

ISSN: 2782-5515



# Перст

Информационный бюллетень

перспективные технологии  
наноструктуры сверхпроводники фуллерены

Том 29, выпуск 10

октябрь 2022 г.



[smebook.eu/Photonics](http://smebook.eu/Photonics)

Черноголовка

## НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ

### *Наноструктуры в природе.*

#### *Крылья ночной бабочки – акустические метаматериалы*

Активная разработка метаматериалов, особым образом структурированных систем, началась в конце XX – начале XXI века, хотя сам термин был введен несколько позже. Название поясняет, что свойства метаматериала превосходят свойства обычных материалов (греческое “мета” означает “вне, над”); они обусловлены не свойствами входящих в него компонентов, а искусственно сформированной специфической структурой. Сначала к метаматериалам относили только материалы с необычными электромагнитными свойствами (например, имеющие отрицательный показатель преломления света), но теперь этот термин используют для разных систем, обладающих необычными, уникальными волновыми свойствами. Исследования, направленные на создание метаматериалов для оптики, фотоники, радиофизики, ведутся во всем мире. В последние годы возрос интерес к акустическим метаматериалам, в том числе эффективным поглотителям звука.

Основы теории поглощения звука были заложены еще в XIX веке Гельмгольцем, Кирхгофом и другими известными учеными, которые изучали звуковые колебания в органах труб. Было установлено, что поглощение звука в основном обусловлено вязким трением и теплопроводностью. Эти выводы и сейчас важны для разработки эффективных поглотителей звука, необходимых как в строительной-архитектурной отрасли, так и в судовой, авиационной, космической и многих других. Традиционно применяют пористые, ячеистые, волокнистые материалы, многослойные резонансные конструкции. Как правило, они имеют большую массу и/или объем. Метаматериалы помогут исправить эти недостатки (подробнее о принципах создания поглотителей звука на их основе можно прочесть в обзоре [1]).

Долгое время считали, что метаматериалы не встречаются в природе, что они могут быть только искусственно созданы. Однако использование современных методов исследований помогло обнаружить живые примеры, относящиеся к оптике. Перст рассказывал о биофотонных структурах чешуек голубых переливчатых бабочек *Morpho* (структура инвертированного опала) [2], зеленых бабочек *Callophrus rubi* (гиридные наноструктуры) [3], о радужных брюшных чешуйках австралийских паучков *Maratus robinsoni* и *M. chrysomelas* [4].

И далее ...

### СПИНТРОНИКА

- 5 Доменный зигзаг:  
новый поворот в теории  
микромагнетизма

### НАНОМАТЕРИАЛЫ

- 7 Новый материал для  
оптических терагерцовых  
элементов
- 8 Водород в графине

### ФОТОНИКА

- 10 Следопыты сверхбыстрых  
процессов:  
определение длительности  
световой пули

### ТОРЖЕСТВО

- 11 Нобелевская премия 2022

Результаты исследований этих структур помогли в создании материалов с новыми оптическими свойствами.

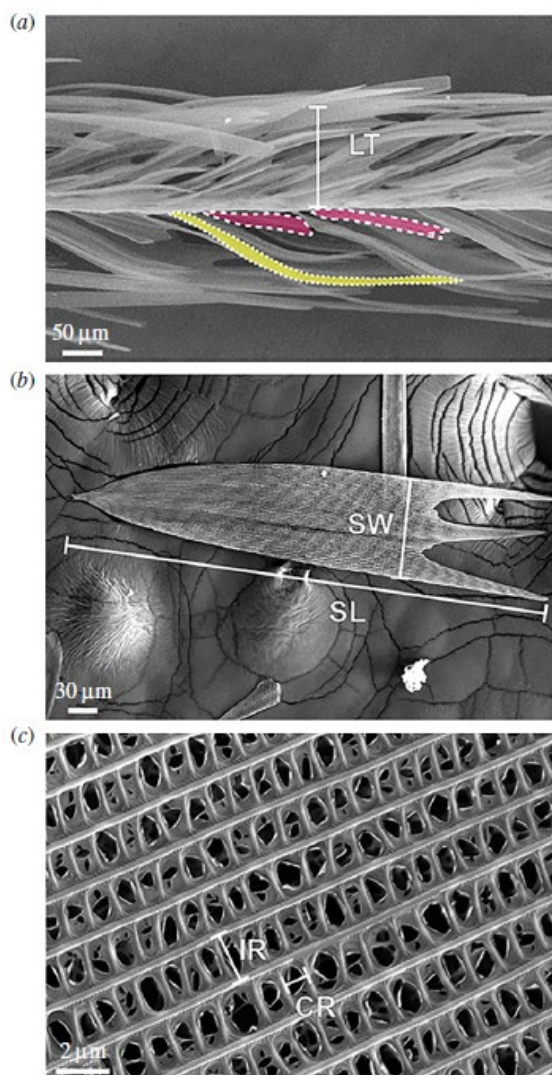


Рис. 1. а) – Сечение секции крыла дубового шелкопряда. Показаны две базовые чешуйки (розовый цвет) и одна покровная (желтый цвет). б) – Базовая чешуйка, вид сверху. с) – Микроструктура базовой чешуйки, состоящая из продольных гребней с поперечными ребрами. Параметры, характеризующие чешуйки: LT (layer thickness) – толщина слоя, SL (scale length) – длина чешуйки, SW (scale width) – ширина чешуйки, IR (inter-ridge distance) – расстояние между гребнями, CR (cross-rib distance) – расстояние между поперечными ребрами.

Однако акустические метаматериалы в природе не были известны. И только совсем недавно ученые из Бристольского университета (Великобритания) обнаружили их на крыльях некоторых ночных бабочек [5]. Мембрану крыла покрывает множество чешуек разного размера. Каждая чешуйка поглощает звук на своей резонансной частоте, а их коллективное дей-

ствие гораздо сильнее, чем сумма индивидуальных вкладов. Чешуйки, присоединенные к мембране крыла, и образуют акустический метаматериал. Он спасает бабочек от летучих мышей, обеспечивая поглощение ультразвука, который эти ночные охотники издают, а потом улавливают как эхо от своей добычи. Природный акустический поглотитель не только успешно работает во всем нужном диапазоне частот, но и является тонким и лёгким – мечта технологов, разрабатывающих акустические метаматериалы. Эффективные поглотители должны иметь толщину существенно меньше длины волны, представляющей интерес, но технологически этого достичь чрезвычайно трудно. Лучшие разработанные до сих пор лабораторные образцы либо предназначены для очень узкой полосы частот, либо их толщина не меньше  $\lambda/8$  -  $\lambda/45$ , а конструкция сложная. Толщина слоя чешуек по сравнению с длиной волны очень маленькая  $\sim \lambda/100$ ! Правда, чешуйки-резонаторы на крыле поглощают звук в естественной среде, когда все они окружены воздухом. В новой работе [6] исследователи решили проверить эффективность поглощения слоев чешуек на подложке, отражающей звук. Это особенно важно для создания акустических метаповерхностей.

Для экспериментов авторы выбрали ночную бабочку *Antheraea pernyi* (дубовый шелкопряд)\*, SEM изображения сечения крыла и чешуек приведены на рис. 1.

Схема эксперимента представлена на рис. 2. Исследователи проводили сравнение коэффициента отражения звука RC (reflection coefficient) от алюминиевого диска диаметром 8 мм и от этого диска, покрытого круглыми фрагментами крыла того же диаметра (рис. 2а). Образцы помещали на подставку из пены, поглощающей ультразвук во всем исследованном диапазоне частот 20-160 кГц (рис. 2б). Для выяснения механизмов поглощения звука было проведено 6 измерений для неизмененных и модифицированных фрагментов крыла, помещенных на диск (рис. 2с). Сначала изучили акустическое воздействие на неизмененное крыло (*Intact*), на его дорсальную (зд. - верхнюю) поверхность, и вентральную (зд. - нижнюю) поверхность. Затем все чешуйки на дорсальной стороне убрали (*Dorsal bald*) и изучили акустическое воздействие на обе поверхности нового образца. При воздействии на его дорсальную поверхность сверху была мембрана

крыла, а снизу (на диске) – чешуйки, а при воздействии на вентральную – наоборот (поэтому на рис. 2с для этого образца даны два разных изображения). Наконец, убрали и все чешуйки

на вентральной стороне (*Both bald*), и изучили акустическое воздействие на обе поверхности голой мембраны крыла.

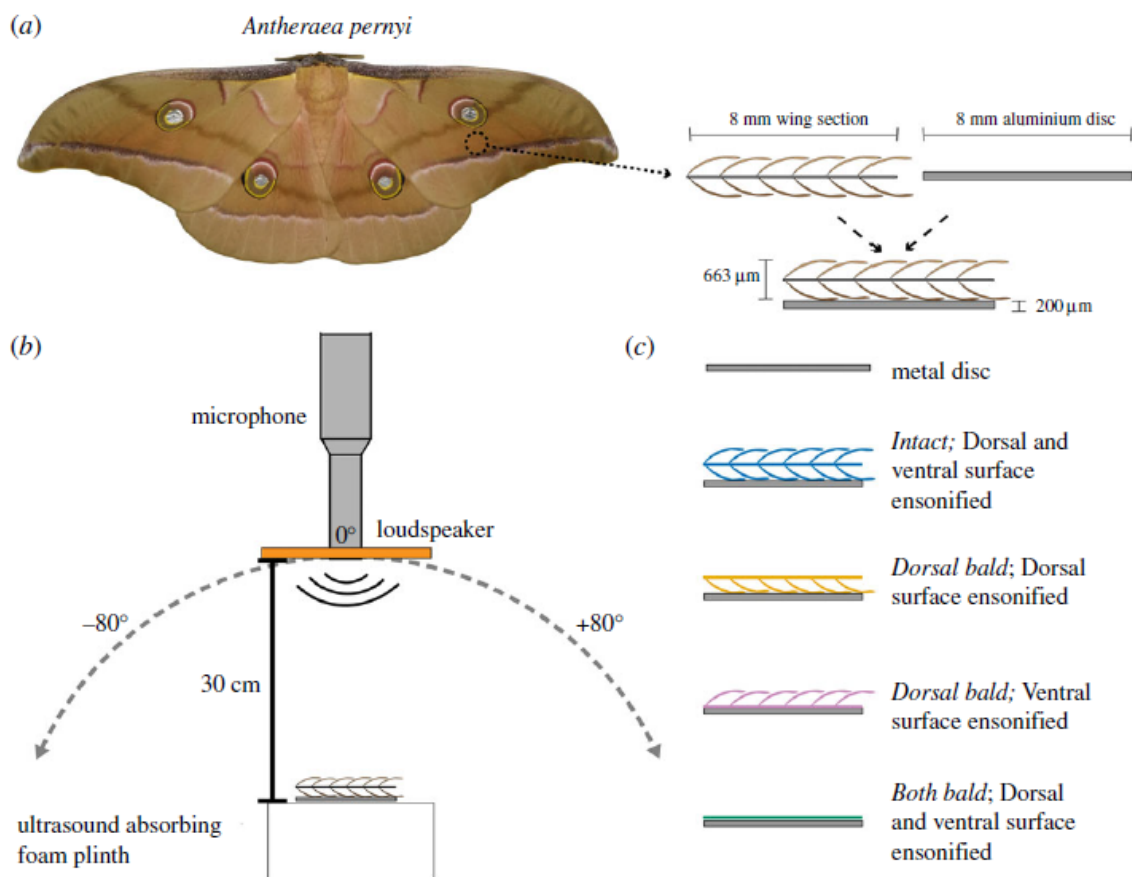


Рис. 2. Схема эксперимента по измерению величины и пространственного распределения сигнала эхо от металлического диска и диска, покрытого кусочками крыла: а) – показано место, откуда брали круглый образец крыла; б) – схема установки; в) – исследованные образцы.

При воздействии на дорсальные поверхности авторы [6] получили следующие результаты. Для неизменённого крыла (*Intact*) для всех частот от 20 до 160 кГц  $RC$  был в диапазоне 0.18-0.3, т.е. поглощение эффективное. При 20 кГц  $RC=0.27$ . Для этой частоты длина волны звука в воздухе 17 мм. Учитывая, что по данным SEM общая толщина крыла 663 мкм, получаем отношение толщины к длине волны  $\sim 1/26$ . Для образца *Dorsal bald*  $RC$  был лишь чуть похуже (0.27-0.41), но отношение толщины к длине волны  $\sim 1/50$  (поскольку один слой чешуек убран).  $RC$  для мембраны (*Both bald*) гораздо выше – от 0.67 до 0.98, т.е. поглощение очень слабое.

При вентральном воздействии на образец неизменённого крыла (*Intact*) коэффициент отражения для всех частот от 20 до 160 кГц был в диапазоне 0.13-0.45, что существенно ниже, чем для двух других образцов, т.е. поглощение эффективное. При 20 кГц  $RC=0.13$ , отношение

толщины к длине волны  $\sim 1/26$ . Коэффициенты отражения для *Dorsal bald* и мембраны (*Both bald*) образцов практически одинаковы и примерно такие же высокие как для мембраны (*Both bald*) при дорсальном воздействии, т.е. поглощение очень слабое.

Численное моделирование с использованием полуэмпирических моделей (параметры чешуек были взяты из SEM исследований) подтвердило экспериментальные результаты.

Тот факт, что фрагмент неповрежденного крыла значительно снизил отражение звука от металлического диска, не удивил исследователей [6]. Как уже было сказано выше, в предшествующих работах они показали, что крыло является метаматериалом, поглощающим звук. Но один результат оказался неожиданным. Речь идет об образце *Dorsal bald* (см. рис. 2с), с которого убрали все чешуйки верхнего слоя, оставив мембрану крыла и нижний слой чешу-

ек. Акустические характеристики этого образца очень сильно зависели от ориентации по отношению к падающей звуковой волне. В том случае, когда мембрана была сверху, а между ней и диском находились чешуйки, поглощение звука было эффективным, а когда мембрана лежала на диске (чешуйки сверху), регистрировали практически полное отражение. Ключевое отличие в том, что эластичная мембрана, находясь сверху на чешуйках, обладает свободой движения. Исследователи предположили, что именно мембрана является основным компонентом, поглощающим звук. Однако численное моделирование показало, что мембрана без чешуек даже при наличии воздушного зазора между ней и металлическим диском не поглощает звук ни при каких частотах. Следовательно, именно комбинация эластичной мембраны и присоединенных к ней чешуек-резонаторов разной формы и размеров является метаматериалом, который создает оптимальные условия для диссипации энергии. Важны эффекты вязкого трения и теплопроводности, но всё же в механизмах, определяющих поглощение звука, еще предстоит детально разобраться. Это необходимо для создания нового поколения поглотителей звука на основе метаматериалов.

В целом результаты исследований продемонстрировали, что крылья ночной бабочки *Antheraea pernyi* являются уникальным природным метаматериалом, который обеспечивает эффективное поглощение звука, находясь на акустически твердой поверхности. Поглощение широкополосное и происходит при всех направлениях падающей звуковой волны. При самой низкой частоте (20 кГц) крыло снижает отражение на 87%.

Такие лёгкие тонкие звукопоглощающие метаматериалы очень важны и для архитектурно-строительной акустики, и для использования на транспорте. Авторы [6] планируют создать искусственные аналоги, действующие на тех же принципах. Следующий этап исследований будет направлен на разработку тонкого и эффективного поглотителя для более низких частот.

*О. Алексеева*

---

*\*Ночная бабочка *Antheraea pernyi* (дубовый шелкопряд, или китайская дубовая павлиноглазка) относится к семейству Сатурнии (*Saturniidae*) из отряда Чешуекрылых (*Lepidoptera*). Гусеницы питаются листьями дуба. Из коконов получают толстую шелковую нить, которая идет на изготовление*

*ткани чесучи. Сейчас 90% мировой продукции коконов принадлежит Китаю, где дубовый шелкопряд начали разводить более 250 лет назад (до этого в течение двух тысячелетий коконы собирали в лесах). В СССР дубового шелкопряда разводили с конца 1920-х до конца 1950-х годов, производили чесучу, из которой шили модные мужские и дамские летние костюмы натурального кремового оттенка, а также парашютный шёлк.*

1. Ю.И.Бобровницкий и др., *Акустический журнал* **64**, с.517 (2018).
2. [ПерсТ 19, вып.24, с.3 \(2012\).](#)
3. [ПерсТ 24, вып. 23/24, с.1 \(2017\).](#)
4. [ПерсТ 25, вып. 3/4, с.1 \(2018\).](#)
5. T.R.Neil et al., *PNAS* **117**, 31134 (2020).
6. T.R.Neil et al., *Proc. R. Soc. A* **478**, 20220046 (2022).

## СПИНТРОНИКА

### *Доменный зигзаг: новый поворот в теории микромагнетизма*

С момента обнаружения магнитных доменов прошло уже почти столетие, к прошлому же веку относится теория микромагнетизма, согласно которой всё многообразие микромагнитных структур обязано своим происхождением трем конкурирующим взаимодействиям в ферромагнетике: обменной жесткости, магнитостатике и магнитной анизотропии.

В текущем столетии в связи с предсказанием и обнаружением магнитных вихрей особого типа – скирмионов, к трем классическим силам микромагнетизма пришлось добавить еще одну – взаимодействие Дзялошинского-Мории, которое способствовало образованию не только скирмионов, но и спиновых циклоид, а также гомохиральных (с одинаковым направлением разворота) доменных стенок. Как оказалось, этот список еще далеко не полон: до последнего времени никто не подозревал о существовании еще одного специфического типа доменных структур – зигзагообразных доменов, теоретически предсказанных и обнаруженных в недавней статье ученых из Нижнего Новгорода и Саратова [1].

Зигзагообразную доменную структуру не стоит путать с лабиринтной (рис. 1). Последняя хорошо знакома тем, кто работает с магнитными пленками: она наблюдается в случае отсутствия выделенного направления в плоскости пленки. Напротив, зигзагообразная структура возникает при анизотропии специфического типа: когда знаки взаимодействия Дзялошин-

ского-Мории вдоль взаимно-перпендикулярных осей в плоскости пленки отличаются.

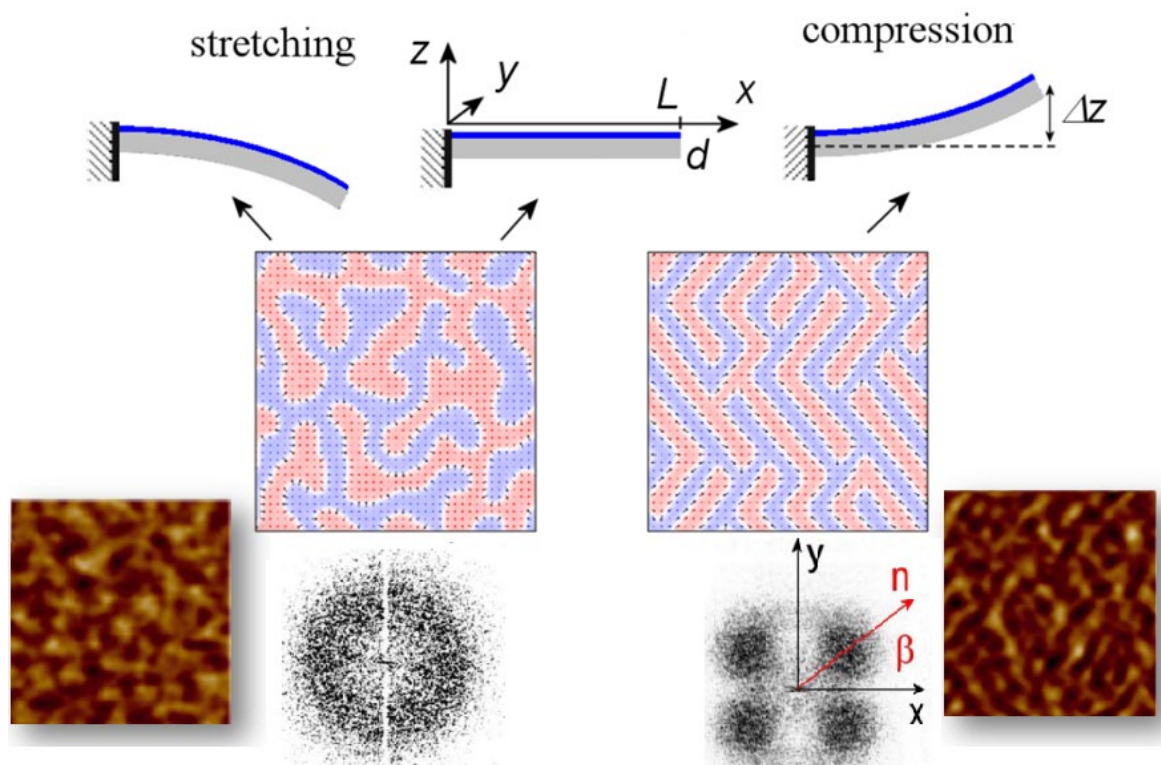


Рис. 1. Доменные структуры, наблюдающиеся в многослойных структурах Co/Pt при растяжении (stretching) и сжатии (compression). В центре – результат численного моделирования (слева – лабиринтная доменная структура, справа – зигзагообразная). В левом нижнем и в правом нижнем углах соответствующие изображения в магнитном силовом микроскопе (размер сканов  $2 \times 2$  мкм<sup>2</sup>). Внизу – их Фурье образы (белая вертикальная полоса – артефакт обработки изображения) [1].

Чтобы навести такую анизотропию, авторы изгибали консоль с нанесенным на нее магнитным материалом (многослойной структурой из пленок Co и Pt). Сжатие или растяжение пленки приводило к изменению конфигурации магнитных атомов и лигандов, определяющей взаимодействие Дзялошинского-Мории. Действенность такого приема была ими доказана ранее [2], путем измерения частот стоксовой и антистоксовой компонент рассеяния Манделштама-Бриллюэна (см. также ПерсТ “Скирмионы займуться растяжкой” [3]).

Собственно, при растяжке структура остается лабиринтной (рис. 1, слева), но если деформация меняет знак и достигает величины  $-0.06\%$ , то возникает полосовая структура с направлением доменов под углом  $\beta$  к направлению сжатия. При этом в силу случайности процесса зарождения доменов и энергетической эквивалентности направлений “ $+\beta$ ” и “ $-\beta$ ”, возникают зигзаги (рис.1, справа). Субмикронные домены были визуализированы методом магнитной силовой микроскопии, хотя наиболее отчетливо различие между лабиринтной и полосовой

структурами проявляется при Фурье-анализе изображений: лабиринтной структуре соответствует кольцо (все направления эквивалентны), а зигзагообразной – максимумы под углом  $\beta$  к горизонтальной оси (рис. 1, внизу).

Авторы отмечают, что использование пьезоэлектрической подложки делает их метод управления взаимодействием Дзялошинского-Мории легко реализуемым в схемах гибкой электроники и стрейнтроники. Отметим, что в мультиферроиках электрическая модуляция взаимодействия Дзялошинского-Мории возможна и напрямую, без посредничества механической деформации [4,5].

А. Пятаков

1. M.V.Sapozhnikov et al., *Phys. Rev. B* **105**, 024405 (2022).
2. N.S.Gusev et al., *Phys. Rev. Lett.* **124**, 157202 (2020).
3. [ПерсТ 27, вып.9/10 с. 6 \(2020\)](#).
4. D.P.Kulikova et al., *Phys. Status Solidi RRL* **12**, 1800066 (2018).
5. T.Srivastava et al., *Nano Lett.* **18**, 4871 (2018).

## НАНОМАТЕРИАЛЫ

### Новый материал для оптических терагерцовых элементов

В настоящее время терагерцовое (ТГц) излучение, диапазон частот которого расположен между инфракрасным и микроволновым диапазонами, привлекает все большее внимание ученых и инженеров для разработки и создания новых приборов и оборудования на его основе. Оно является неионизирующим, т.е. безопасно для живых организмов, в том числе и для человека. В связи с этим использование ТГц излучения представляет интерес для диагностики и лечения широкого спектра заболеваний в медицине, а также разработки новых систем безопасности (сканирование багажа, досмотр пассажиров), экологического мониторинга, специальной техники (приборы ночного видения и т.д.), разработки новых методов неразрушающего контроля для научных и технологических применений (пищевая промышленность, фармакология и т.д.), неразрушающего исследования предметов искусства. Несмотря на высокий потенциал ТГц излучения, на сегодняшний день все еще существует проблема нехватки материалов для синтеза и оптимизации ТГц оптических элементов и систем. Решением этой проблемы является поиск новых оптических материалов, которые должны одновременно обладать следующими характеристиками: низким поглощением и дисперсией ТГц волн, высокой термической стойкостью, механической прочностью, радиационной стойкостью, химической инертностью и т.д.

Коллектив ученых из Института физики твердого тела имени Ю.А. Осипяна РАН, Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана, Института регенеративной медицины Сеченовского университета и Политехнического университета Монреаля (Канада) впервые предложили использовать в качестве нового материала ТГц оптики искусственные опалы, полученные седиментацией монодисперсных наночастиц  $\text{SiO}_2$ . Было показано, что такой материал способен изменять показатель преломления в диапазоне 1.6 – 1.95 на частоте 1 ТГц за счет уменьшения пористости при отжиге. Для получения элементов ТГц оптики использовали два подхода. Во-первых, традиционными методами механической обработки были изготовлены цилиндрические ТГц-линзы на основе опало-

вой матрицы одинаковой геометрии, но с разными показателями преломления и фокусными расстояниями, которые удалось получить благодаря различным режимам отжига. Во-вторых, в качестве альтернативы для изготовления ТГц оптических элементов сложной формы был предложен новый метод, обеспечивающий получение искусственных опалов прямым осаждением водной коллоидной суспензии наночастиц  $\text{SiO}_2$  в форму с обратным профилем оптической поверхности требуемого ТГц элемента. Данный метод позволяет получать оптические поверхности сложной геометрии без использования механической обработки. Для демонстрации универсальности этого метода был изготовлен аксикон с углом при вершине  $160^\circ$  для генерации пучков Бесселя (рис. 1). Напомним, что аксиконы – это осесимметричные оптические линзы, одна поверхность которых плоская, а вторая – коническая. Преобразование ТГц поля аксиконом было исследовано на установке ТГц визуализации; теоретическое распределение ТГц поля за аксиконом было получено с помощью методов вычислительной электродинамики (рис. 2).

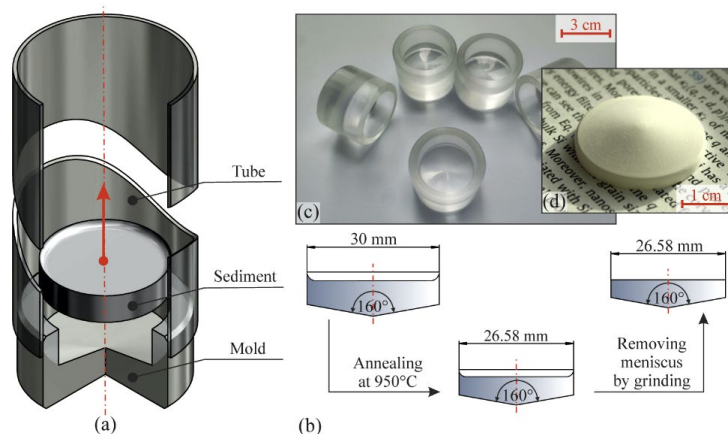


Рис. 1. Седиментация коллоидной суспензии в подготовленную форму с целью получения ТГц аксикона: а) – 3D модель собранной формы для осаждения; б) – режим постобработки готового аксикона; в) – фото форм для осаждения из полиметилметакрилата; д) – фото готового аксикона, полученного седиментацией в форму.

Хорошее согласование эксперимента с теорией показало, что опаловые матрицы являются перспективным материалом для ТГц оптики. Учитывая высокую термостойкость материала (до  $900 - 1100^\circ\text{C}$ , в зависимости от условий синтеза материала) и биологическую совместимость, этот материал может быть использован для решения многих теоретических и прикладных задач современной физики. Получен-

ные результаты подтвердили технологическую надежность предложенного метода получения ТГц-оптических материалов, тем самым открыв новые возможности к созданию различных

объемных оптических ТГц-элементов на основе нанопористого SiO<sub>2</sub> со сложной формой и заданными оптическими характеристиками.

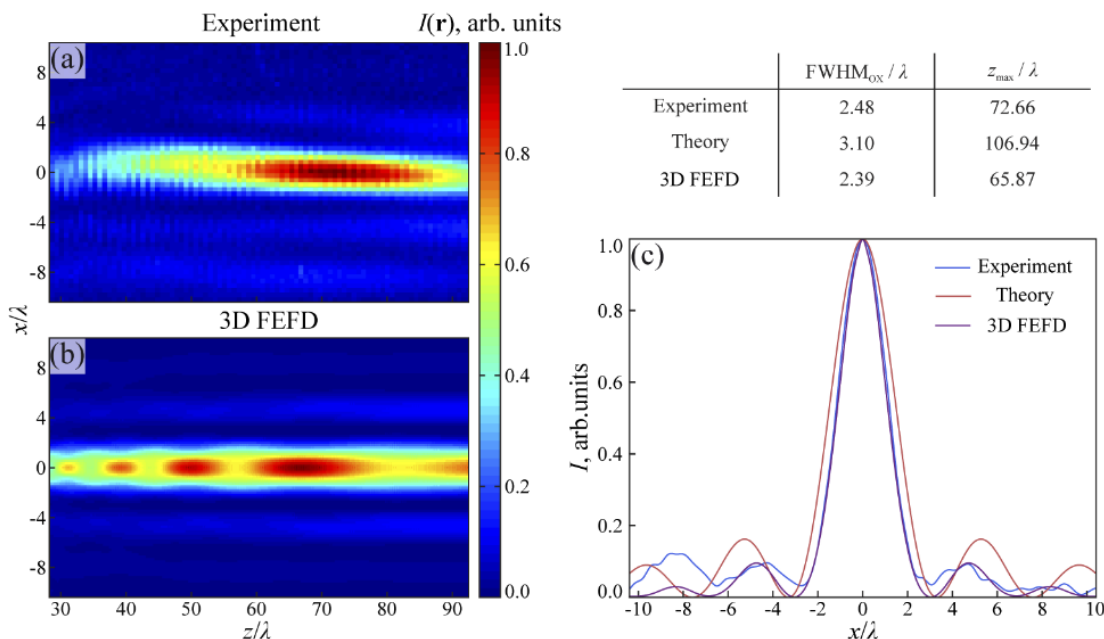


Рис. 2. Сравнение экспериментально полученного пучка Бесселя с результатами моделирования: а) – экспериментально полученное продольное сечение пучка Бесселя; б) – моделирование этого же сечения методами вычислительной электродинамики; в) – сравнение распределения интенсивности ТГц поля в максимуме пучка Бесселя.

Использование опаловых матриц для получения ТГц-оптических материалов позволяет получать различные объемные оптические элементы (линзы, окна, фазовые пластины, призмы, дифракционные оптические элементы и др.) как с использованием традиционных методов механической обработки, так и с помощью седиментации суспензии в форму. При этом, варьируя режим отжига нанопористого материала или уже готового ТГц компонента на основе SiO<sub>2</sub>, с учетом усадки, можно плавно регулировать оптические свойства изделий для терагерцовой техники.

Технологическая надежность и возможность получения изделий с заданными ТГц оптическими свойствами обеспечивают материалам на основе нанопористого SiO<sub>2</sub> значительные преимущества по сравнению с обычными полимерными и кристаллическими терагерцовыми оптическими материалами и, таким образом, расширяют возможности по проектированию, синтезу и оптимизации терагерцовых оптических элементов и систем.

О. Камынина

1. V.E.Ulitko et al., *Opt. Express* **29**, 13764 (2021).

2. V.E.Ulitko et al., *Proc. SPIE 11827, Terahertz Emitters, Receivers, and Applications XII, 118270M* (2021).

### Водород в графине

Постепенное истощение запасов ископаемого топлива в сочетании с постоянно растущим спросом на энергетические ресурсы и сопутствующим загрязнением окружающей среды вынуждают исследователей искать новые альтернативные “зеленые” источники. Примером такой альтернативы может служить водородная энергетика. Однако здесь неизбежно возникает вопрос об эффективном хранении водорода, его транспортировке и высвобождении. Например, Министерство энергетики США (DOE) установило целевые показатели эффективности водород-сорбционных энергетических материалов. Так, энергия связи адсорбированного водорода должна находиться в диапазоне от 0.2 до 0.7 эВ, а гравиметрическая емкость составлять не менее 6.5 масс. %. В качестве наиболее вероятных кандидатов на роль водородных аккумуляторов часто называют металлоорганические каркасы (MOF), а также углеродные наноструктуры, такие как фуллерены, нанотрубки и графен. Исследователи из Indian Inst. of Tech-



nology Bombay и Bhabha Atomic Research Centre (Индия) [1] предложили для этих целей монослой  $\gamma$ -графина, декорированный цирконием. Напомним, что графин (graphyne) является двумерным графеноподобным материалом, особенность которого заключается в сосуществовании  $sp$  и  $sp^2$  гибридных атомов углерода (см. рис. 1). С помощью теории функционала плотности исследователи предсказывают, что каждый находящийся на поверхности графина атом циркония, способен присоединять до семи молекул водорода со средней энергией адсорбции  $-0.44$  эВ/ $H_2$ , что приводит к гравиметрической емкости водорода 7.95 масс. %, превышая рекомендации DOE. Авторы провели компьютерное моделирование в программе VASP с использованием обобщенного градиентного приближения (GGA) с PAW-псевдопотенциалами и поправок Гримме D2 для учета слабого ван-дер-ваальсового взаимодействия. Для проверки устойчивости системы “графин + Zr” при комнатной температуре они воспользовались *ab initio* молекулярной динамикой в рамках канонического (NVT) ансамбля с термостатом Нозе-Гувера и с шагом по времени 1 фс. Однако общее время молекулярно-динамического моделирования составило не очень заметные 5 пс, хотя авторы посчитали его достаточным.

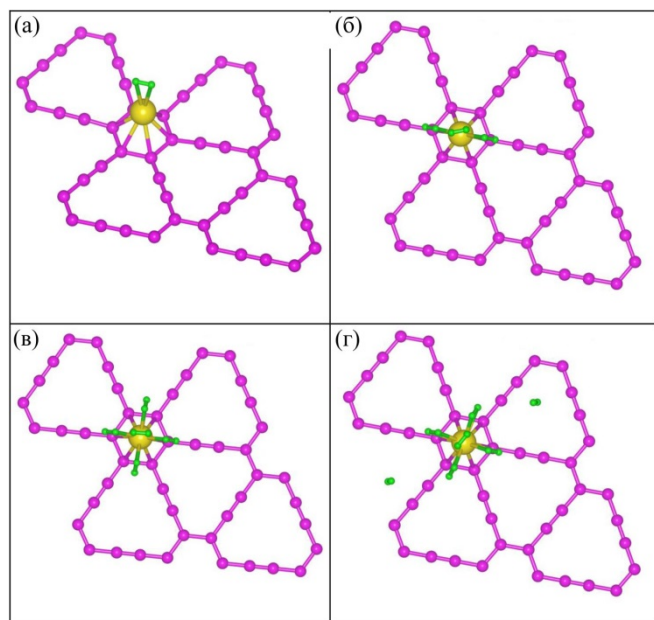


Рис. 1. Атомные структуры наносистем: а)  $\gamma$ -графин + Zr +  $1H_2$ ; б)  $\gamma$ -графин + Zr +  $3H_2$ ; в)  $\gamma$ -графин + Zr +  $5H_2$ ; г)  $\gamma$ -графин + Zr +  $7H_2$ . Атомы углерода, циркония и водорода обозначены фиолетовым, золотым и зеленым цветом, соответственно.

Итак, исследователи выяснили, что по причине переноса и перераспределения заряда атом циркония прочно усаживается на графин, а молекулы водорода впоследствии адсорбируются уже на декорированном графине за счет механизма так называемого взаимодействия Кубаса, которое сводится к сложному электронному обмену между водородом и цирконием. Учитывая высокую энергию когезии объемного циркония, присутствие нескольких атомов Zr на листе графина может вызвать кластеризацию Zr-Zr, что приведет к значительному снижению эффективности такой системы запасать водород. Однако авторы предложили разместить атомы Zr по обе стороны от листа графина напротив центра шестичленных углеродных колец (см. рис. 2). Выбранная позиция атомов металла является наиболее результативной, поскольку именно для такого расположения достигается максимальная гравиметрическая емкость, а энергетический диффузионный барьер высотой в 4 эВ позволит избежать кластеризации типа Zr-Zr. Дальнейшее молекулярно-динамическое моделирование показывает, что декорированный цирконием графин сохраняет устойчивость вплоть до температуры десорбции водорода (574 К).

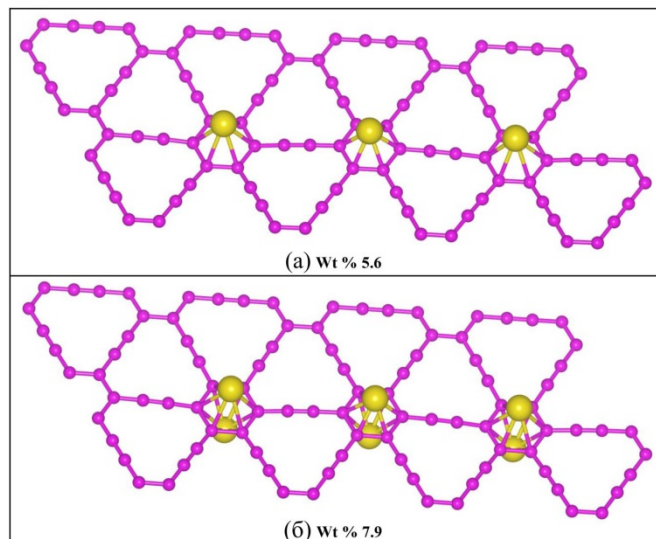


Рис. 2. Схема расположения атомов металла на листе  $\gamma$ -графина для определения гравиметрической емкости  $H_2$ : а) – одностороннее расположение Zr и б) – расположение атомов Zr по обе стороны листа графина

Таким образом, принимая во внимание реальные возможности синтеза допированного графина и его термическую устойчивость, а также высокую адсорбционную способность молекул  $H_2$ , авторы пришли к выводу, что декорированный цирконием  $\gamma$ -графин является перспектив-

ным наноматериалом для хранения и транспортировки водорода и вполне подходит на роль компонентов топливных элементов. Последнее слово, разумеется, остается за экспериментом.

*М. Маслов*

*I. M. Singh et al., Int. J. Hydrog. Energy (2022), DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.07.062*

## ФОТОНИКА

### **Следопыты сверхбыстрых процессов: определение длительности световой пули**

Мощные световые импульсы фемтосекундной длительности – “световые пули” – в настоящее время являются как самостоятельным объектом исследования, так и важным инструментом спектроскопии сверхбыстрых процессов. Определение длительности таких импульсов – сложная научно-техническая задача, которая в настоящий момент решается с помощью определения функции автокорреляции. Автокорреляционный метод регистрирует только огибающую сигнала, он не может почувствовать начальную фазу импульса. Существует ряд других экспериментальных методов, регистрирующих не только амплитуду, но и фазу импульса, однако все они требуют дорогостоящего оборудования.

В недавней статье [1], исследователи из Института спектроскопии РАН, физфака МГУ и ВНИИА им. Н.Л. Духова предложили еще один метод определения длительности и фазы световой пули, не требующий большого количества дополнительного оборудования и сложной математической обработки.

Метод основан на регистрации следа, возникающего в нелинейной среде при формировании световой пули. Световая пуля создается в нелинейной среде с аномальной дисперсией групповой скорости при воздействии на среду мощного лазерного импульса: волновой пакет изначально гауссовой формы сжимается, уменьшая свою длительность и увеличивая плотность энергии. Сильное электрическое поле формирует в среде след – плазменные каналы или возбуждение центров окраски, и по структуре этого следа можно определить важные параметры – длительность импульса и его фазу.

Световая пуля произвольной фазы в общем случае представляет собой смешение синус-моды и косинус-моды, и в нелинейной диспергирующей среде происходят периодические

биения этих мод с характерным периодом, определяемым дисперсионными параметрами среды. Таким образом, можно зарегистрировать в сигнале люминесценции картину модуляции (рис. 1а). Авторы показали, что глубина этой модуляции однозначно связана с длительностью импульса (рис. 1б), а расстояние до максимальной величины амплитуды определяется фазой импульса.

Авторы теоретически и экспериментально исследовали световые пули на различных длинах волн среднего ИК диапазона, формирующиеся во фториде лития LiF и оксиде кремния SiO<sub>2</sub>.

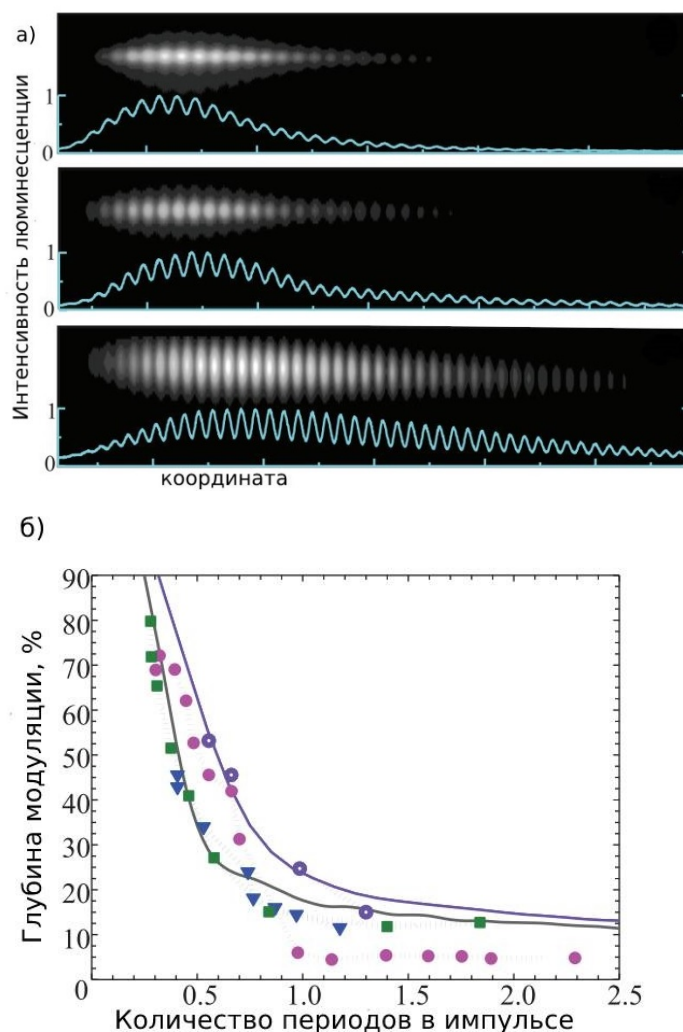


Рис. 1. а) – Экспериментальные данные люминесценции от световой пули в LiF на различных длинах волн; б) – зависимость глубины модуляции от количества периодов в импульсе в LiF и SiO<sub>2</sub> на различных длинах волн, теоретические кривые и экспериментальные точки, более подробно см. [1].

Картину люминесценции регистрировали с помощью ПЗС-камеры, и по этой картине численно рассчитывали профиль кривой модуляции. Далее в каждой точке данной кривой можно определить глубину модуляции, а ис-

пользуя рассчитанную связь длительности импульса и глубины модуляции (рис. 1б), можно найти и длительность импульса.

Результаты вычислений длительности импульсов с хорошей точностью совпали с измерениями независимыми методами – автокорреляционным, кросс-корреляционным, спектральной интерферометрии. Важным преимуществом предлагаемого метода является отсутствие дополнительных помех, создаваемых другими нелинейными элементами оптической схемы, поскольку измерение происходит в том же кристалле, в котором и создаётся световая пуля.

К недостаткам нового метода можно отнести узкий диапазон измерений времени. Если длительность импульса меньше половины периода, глубина модуляции начинает приближаться к 100% очень резко, получается большая погрешность. На больших же временах глубина модуляции начинает слишком слабо зависеть от длительности. Данный метод можно использовать только для длительностей, близких к одному периоду колебаний светового поля.

Таким образом, в копилку исследователей сверхкоротких световых импульсов добавился ещё один красивый экспериментальный метод.

З. Пятакова

1. А.Е.Дормидонов и др., *Письма в ЖЭТФ* 116, с. 434 (2022).

## ТОРЖЕСТВО

### Нобелевская премия 2022

С 3 по 10 октября в Стокгольме (Швеция) прошла 121-я Нобелевская неделя, на которой стали известны имена лауреатов Нобелевской премии в области медицины и физиологии, физики, химии, премии мира и экономики.



**Нобелевскую премию по физике** получили три учёных: француз Alain Aspect (Université Paris-Saclay École Polytechnique, Palaiseau), американец John F. Clauser (JF Clauser & Assoc., Уолнат-Крик, Калифорния) и австриец Anton Zeilinger (Univ. Vienna). Премия присуждена за “проведение экспериментов с квантово-запутанными фотонами, доказательство нарушения неравенства Белла и за первопроходство в области квантовой теории информации”. Эти работы привели к созданию новейших квантовых компьютеров и фундаментально защищённых от перехвата каналов связи.

Физики провели ряд экспериментов, в ходе которых доказали, что в запутанном состоянии частицы ведут себя как единое целое, даже когда разделены. Исследовательская группа Антона Цайлингера продемонстрировала явление, называемое квантовой телепортацией, благодаря которой возможно перемещать квантовое состояние от одной частицы к другой на расстоянии. Таким образом А. Аспе, Д.Ф. Клаузер и А. Цайлингер “расчистили путь для новых технологий” — квантовых компьютеров и сетей. Также их открытие поможет создать пути безопасного обмена информацией, линий связи, защищённых квантовым шифрованием.



**Нобелевскую премию по химии** получили американец К. Barry Sharpless (Scripps Research) и датчанин (Univ. Copenhagen) “за развитие клик-химии”, а также американке Carolyn R. Bertozzi (Stanford Univ.) “за разработки методов биоортогональной химии”. Клик-химия (click - щелчок) - набор реакций для быстрого (“по щелчку”) и селективного получения сложных органических и биоорганических молекул посредством соединения между собой маленьких структурных фрагментов (по принципу детского конструктора Lego). Клик-химия существенно облегчает поиск новых фармацевтических препаратов.

Химики давно движет желание строить все более сложные молекулы. В фармацевтических исследованиях это часто связано с искусственным воссозданием природных молекул с лечебными свойствами. Это привело ко многим замечательным молекулярным конструкциям, но они, как правило, требуют много времени и очень дороги в производстве. “Премия этого года по химии направлена на то, чтобы не усложнять вещи, а работать с тем, что легко и просто. Функциональные молекулы можно построить даже прямым путем”, — говорит Йохан Оквист, председатель Нобелевского комитета по химии. Щелчковая химия и биоортогональные реакции перенесли химию в эпоху функционализма. Это приносит наибольшую пользу человечеству.

**Информационный бюллетень ПерсТ  
издается информационной группой ИФТТ РАН**

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, О. Камынина, М. Маслов, А. Пятаков, З. Пятакова

Выпускающий редактор: И. Фурлетова

Адрес редакции: 119296 Москва, Ленинский проспект, 64