

ISSN: 2782-5515

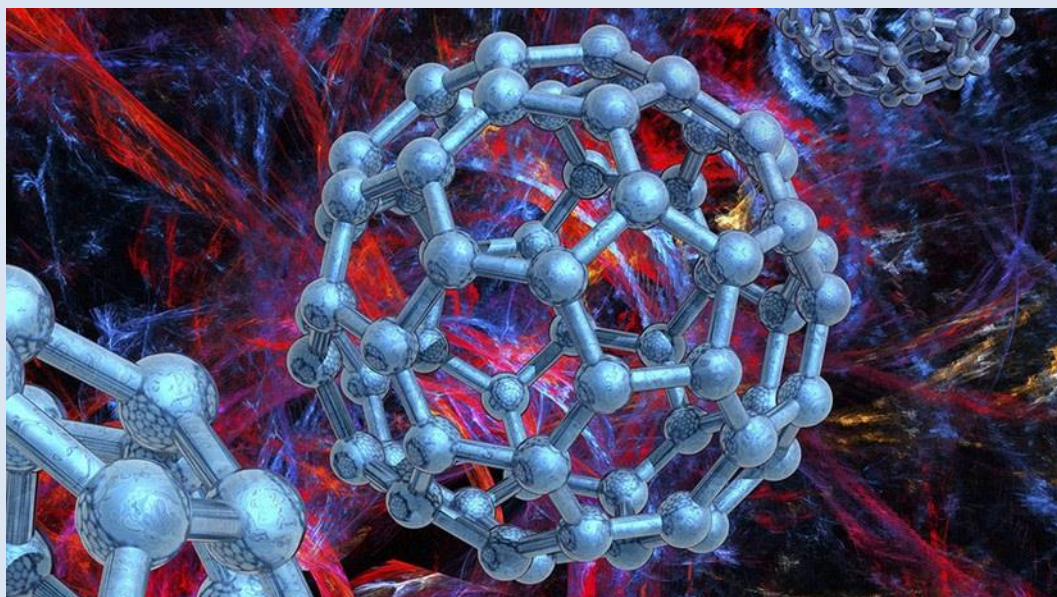


Перст

Информационный бюллетень
перспективные технологии
наноструктуры сверхпроводники фуллерены

Том 28, выпуск 23/24

декабрь 2021 г.



Фуллерен/ Gettyimages.ru / © LAGUNA DESIGN

Черноголовка

Том 28, выпуск 23/24

декабрь 2021 г.

В этом выпуске:

НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ

Пластырь по мотивам колючек кактуса быстро и эффективно собирает капли пота для анализа

Пот человека содержит биомаркеры состояния организма, и анализ его состава позволяет проводить неинвазивную диагностику заболеваний (например, обнаружить повышение уровня сахара в крови), определять мышечное перенапряжение, обезвоживание, уровень стресса. В последние годы были разработаны различные варианты носимых устройств, которые, к сожалению, не подходят для непрерывного контроля, поскольку для получения необходимого количества пота требуется или увеличение физической нагрузки или термостимулирование. Перспективны системы, использующие для сбора пота микрофлюидные каналы. Тем не менее, и они не лишены недостатков – в этих каналах смешивается свежий и старый пот. Исследователи из Pohang Univ. of Science and Technology (Южная Корея), вдохновленные колючками кактуса, создали “пластырь” для сбора пота, который обеспечивает быстрый и непрерывный анализ [1].

Колючки кактуса обладают способностью собирать влагу из воздуха. Они имеют форму конуса, диаметр которого увеличивается от кончика к основанию. Капля, попавшая на колючку, имеет меньшую кривизну поверхности ближе к основанию, и большую – ближе к кончику. Величины давления Лапласа, зависящие от радиуса кривизны, также разные, и капля постепенно сдвигается к основанию колючки (рис. 1). Авторы работы [1] по мотивам колючки создали 2D микро/наноструктурную конструкцию для сбора капель пота.

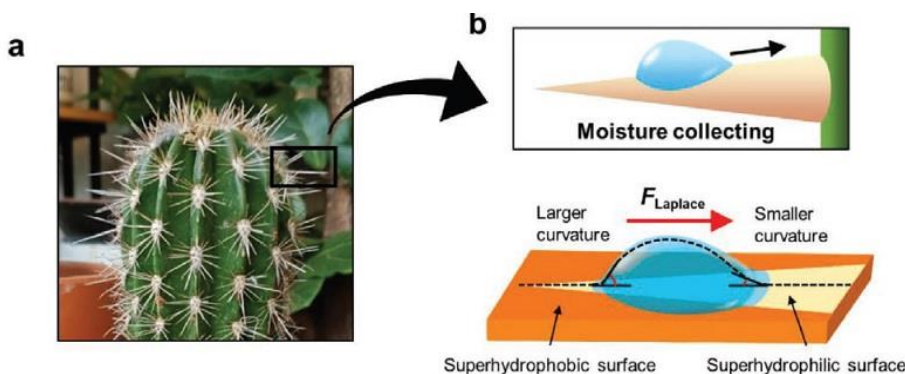


Рис. 1. а - Фотография кактуса. б - Схема движения капли по колючке и по супергидрофильному клиновидному каналу 2D конструкции авторов [1].

И далее ...

СНОВА К ОСНОВАМ

4 Как нож сквозь масло, или секреты резки полимеров

5 Прочность твердого водорода

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

6 Алмазное стекло из фуллеренов

МАГНИТЫ

7 Есть только миг: [метаморфозы антиферромагнитного кристалла в терагерцовом импульсе

МИКРОТЕХНОЛОГИИ

8 Лазерная нарезка струи или оптофлюидный резонанс

КОНФЕРЕНЦИИ

9 VIII Euro-Asian Symposium “Trends in Magnetism” (EASTMAG-2022), August 22-26, 2022, Kazan, Russia

В этой конструкции клиновидные супергидрофильные каналы в супергидрофобном окружении размещены на двух идентичных (верхней и нижней) пластинах из полидиметилсилоксана (ПДМС). Верхняя пластина (“крышка”) добавлена для предотвращения испарения пота из открытых каналов, а также для удвоения давления Лапласа благодаря увеличению поверхности контакта. Каналы расширяются к центру

системы, где находится резервуар для сбора пота диаметром 5 мм. “Пластырь” с микрофлюидными каналами прикрепляется к коже с помощью двухстороннего адгезионного слоя с отверстиями для пота диаметром 2 и 6 мм, соединенными со входами в каналы. Конструкция хорошо видна на схеме (рис. 2а). Фотография “пластыря” на руке приведена на рис. 2б.

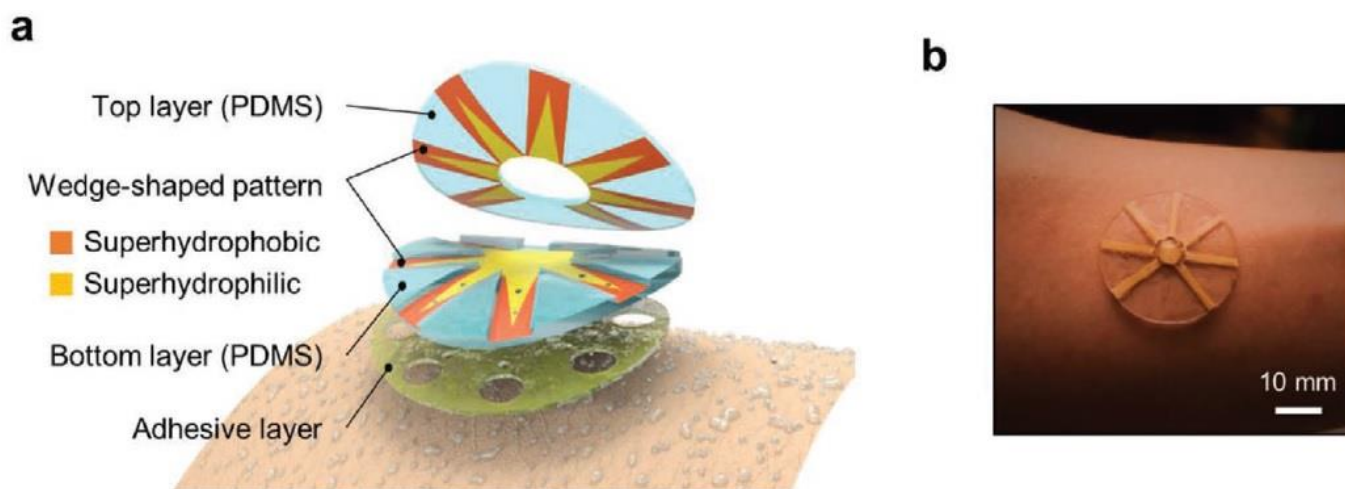


Рис. 2. а - Схема “пластыря” для сбора пота на коже человека.
 б - Фотография устройства, прикрепленного к руке.

Для создания наноструктурной супергидрофильной поверхности раствор наночастиц SiO_2 в ПВА распыляли на слой ПДМС, обработанный в кислородной плазме. С помощью дополнительной химической обработки необходимые части поверхности вокруг каналов сделали супергидрофобными. Благодаря геометрии каналов (клинья) и разных величин поверхностных энергий супергидрофильных и супергидрофобных областей капли пота под действием давления Лапласа направляются к центру, а не остаются в каналах. Сбор пота в резервуаре происходит, даже если система ориентирована вертикально. Скорость сбора в два раза выше, чем для конструкции с прямыми микрофлюидными каналами.

Испытания “на теле” были проведены для системы, объединяющей разработанный исследователями сборник пота и сенсор пота (рис. 3). Отклики присоединенного к пластырю сенсора на биохимические компоненты пота (на примере глюкозы и молочной кислоты) были получены в течение 5 минут.



Рис. 3. Испытания “на теле”. Фотография прикрепленной к руке системы, объединяющей разработанный сборник пота (“пластырь”) и сенсор пота.

Сборник пота, разработанный авторами [1], дает возможность практически непрерывно следить за состоянием организма в режиме реального времени.

О. Алексеева

1. J.Son et al., *Adv. Mater.* 33, 2102740 (2021).

СНОВА К ОСНОВАМ

Как нож сквозь масло, или секреты резки полимеров

Процесс резки материалов до последнего времени был непредсказуемым. У некоторых образцов при отрезании происходят сколы, и поверхность среза оказывается негладкой. Причем при одних толщинах среза отрезаются

гладкие полоски, а при других – образуются сколы и зазубрины. Для того чтобы четко контролировать технологические процессы, необходимо заранее знать, будет материал скалываться или нет. В статье [1] исследователи из Aarhus Univ. (Дания) подробно изучили процесс резки ножом полимерных материалов с различными упругими свойствами и механизмы образования сколов.

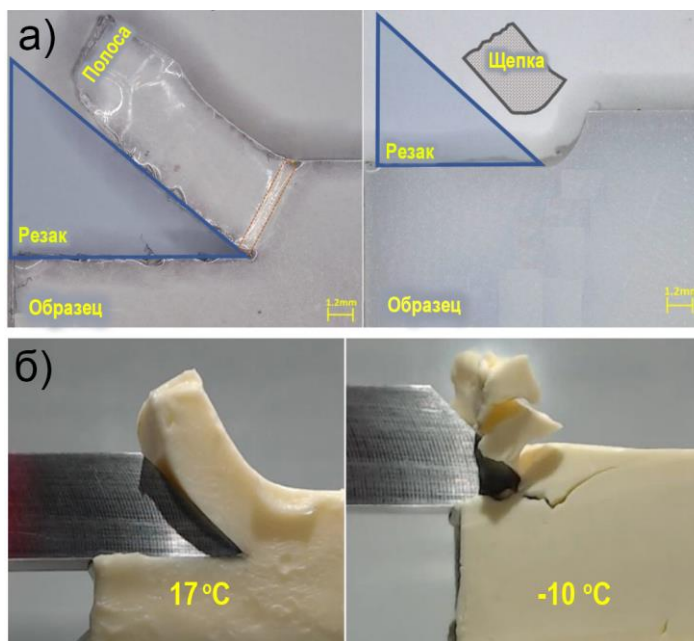


Рис. 1. а - Образование полос и щепок при резке полимеров
б - Резка сливочного масла при разных температурах

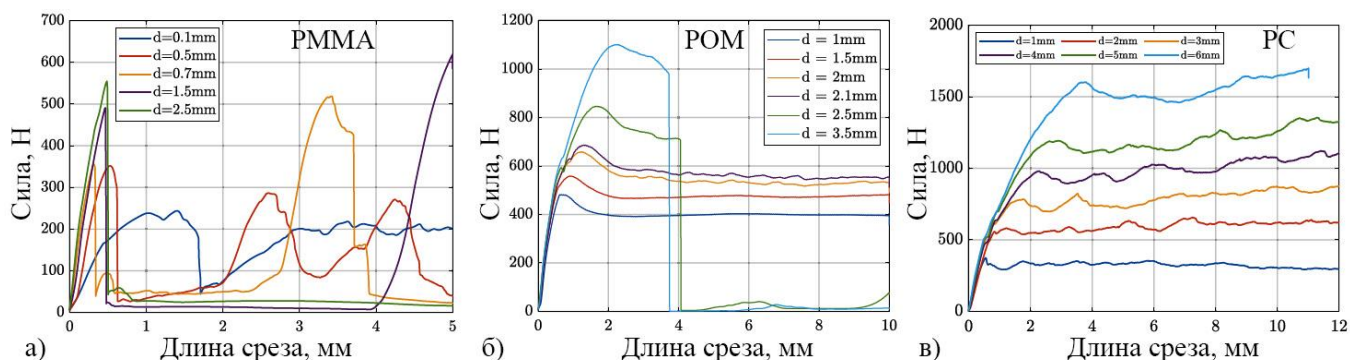


Рис. 2. Графики сила – длина среза для трех материалов

а – полиметилметакрилат (самый хрупкий); б – полиоксиметилен; в – поликарбонат (самый пластичный)

Авторы исследовали три полимера: полиметилметакрилат (оргстекло, PMMA), полиоксиметилен (POM), поликарбонат (PC). Эти три полимера обладают существенно различающимися упругими свойствами: оргстекло самое хрупкое, а поликарбонат – самый пластичный. Важнейшим фактором является расстояние от начала среза до края материала: тонкие срезы могут изгибаться, а срезы потолще начинают

ломаться, значит, существует определенное значение критической толщины.

Получена формула для критической толщины, в которую входят упругий модуль материала, сдвиговый модуль, угол лезвия ножа, и другие безразмерные параметры. Экспериментально авторы [1] исследовали силу, возникающую в процессе резки полимеров, и характер этих процессов, и, определив критическую толщину,

подтвердили теоретическую зависимость. Обнаружилось, что в оргстекле щепки образуются даже при срезах толщиной меньше 0.1 мм, на графиках (рис. 2а) видно, что сила, действующая на нож, то резко нарастает, то снижается до нуля, когда материал откалывается. В полиоксиметиле не виден переход режимов – при малых толщинах сила выходит на стационарный уровень, а при толщине больше 2.5 мм она меняется скачкообразно – материал начинает откалываться (рис. 2б). Поликарбонат режется без сколов вплоть до толщин 6 мм (рис. 2в).

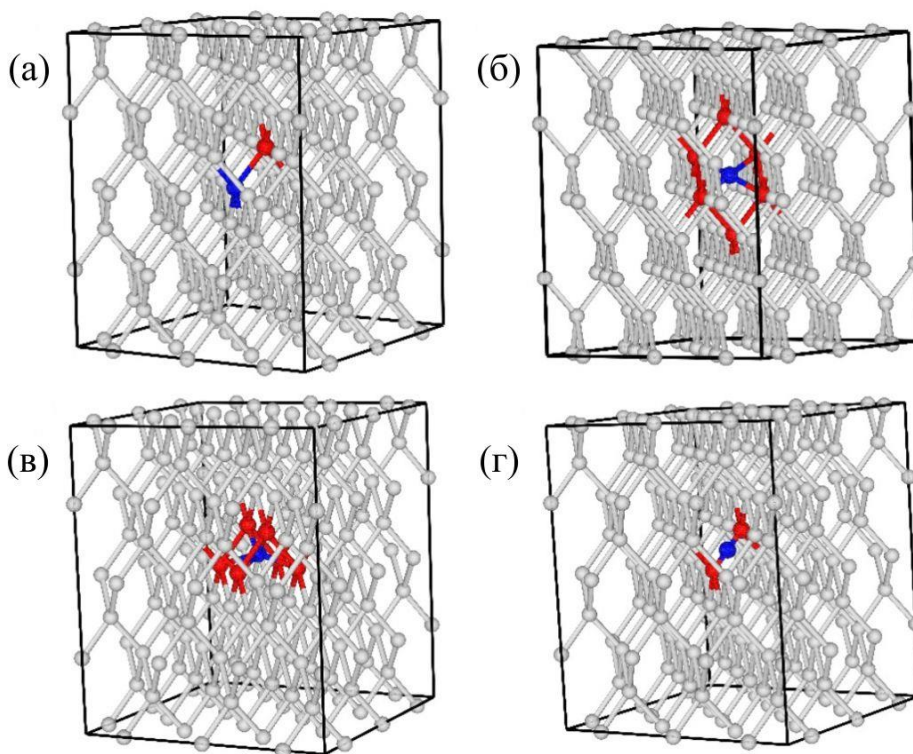
Исходя из теоретических предпосылок, технологи на производстве могут заранее предсказать результат резки и выбрать необходимые методики. Например, для хрупкого оргстекла обычно используется лазерная, а не механическая резка. А в быту эти знания помогут лучше порезать масло для новогодних бутербродов. Желаю всем читателям ПерсТа счастливого Нового Года!

З. Пятакова

I. R.Aghababaei et al., Phys. Rev. Lett. 127, 235502 (2021).

Прочность твердого водорода

Твердый атомарный водород – объект достаточно интересный. Помимо нетрадиционной атомной структуры, которой он очевидно обладает, теоретические исследования предсказывают ряд присущих ему уникальных свойств, среди которых, например, металличность и высокотемпературная сверхпроводимость. Твердый атомарный водород может кристаллизоваться с образованием различных типов решетки лишь при высоких, существенно выше атмосферного давлениях (по некоторым оценкам порядка 600 ГПа). Однако при постепенном снятии давления до ~200 ГПа возможность удержать такое метастабильное состояние все же остается. Первопринципные расчеты, основанные на анализе фононных спектров при нулевой температуре, подтверждают, что фаза с симметрией кристаллической решетки $I4_1/amd$ (см. рис.) должна существовать вплоть до давлений порядка 175 ГПа. При этом остается вопрос, насколько она устойчива к различным возмущениям, таким как температура, точечные дефекты и т.д.



Структура сверхъячеек твердого водорода $I4_1/amd$ с моновакансией (удален атом синего цвета), двойной вакансией (удалены атомы синего и красного цвета) (а) и междуузлиями различного типа (б, в, г). В случае междуузлий атом, обозначенный синим цветом, помещен в центр масс группы атомов, обозначенных красным цветом

Проверить водород на прочность решили авторы работы [1]. Их заинтересовали в первую очередь механические характеристики фазы $I4_1/amd$, а именно ее упругие свойства и сопротивление образованию дефектов. Теоретический анализ выполнялся с помощью теории функционала плотности в программе Quantum Espresso с применением функционала PBE и базиса плоских волн. Расчет упругих постоянных показал, что в диапазоне давлений 250 – 600 ГПа присутствуют три области механической неустойчивости, и ширина этих областей увеличивается с ростом давления. Причина этого заключается в существовании нескольких структурных минимумов фазы $I4_1/amd$, переход между которыми происходит с искажением кристаллической решетки до $Fddd$ -симметрии. По мнению авторов, это подтверждает ранее высказанную гипотезу о том, что металлическая фаза твердого атомарного водорода является единственной, для которой наблюдается регулярно повторяющийся с ростом давления структурный переход между симметриями $I4_1/amd$ и $FDDD$. Для анализа дефектообразования в твердом водороде исследователи рассмотрели несколько типов точечных дефектов (см. рис.): вакансию и бивакансию, когда один или два соседних атома удалены из исходной сверхъединицы, соответственно, а также междоузлия различного типа, когда дополнительный атом водорода помещается в определенную область между атомами кристалла. Результаты расчетов показали, что образование вакансий играет ключевую роль в разрушении метастабильного состояния. При давлении 265 ГПа их равновесная концентрация на атом достигает критической величины даже вблизи температуры кипения жидкого гелия. Таким образом, разрушение фазы происходит при более высоком давлении, чем это было предсказано ранее из анализа фононных спектров (~175 ГПа), следовательно, для устойчивости металлического водорода и возможной сверхпроводимости с критической температурой, близкой к комнатной, по оценке авторов, требуются давления, превышающие 280 ГПа. На первый взгляд, результат не внушает оптимизма. Однако останется ли металлический водород недостижимой мечтой или мы все-таки когда-нибудь подержим его в руках, покажет только время.

М. Маслов

I. K.S.Grishakov et al., Phys. Lett. A 425, 127876 (2022).

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

Алмазное стекло из фуллеренов

Исследователям из нескольких лабораторий Китая и Швеции [1] удалось настолько удачно разрушить фуллерены, что в итоге это привело к образованию алмазоподобных стекол. Они продемонстрировали, что нагревание сжатых бакиболов C_{60} приводит к формированию аморфных углеродных материалов с высоким содержанием sp^3 -связей. При этом концентрация sp^3 -гибридизованных атомов существенно увеличивается с ростом давления на фуллерены и достигает своего максимума (около 95%) в так называемой фазе AC-3 (рис. 1) при 27 ГПа, как раз, когда углеродные клетки фуллеренов безвозвратно разрушаются.

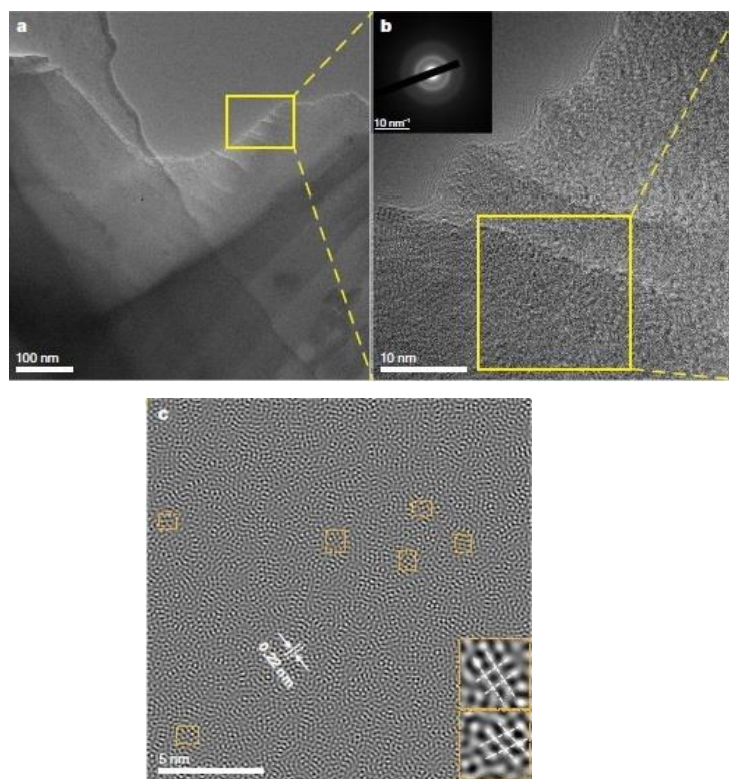


Рис. 1. Анализ образца AC-3 с помощью просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ): *a* – ПЭМ-изображение с малым увеличением; *b* – полученное с помощью ПЭМ высокого разрешения изображение, области, выделенной желтым квадратом на *a* (на вставке приведено изображение, полученное с помощью дифракции электронов (SAED) в той же выбранной области); *c* – полученное с помощью обратного преобразования Фурье изображение, области, выделенной желтым прямоугольником на *b*. Области, очерченные оранжевыми прямоугольниками, указывают на случайно ориентированные кластеры с алмазоподобным средним порядком с интервалом d около 2.2 Å, которые демонстрируют алмазоподобные геометрические характеристики (см. вставки на рисунке в правом нижнем углу).

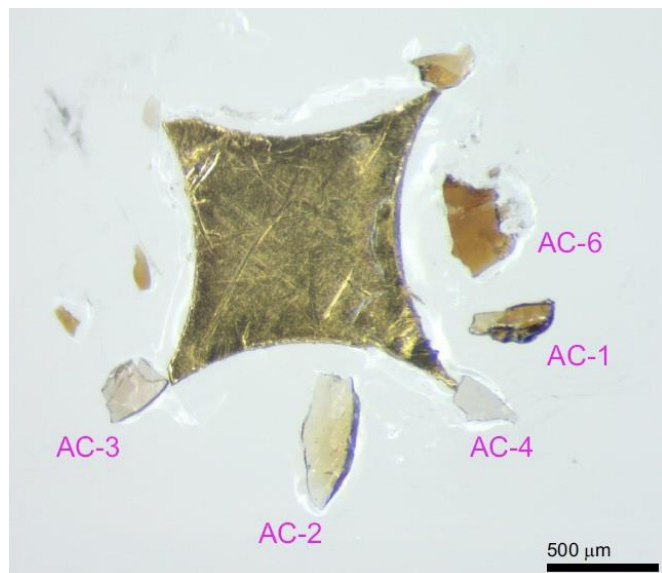


Рис. 2. Изображение тонких срезов образцов аморфного sp^3 -углерода. Срезы были получены из объемных образцов, синтезированных при различных величинах давления и температуры. Наблюдается заметная разница в цвете представленных образцов.

В конечном итоге авторы получили практически безупречные, прозрачные образцы аморфного sp^3 -углерода миллиметровых размеров (рис. 2), с высоким выходом синтеза, значительно превышающим тот, который удавалось достигнуть в предыдущих аналогичных исследованиях с помощью нагрева фуллеренов при давлениях, близких к границе схлопывания каркаса. Таким образом, превращение сколлапсированных фуллеренов в аморфный sp^3 -углерод представляет собой индуцированный нагреванием фазовый переход, параметры которого можно контролировать, регулируя давление и температуру. При этом ключевая роль для получения высококачественных образцов, (об этом авторы упоминают отдельно) отводится процессу быстрой закалки (около $500\text{ }^\circ\text{C}/\text{сек}$). Так, в сравнительном эксперименте с использованием достаточно медленного постепенного понижения температуры (примерно $5\text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$) получался материал с повышенной концентрацией sp^2 -связей и, следовательно, с менее привлекательными характеристиками. По своей структуре конечные образцы (рис. 2) представляют собой множество хаотически ориентированных кластеров с алмазоподобным ближним и средним порядком и обладают микротвердостью 102 ГПа , что сравнимо с алмазами природного происхождения. Дальнейший подробный анализ физико-химических свойств “фуллереновых стекол” показал, что их модуль упругости составляет

1182 ГПа , а теплопроводность – $26\text{ Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$. Что касается электронных характеристик, то, например, ширина запрещенной зоны варьируется в пределах от 1.85 до 2.79 эВ . Это существенно меньше, чем у алмаза, однако превышает соответствующие величины для известных классических полупроводников, таких как кремний или германий. Подводя итоги, можно сказать, что, во-первых, результаты, представленные в работе [1], вносят существенный фундаментальный вклад в развитие технологий получения объемных аморфных материалов с помощью воздействия высоких давлений и температур, а во-вторых, синтезированное авторами “фуллереновое стекло” благодаря своим превосходным механическим, термическим и электронным характеристикам открывает новые широкие возможности практического применения аморфных твердых тел. Например, такие стекла вполне могут заменить привычное Gorilla Glass, повсеместно применяемое в дисплеях наших мобильных устройств.

М. Маслов

1. Y. Shang et al., *Nature* **599**, 599 (2021).

МАГНИТЫ

Есть только миг: метаморфозы антиферромагнитного кристалла в терагерцовом импульсе

Сверхбыстрый магнетизм – активно развивающаяся область на стыке физики магнитных явлений и импульсной фемтосекундной оптики. В частности, оптическое воздействие ультракороткими импульсами на магнитную среду открывает для компьютерной памяти перспективы, которые мы описывали ранее как “стратегию 20/20”: переключать спин за 20 пикосекунд, затрачивая при этом всего 20 аттоджоулей энергии. Этот результат был получен в 2017 г. в Radboud Univ. (Нидерланды) на кобальт-замещенных пленках ферритов-гранатов (см. ПерсТ [1]).

В этот раз исследователи из этого университета совместно с учеными из Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе и Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН в качестве объекта исследования выбрали антиферромагнетик CoF_2 (рис. 1a). Воздействие коротких импульсов не привело к переключению спинов, но результат оказался не менее интригующим, а работа была опубликована в журнале *Science* [2].

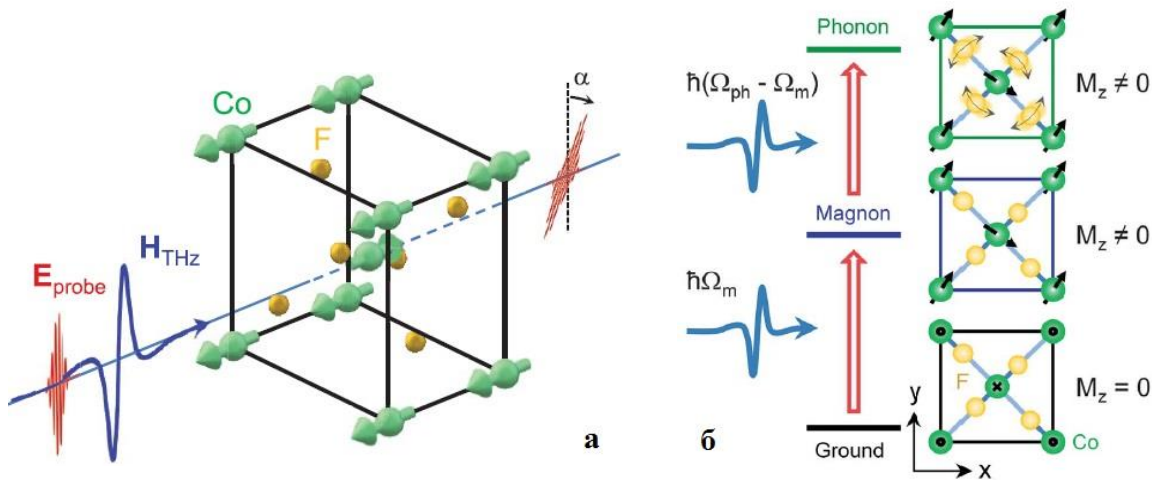


Рис. 1. а – Схематическое изображение накачки терагерцовым импульсом (изображен синим) и считывания магнитного состояния ячейки антиферромагнетика CoF_2 с использованием эффекта Фарадея пробным импульсом инфракрасного излучения (показан красным); б – возбуждение фононных мод Ω_{ph} при посредстве магнанных возбуждений Ω_{m} . Частоты переходов между уровнями составляют примерно 1ТГц.

Спиновая подсистема кристалла обычно слабо связана с решеточной: магноны с фононами практически не взаимодействуют. Это обстоятельство и способствует устойчивости магнитной памяти по отношению к тепловым флуктуациям. Однако при определенной температуре магнанные возбуждения в CoF_2 оказываются “на полпути” по энергии до уровня фононных мод (рис. 1б) и потому могут служить связующим звеном при возбуждении фононов с использованием терагерцовых импульсов (именно этому диапазону соответствует расстояние между уровнями). При пикосекундной длительности импульса терагерцовой накачки успевают пройти всего один период колебания электромагнитного поля: на мгновение антиферромагнетик становится как будто другим материалом - в нем появляется ненулевая намагниченность, а спин-фононное взаимодействие многократно возрастает.

Терагерцовые методы не только позволяют изучать свойства антиферромагнетиков на пикосекундных временных интервалах, но также помогут найти способы оптической записи магнитной информации в антиферромагнетиках с высоким быстродействием и ультрамалыми энергозатратами.

А. Пятаков

1. [ПерсТ 24, вып. 23/24, с. 10 \(2017\).](#)
2. *E.A.Mashkovich et al., Science 374, 1608 (2021).*

МИКРОТЕХНОЛОГИИ

Лазерная нарезка струи или оптофлюидный резонанс

Три года назад изобретение лазерного пинцета – инструмента, позволяющего манипулировать микронными диэлектрическими объектами с помощью сфокусированного лазерного излучения, было отмечено Нобелевской премией по физике. А может ли лазерный луч управлять более крупными объектами, такими, как струя воды, например? Этим вопросом задались исследователи из нескольких лабораторий Китая [1]. Исследования привели их к открытию явления, которое они назвали “оптофлюидным резонансом” дробления струи жидкости на капли одинакового размера при воздействии непрерывного излучения лазера.

Сила давления света даже от достаточно мощного (~1 Вт) непрерывного лазера составляет всего наноньютон. Однако в ситуации неустойчивости она может стать решающей. Классическим примером такого явления является неустойчивость Рэля-Плато – спонтанное разбиение струи текущей жидкости на капли под действием капиллярных волн, впервые наблюдавшееся Жозефом Плато еще в 1873 году.

В своем эксперименте авторы [1] фокусировали луч света от лазера на струю жидкости (воды и спиртовых растворов различных концентраций). Через 100 мс после включения лазера точка отрыва капле стабилизируется ниже сфокусированного луча: чем мощнее лазер, тем ближе точка отрыва к точке фокуса.

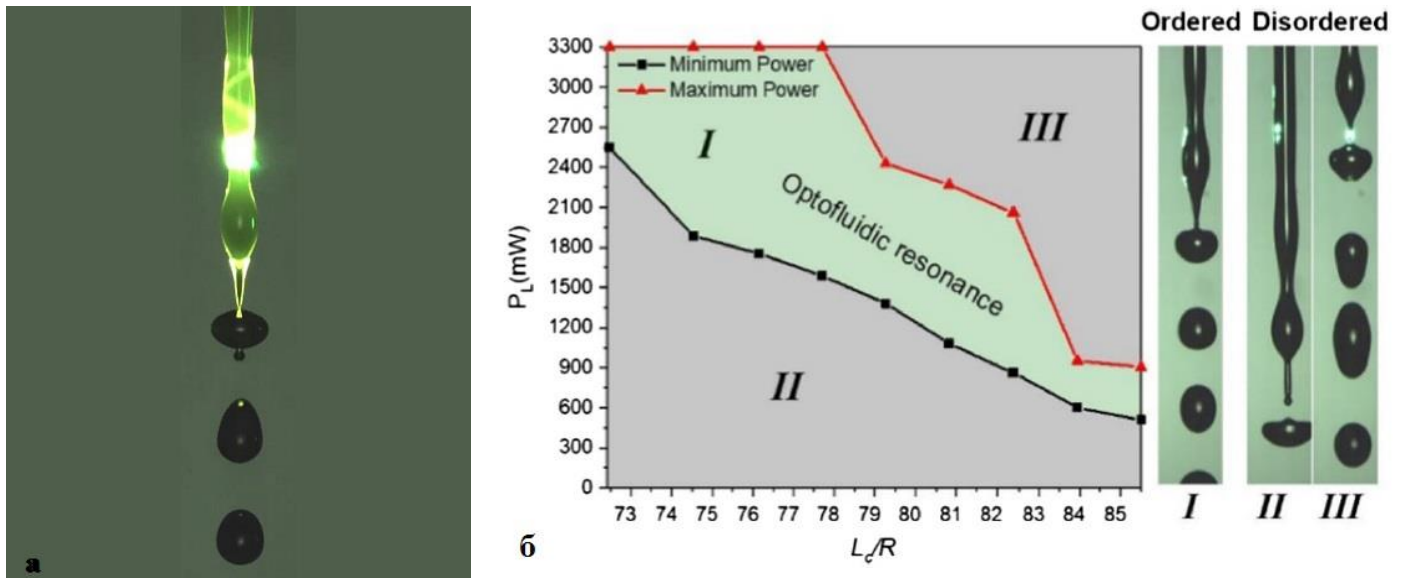


Рис. 1. а – Луч лазера, попадающий в волновод, образованный струей, способствует разбиению ее на капли; б – фазовая диаграмма “оптофлюидного резонанса” в координатах мощность лазера/расстояние до сопла, из которого течет струя, деленное на радиус струи. Иллюстрации стационарного режима I и двух нестационарных (II и III) приведены на фото справа.

Капиллярные волны, бегущие по струе, за счет периодически нарушающегося условия полного внутреннего отражения, приводят к переменной силе давления света на поверхность струи, которая меняется с той же частотой, с какой колеблется поверхность. В результате возникает явление подпитки колебаний поверхности струи за счет энергии луча лазера, которое авторы и называют “оптофлюидным резонансом”. Фазовая диаграмма перехода в этот режим показана на рис. 1б: наряду с минимальной мощностью существует и максимальная, при которой возмущения, вносимые лазером, слишком велики для возникновения стационарного режима. Чем дальше от сопла выбирается место в струе, тем более она неустойчива, и тем более узким становится диапазон разрешенных величин мощности. Мощность лазера, необходимую для разрыва струи, можно уменьшить, если использовать жидкость с меньшим поверхностным натяжением, что понятно, так как при этом поверхность струи более подвержена воздействию силы давления света. Для струи спирта с радиусом 100 мкм и лазера мощностью 1.5 Вт амплитуду начального отклонения, вызванного давлением света, можно оценить как 10 нм, что по порядку величины согласуется с экспериментальной величиной 5 нм.

Поскольку стандартное отклонение размера капель уменьшается с 20% для спонтанного Перст, 2021, том 28, выпуск 23/24

разбиения до 1% в режиме оптофлюидного резонанса, то это явление можно использовать в принтерах, пульверизаторах и микрофлюидных схемах.

А. Пятаков

1. H.Liu et al., *Phys. Rev. Lett.* **127**, 244502 (2021).

КОНФЕРЕНЦИИ

**VIII Euro-Asian Symposium
“Trends in Magnetism”
(EASTMAG-2022), August
22-26, 2022, Kazan, Russia**



EASTMAG-2022 is programmed with a hybrid model of online and offline conference. Speakers could choose to speak on site or online if they cannot attend in person.

Moreover, all the speakers and participants would have the great opportunity to submit papers. The approved papers will be published in the following journals: The Physics of Metals and Metallography (Springer); Applied Magnetic Resonance (Springer); Journal of Physics: Conference Series (IOP Publishing); and Magnetic Resonance in Solids. Electronic Journal (KFU), which are indexed by WoS (Clarivate), Scimago (Scopus) databases.

Important dates:

Deadline for registration - **April 18, 2022.**

Deadline for submission of Abstracts - **April 18, 2022.**

Notification of acceptance/rejection will be emailed by end of - **May, 2022.**

Any queries about the conference can be directed to the electronic address: eastmag2022@kfti.knc.ru.

The meeting Web site will operate after New Year holidays and will be announced later.

Web site: <http://kfti.knc.ru/EASTMAG2022/>

*Дорогие наши читатели!
Поздравляем вас и ваших близких с наступающим Новым годом и Рождеством!*

*Сорван листочек последний,
Снят со стены календарь.
Ждет уж давно поздравлений,
Стоящий за дверью январь.
В ярких огнях карнавальных
Час наступает его,
Звоном бокалов хрустальных.
Входит в Ваш дом торжество.
Пусть посетит Вас удача,
Пусть вдохновенье придет,
Пусть Ваша жизнь станет ярче
В Новый, начавшийся год!*



Редакция и авторы ПерсТа

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

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

Научные редакторы К. Кугель, Ю. Метлин

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

Выпускающий редактор: И. Фурлетова

Адрес редакции: 119296 Москва, Ленинский проспект, 64