

ISSN: 2782-5515



Перст

Информационный бюллетень
перспективные технологии
наноструктуры сверхпроводники фуллерены

Том 29, выпуск 1

январь 2022 г.



Фуллерен

Черноголовка

НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ

Эффект сальвинии вдохновляет на создание важных функциональных материалов

Природные супергидрофобные поверхности много лет вдохновляют исследователей на создание микро/наноструктур, обладающих похожими свойствами. Хорошо известны эффект лотоса и эффект лепестков розы. Иерархическая структура поверхности листа лотоса, “священного растения”, наделяет его способностью к самоочищению [1]. Капля воды почти сферической формы удерживается на микробугорках, сплошь покрытых нановолосками, а при малейшем наклоне скатывается, захватывая грязь. Важно, что во впадины структуры вода не проникает, и между жидкостью и твердой поверхностью остается своеобразная воздушная прослойка (так называемое “состояние Касси”). Структура поверхности лепестков розы обеспечивает не только супергидрофобность, но и сильную адгезию. В отличие от предыдущего примера вода заполняет полости структуры, и капли удерживаются на поверхности даже при сильном наклоне, сохраняя свежесть лепестков (“состояние Венцеля”). В природе имеются и промежуточные состояния, когда часть полостей заполнена воздухом, а часть – водой. Иногда одно состояние переходит в другое под действием внешних условий. Поверхностные структуры, разработанные по типу листа лотоса, важны для придания водоотталкивающих свойств, снижения гидродинамического сопротивления, для борьбы с биообрастанием. К сожалению, не удастся обеспечить длительное присутствие воздуха. Неудивительно, что исследователи обратили внимание на другой природный эффект – эффект сальвинии. В обзоре китайских ученых обсуждается механизм эффективного, стабильного удерживания сальвинией воздуха под водой, а также возможности синтеза подобных материалов с использованием современных технологий [2].

Сальвиния (*Salvinia*), плавающее на поверхности воды растение (его часто используют в аквариумах), имеет уникальную структуру листьев (рис. 1). Верхняя их часть покрыта сложными волосками, при этом каждые четыре волоска соединены в вершине, образуя своеобразный венчик для взбивания (рис. 1c). Волоски покрыты гидрофобными восковыми кристалликами, кроме пластинок-накладок в месте соединения (рис. 1d), которые, соответственно, гидрофильны.

На эффект сальвинии, т.е. на способность удерживать воздух, влияют несколько факторов, которые должны быть учтены при разработке подобных материалов.

И далее ...

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- 4 Способ получения крупнобаритных изделий из карбидокремневой керамики

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

- 5 Благородные фуллерены накапливают литий

ДЛЯ ПРАЗДНОГО УМА

- 6 Вечный пузырь

ФОТОНИКА

- 7 Можно ли сделать транзистор из метаматериала ... из транзисторов?

КОНФЕРЕНЦИИ

- 8 Российский коллоквиум по современным проблемам физики конденсированных сред

ИФТТ РАН – участник государственной программы “Глобальное образование”

Структура “венчиков” работает как тент, который подпирает поверхность раздела воздуха и не дает ей опуститься к основе. Гидрофобные волоски повышают энергию, которая требуется, чтобы вода достигла основы листа, а гидрофильные кончики закрепляют воду. Благодаря этой комбинации поверхность раздела вода-воздух зафиксирована на определенном уровне, и для любого отклонения требуется до-

полнительная энергия. Кроме того, “венчики” эластичны и предохраняют поверхность раздела вода-воздух от деформации. Схема структуры листа и фотография капли воды, “закрепленной” на кончиках волосков листа сальвинии приведены на рис. 2. Сферическая форма капли свидетельствует о супергидрофобности поверхности.

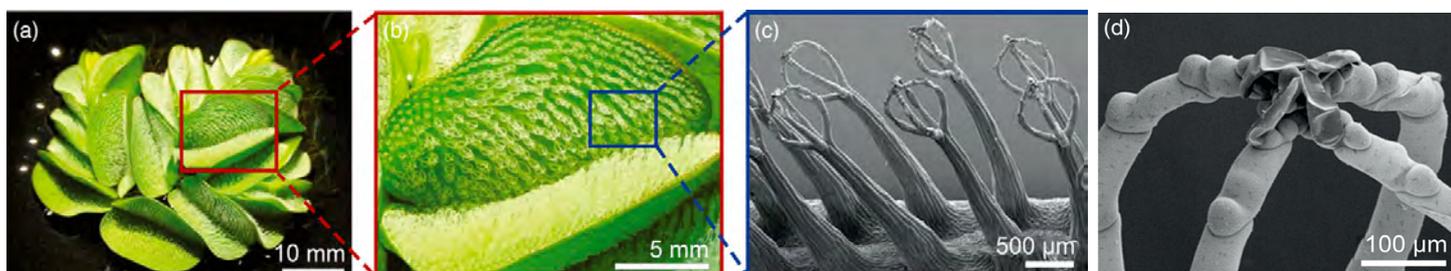


Рис. 1. a, b – Листья сальвинии; c – SEM изображение структуры; d – место соединения четырех волосков. [2]

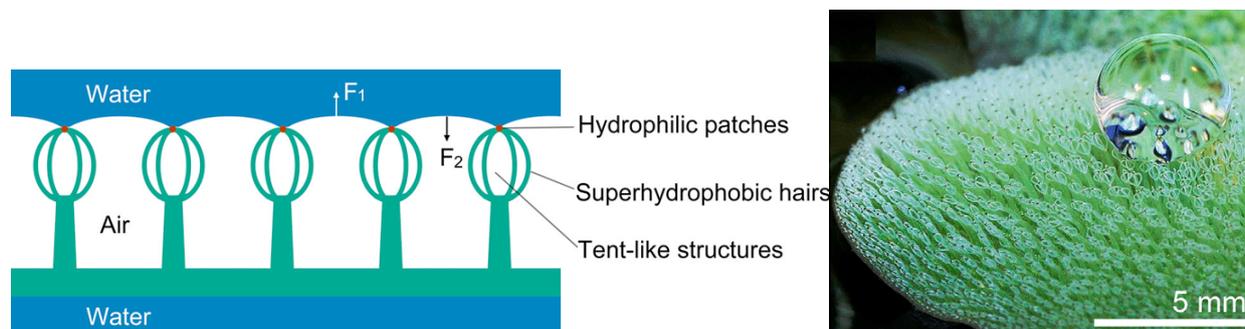


Рис. 2. Слева – схема структуры листа сальвинии (под каплей воды супергидрофобные волоски с гидрофильной накладкой в месте соединения удерживают воздух). Справа – фотография капли воды на “венчиках”. [2]

Около десяти лет назад были предприняты первые попытки создания упрощенной структуры венчиков с помощью фотолитографии, но нужные свойства не были достигнуты. С тех пор активность исследователей и технологов постоянно возрастает. Используют лазерную литографию, разные варианты CVD, химическое травление, плазменную обработку, электроосаждение, электроформование, электростатическое флокирование, 3D печать. Авторы обзора [2] проанализировали результаты и обсудили возможности различных методов. С помощью фотолитографии, химического и плазменного травления, электростатического флокирования не удалось воссоздать структуру венчиков и получить хорошее удерживание воздуха. Использование лазерной литографии и 3D печати привело к формированию тонкой структуры листьев сальвинии, но гетероген-

ность (т.е. наличие гидрофобности венчиков и гидрофильности кончиков) не достигнута, и, соответственно, нет адгезии. Кроме того, структуры неэластичные. Удерживание воздуха при лазерной литографии наблюдается, но лишь для нескольких материалов.

Приходится констатировать, что применение как давно известных, так и самых современных технологий пока не позволило получить микро/наноструктурные поверхности, обладающие всеми достоинствами листа сальвинии, простого водного растения. Но есть и хорошие новости. Даже неполное, а порой упрощенное воспроизведение созданной природой структуры привело к разработке перспективных функциональных материалов. Продемонстрирована возможность их использования для снижения гидродинамического сопротивления; для сбора воды (важного в условиях ее дефицита); при-

дания водоотталкивающих свойств; испарения воды; разделения воды и нефтепродуктов, а также создания эффективных термоизоляционных материалов для медицины. Правда, результаты пока получены на лабораторном уровне. Необходимы испытания в реальных условиях, а также совершенствование методов получения.

О. Алексеева

1. *ПерсТ 22, вып. 23/24, с.6 (2015).*

2. *W.Bing et al., Small Struct. 2, 2100079 (2021).*

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Способ получения крупногабаритных изделий из карбидокремниевой керамики

Сотрудники лаборатории профилированных кристаллов ИФТТ РАН (зав. лабораторией д.т.н. Курлов В.Н.) разработали способ получения крупногабаритных изделий из карбидокремниевой керамики конструкционного и функционального назначения. В качестве основы для разработки, была использована технология получения рекристаллизованного карбида кремния (RSiC), который применяется для изготовления карбидокремниевых электронагревателей (ККЭН) – крупногабаритных изделий трубчатой формы. RSiC обладает высокой тепло- и электропроводностью, химической стойкостью, термостойкостью и низким коэффициентом термического расширения.

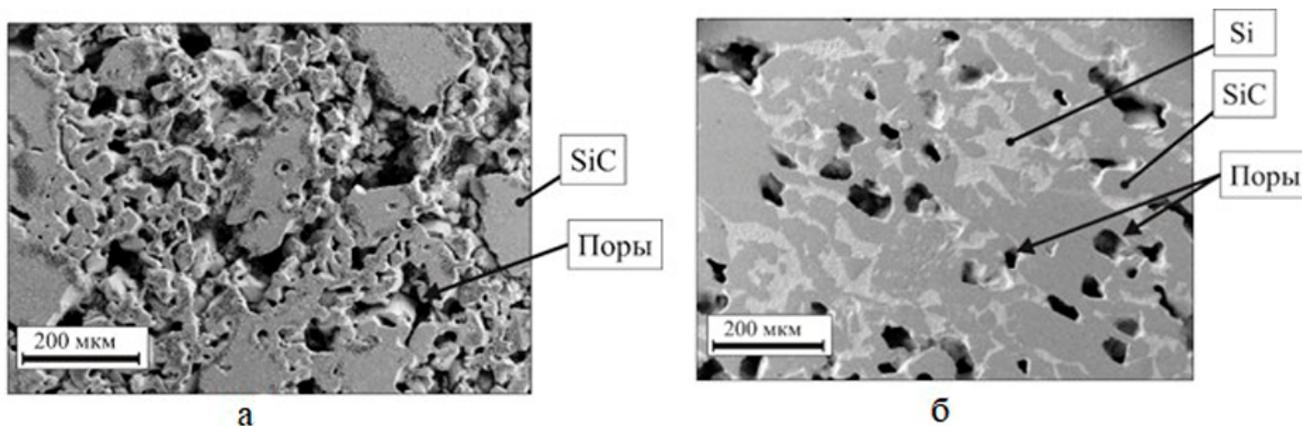


Рис. 1. Микроструктура рекристаллизованного карбида кремния:
а - до модификации, б - после модификации.

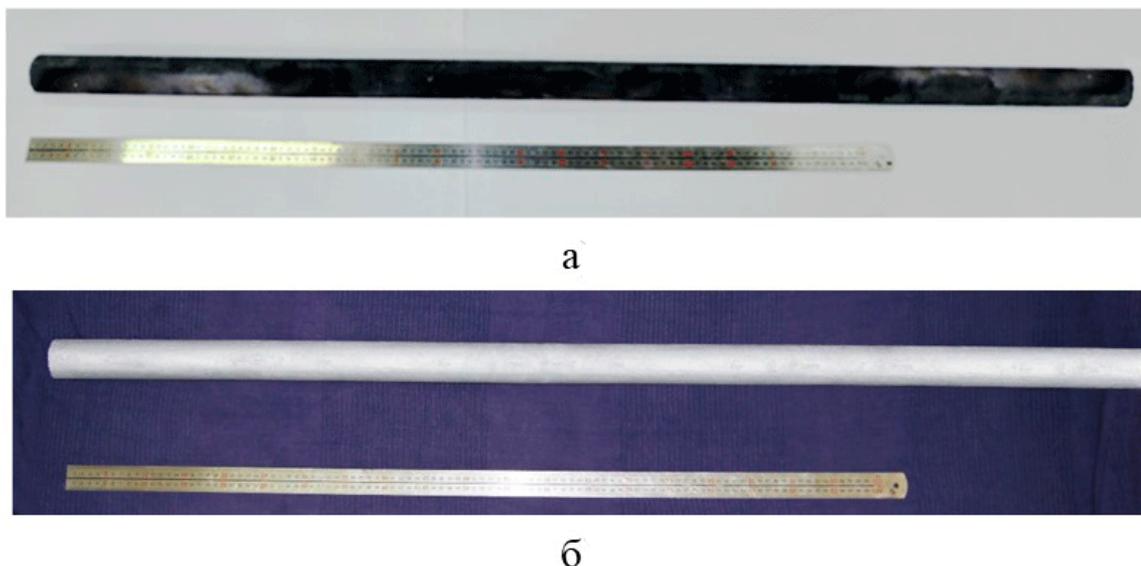


Рис. 2. Труба из RSiC керамики диаметром 45 мм и длиной 1350 мм:
а - до модификации, б - после модификации

Однако из-за высокой открытой пористости и слабой связанности зерен (рис. 1а) материал обладает низкими прочностными характеристиками. Для улучшения прочностных свойств изделий из карбидокремниевой керамики сотрудники лаборатории разработали способ объемного уплотнения пористого карбидокремниевых каркаса RSiC введением в него углеродных компонентов с последующим силицированием. Образование дополнительных связей между частицами SiC каркаса (рис. 1б) не только приводит к существенному увеличению механической прочности (примерно в 10 раз) получаемого материала, но и позволяет контролируемым образом изменять электрические характеристики нагревательных элементов, а также существенно повышать трещиностойкость керамики при высоких температурах эксплуатации и термоциклировании.

Образцы изделий, полученные по предложенной методике, обладают повышенной прочностью, менее подвержены старению и выдерживают многократные термоциклические нагрузки в режиме изменения температуры со скоростью до 100°C в минуту (рис. 2).

Данная разработка открывает новые возможности для производства карбидокремниевых изделий сложной формы, в том числе крупногабаритных, а также существенно расширяет области их применения. Таким способом могут быть изготовлены крупногабаритные нагреватели, тигли, воронки, теплообменники, трубы для перекачки агрессивных жидкостей и т.п.

О. Камынина

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

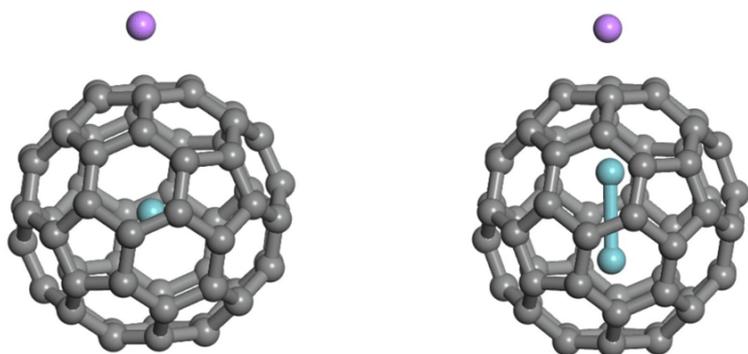
Благородные фуллерены накапливают литий

В связи с интенсивным развитием мобильной электроники в последние годы большое внимание исследователей нацелено на совершенствование литий-ионных батарей, которые широко применяются в портативных электронных устройствах. Несмотря на значительные успехи в развитии технологий их изготовления, оптимальная конструкция электродов с высокой удельной емкостью, высокой плотностью энергии и приемлемой стабильностью пока остается актуальной задачей. Поиск подходящих для этой цели функциональных материалов не прекращается. В частности, большое распространение получили различные наноструктуры на основе углерода, включая фуллерены, нанотрубки, двумерные графеноподобные структу-

ры и системы гибридной мерности на их основе. Дело в том, что высокая удельная поверхность и пористость подобных материалов позволяет не только обеспечить активные центры адсорбции, но и способствует высокой подвижности атомов лития.

Ученые из Univ. of Maragheh (Иран) [1] предложили для хранения лития использовать фуллерены C₆₀, но не “чистые”, а инкапсулированные атомами благородных газов (Ng): гелия, неона, аргона, криптона и ксенона. В частности, их заинтересовали механизмы усиления эффективности адсорбции и повышения емкости хранения лития в этих системах. Для этого авторы провели серию расчетов в рамках теории функционала плотности с помощью программы DMol³ на уровне теории PBE/DNP с включением дисперсионных поправок для учета слабых ван-дер-ваальсовых взаимодействий. Псевдопотенциалы выбирали таким образом, чтобы учесть также и релятивистские эффекты, возникающие от электронов инкапсулированных атомов криптона и ксенона. В результате после традиционного этапа структурной оптимизации эндодральных фуллеренов исследователи получили набор их энергетических и электронных характеристик. Так, исследователи выяснили энергии формирования комплексов и НОМО-LUMO щели. Оказалось, что тип выбранных дисперсионных поправок (авторы использовали варианты поправок Гримме D2 и Ткаченко-Шеффлера, TS) существенно влияет на величину энергий образования: скорректированные энергии Гримме-D2 больше по абсолютной величине, чем TS. Тем не менее, полученные результаты свидетельствует об устойчивости этих систем. Положительные заряды на атоме благородного газа уменьшаются в ряду Xe > Kr > Ar > Ne > He, что говорит об усилении переноса заряда к фуллереновой клетке от внедренного атома с увеличением размеров последнего. Это означает, что, инкапсулируя “благородные” атомы, фуллерен C₆₀ приобретает свойства аниона. Несмотря на это, длины связей практически не изменяются при внедрении Ng в C₆₀ по сравнению со свободной клеткой. Электронная структура, в частности НОМО-LUMO щель, также остается прежней. Однако картина меняется при появлении второго атома Ng. Например, включение Kr₂ вызывает существенное изменение плотности состояний вблизи уровня Ферми, что свидетельствует о том, что инкапсулирование уже двухатомными молекулами благородного газа

(см. рис.), особенно тяжелыми, способно существенно изменить электронную структуру и поверхностную реакционную способность C_{60} .



Адсорбция атома лития на эндофуллеренах $Kr@C_{60}$ (слева) и $Kr_2@C_{60}$ (справа)

На следующем этапе авторы проанализировали адсорбционное поведение собственно атомов лития для определения способности эндофуллеренов $Ng@C_{60}$ и $Ng_2@C_{60}$ удерживать их (см. рис.). В итоге исследователи подтвердили, что эндодральные комплексы типа $Ng_m@C_{60}$ более склонны к удержанию лития, чем незамещенные фуллерены. При этом атом газа большего размера оказывает большее влияние на адсорбцию металла. Расчет энергетических диффузионных барьеров позволил установить, что диффузия атома Li к соседнему шести- или пятичленному кольцу на поверхности фуллерена лежит в диапазоне от 9.4 до 10.3 и от 7.1 до 8.5 ккал/моль при использовании уровня теории PBE/D2 и PBE/TS, соответственно. При этом добавление атомов Ng понижает миграционный барьер. Авторы показали, что всего фуллерены $Ng@C_{60}$ или $Ng_2@C_{60}$ способны хранить до двенадцати атомов лития, каждый из которых адсорбирован на пятичленном кольце фуллереновой клетки, что, в общем-то, не так уж и мало. Будем надеяться, что, возможно, в будущем фуллерены займут достойное место среди эффективных материалов для компонентов литий-ионных батарей.

М. Маслов

1. M.D.Esrafilı et al., *Chem. Phys. Lett.* **787**, 139236 (2022).

ДЛЯ ПРАЗДНОГО УМА

Вечный пузырь

В наше турбулентное время на стабильность спрос особый. Мыльный пузырь как символ эфемерности меньше всего ассоциируется со стабильностью, однако исследователям из Univ. Lille (Франция) [1] удалось при нормальных условиях создать пузырь, который прожил уже больше года и пока не проявляет каких-либо признаков намечающегося развала.

Для начала авторы [1] выделили факторы, которые способствуют коллапсу мыльных пузырей, в порядке значимости:

- нисходящий поток жидкости, приводящий к истончению и разрыву верхней части пленки;
- испарение воды, также приводящее к истончению пленки по всей поверхности пузыря;
- односторонняя диффузия воздуха сквозь оболочку пузыря, вызванная избыточным внутренним давлением (давление Лапласа), за счет чего пузырь, даже в невесомости и в специальной атмосфере все равно сдуется.

Наиболее очевиден способ борьбы с высыханием. Гигроскопичность спиртов всем известна, а то, что особую устойчивость пузыри приобретают при добавлении в мыльный раствор глицерина, знали еще советские школьники, благодаря “Занимательной физике” Я.И. Перельмана, который в свою очередь пересказывал Чарльза Бойса, а тот – Жозефа Плато. Оптимальным в этом смысле является 85% раствор глицерина: при влажности около 50% состав раствора со временем не меняется – за счет динамического равновесия между водой, испаряющейся и поглощаемой раствором.



Рис. 1. Судьбы пузырей: а – мыльный пузырь лопнет через минуту; б – водяной пузырь с частичками полиамида пересохнет через 10 минут (для наглядности в воду намешали краситель); с – пузырь с оболочкой из раствора глицерина с частицами полиамида живет многие месяцы.

Другую причину разрушения пузыря – стекание жидкости к его низу – можно преодолеть, создав композитную оболочку из водяной пленки с твердыми частицами, в качестве которых используют частично смачивающие воду субмиллиметровые частички полиамида (размер ~ 0.1 мм, краевой угол ~ 70°).

Влияние этих двух факторов иллюстрирует рисунок: мыльные пузыри подвержены разрушению за счет стекания воды с вершины пузыря и живут не более минуты, шарик с частицами полиамида сохраняется дольше – пока не высохнет вода (высыхание заметно по изменению цвета на рис. 1b), и разваливается подобно песочной формочке через 10 минут. Наконец, пузырь с частицами полиамида в растворе глицерина не изменяет свой вид на протяжении многих месяцев (рис. 1c).

Основной интригой рассказанного сюжета остается победа над третьим фактором – сдутием пузыря за счет диффузии через оболочку воздуха, испытывающего давление Лапласа. Авторы не приводят ответа, но сам вид “пузыря”, больше напоминающего конфетку-“рафаэлку” наталкивает на мысль, что это давление как, минимум, частично компенсируется скорлупой из микрочастиц.

А. Пятаков

1. A.Roux et al., *Phys. Rev. Fluids* 7, L011601 (2022).

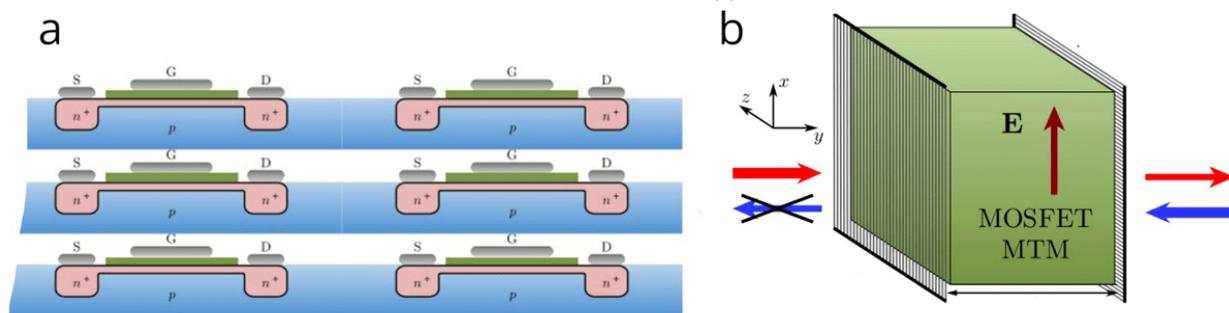


Рис. 1. а – Метаматериал из полевых МОП-транзисторов; б – невзаимный элемент, управляемый электрическим полем – поляризатор, метаматериал, анализатор.

a

$$\bar{\epsilon} = \begin{pmatrix} \epsilon_{xx} & 0 & \epsilon_{xz} \\ 0 & \epsilon_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{zz} \end{pmatrix}$$

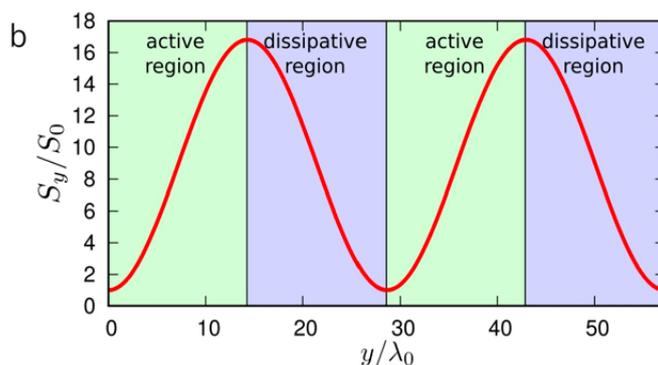


Рис.2. а – Тензор диэлектрической проницаемости метаматериала; б – нормированный вектор Пойнтинга в зависимости от пути y , нормированного на длину волны в вакууме (активные и диссипативные области закрашены разным цветом).

ФОТОНИКА

Можно ли сделать транзистор из метаматериала ...из транзисторов?

Метаматериалы – композиты с отрицательным показателем преломления или другими необычными электромагнитными свойствами – продолжают привлекать внимание исследователей. Например, ученые из Univ. of Coimbra и Univ. of Lisbon (Португалия) [1] занялись конструированием недиагональных компонент тензора диэлектрической проницаемости, и предложили концепцию материала, в котором этот тензор является неэрмитовым. Эрмитовость тензоров диэлектрической и магнитной проницаемости ведет к обратимости световых лучей, значит, материалы с неэрмитовыми тензорами могут работать как оптические изоляторы без применения дополнительных магнитных полей (рис. 1b).

Авторы предложили создать метаматериал из слоев МОП-транзисторов (рис. 1), проводимость которых существенным образом меняется при приложении электрического поля. При приложении поля вдоль вертикальной оси увеличивается проводимость транзисторов вдоль горизонтальной оси, а значит, появляется недиагональная компонента тензора диэлектрической проницаемости, причем в силу свойств транзистора поле, приложенное в противоположную сторону, не будет оказывать аналогичного действия.

На рис. 2а представлен вид тензора диэлектрической проницаемости для такой системы.

Еще одной особенностью такой среды является ее неконсервативность, причем нельзя сказать, что вся среда является усиливающей или поглощающей, ее свойства будут зависеть от пути, пройденного волной в среде (рис.2б). Энергия будет перераспределяться между собственными волнами с определенным пространственным периодом. Это свойство, в сочетании с невязимностью, дает еще одну возможность гибко управлять световыми пучками, а значит, создавать для них элементы, подобные транзисторам.

З. Пятакова

1. S.Lannebere et al., *Phys. Rev. Lett.* **128**, 013902 (2022).

КОНФЕРЕНЦИИ

Российский коллоквиум по современным проблемам физики конденсированных сред 3 февраля 2022 года (15:00 по московскому времени)



Докладчик:
Prof. Roland Wiesendanger, University of Hamburg (Germany)

Title: From spin-resolved atomic-resolution imaging to magnetic materials and devices by design

Язык: Английский

Председатель: Сергей Стрельцов

17 февраля 2022 года (15:00 по московскому времени)



Докладчик:
Prof. Stuart Parkin, Max Planck Institute of Microstructure Physics (Germany)

Title: Chiral spintronics

Язык: Английский

Председатель: Сергей Стрельцов

Цель данных коллоквиумов - представить обзор текущего состояния и основных тенденций в физике конденсированного состояния.

Платформа семинаров - ZOOM. Это бесплатная программа, Вы можете смотреть семинары на любом компьютере, планшете или смартфоне. Для этого нужно только поставить приложение ZOOM (<https://zoom.us/download>).

Все подробности и актуальную информацию о коллоквиумах можно найти по адресу: www.cond-mat.ru

ИФТТ РАН – участник государственной программы “Глобальное образование”

Государственная программа “Глобальное образование” (далее – Программа) была создана во исполнение Указа Президента РФ от 23 декабря 2013 года № 967 «О мерах по укреплению кадрового потенциала РФ». Программа предусматривает грантовую поддержку граждан РФ, самостоятельно поступивших в ведущие зарубежные образовательные организации и обучающихся в них по специальностям и направлениям подготовки, качество обучения по которым соответствует лучшим мировым стандартам. После окончания обучения участники Программы обеспечиваются трудоустройством по специальности в организациях, зарегистрированных на территории России. По условиям гранта, участникам предоставляется самостоятельный выбор организации-работодателя из утвержденного списка, который насчитывает более 1000 различных компаний, корпораций, промышленных предприятий, ВУЗов и научных организаций.

Решением наблюдательного совета Программы, заседание которого состоялось 30 декабря 2021 года, Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук (ИФТТ РАН) включен в перечень организаций-работодателей Программы. Несмотря на относительно небольшой срок участия Института в Программе, уже есть результат – выпускница Программы Бурданова Мария Геннадьевна выбрала ИФТТ РАН для своего трудоустройства.

Бурданова М.Г. – молодой научный сотрудник лаборатории профилированных кристаллов ИФТТ РАН, специализирующийся в области спектроскопии одномерных наноматериалов. В ноябре 2020 года в University of Warwick (Англия) ей была присвоена ученая степень доктора философии в физике (PhD in Physics), соответствующая российской ученой степени кан-

ПерсТ, 2022, том 29, выпуск 1

дидата физико-математических наук. Результаты исследований, полученные Марией, имеют важное фундаментальное и прикладное значение и расширяют знания как об одномерных наноматериалах, так и об их гетероструктурах, позволяя создавать новые оптоэлектронные устройства на их основе. Мария успешно сочетает исследовательскую деятельность с научно-организационной и преподавательской деятельностью: регулярно проводит рецензирование статей по спектроскопии наноматериалов в журналах ACS Photonics, Scientific Reports, Results in Physics, Journal of Biomedical Optics; преподает на кафедре общей физики МФТИ, ведет авторский курс лабораторных работ по “Спектроскопии наноматериалов” в Московском государственном областном университете (МГОУ).

Надеемся, что благодаря Программе “Глобальное образование” научный коллектив ИФТТ РАН будет и дальше пополняться молодыми научными кадрами, которые внесут в деятельность Института передовой международный опыт, знания и лучшие мировые практики.

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

Выпускающий редактор: И. Фурлетова

Адрес редакции: 119296 Москва, Ленинский проспект, 64