

ISSN: 2782-5515

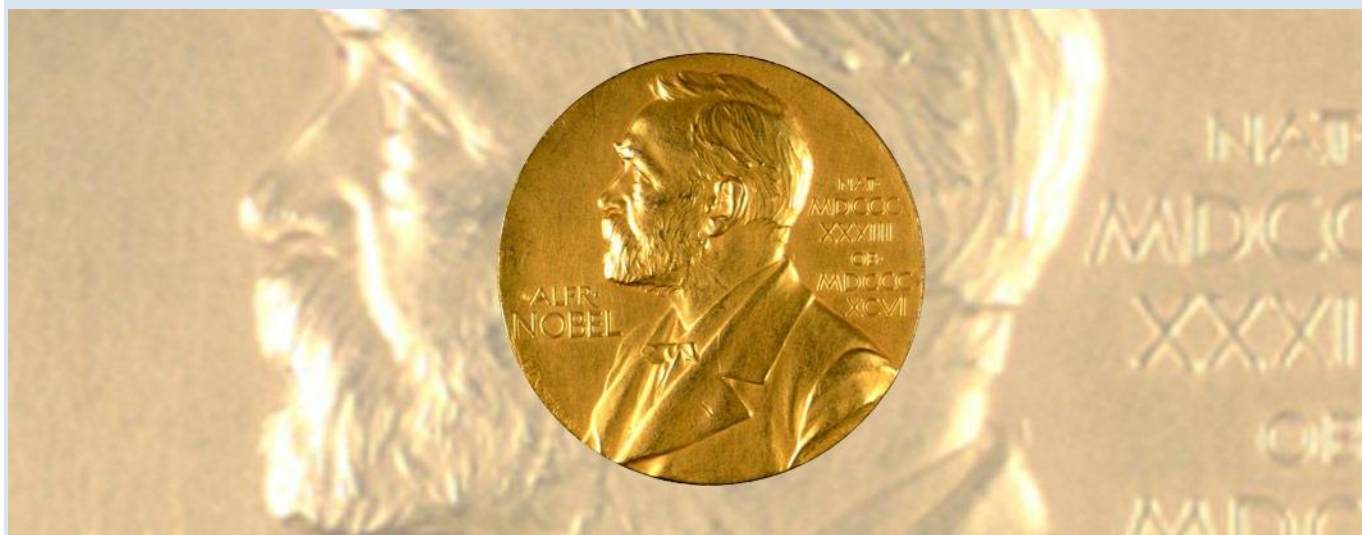


Перст

Информационный бюллетень
перспективные технологии
наноструктуры сверхпроводники фуллерены

Том 31, выпуск 10

октябрь 2024 г.



Черноголовка

НАНОМАТЕРИАЛЫ

Новый композит для терморегуляции по мотивам кожи кальмаров

Изучение природных объектов помогает ученым создавать новые материалы с необычными свойствами. Кальмары, способные практически мгновенно менять свою окраску, уже давно привлекают внимание исследователей. В одном из слоев их сложной кожи находятся хроматофорные комплексы, которые состоят из хроматофоров с пигментами и мышечных и нервных клеток. В результате мышечного воздействия пигменты растягиваются в диски или сжимаются до точечных размеров, при этом меняется пропускание и отражение видимого света и, соответственно, окраска. Используя эту подсказку Природы, ученые из Univ. of California, Irvine (США) разработали композитное “термоодеяло” для ИК диапазона, которое обеспечивает терморегуляцию организма, и даже сделали рукав для испытаний на человеке (подробнее см. ПерсТ [1]). Однако этот материал имел некоторые недостатки, например, он не пропускал воздух и пары воды. В своих дальнейших работах исследователи совершенствовали композит и недавно представили результаты создания дышащего, пригодного к многократной стирке материала, который к тому же можно внедрить в гибкую ткань [2]. На рис. 1 показана фотография длинноперых прибрежных кальмаров, вдохновивших авторов разработки (а), схема изменения хроматофоров при мышечном воздействии (b), схема изменения структуры стандартного композита при растяжении (с), а также этапы изготовления нового композита (d,e,f) и его изменение при механическом растяжении (g).

Как и в первоначальном варианте, методом электронно-лучевого напыления на подложке получили наноструктурную пленку меди, затем поверх неё распылили полимерную матрицу (прозрачную для ИК излучения) и отделили композит от подложки (рис. 1с). Для того, чтобы обеспечить пропускание воздуха и паров воды, провели перфорирование – с помощью лазера проделали ряды отверстий (рис. 1d). По данным оптической микроскопии круглые отверстия в металлическом слое полученного композита окружены слитными доменами меди. При растяжении отверстия становятся овальными, а островки металла вокруг них разделяются (рис. 2). Таким образом, перфорирование не влияет на рабочий механизм. Композит пропускает воздух и пары воды как хлопковая ткань и при этом обеспечивает нужное пропускание и отражение ИК излучения, или тепла человеческого

И далее ...

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

- 5 Фуллереновые мембраны
для очистки воды

ФОТОНИКА

- 6 Оптические гребенки станут
инфракрасными: создан
микрорезонатор
на основе германия

ВЕСТИ С КОНФЕРЕНЦИЙ

- 7 Конференция mFrA-2024

ТОРЖЕСТВО

- 8 Нобелевская премия 2024

тела. При растяжении 0%, 30% и 50% пропускание увеличивается от 8% до 17% и 25%, а отражение снижается от 88% до 72% и 64%.

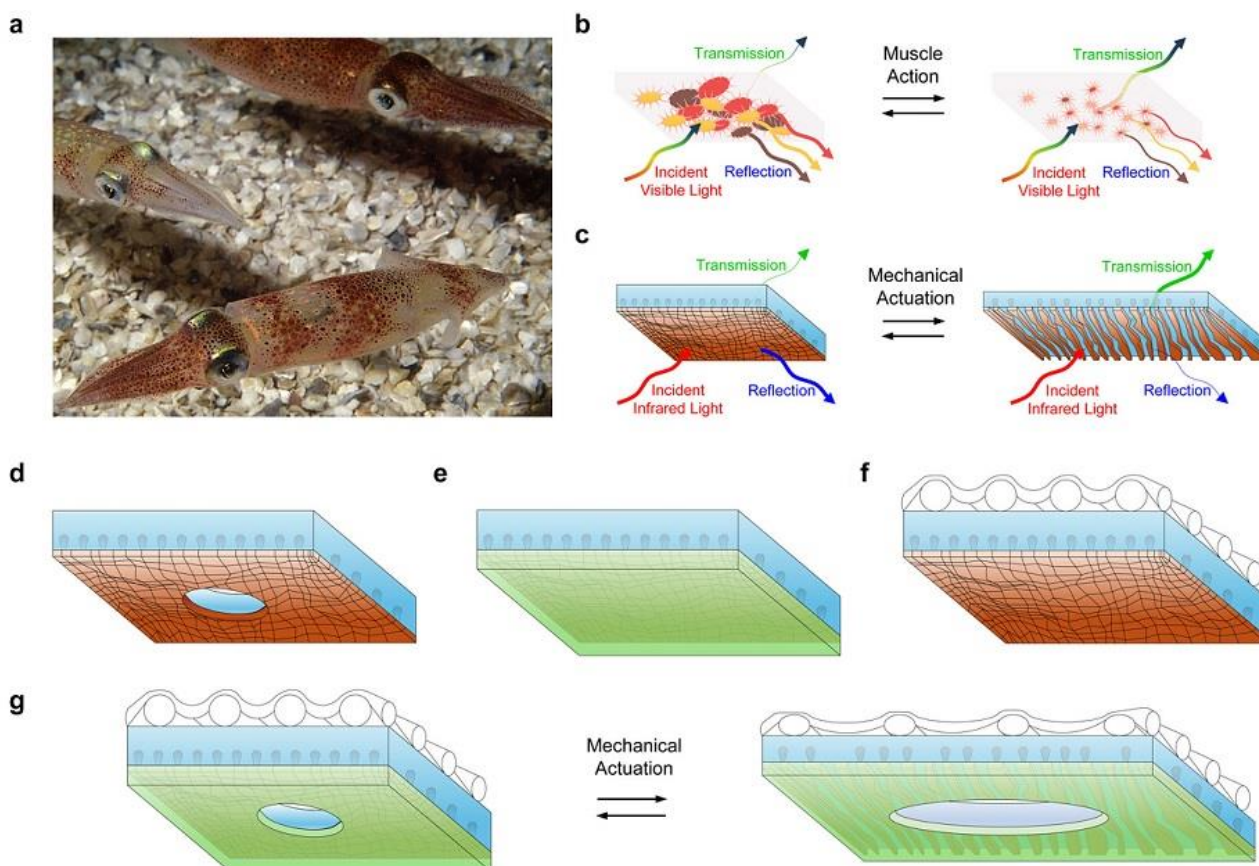


Рис. 1. **a** – Фотография длинноперых прибрежных кальмаров. **b** – Схема работы хроматофоров в слое кожи кальмара при мышечном воздействии. **c** – Схема изменения при растяжении структуры стандартного композита из полимерной матрицы с островками меди. **d,e,f** – Этапы изготовления нового композита. **g** – Схема изменения при растяжении дышащего, пригодного к многократной стирке, внедрённого в гибкую ткань композита.

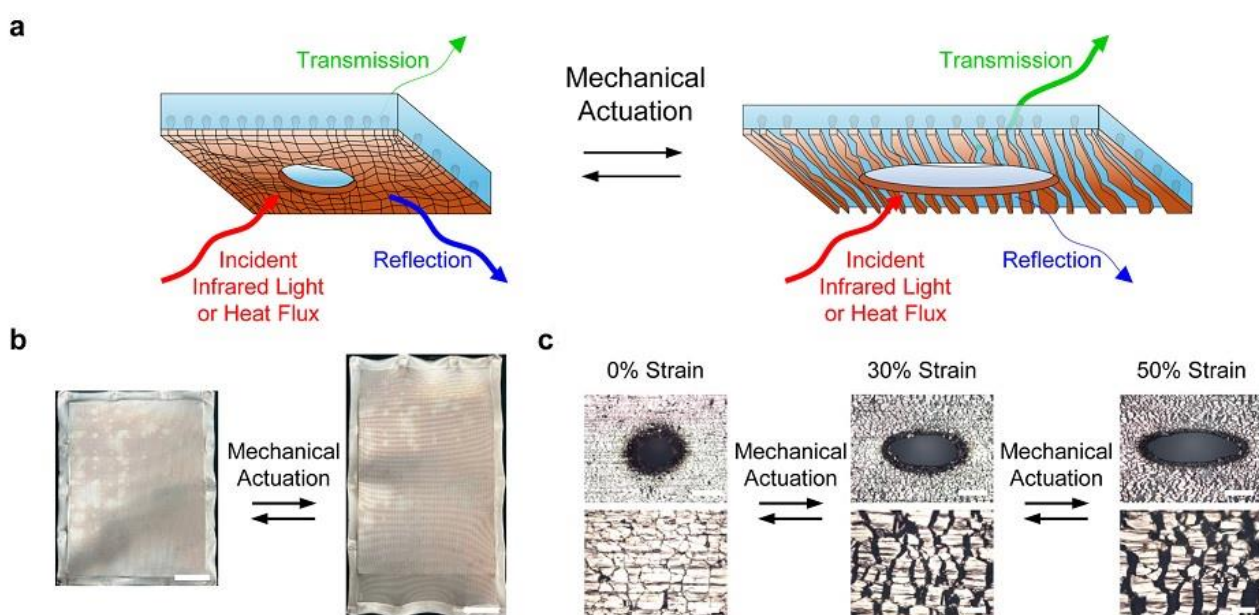


Рис. 2. **a** – Схема изменения микроструктуры и пропускания ИК излучения для перфорированного композита при механическом воздействии. **b** – Оптическое изображение перфорированного композита без нагрузки (слева) и при растяжении 50% (справа). **c** – Оптическая микроскопия образцов при растяжении 0%, 30% и 50% (шкала 100мкм вверх, 20 мкм вниз). Островки металла разделяются при растяжении.

Для того, чтобы обеспечить возможность многократной стирки, стандартный композит со стороны металла закрыли тонкой полимерной пленкой (рис. 1е). Испытания показали, что нужные свойства сохранились, хотя стали несколько слабее. Затем авторы [2] продемонстрировали возможность внедрения стандартного композита в гибкую ткань, закрепив с помощью клеевого раствора на полимерной матрице коммерческую сетку (рис. 1f). Исследова-

ния подтвердили, что рабочий механизм, т.е. разделение островков меди при растяжении и слияние их при снятии нагрузки, сохранился.

Полученные результаты позволили авторам [2] перейти к заключительному этапу – изготовлению дышащего, выдерживающего стирку, внедренного в гибкую ткань композитного материала и оценить влияние растяжения (рис. 1g и рис. 3).

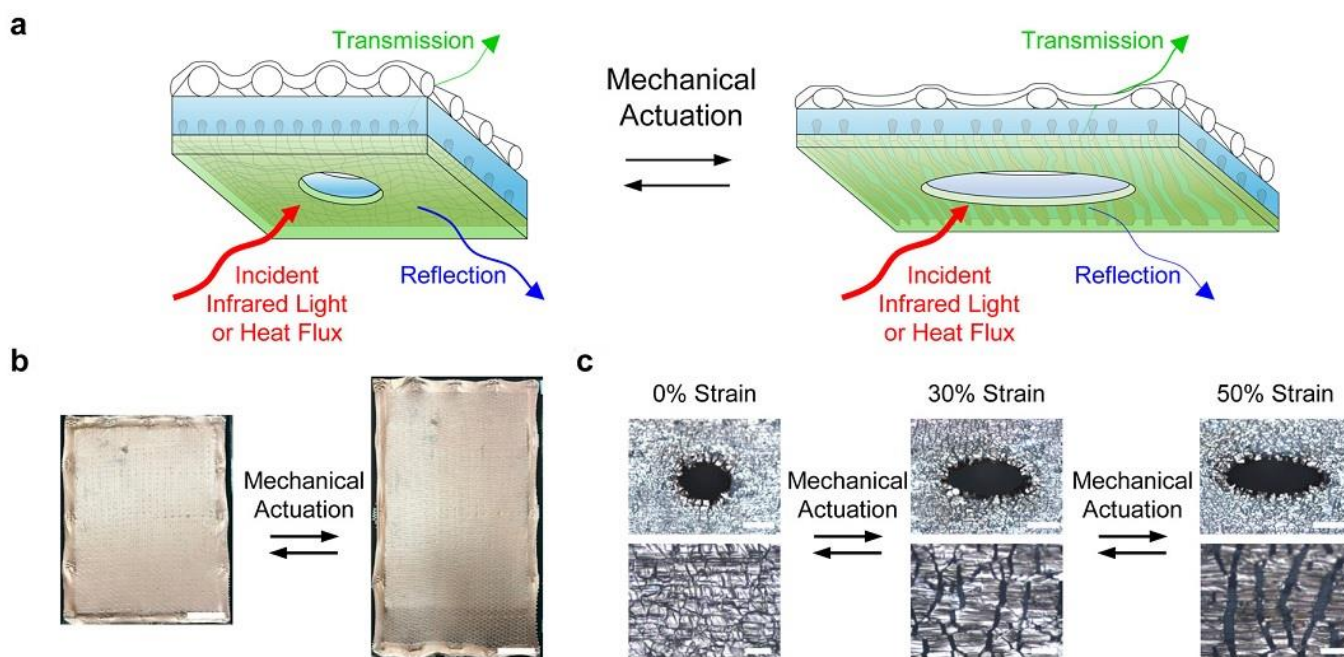


Рис. 3. **а** – Схема изменения микроструктуры и пропускания ИК излучения для композита с перфорацией и с дополнительным покрытием со стороны металла, соединенного с сеткой на другой стороне. **б** – Оптическое изображение перфорированного композита без нагрузки (слева) и при растяжении 50% (справа). **с** – Оптическая микроскопия образцов при растяжении 0%, 30% и 50%. Шкала 100мкм вверх, 20 мкм вниз. Островки металла разделяются при растяжении.

Исследователи изготовили композиты довольно больших размеров – 560 см². Как и раньше, поверх Си наноструктурной пленки методом распыления полимеров нанесли растягиваемую матрицу. Полученный композит отделили от подложки. В образцах проделали ряды отверстий ~200 мкм на расстоянии ~1 мм от края до края. Композиты “запечатали” полимерным слоем со стороны металла, а к полимерной матрице с помощью клеевого раствора прикрепили коммерческую гибкую сетку. Избыток растворителя испарился в атмосферу.

На рис. 3с показано, что при растяжении изменяется микроструктура – происходит разделение доменов меди. Средние значения для ИК спектра пропускания при растяжении 0%, 30% и 50% растут от 2% до 5% и 7%, а для ИК спектра отражения снижаются от 63% до 55% и

51%. Как и ожидалось, они меньше этих величин для стандартного композита, но важно, что сохраняются даже после 10 000 циклов механического воздействия и практически не меняются после 20 циклов стирки. Оценка динамической терморегуляции показала, что тепловые потоки меняются от 197 Вт/м² при растяжении 0% до 212 Вт/м² при растяжении 30%.

Модифицированные композиты сохранили не только хорошие механические свойства (низкий модуль Юнга и большая величина разрушающей деформации), но и рабочий механизм – перестраиваемое изменение микроструктуры при растяжении и при его снятии. Прикладывая растяжение 50%, спектр пропускания можно изменить на 5%, а спектр отражения – на 12%. Тепловой поток при 30% растяжении меняется на 15 Вт/м².

Новые оптимизированные композиты, конечно, можно использовать для зимней одежды. Но дышащий материал, допускающий стирку и внедрение в ткань, представляет интерес и для других носимых систем, например, используемых в гибкой органической электронике.

О. Алексеева

1. [ПерсТ 26, вып. 19/20, с.1 \(2019\).](#)
2. [S. Lee et al APL Bioeng. 8, 046101 \(2024\).](#)

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

Фуллереновые мембраны для очистки воды

Проблема опреснения и очистки воды остается одной из самых актуальных и значимых на современном этапе развития человечества. В связи с этим поиск и разработка пористых материалов является ключевой научной задачей, от решения которой напрямую зависит эффективность процессов фильтрации. Появление низкоразмерных функциональных систем, в частности двумерных кристаллов, позволило исследователям существенно продвинуться в проектировании селективных мембран с заданной проницаемостью и высокой степенью задержки и захвата примесей. Особая роль здесь традиционно отводилась углеродным материалам, таким как графен и его производные. Однако недавний успешный синтез фуллереновых монослоев открыл новые перспективы для создания сверхтонких фильтрующих мембран. От графеновых мембран их отличает более высокая плотность пор, а сами поры, образованные в результате прочного ковалентного связывания между фуллеренами, благодаря своей воронкообразной форме обладают большим количеством адсорбционных узлов. В настоящее время выделяют три типа монослойных фуллереновых мембран, которые получаются из соответствующих объемных фаз: квазигексагональная (qHP) и две различные квазитетрагональные (qTP1, qTP2) структуры. Поскольку отверстия в qHP диаметром $2.1 \text{ \AA}$ слишком малы для пропускания воды, а qTP1 устойчива лишь в анионном состоянии, исследователи из Vanderbilt Univ. и Oak Ridge National Lab (США) в своей работе [1] показали, что мембрана qTP2 (см. рис. 1) с предельным диаметром пор $3.1 \text{ \AA}$ могла бы стать идеальным кандидатом для очистки воды от примесей. Таким образом, исследователи поставили перед собой задачу комплексной оценки перспективности применения квазидвумерной фуллереновой

мембраны qTP2 в качестве селективного барьера для воды как в жидкой, так и в паровой фазе.

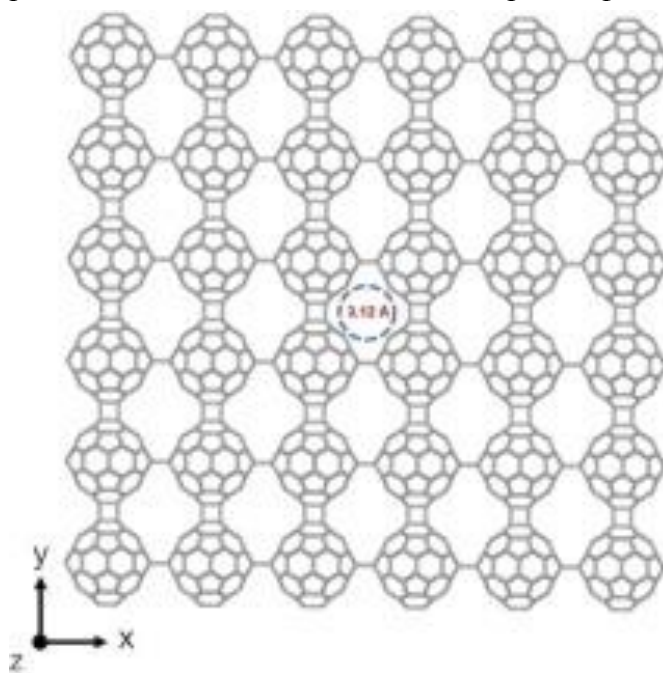


Рис. 1. Атомная структура (вид сверху) монослойной фуллереновой мембраны qTP2 (квазитетрагональная фаза 2). Предельный диаметр пор составляет $3.12 \text{ \AA}$

Транспорт пара и жидкости сквозь мембрану они анализировали с помощью метода классической молекулярной динамики, точнее, его реализации в программе Gromacs. Для моделирования процессов переноса они использовали простую двухкамерную систему (см. рис. 2). На стороне подачи находился азот под давлением в 100 бар, который и проталкивал воду через мембрану, а на стороне пермеата (очищенной воды) поддерживалось давление около одного бара. Размеры “коробки моделирования” составили $5.46 \text{ нм} \times 5.40 \text{ нм} \times 20 \text{ нм}$. При этом в направлении x авторы применили периодические граничные условия, а на границах $z = 0$ и $z = 20 \text{ нм}$ они расположили две непроницаемые стенки (рис. 2). С каждой стороны находилось по 3000 молекул H_2O . Для моделирования процесса переноса морской воды исследователи добавили 33 пары ионов Na^+ и Cl^- на сторону подачи, что способствовало образованию раствора NaCl с концентрацией около 3.45 % масс., что соответствует средней солености мирового океана ($\sim 3.5 \text{ \% масс.}$). Авторы использовали канонический (NVT) ансамбль с модифицированным термостатом Берендсена. Общая продолжительность моделирования составила 600 нс с временным шагом 2 фемтосекунды.

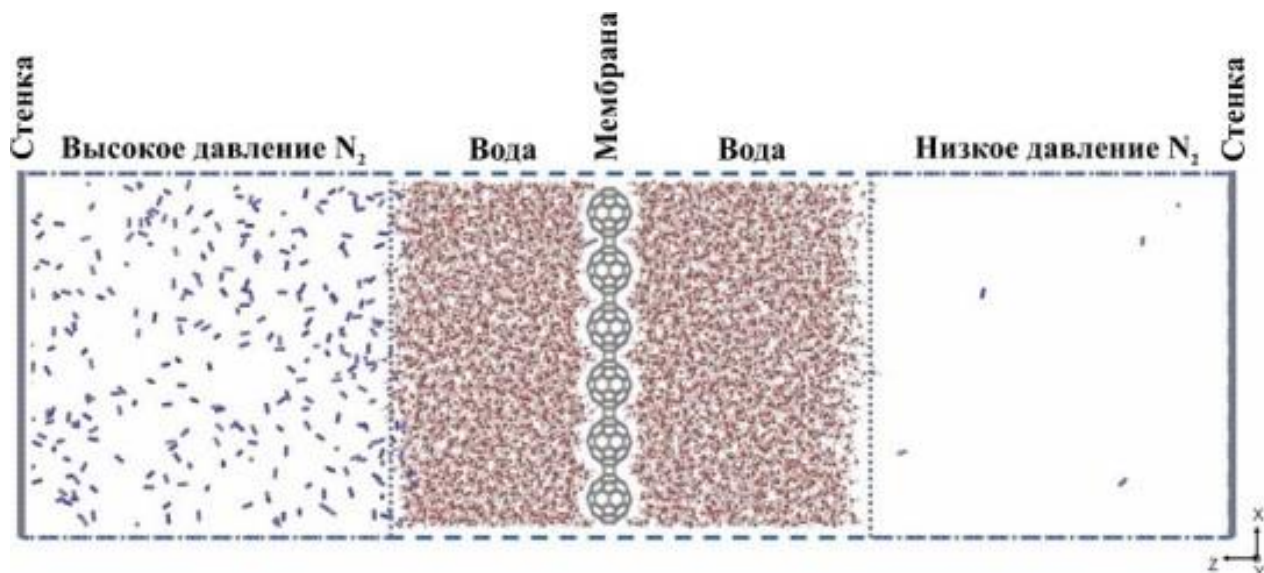


Рис. 2. Модель (вид сбоку) двухкамерной системы для проведения молекулярно-динамических расчетов прохождения воды через фуллереновую мембрану. Серые линии соответствуют непроницаемым стенкам на левой и правой границах. Молекулы воды проходят сквозь мембрану из области высокого давления (сторона подачи, слева) в область низкого давления (сторона пермеата, справа).

Межатомное взаимодействие они описывали с помощью силового поля OPLS-AA с нулевыми зарядами на атомах.

В результате авторы обнаружили, что структура квазитетрагональной фуллереновой мембраны qTP2 способна обеспечить достаточно быстрый транспорт водяного пара ($\sim 50 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{день}^{-1} \cdot \text{Па}^{-1}$) и транспорт жидкой воды ($\sim 2 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{день}^{-1} \cdot \text{Па}^{-1}$). Более продолжительный перенос жидкости обусловлен необходимостью десольватации молекул воды для разрыва водородных связей. Моделирование же процесса транспорта морской воды через такой барьер продемонстрировало ее полную очистку от соли. Таким образом, по мнению авторов, их работа раскрывает значительный потенциал использования однослойных фуллереновых мембран в качестве производительных очистных элементов. Будем ждать экспериментальной проверки результатов.

М. Маслов

1. Y.Tong et al., *Comput. Mater. Today* **4**, 100013 (2024).

ФОТОНИКА

Оптические гребенки станут инфракрасными: создан микрорезонатор на основе германия

Оптические микрорезонаторы с модами шепчущей галереи – перспективные системы, находящие свое применение в самых разнообразных проектах: от создания квантовых компьютеров и детекторов гравитационных волн до автомобильных навигаторов. Одной из ведущих научных групп в этой области является лаборатория Российского квантового центра под руководством И.А. Биленко, их исследования уже были отмечены в Перст [1]. Для создания оптических гребенок и многочисленных спектроскопических применений необходимы микрорезонаторы, работающие не только в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне, но и в среднем ИК-диапазоне. Создание такого микрорезонатора стало задачей команды исследователей из Российского квантового центра, Института космических исследований, МФТИ и Тверского университета. Результаты этой работы опубликованы в недавней статье в *Optics Express* [2]

Материал, выбранный для микрорезонатора – германий. Он обладает расширенным окном прозрачности в инфракрасном диапазоне (от 1.7 до 15 мкм), высоким показателем преломления, а также существенным коэффициентом оптической нелинейности [3], превышающим соответствующий показатель кремния в 10 раз.

Германий также совместим с КМОП-технологией, то есть его можно включать в оптические интегральные схемы. Всё это делает германий перспективным материалом для создания оптических гребенок в инфракрасном диапазоне.

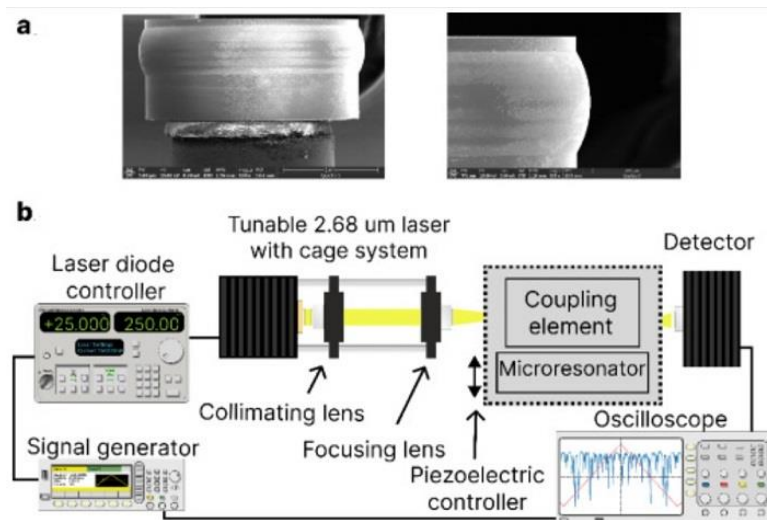


Рис. 1. **а** – Микрофотографии изготовленных микрорезонаторов (диаметр порядка 1 мм); **б** – установка для измерения добротности

Авторы разработали методику изготовления микрорезонаторов из германия и измерения их добротности. Микрорезонатор вытачивали из кристалла германия на токарном станке (рис. 1а), затем шлифовали шкурками с уменьшающимся размером зерна при микроскопическом контроле. Экспериментальная установка (рис. 1б) позволяет снимать спектр пропускания микрорезонатора, из которого и вычисляется добротность. Она составила $2 \cdot 10^7$ для длины волны 2.68 мкм, эта величина является очень высокой для данного диапазона и близка к пределу, определяемому потерями в материале.

Таким образом, разработанная методика создания и исследования высокодобротных микрорезонаторов на основе германия даст еще много возможностей для работы в диапазоне среднего инфракрасного излучения.

З. Пятакова

1. [ПерсТ 28, вып.3/4, с. 4 \(2021\).](#)
2. T.S.Tebeneva, et al., *Opt. Express* **32**, 15680 (2024).
3. И.А.Каплунов, В.Е.Роголин, *Фотоника* **13**, № 1, с. 88 (2019).

ВЕСТИ С КОНФЕРЕНЦИЙ

Конференция mFpA-2024

24 – 27 сентября в Витебске прошла Международная научно-практическая конференция “Мультиферроики: получение, свойства, применение” (mFpA-2024). Организатором конференции выступил Институт технической акустики Национальной академии наук Беларуси.

В ходе выступлений были представлены доклады, посвященные пьезоэлектрическим и магнитным материалам, совершенствованию методик получения и исследования компози- тов. Существенная часть работ была посвяще- на разработке практических устройств, работа которых основана на преобразовании магнит- ного и электрического полей.



а



б

Рис. 1 **а** – Выступление профессора С.Б.Вахрушева (Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук) с пленарным докладом “Межмоновое взаимодействие и фазовые переходы в твердых растворах релаксоров”; **б** – пленарный доклад директора по научной деятельности Института высоких технологий и пьезотехники ЮФУ М.А. Мараховского “Исследование основных электрофизических характеристик пьезокерамических материалов системы ЦТС в широком диапазоне температур”.

Несмотря на небольшое количество участников (около 60) география охватывала более 10 стран мира (в том числе Азербайджан, Вьет-

нам, Китай, Колумбия и др.). Некоторые доклады были представлены онлайн. В ходе работы конференции обсуждались и стендовые доклады, представленные на онлайн платформе. При поддержке РТУ МИРЭА, НИТУ “МИ-СиС” и БГУ докладчикам предоставлена возможность ускоренной публикации статей в журналах: “Ferroelectrics”, “Integrated Ferroelectrics”, “Журнал Белорусского государственного университета. Физика” либо в специальном выпуске журнала “Modern electronic materials”, посвященного мультиферроикам.



Рис. 2. Профессор Московского университета А.П. Пятаков выступает с докладом “Магнитоэлектрические и магнитомеханические эффекты в магнитных пленках и двумерных материалах”.



Коллаж из фрагментов культурной программы конференции

Культурная программа познакомила участников с Витебском и традиционной белорусской культурой. Желавшие посетили Музейный комплекс старинных народных ремесел и технологий “Дудутки”. В живописном уголке вблизи Витебска состоялось выступление дуэта

витебских цимбалистов - Екатерины Мельниковой и Сергея Тимошенко с аккомпанементом Мариной Попковой.

Н. Поддубная

ТОРЖЕСТВО

Нобелевская премия 2024



В октябре 2024 года в Стокгольме и Осло прошла Нобелевская неделя, на которой стали известны имена лауреатов Нобелевской премии в области медицины и физиологии, физики, химии, экономики, премии мира и по литературе.

По физике

Лауреатами Нобелевской премии по физике 2024 года стали американец Джон Хопфилд (John J. Hopfield) и британец Джеффри Хинтон (Geoffrey E. Hinton). Премия присуждена за разработку методов, которые легли в основу современных принципов машинного обучения.



Согласно пресс-релизу Нобелевского комитета, Джон Хопфилд создал ассоциативную память, которая способна хранить и восстанавливать из данных изображения и другие типы шаблонов. Джеффри Хинтон изобрел метод, который помогает идентифицировать определенные элементы в изображениях.

Д. Хинтон использовал сеть, разработанную его солауреатом, в качестве основы для создания новой нейронной сети – машины Больцмана. Она способна распознавать характерные элементы в заданном типе данных. Ее можно использовать для классификации изображений или создания новых примеров по шаблону, на котором она была обучена.

“Хотя компьютеры не умеют думать, машины теперь могут имитировать такие функции, как

Перст, 2024, том 31, выпуск 10

память и обучение. Лауреаты по физике этого года помогли сделать это возможным. Используя фундаментальные физические концепции и методы они разработали технологии, которые используют сетевые структуры для обработки информации”, – отметили в Нобелевском комитете.

По химии

Нобелевская премия по химии присуждена американцам Дэвиду Бейкеру (David Baker) и Джону Джамперу (John M. Jumper) и британцу Демису Хассабису (Demis Hassabis) за исследования белковых структур. В сообщении Нобелевского комитета говорится, что они “взломали код удивительной структуры белков”.



Дэвиду Бейкеру удалось создать “совершенно новые виды белков”, а Демис Хассабис и Джон Джампер разработали модель искусственного интеллекта для предсказания сложных структур белков. С этой проблемой не могли справиться 50 лет. Комитет считает, что у этих открытий “огромный потенциал”.

Д. Хассабис и Д. Джампер работают в компании Google DeepMind. В 2020 году они представили модель ИИ под названием AlphaFold2. Благодаря ей удалось предсказать структуру практически всех 200 миллионов белков, идентифицированных учеными. С тех пор программу AlphaFold2 использовали более двух миллионов человек из 190 стран. Теперь исследователи могут лучше понимать антибиотикорезистентность и создавать изображения ферментов, которые способны разлагать пластик.

“Жизнь не могла бы существовать без белков. То, что мы теперь можем предсказывать структуру белков и создавать белки, дает человечеству огромную пользу”, – говорится в пресс-релизе.

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, Н. Поддубная,
А. Пятаков, З. Пятакова

Выпускающий редактор: И. Фурлетова