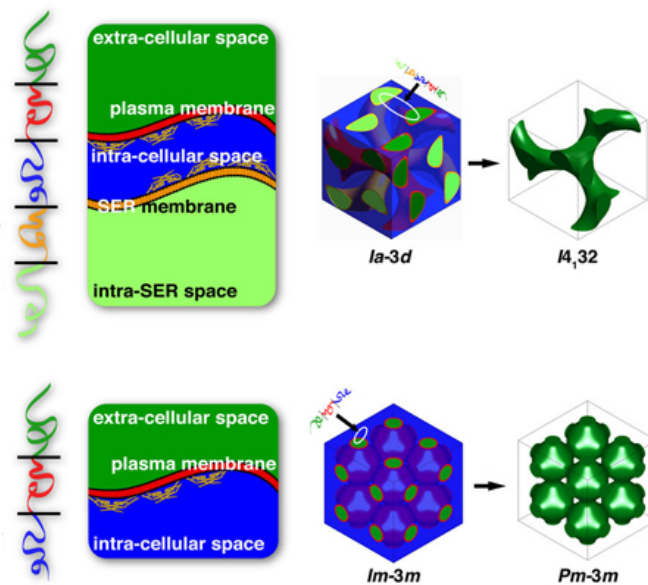


Рис. 4. Два механизма самосборки фотонных наноструктур по аналогии с микрофазным разделением в блок-сополимерах

Результаты изучения разнообразных фотонных наноструктур насекомых важны не только для понимания механизмов их возникновения. Они интересны для разработки новых сенсоров и приборов фотоники. Дальнейшие исследования также помогут создавать из блок-сополимеров фотонные кристал-

лы и метаматериалы с гироидной структурой. Их оптические свойства чрезвычайно интересны, но некоторые лишь предсказаны теоретически [6], т.к. синтез таких материалов путем самосборки в настоящее время невозможен.

**Гироид (gyroid) – непрерывная (без самопересечений) бесконечно повторяющаяся в трёх измерениях структура с минимальной поверхностью. Впервые гироиды были описаны в 1970 г американским ученым Аланом Шоэном (Alan H. Schoen), когда он работал в NASA. (A.H. Schoen, “Infinite periodic minimal surfaces without self-intersections.” Technical Notes TN D-5541, NASA, 1970).*

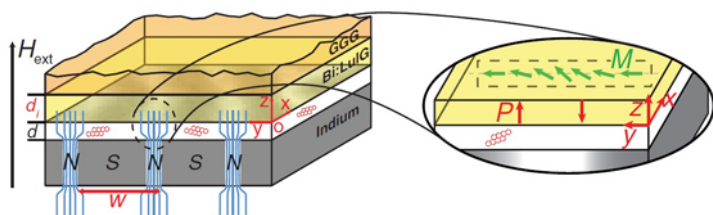
О.Алексеева

1. [ПерсТ 19, вып. 24, с.3 \(2012\).](#)
2. [ПерсТ 19, вып. 21, с.3 \(2012\).](#)
3. A.E.Seago et al., *J. R. Soc. Interface* **6**, S165 (2009).
4. V.Saranathan et al., *Nano Lett.* **15** (6), 3735 (2015).
5. J.A.Dolan et al., *Adv. Optical Mater.* **3**, 12 (2015).

МУЛЬТИФЕРРОИКИ

Сверхпроводящее “решето” и магнитоэлектрический эффект

Работа [1] группы из Univ. Bordeaux (Франция) с участием исследователей из России может служить примером того, как исследование в одной области физики неожиданно “выстреливает” в другой, а “паразитный” эффект оказывается не менее интересным чем тот, который искали вначале.



Одномолекулярная спектроскопия электрического поля, порождаемого магнитоэлектрической поляризацией P в пленке феррита-граната (Bi:LuIG), напыленной на подложке из гадолиний-галлиевого граната (GGG). Нижний слой индия, содержащий сверхпроводящую (S) и нормальную (N) фазы создает сильно неоднородное магнитное поле, необходимое для создания неоднородности в распределении намагниченности M [1].

Более тридцати лет назад в работе [2] было предсказано, что магнитные доменные границы, будучи неоднородностями в распределении намагниченности, должны локально понижать симметрию кристалла и наводить в месте своего расположения электрическую поляризацию. Несколько десятилетий эта идея оставалась не востребованной, пока в 2007 г. после целенаправленных поисков не было обнаружено в пленках ферритов-гранатов электро-

статическое притяжение/отталкивание доменных границ к заряженному зонду [3]. Однако впоследствии появились сомнения относительно природы наблюдаемого эффекта. Так, в публикации [4] авторы выдвигают альтернативную гипотезу, объясняющую все особенности взаимодействия заряженной иглы и доменных границ: вблизи острия зонда электрическое поле сильно неоднородно, что может приводить к локальному изменению магнитной анизотропии материала и, как следствие, к перемещению доменной границы.

Для того чтобы отличить один механизм от другого, нужна кардинально иная схема эксперимента, и здесь помощь пришла оттуда, откуда не ждали – из физики сверхпроводимости. Первоначальной целью авторов [1] было найти электрические поля, возникающие на границе сверхпроводящей и нормальных фаз в сверхпроводниках. Для этого они использовали спектроскопию одиночных молекул. Она позволяет измерять распределение электрических полей с чувствительностью 10 В/см по смещению частоты линии излучения органической молекулы за счет эффекта Штарка. Для визуализации сверхпроводящей структуры и магнитных полей, связанных с ней, использовали пленку редкоземельного феррита-граната (см. рис.). Каково же было удивление экспериментаторов, когда они обнаружили, что получившийся сигнал на порядок превосходит тот, что ожидался, и возникает он только в присутствии пленки феррита-граната, т.е. индикатор сам стал источником паразитного электрического поля! Сверхпроводящий материал в данном случае играл лишь роль “решета”, пропускающего внешнее магнитное поле только сквозь области нормальной фазы, что создает возмущение в распределении намагниченности в пленке феррита-граната (см. рис., вставка). Таким образом, гипотеза об электрической поляризации магнитных неоднородностей [2] нашла независимое экспериментальное подтверждение.

Метод, описанный в [1] интересен не только в контексте спора о природе магнитоэлектрического эффекта на доменных границах в пленках ферритов-гранатов, но и может оказаться полезным в смежных областях физики материалов: там, где требуется измерять распределение электрических полей над поверхностью с атомарным разрешением.

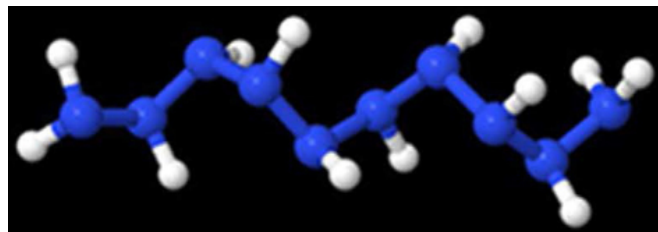
А. Пятаков

1. I.S.Veshchunov et al., *Phys. Rev. Lett.* **115**, 027601 (2015).
2. В.Г.Барьяхтар и др., *Письма в ЖЭТФ* **37**, 565 (1983).
3. А.С.Логгинов и др., *Письма в ЖЭТФ* **86**, 124 (2007).
4. А.А.Арзамасцева и др., *ЖЭТФ* **147**, 793 (2015).

НАНОМАТЕРИАЛЫ

Новое поколение азотных олигомеров

Не прекращаются попытки получить азотсодержащие высокоэнергетические вещества или HEDM (high-energy-density materials). Тем не менее, подавляющее большинство различных форм немолькулярного азота образуется лишь в диапазоне экстремальных давлений и температур и оказывается неустойчивыми при нормальных условиях, что делает практически невозможным их реальное применение. На сегодняшний день существует три основных подхода к решению проблемы повышения их стабильности: внедрение в состав азотных наноструктур стабилизирующих атомов других элементов, например, углерода, кислорода, фосфора и т.д.; инкапсуляция чисто азотных систем внутрь соединения-хозяина, например, углеродных нанотрубок, с образованием эндодральных комплексов; наконец, краевое или поверхностное допирование различными функциональными группами. Последнее кажется особенно привлекательным, когда в роли допанта предлагается использовать атомы водорода [1]. Международный коллектив авторов, среди которых присутствуют и наши соотечественники, экспериментально и с помощью компьютерного моделирования изучил формирование азотводородных цепочек, у которых атомы азота связаны друг с другом одинарными ковалентными связями. Исследователи рассчитывали, что присутствие водорода позволит снизить давление необходимое для синтеза высокоэнергетических азотсодержащих материалов и значительно повысит их устойчивость по сравнению с чисто азотными полимерами. Авторы обнаружили, что молекулярные азот и водород способны вступать в реакцию при комнатной температуре и давлениях ~ 35 ГПа и образовывать азотные цепочки – олигомеры, пассивированные атомами водорода (см. рис.), что подтверждается не только теоретическими расчетами, но и методами ИК-спектроскопии, комбинационного рассеяния и рентгеновской дифракции.



Структура азотводородной цепочки $N_{10}H_{12}$, в которой атомы азота связаны друг с другом одинарными ковалентными связями.

Это давление значительно ниже тех, которые необходимы для синтеза других высокоэнергетических материалов, например, полимерного азота (около 150 ГПа). К сожалению, при снятии давления и последующем его понижении ниже 10 ГПа азотводородные цепочки трансформируются в отдельные молекулы гидразина N_2H_4 . Однако авторы, основываясь на полученных результатах квантово-химического моделирования, надеются, что в дальнейшем азотсодержащие олигомеры удастся получать уже при 2 ГПа, что приблизит создание высокоэнергетических материалов и топлив на их основе.

М. Маслов

1. *H.Wang et al., Sci. Rep. 5, 13239 (2015).*
2. [ПерсТ 21, вып.1/2, с. 6 \(2014\).](#)

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, А. Елецкий, М. Маслов, Л. Опенов, А. Пятаков

Выпускающий редактор: И.Фурлетова

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