

ISSN: 2782-5515



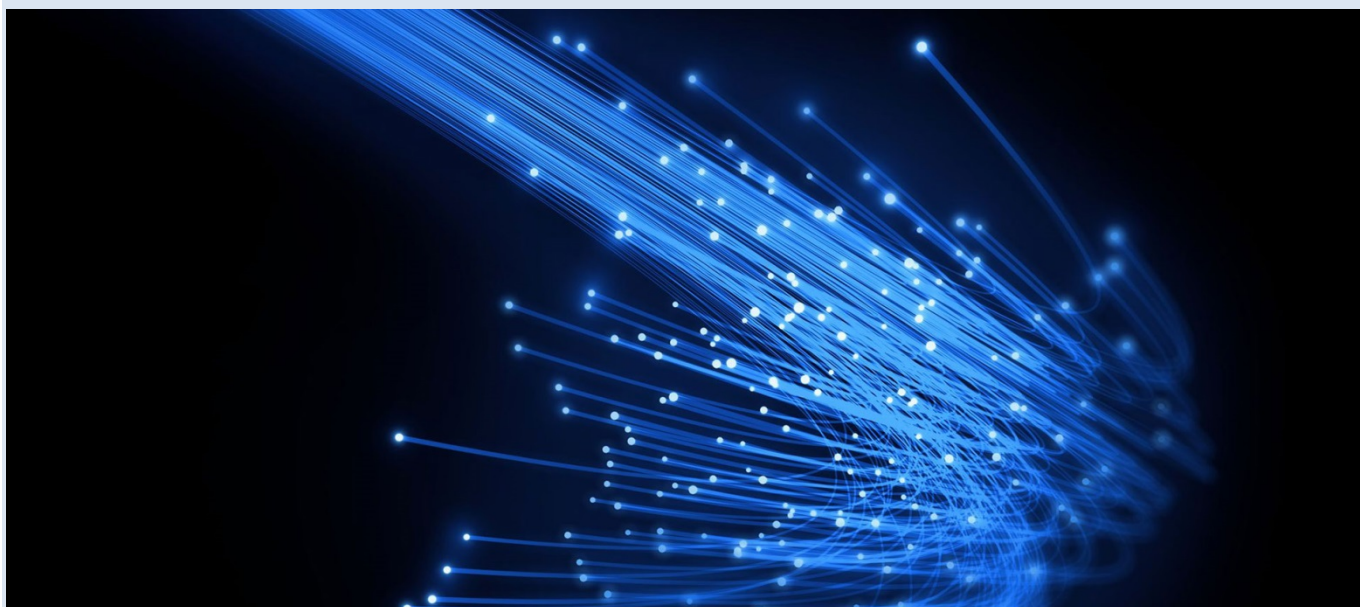
Перст

Информационный бюллетень

перспективные технологии
наноструктуры сверхпроводники фуллерены

Том 29, выпуск 11

ноябрь 2022 г.



optical fiber/Photonics

Черноголовка

ФОТОНИКА

Световая “лента Мёбиуса” в кольцевом микрорезонаторе с фотонным кристаллом

Оптические микрорезонаторы, поддерживающие моды шепчущей галереи, в последнее время активно применяются в самых различных областях - и для систем оптической связи, и для создания высокочувствительных сенсоров, и в метрологии в качестве высокоточных стандартов частоты. Как известно, условием возбуждения мод шепчущей галереи является то, что на длине резонатора укладывается целое число длин волн. Казалось бы, возбуждение мод, при которых на длине резонатора укладывается полуцелое число длин волн, невозможно, ведь это как раз условие интерференционного минимума - волны, сделав полный оборот, должны гасить друг друга. Тем не менее, в недавней работе [1] исследователи из США создали именно такой микрорезонатор, в котором реализуются моды с полуцелым номером - повторение происходит при двойном обходе микрорезонатора.

Как так получается? В обычном кольцевом микрорезонаторе могут возбуждаться два набора мод - бегущие по часовой стрелке (CW) и против часовой стрелки (CCW), и при отсутствии дефектов или вращения кольца они возбуждаются независимо друг от друга и не переходят одна в другую. В исследуемой же системе была создана дополнительная периодическая структура - фотонный кристалл (рис.1а). Важно, чтобы число неоднородностей-полосок в волноводе было нечётным. Наличие такой структуры меняет условия распространения волн, сдвигая дисперсионные кривые для волн, распространяющихся по и против часовой стрелки (рис.1б). За счет трансляционной симметрии фотонного кристалла для каждой дисперсионной кривой (сплошные линии на рис.1б) появляются дополнительные дисперсионные кривые, сдвинутые относительно исходных на вектор обратной решетки (штриховые линии на рис. 1б). Таким образом, может оказаться, что волны, распространяющиеся в разных направлениях, оказываются близки друг к другу по частоте и волновому вектору. Возникают условия для их смешивания, и в результате в микрорезонаторе распространяется смешанная волна с волновым числом, определяемым полусуммой волновых чисел соседних мод, и огибающей, определяемой их полуразностью.

И далее ...

ДЛЯ ПРАЗДНОГО УМА

- 3 Нанохитин из панцирей
креветок укрепляет бетон

СПИНТРОНИКА

- 6 Изолятор для электронов –
проводник для магнонов:
гигантская спиновая
проводимость в пленке
феррита-граната

НАНОМАТЕРИАЛЫ

- 7 Замещенные энергетика:
кремний и германий в CL-20

КОНФЕРЕНЦИИ

- 9 XX Юбилейная Конференция
“Сильно коррелированные
электронные системы и
квантовые критические
явления”, 25 мая 2023 года,
г. Москва, ФИАН

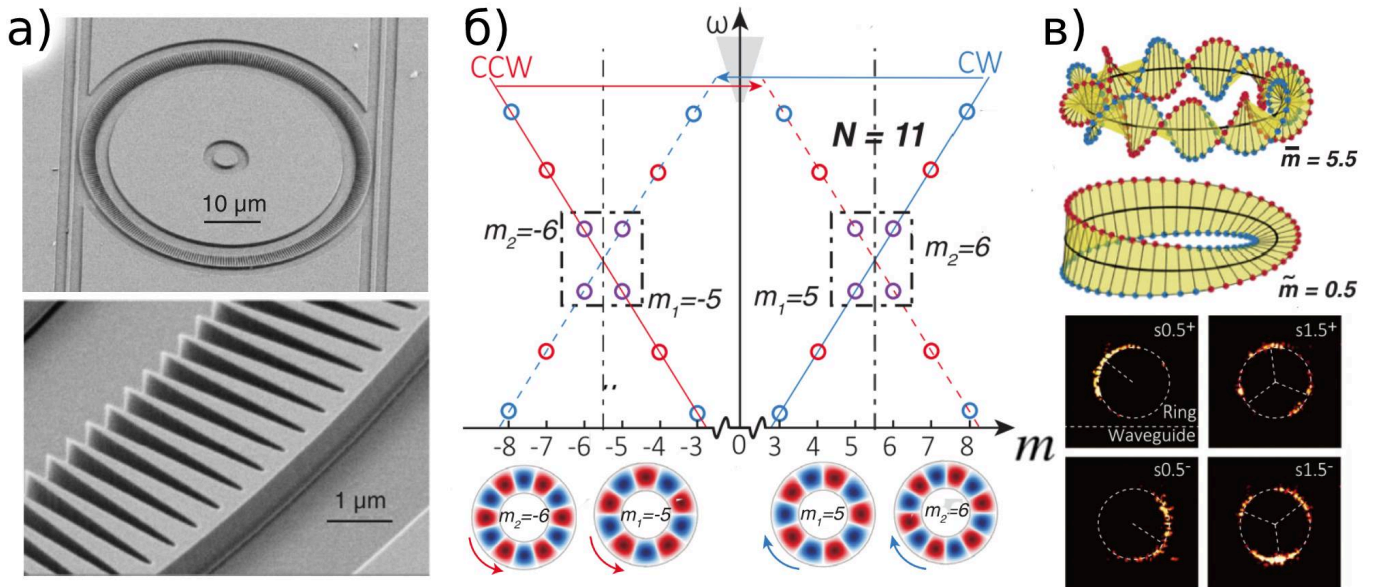


Рис. 1. а) Кольцевой микрорезонатор и созданная в нем периодическая структура с нечетным числом полосок, в данном случае 133 полоски; б) закон дисперсии для мод, распространяющихся по и против часовой стрелки с номерами 5 и 6 (сплошными линиями показаны исходные моды волновода, штриховыми - добавленные за счет периодической структуры; внизу - смоделированное распределение поля в исходных модах; в) смешанная волна, в которой волновое число определяется полусуммой соседних волновых чисел $(6+5)/2$, и огибающей, определяемой их полуразностью $(6-5)/2$ (сверху - моделирование, внизу - экспериментальные изображения в инфракрасном диапазоне).

Авторами были получены как теоретические, так и экспериментальные результаты по возбуждению в кольцевом волноводе таких необычных волн. Поскольку условия синхронности фаз выполняются при двойном обходе кольца, то напрашивается прямая аналогия с лентой Мёбиуса. Чтобы выделить только одну из волн, распространяющуюся по или против часовой стрелки, авторы создали в структуре фотонного кристалла дополнительные дефекты, таким образом нарушая симметрию относительно вращения. Вращательная симметрия микрорезонатора может быть нарушена также за счет механического вращения устройства.

Такие “ленты Мёбиуса” в микрорезонаторах могут быть использованы для создания высокочувствительных датчиков вращения. Добротность мод, по расчетам авторов, является величиной порядка $10^5 - 10^6$, что вполне достаточно для практических применений. Но даже безотносительно какой-либо практической ценности, сама физическая идея представляет несомненный интерес для широкого круга исследователей.

З. Пятакова

1. M.Wang et. al., *Phys. Rev. Lett.* **129**, 186101 (2022).

ДЛЯ ПРАЗДНОГО УМА

Нанохитин из панцирей креветок укрепляет бетон

Бетон – древнейший композит, созданный человеком более 7000 лет назад. Археологи обнаружили, что в те далекие времена смесь гравия и местной извести использовали для изготовления пола. Широко применять бетон в строительстве стали древние римляне (известные примеры – Пантеон, Колизей). Цемент готовили из смеси извести и затвердевших отложений вулканического пепла, а наполнителями служили песок, пемза, туф. Многие века цементные материалы люди создавали и совершенствовались по подсказке природы, используя разные местные материалы, и только в начале XIX века был найден способ получения качественного цемента путем обжига смеси глины и известняка. Русский строитель Е.Г. Челиев использовал изобретенный им цемент такого типа во время работ по восстановлению Москвы (особенно Кремля) после пожара 1812 года. Способ изготовления он описал в своей книге в 1825 г. Возникла наука о цементе, стали появляться заводы, в том числе и в России. “Отцом русского цементного дела” по праву считается А.Р. Шуляченко, русский химик, профессор, военный инженер. Благодаря его теоретической и практической деятельности

в конце XIX века высококачественные отечественные цементы практически вытеснили ввозимые из-за границы.

В последнее десятилетие технология производства цемента и бетона активно развивается. Исследователи предлагают использовать новые добавки, среди которых важную роль играют наноматериалы – различные наночастицы, углеродные нанотрубки и нановолокна (подробнее см. ПерсТ [1]). Большое внимание уделяют и изучению природных композитов из минералов (гидроксиапатита, CaCO_3 , SiO_2) и органики (коллагена, хитина), которые составляют основу костей, рогов, раковин, клешней омаров и др. Они способны нести огромные механические нагрузки. Так, например, входящий в состав ударной конечности рака-богомла биокompозит из фосфатов и карбонатов кальция и хитиновых волокон не только поглощает энергию при ударе, но и препятствует распространению возникающих трещин [2]. “Молоток” не разрушается, хотя рак от линьки до линьки пускает его в ход в среднем около 50 тысяч раз.

Особый интерес вызывает хитин, один из наиболее распространенных в природе полисахаридов. Он содержится в панцирях морских крабов, омаров, креветок; кутикулах насекомых, клеточных стенках грибов и бактерий. Исследования показали, что нанокомпозиты на основе хитина и его производного хитозана обладают уникальными сорбционными, антиоксидантными, радиопротекторными свойствами, биосовместимостью и биоразлагаемостью. Они могут быть использованы для регенеративной медицины и тканевой инженерии костей и хрящей (для повышения механической прочности добавляют наночастицы CaP или CaCO_3) [3]. Влияние добавок хитина или хитозана на свойства цемента или цементного теста (смеси цемента с водой) изучали, но заметных положительных эффектов не обнаружили, а в некоторых случаях происходило даже ухудшение механических свойств. Надо отметить, что добавки были микронных размеров или даже более крупные. Только недавно ученые из США догадались использовать наноструктурный хитин [4]. Добавление в цемент всего 0,05% нанохитина привело к увеличению прочности на изгиб на 40% и прочности на сжатие на 12%. Источником хитина послужили панцири креветок. Путем специальной обработки авторы [4] получили нанокристаллы (Ch-NC) и нановолокна (Ch-NF) хитина. Ширина нанокристаллов

9 нм, нановолокон 16 нм, длина 200 нм и 1070 нм, соответственно (рис. 1).

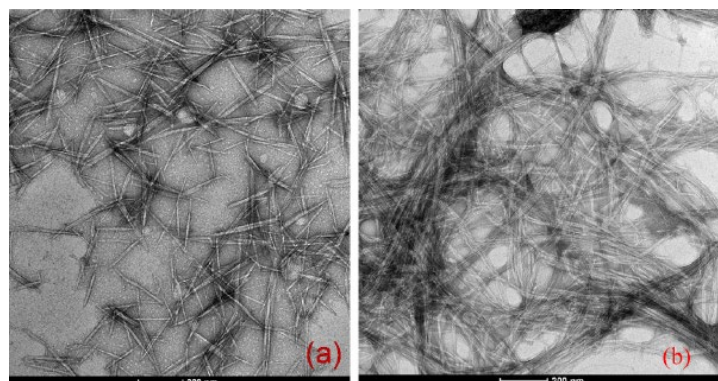


Рис. 1 ТЕМ изображения нанокристаллов (а) и нановолокон (б) хитина

Были приготовлены образцы цементного теста, содержащие 6 концентраций (от 0.035 до 0.1 вес.%) Ch-NC и Ch-NF, и контрольные образцы без добавок. Изучили влияние добавок на время схватывания цемента и его механические и реологические (пластическую вязкость) свойства.

Исследователи показали, что начальное и конечное время схватывания цемента с Ch-NC растет с ростом концентрации (до 0.055%), при этом задержка составляет 56 и 106 минут, соответственно. Для цемента с Ch-NF рост также происходит, но до концентрации 0.035%, и составляет 35 и 78 мин. По-видимому, нанокристаллы активнее адсорбируются на частицах цемента и обеспечивают более сильное электростатическое отталкивание этих частиц, чем длинные и запутанные нановолокна (схематически показано на рис. 2).

Увеличение времени схватывания особенно важно для транспортировки и для работы в жаркую погоду.

Реологические тесты показали, что консистенция свежего цементного теста с разными концентрациями нанохитина не отличается от контрольной. Пластическая вязкость при добавлении Ch-NF несколько выше, чем для Ch-NC. Прочность на сжатие при добавлении нанохитина растет, но почти не зависит от его концентрации. Максимальное увеличение по сравнению с контрольным образцом происходит при концентрации 0.05% и составляет на 28-й день +12% для Ch-NF и +5% для Ch-NC.

Добавки нанохитина к цементному тесту существенно улучшили прочность на изгиб. На 28-й день повышение при концентрации добавок 0.05% составило 41% для Ch-NF и 40% для

Ch-NC. По мнению авторов, важную роль играет образование связей между функцио-

нальными группами наноструктурного хитина и кристаллогидратами цемента.

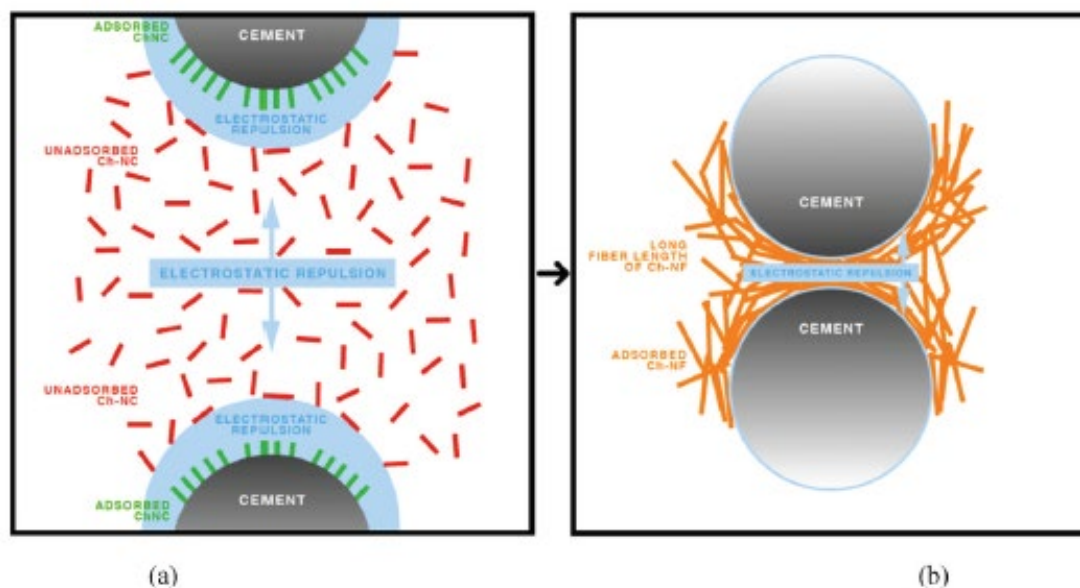


Рис. 2. Электростатическое отталкивание нанокристаллами Ch-NC (a) и менее эффективное отталкивание нановолокнами Ch-NF (b)

Нановолокна и нанокристаллы хитина формируют своеобразные скрепляющие мостики и не дают распространиться нанотрещинам (рис. 3).

дов были предложены оригинальные технологии и способы их получения из панцирей морских ракообразных для использования в медицине, агробиологии, биотехнологии, экологии, сельском хозяйстве, пищевой промышленности [5]. В нескольких работах было также исследовано введение хитозана в цементные смеси, в частности, для придания антистатических свойств [6]. Однако влияния на прочностные свойства или процесс гидратации не наблюдали. В течение двух веков российские ученые успешно развивали “цементное дело”, и, конечно, можно надеяться, что использование таких перспективных добавок как нанохитин приведет к новым достижениям.

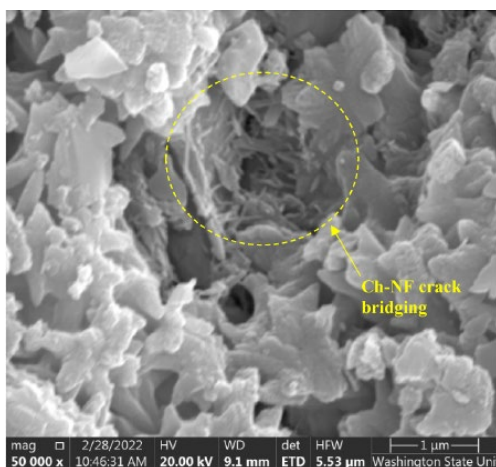


Рис. 3. Нановолокна хитина образуют перемишки в зоне растрескивания цемента.

В целом результаты исследований показали, что оптимальная концентрация как нанокристаллов, так и нановолокон хитина равна 0,05%. Улучшаются свойства схватывания, гидратации, повышаются прочность на сжатие и изгиб, трещиностойкость и, соответственно, долговечность цементных материалов. Конечно, очень важно и то, что хитин можно получать из панцирей крабов, креветок, криля. Объем добычи этих морепродуктов постоянно растет, а при их переработке до 40% составляют отходы. В России свойства хитина и хитозана изучают с 1930-ых годов, а с конца 1990-х го-

О. Алексеева

1. [ПерсТ 23, вып. 20, с.4 \(2016\).](#)
2. [ПерсТ 19, вып. 19, с.3 \(2012\).](#)
3. [ПерсТ 22, вып. 8, с. 2 \(2015\).](#)
4. *M.M.Haider et al., Cement and Concrete Composites 132, 104623 (2022).*
5. *Н.Г.Строкова и др., Труды ВНИРО №170, с. 124 (2015).*
6. *В.И.Дарчия, Вестник МГСУ №3, с.105 (2012).*

СПИНТРОНИКА

Изолятор для электронов – проводник для магнонов: гигантская спиновая проводимость в пленке феррита-граната

Спиновый ток определяется как разность токов электронов с противоположными ориентациями спинов. По аналогии с обычной проводимостью вводят и спиновую проводимость – как коэффициент пропорциональности между спиновым током и величиной, аналогичной напряженности поля – отношением спинового химического потенциала к заряду электрона. Как и обычная удельная проводимость, она измеряется в сименсах на метр. В диэлектриках электронный транспорт невозможен, но спиновый транспорт остается – он осуществляется

уже магнонами – элементарными возбуждениями в спиновой подсистеме кристалла.

Международная команда исследователей из Univ. Groningen (Нидерланды), Tohoku Univ. (Япония), Univ. Chinese Acad. Sci. (Китай) и Univ. Bretagne Occidentale (Франция) бозе-эйнштейновском в тонкой (~4 нм) пленке феррита-граната обнаружила магنونную проводимость 10^8 См/м – на 4 порядка выше, чем объеме того же материала [1]. Что еще удивительнее, в расчете на толщину слоя эта проводимость соответствует 1 Сименсу при комнатной температуре – аналогичная электронная проводимость наблюдается только в двумерном газе квантовых ям GaAs при 30 милликельвинах.

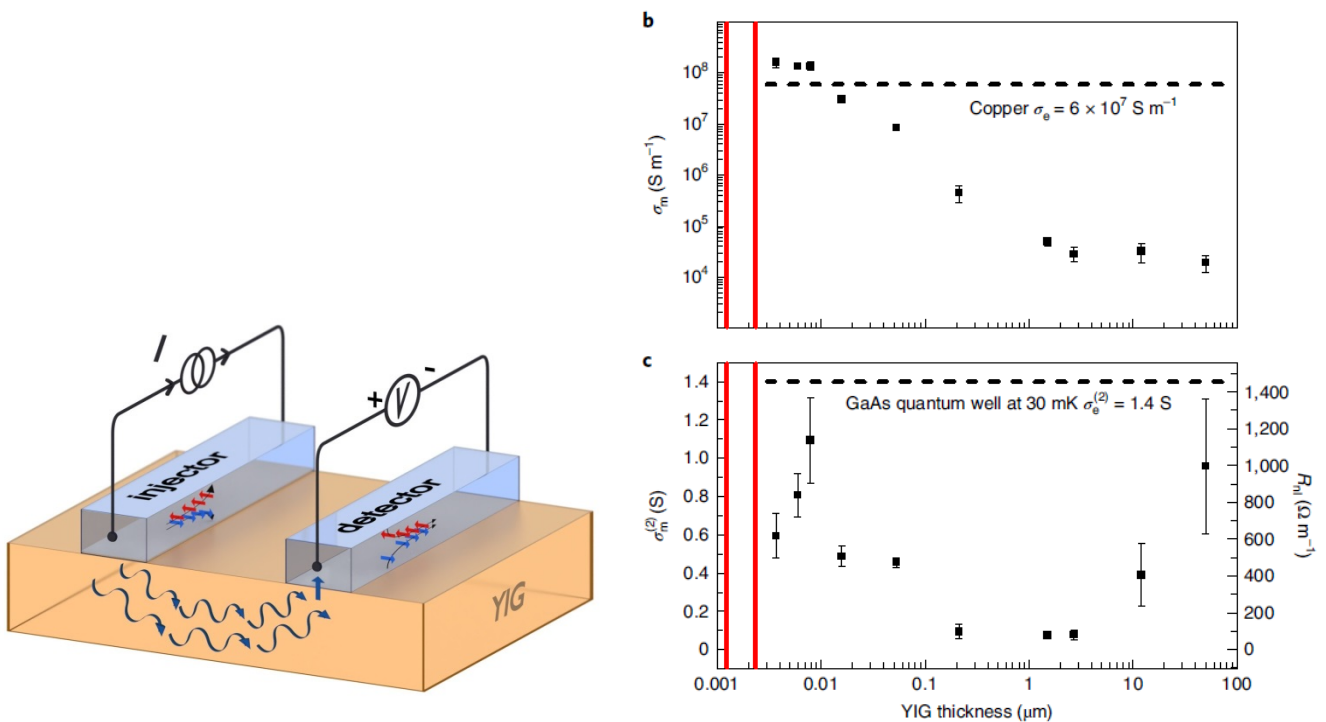


Рис. 1. Измерение спиновой проводимости магнонов: а) - схема эксперимента (YIG – пленка железо-иттриевого граната с минимальной толщиной 3.7 нм; в инжекторе и детекторе красными и синими стрелками показаны спины электронов, волнистыми стрелками в YIG показаны магноны); б) - удельная магنونная проводимость и с) - двумерная проводимость в зависимости от толщины пленки. Штриховыми линиями показаны уровень удельной проводимости меди и двумерной проводимости квантовых ям в GaAs, соответственно. Вертикальными красными линиями показаны толщины одного и двух периодов кристаллической решетки [1].

Спиновый ток в эпитаксиальной пленке железо-иттриевого граната создавали с помощью платинового электрода, вдоль которого прикладывали электрическое напряжение на гигагерцовых частотах (рис. 1а). За счет спинового эффекта Холла возникал спиновый ток в направлении по нормали к поверхности пленки, который на границе между электродом и гранатом трансформировался в спиновый ток магнонов. Детектирование спинового тока

осуществляли за счет обратного спинового эффекта Холла другим платиновым электродом, находящимся на расстоянии нескольких десятков микрометров.

В заключение отметим, что передача спиновых токов посредством магнонов избавляет от джоулевых потерь, но не является полностью бездиссипационным процессом. В этом контексте обнаруженная в данной статье гигантская магنونная проводимость при комнатных

температурах не только открывает новые перспективы перед спинтроникой, но и вселяет надежду, что вскоре будет экспериментально подтверждена и высокотемпературная магнетическая сверхпроводимость – в магнетическом Бозе-Эйнштейновском конденсате [2].

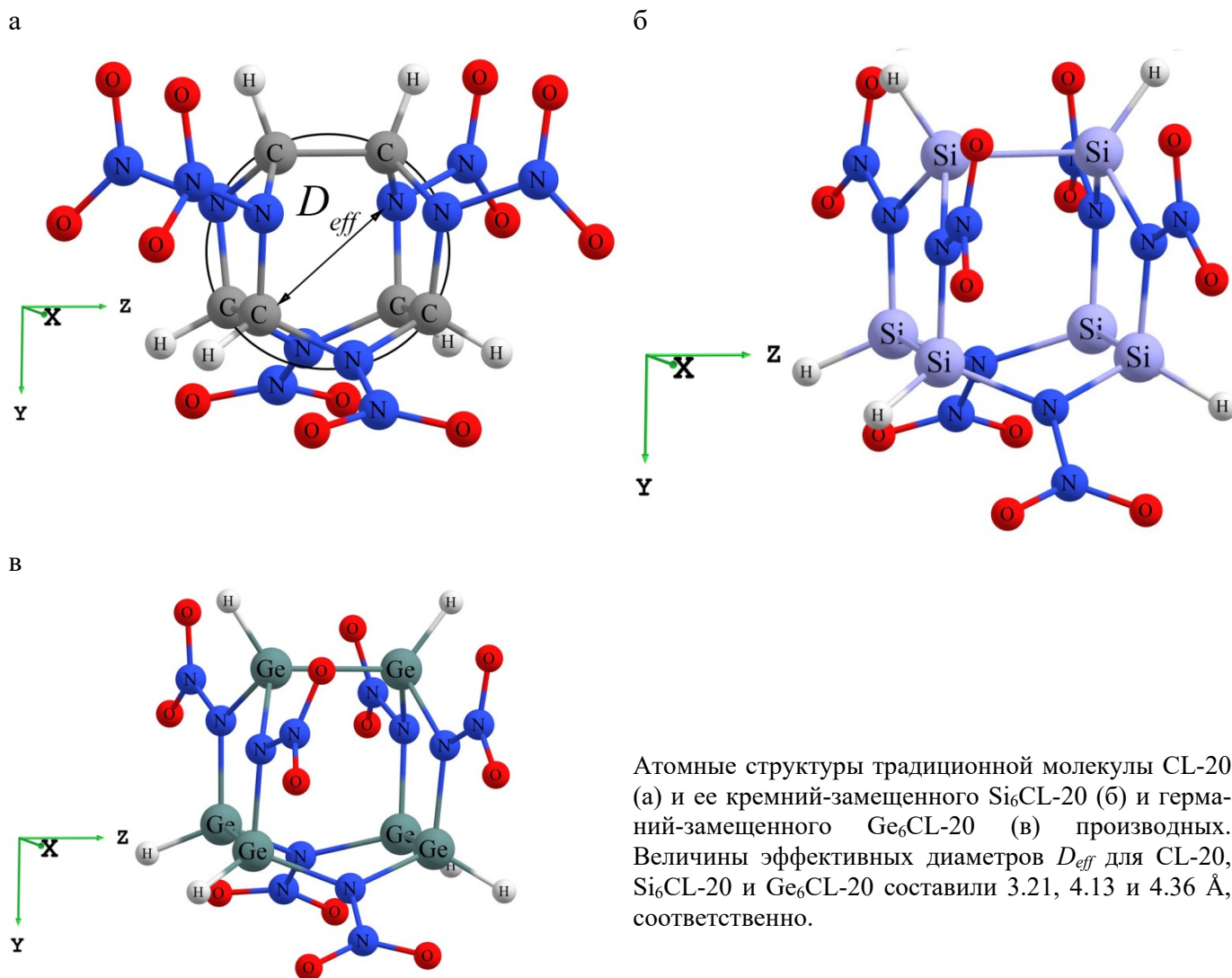
А. Пятаков

1. X.-Y. Wei et al., *Nat. Mater.*, (2022).
<https://doi.org/10.1038/s41563-022-01369-0>
2. Yu. M. Bunkov, G. E. Volovik, *J. of Physics: Condensed Matter*, 22, 164210 (2010).

НАНОМАТЕРИАЛЫ

Замещенные энергетика: кремний и германий в CL-20

Молекула CL-20 была синтезирована в Калифорнии в теперь уже далеком 1987 году и является ярчайшим представителем класса так называемых высокоэнергетических материалов (high-energy-density materials, HEDM). Ее уникальные свойства в основном обусловлены нетривиальным химическим строением CL-20. Молекула образована напряженным углеродно-азотным каркасом, построенным из двух пятичленных и одного шестичленного кольца, с шестью присоединенными к нему функциональными группами NO₂ (см. рис.).



Атомные структуры традиционной молекулы CL-20 (а) и ее кремний-замещенного Si_6CL-20 (б) и германий-замещенного Ge_6CL-20 (в) производных. Величины эффективных диаметров D_{eff} для CL-20, Si_6CL-20 и Ge_6CL-20 составили 3.21, 4.13 и 4.36 Å, соответственно.

Система CL-20 часто рассматривается современными исследователями в качестве основы энергоносителей и топливных элементов следующего поколения, однако попытки дополнительно “улучшить” ее энергетические характеристики не прекращаются. Одним из способов может стать создание сокристаллов, а именно функциональных материалов, включающих помимо CL-20 и другие энергоэффективные соединения. По мнению ряда исследователей,

риктики не прекращаются. Одним из способов может стать создание сокристаллов, а именно функциональных материалов, включающих помимо CL-20 и другие энергоэффективные соединения. По мнению ряда исследователей,

это поможет усилить преимущества и исключить недостатки составляющих сокристалл высокоэнергетических компонентов. Однако сокристаллизация – это не единственно возможный способ. Один из альтернативных подходов базируется на принципе функционального замещения атомов, составляющих напряженный каркас молекулы. Так, например, атомы углерода можно заместить кремнием или германием. Собственно, анализу этого механизма и посвящена работа исследователей из МИФИ [1]. Авторы с помощью теории функционала плотности предприняли попытку определения устойчивости, структурных, электронных и энергетических характеристик кремний- и германийзамещенных CL-20 (см. рис.), а также построенных на их основе димеров. Вычисления они выполняли в программе TeraChem с использованием графических процессоров (GPU) на уровне теории B3LYP/6-311G(d,p). Исследователи получили энергии связи, стандартный набор квантово-химических дескрипторов (энергии НОМО и LUMO, химический потенциал, химические жесткость и мягкость, индексы электрофильности), а также оценили величины энергий напряжения замкнутого каркаса как для незамещенной молекулы CL-20, так и для производных Si₆CL-20/Ge₆CL-20, используя формальные гомодесмотические реакции. В результате авторы установили, что последовательное добавление в каркас атомов кремния или германия существенно влияет на его структуру. Основная отличительная особенность строения замещенных CL-20 от родителя заключается в положении нитрогрупп на каркасе (они значительно отклоняются от своего первоначального расположения), при этом увеличивается эффективный диаметр молекулы (см. рис.). Кроме того, последовательное замещение углерода атомами кремния и германия приводит к уменьшению энергии связи системы, что свидетельствует о снижении ее термодинамической устойчивости. Однако каркас при этом не разрушается и сохраняет свою структуру. Дополнительный анализ гомодесмотических реакций как для классической CL-20, так и для ее производных показал, что добавление в остов атомов кремния или германия приводит к уменьшению величины энергии напряжения. Это может означать, что традиционная молекула CL-20 окажется более энергоэффективной, чем ее замещенные аналоги. Тем более, что синтез таких систем – отдельная сложная задача. Возможно, создание ковалент-

ных кристаллов или сокристаллов на основе системы CL-20 или замена NO₂ на другие функциональные группы, например, содержащие фтор, все же окажутся более результативными подходами для ее “улучшения”. Исходя из этого, можно с уверенностью предположить, что тема CL-20 еще долго останется актуальной.

М. Маслов

I. M.A. Gimaldinova et al., Materials 15, 6577 (2022).

КОНФЕРЕНЦИИ

XX Юбилейная Конференция “Сильно коррелированные электронные системы и квантовые критические явления”, 25 мая 2023 года, Москва (ФИАН, Ленинский пр. 53)

Традиционно на Конференции будут представлены материалы по таким темам, как магнитные и Кондо-системы, волны зарядовой и спиновой плотности, топологические материалы, включая: топологические изоляторы и полуметаллы, сверхпроводимость и топологические сверхпроводники, сверхпроводники с магнитным упорядочением, электронное фазовое расщепление, фазовые переходы и критические явления, влияние давления на физические свойства и пр.

На Конференции предполагаются устные выступления (15-20 минут), включая выступления online, и постерная сессия.

Дополнительную информацию можно получить:

Ольга Иосифовна Акинфиева –
akinfiyevaoi@lebedev.ru

Алла Евгеньевна Петрова –
petrovaee@lebedev.ru

Сайт конференции: <http://sces.lebedev.ru>

**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