

ISSN: 2782-5515

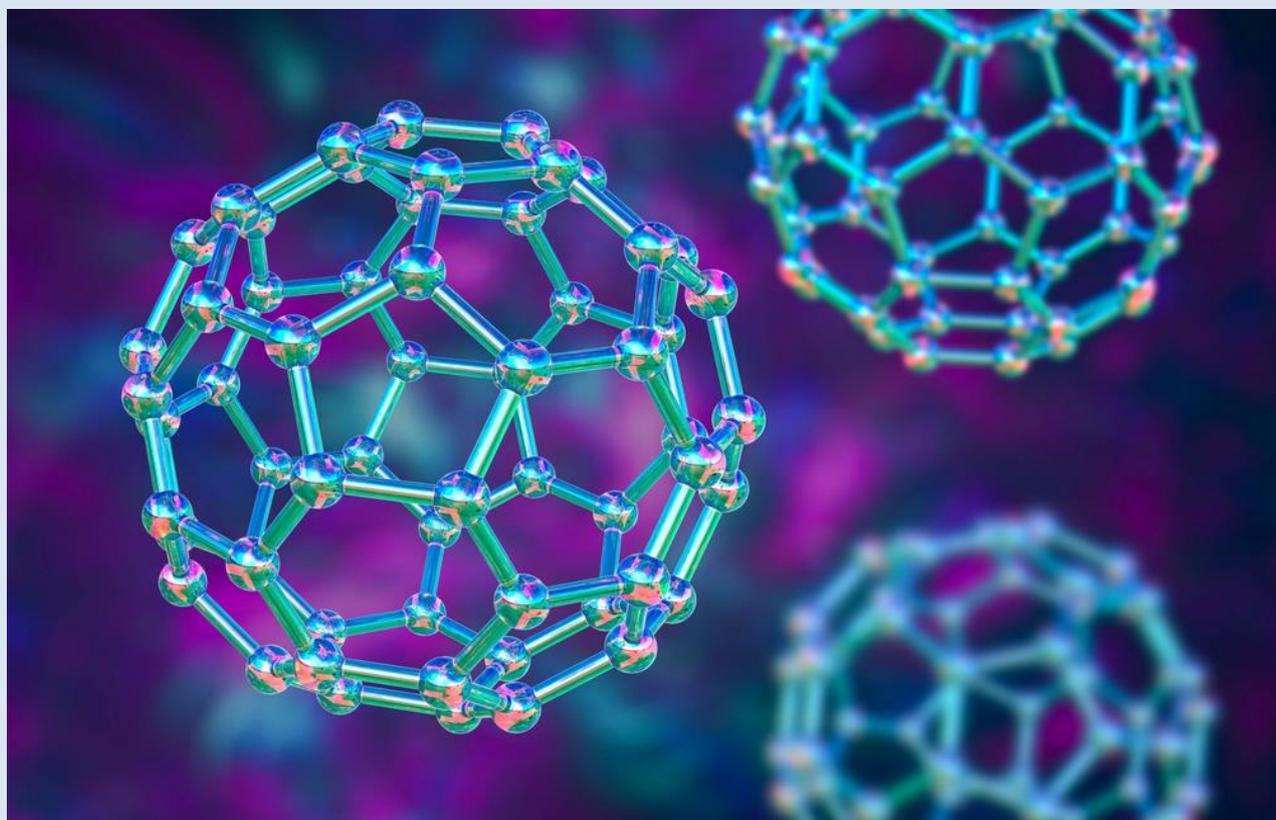


Перст

Информационный бюллетень
перспективные технологии
наноструктуры сверхпроводники фуллерены

Том 31, выпуск 2

февраль 2024 г.



Fullerene/ <https://dzen.ru/a/YIHR03coOCxxcSZu>

Черноголовка

Том 31, выпуск 2

февраль 2024 г.

В этом выпуске:

СПИНТРОНИКА

Еще один электрооптический эффект: изменение спектров бриллюэновского рассеяния в магнитных гетероструктурах

Прочитав название заметки, читатель может прийти в недоумение: почему ее отнесли к разделу “спинтроника”, а не “фотоника”, нет ли здесь ошибки, ведь управление светом за счет различных эффектов в твердом теле относится как раз к фотонике. В твердых телах, а в особенности в магнитных неоднородных материалах, наблюдается множество эффектов, связанных с взаимодействием различных подсистем: магнитной, механической, электрической, и всё это так или иначе влияет на оптические свойства материала. Разобраться в хитросплетении эффектов и механизмов, их вызывающих, довольно сложно, и часто интерпретация тех или иных экспериментальных данных вызывает бурные дискуссии среди специалистов. Возможно, и статья, которой посвящена сегодняшняя заметка, тоже вызовет дискуссию, но ведь это и есть нормальный ход научного познания.

Группа исследователей из различных российских научных центров опубликовала статью [1], посвященную исследованию рассеяния Мандельштама-Бриллюэна в гетероструктуре ферромагнетик–антиферромагнетик (а именно, в пленке NiFe/IrMn). Такие структуры перспективны для применения в спинтронике, так как ферромагнетик позволяет считывать состояния антиферромагнетика без применения низких температур и сверхчувствительных датчиков.

Ученые обнаружили, что при протекании электрического тока в антиферромагнетике IrMn нарушается симметрия мандельштам-бриллюэновского рассеяния ферромагнетика NiFe: в зависимости от направления тока усиливается либо стоксова, либо антистоксова компонента, а другая ослабляется. Были проведены исследования с образцами различной формы (однородная квадратная пленка, паттернированный образец формы “крест Холла”), варьировалось внешнее магнитное поле H , направление и величина плотности тока j . В таких образцах присутствует поле обменного смещения H_{ex} , определяемое составом пленки и связанное с анизотропией антиферромагнетика.

При электрическом токе, направленном вдоль направления внешнего магнитного поля, усиливается стоксова компонента рассеянного света, а если ток направлен в противоположную сторону, то усиливается антистоксова компонента, а стоксова ослабляется. При нулевом токе спектр рассеяния

И далее ...

НАНОМАТЕРИАЛЫ

3 Диаманты из графеновых аллотропов

4 Нанопористый активированный уголь для конденсаторов получен из пивной дробины

ФОТОНИКА

5 Флексо-фотогальванический эффект

СНОВА К ОСНОВАМ

7 Экспериментально исследована структура когерентных вихрей

КОНФЕРЕНЦИИ

8 39-е Совещание по физике низких температур (международная конференция), 3-7 июня 2024 года, г. Черноголовка

также несимметричен. Положение самих максимумов рассеяния при изменении направления и величины тока не меняется.

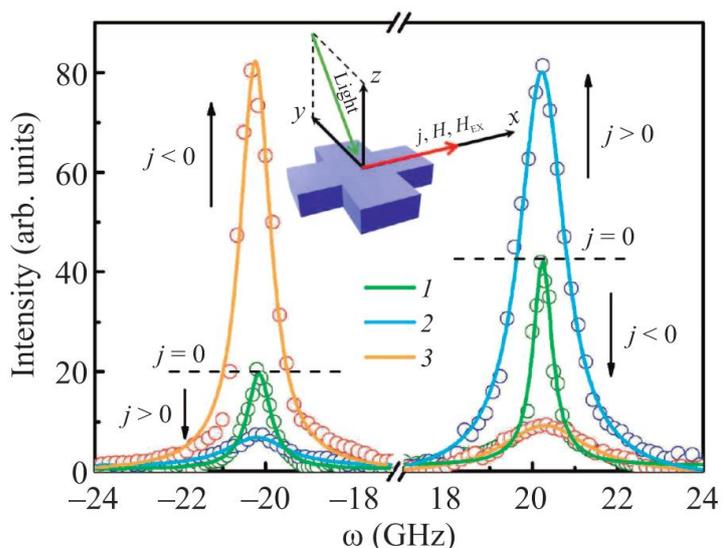


Рис. 1. В центре: исследуемая гетероструктура “крест Холла”, намагниченная в плоскости. Внешнее магнитное поле H и поле обменного смещения H_{ex} направлены параллельно друг другу в плоскости пленки. Свет падает в плоскости, перпендикулярной магнитным полям. Спектры рассеяния Мандельштама-Бриллюэна при нулевом токе (зеленая кривая 1), при токе вдоль магнитного поля (синяя кривая 2) и в противоположном направлении (оранжевая кривая 3). По горизонтальной оси разность частот: частоты исходного лазерного излучения (532 нм) и частоты рассеянного света. Стоксова компонента оказывается справа, антистоксова – слева.

Исследованные в [1] симметричные свойства эффекта, совместно с данными предыдущих работ, позволили авторам сделать вывод о механизме данного влияния. Ток, проходящий вблизи ферромагнетика, становится спинполяризованным (рис. 2). Электроны проводимости передают свой вращательный момент электронам, связанным с атомами в кристаллической решетке. Это влияет на поле обменного смещения и на амплитуду спиновых волн, распространяющихся в ферромагнетике вдоль направления магнитного поля и против него (k_S и k_{AS} на рис. 2), а спиновые волны, в свою очередь, влияют на рассеяние Мандельштама-Бриллюэна. В результате этого сложного процесса при включении-выключении электрического тока или изменении его направления будет изменяться частота рассеянного лазерного света – останется почти только стоксова или антистоксова компонента.

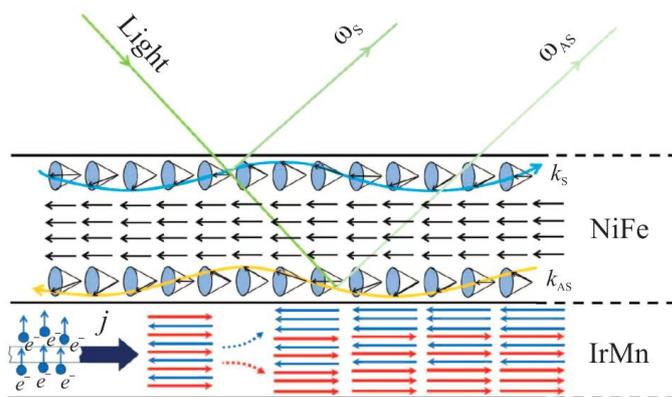


Рис. 2. К механизму влияния тока на рассеяние Мандельштама-Бриллюэна.

Таким образом, в магнитных гетероструктурах можно наблюдать еще один эффект из разряда электрооптических, имеющий фундаментальный интерес и представляющий практическую значимость. Тут можно говорить о смежной области, затрагивающей фотонику как внешнее проявление эффекта и спинтронику как его механизм.

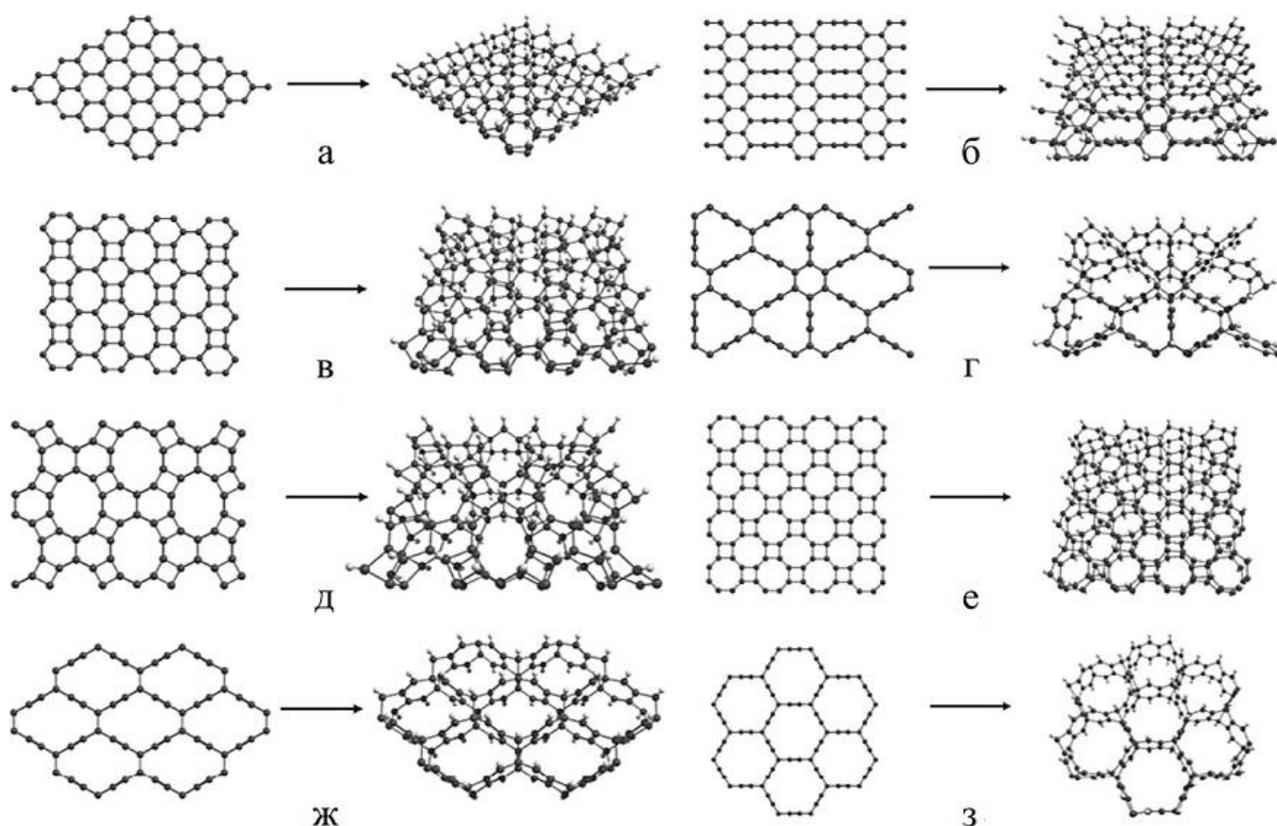
З. Пятакова

1. Р.Б.Моргунов и др., *Письма в ЖЭТФ* **119**, 289 (2024).

НАНОМАТЕРИАЛЫ

Диаманты из графеновых аллотропов

В работе [1] с помощью компьютерного моделирования авторы из МИФИ и Ульяновского университета показали, что ковалентное межслоевое связывание с образованием диаманоподобных структур не уникальное для традиционного графена явление. Некоторые его аллотропы также способны к образованию подобных квазидвумерных материалов, при этом их устойчивость сравнима с устойчивостью классического диамана. Исследователи рассмотрели восемь возможных прекурсоров, включая недавно синтезированные бифенилен, графин и DNQ-графен (см. рис.), и определили их физико-химические свойства. При этом структурную оптимизацию и прецизионные расчеты электронных, энергетических и механических характеристик они выполнили в рамках теории функционала плотности с различными функционалами (PW, PBE, HSE) и с учетом слабого ван-дер-ваальсового взаимодействия в программе Quantum Espresso, а для оценки кинетической устойчивости авторы применили традиционную NVE молекулярную динамику с потенциалом сильной связи, реализованную в программном пакете NTBM.



Атомная структура различных графеновых аллотропов и соответствующих алмазов вида C_2H : а - графен, б - скварографен (“квадратный графен”), в - бифенилен, г - 6,6,12-графин, д - DHQ-графен, е - Т-графен, ж - суперграфен, з - α -графин.

Шаг молекулярной динамики составил 0.5 фс, а диапазон температур – от 1500 до 3500 К. В дальнейшем на основе полученных с помощью молекулярной динамики результатов авторы методом “подталкивания упругой ленты” (nudged elastic band, NEB) определили переходные конфигурации (“седловые” точки) на гиперповерхности потенциальной энергии, а также продукты деградации новых алмазов. В результате исследователи пришли к выводу, что помимо привычного алмаза на основе графена наиболее кинетически устойчивыми можно считать системы, построенные на основе α -графина, бифенилена, 6,6,12-графина и скварографена. Оценки энергий активации процессов распада этих алмазов из предсказаний молекулярной динамики составили 1.63, 1.78, 2.53 и 4.34 эВ, соответственно. Последующий расчет электронных зонных структур и плотностей состояний показал, что величина диэлектрической щели рассматриваемых алмазов лежит в широком диапазоне: от 1.5 до 4.2 эВ. Дополнительный анализ механических характеристик позволил установить, что их упругие константы, включая модуль Юнга, сравнимы с соответствующими величинами

для графена. В конечном итоге авторы полагают, что новые алмазы благодаря совокупности уникальных свойств смогут занять свою нишу в приложениях нанoeлектроники. Кроме того, интерес представляют и многослойные композиты из графеновых аллотропов, которые исследователи планируют детально рассмотреть в последующих работах.

М. Маслов

1. K.P.Katin et al., *FlatChem* **44**, 100622 (2024).

Нанопористый активированный уголь для конденсаторов получен из пивной дробины

Эффективность устройств накопления и хранения электрической энергии, например электрохимических конденсаторов или литий-ионных конденсаторов, во многом зависит от материала электродов. Широко используют активированный уголь (АУ), который имеет большую площадь поверхности, высокую электропроводность, хорошую химическую стабильность, низкую стоимость получения. В последние годы для этой цели было предложено и исследовано много разных типов АУ. Результаты пока-

зали, что электрохимические характеристики определяются структурой пор, а на формирование этой структуры влияет как процесс производства, так и прекурсор АУ. Сейчас многообещающим прекурсором считают биомассу (в том числе рисовую шелуху, скорлупу кокосовых орехов). Недавно исследователи из Германии и Испании [1] нашли новый перспективный вариант дешевого сырья – пивную дробину, то есть отходы производства пива (эта биомасса, в отличие от кокосовых орехов, доступна и в России). Пивная дробина – это гуща, которая остается после варки и выработки ячменного сула. Она содержит частицы ядер, оболочки зерна. Её доля в отходах может достигать 80%. Раньше пивная дробина в основном попадала в сточные воды, засоряя окружающую среду. Потом её научились сушить и стали использовать как добавки в комбикорма и даже перерабатывать в биогаз. В составе пивной дробины много волокон, целлюлозы, поэтому она может быть полезной для изготовления качественного активированного угля. Авторы [1] получили АУ с очень высокой удельной поверхностью ($\sim 3600 \text{ м}^2/\text{г}$) и средним диаметром пор 3.2 нм. Для этого они сначала осуществили карбонизацию высушенной пивной дробины в потоке азота, а затем провели термохимическую активацию измельченного продукта. Фотография прекурсора и SEM изображение активированного угля приведены на рис. 1.



Рис. 1. Слева – прекурсор, пивная дробина BSG (brewer's spent grain). Справа – SEM изображение полученного активированного угля.

На основе полученного таким образом АУ авторы [1] изготовили электроды для электрохимического суперконденсатора с двойным электрическим слоем и органическим электролитом. Электроды показали очень высокую удельную емкость (46 Ф/г).

Исследователи продемонстрировали, что этот активированный уголь можно эффективно использовать и для катодов литий-ионных кон-

денсаторов. Раньше они выяснили, что для анодов таких конденсаторов (и аккумуляторов) можно применять твердый углеродный материал, также полученный из пивной дробины [2].

Результаты лабораторных исследований показали, что электроды на основе активированного угля обеспечивают высокую ёмкость и длительное сохранение ёмкости (до 85% после двухсотчасовых испытаний) как у электрохимических, так и у литий-ионных конденсаторов. Это позволяет рассчитывать, что использование дешевых отходов производства пива поможет созданию экологически чистых стабильных устройств высокой мощности.

О. Алексеева

1. S.D.Magar et al., *Electrochimica Acta* **446**, 142104 (2023).
2. S.D.Magar et al., *Energy Technology*, 2200379 (2022).

ФОТОНИКА

Флексо-фотогальванический эффект

Фотогальванический эффект (в последнее время его стали все чаще называть “фотовольтаическим”) копируя английский термин photovoltaic), при котором в полупроводнике возникает фотоиндуцированная ЭДС, широко используется в солнечной энергетике. Это явление, разумеется, связано с фотоэффектом, но не сводится только к нему, поскольку для генерации электрической энергии разделение электронно-дырочной пары не менее важно, чем ее образование под действием фотона. В полупроводнике разделение зарядов происходит в *p-n* переходах, и этим обусловлено принципиальное ограничение на фотоЭДС традиционных солнечных элементов – она не может превышать ширины запрещенной зоны полупроводника.

Если бы эффект возникал в объеме кристалла, а разделением зарядов занималось бы “внутреннее поле” кристалла, то фотоиндуцированное напряжение определялось бы только расстоянием, на которое расходятся электроны и дырки. Такая разновидность фотогальванического эффекта, действительно, имеет место, но не во всех кристаллах – только в средах без центра симметрии – пьезоэлектриках и сегнетоэлектриках.

В то же время, существует универсальный способ, с помощью которого можно искусственно нарушить пространственную инверсию кристалла – для этого достаточно просто его со-

гнуть. При этом одни слои сжимаются, другие растягиваются, возникает градиент деформации, выделяющий полярное направление. Эффекты, порожденные нарушением симметрии при изгибе, носят приставку “флексо-”: флексоэлектрический [1], флексомагнитный [2] и др. Существует и флексофотогальванический эффект, но о нем мало что известно: несмотря на его универсальность, этот эффект до недавнего времени был изучен только в титанате стронция, и его величины не поражали воображение: напряженность поля, вызванная изгибом, не превышала нескольких милливольт на

метр [3], так что о преодолении фотогальваническим напряжением ширины запрещенной зоны говорить не приходилось. И вот в февральской статье [1] команда ученых под руководством проф. ЛунЛун Шу из Nanchang Univ. (Китай) и проф. Густау Каталана из Univ. Autònoma de Barcelona (Испания) экспериментально продемонстрировала эффект в тысячу раз больший. Он наблюдается в галогенидных перовскитах – материалах, привлекающих в последнее время пристальное внимание изготовителей солнечных батарей.

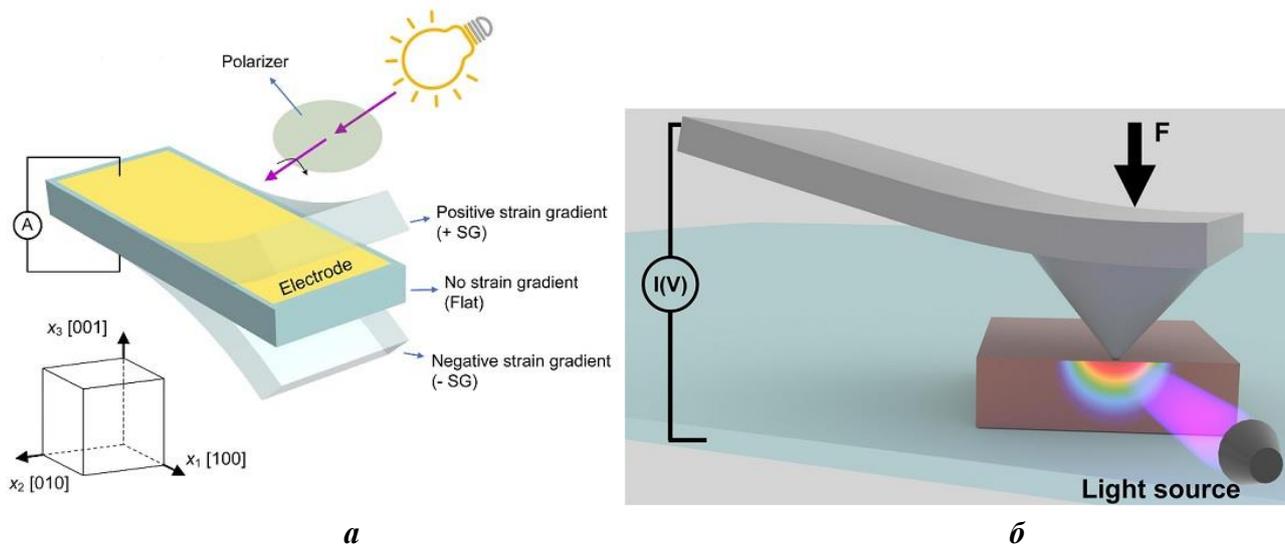


Рис. 1. *а* - Принципиальная схема измерения флексо-фотогальванического эффекта. Зависимость от поляризации света позволяет выделить искомый объемный вклад в флексо-фотогальванический эффект.

б - Принципиальная схема получения рекордных величин флексо-фотогальванического эффекта. Фотоиндуцированный ток и напряжение снимаются с помощью проводящего кантилевера зондового микроскопа, служащего одновременно электродом и источником механического напряжения.

В работе сравнивали эффекты в галогенидном перовските MAPbBr_3 (MA – обозначение иона метиламмония CH_3NH_3^+) и SrTiO_3 . Авторы [4] проводили эксперимент в “макроскопической” и “микроскопической” версиях. В первом случае размер исследуемой пластины кристалла составлял $15\text{мм} \times 5\text{мм} \times 1\text{мм}$ (рис. 1а). Однако такая установка не позволяла создавать градиенты напряжений больше четверти обратного метра. Для того чтобы получить действительно большие величины фотоиндуцированного напряжения потребовалось уже использовать острую иголку от кантилевера сканирующего зондового микроскопа, давящую на поверхность с силой 10 микроныютон (по меркам СЗМ это не маленькая сила: при радиусе кривизны 70 нм она создает давление 50 МПа). Действуя таким образом, ученые достигли величин фотоЭДС шесть вольт, что почти в три раза превышает ширину запрещенной зоны перовскита.

При рассмотрении причин увеличения флексо-фотогальванического эффекта авторы [4] предупреждают от соблазна сводить механизм явления к совместному действию фотоэффекта и флексоэлектрического эффекта – важную роль в этом играют оптические свойства материала, в частности большая, чем в титанате стронция, диэлектрическая постоянная на частоте светового излучения, а также то обстоятельство, что диффузионная длина носителей заряда в перовскитах измеряется микронами, в то время как в титанате стронция – сотней нанометров.

Ученым также удалось показать, что с помощью изгибной деформации можно управлять величиной фотогальванических эффектов в тех кристаллах, где фотоиндуцированная ЭДС возникает и в отсутствие деформаций, например в родственном перовскитном материале MAPbI_3 , в котором центральная симметрия нарушена

изначально. Эти результаты позволяли их коллеге МинМинь Яну – первооткрывателю флексо-фотогальванического эффекта высказывать в комментарии на данную статью [5] надежду на преодоление пресловутых 30% КПД – максимальной теоретической эффективности солнечного элемента на *p-n*-переходе (предел Шокли-Квиссера).

А. Пятаков

1. [А.Пятаков, ПерсТ 25, вып. 7/8, \(2019\).](#)
2. [А.Пятаков, ПерсТ 31, вып. 1 \(2024\).](#)
3. *M.M.Yang et al., Science 360, 904 (2018).*
4. *Zhiguo Wang et al., Phys. Rev. Lett., 132, 086902 (2024).*
5. *Mingmin Yang, Physics, 17, 27 (2024).*

СНОВА К ОСНОВАМ

Экспериментально исследована структура когерентных вихрей

Крупномасштабные когерентные структуры (столбовые вихри) – формирование течения в турбулентном потоке быстро вращающейся трёхмерной жидкости, однородного вдоль оси вращения и направленного в плоскости, ортогональной этой оси. Примерами таких вихрей в природе являются торнадо, а также течение в жидком ядре Земли. В промышленности нашли широкое применение установки циклоны, основанные на вихревых когерентных течениях в турбулентном потоке. Такие установки используются для очистки в подготовительных или технологических операциях на предприятиях металлургической, деревообрабатывающей, химической, сельскохозяйственной промышленности, в энергетическом секторе и при производстве сыпучих строительных материалов. Однако до сих пор остаются неизученными механизмы, определяющие их структуру, процессы формирования и дальнейшего распространения вихрей.

Сотрудники ИФТТ РАН совместно с ИТФ РАН им. Л.Д. Ландау впервые экспериментально исследовали генерацию вихревого течения в несжимаемой жидкости внутри вращающегося закрытого аквариума кубической формы [1]. Для решения задачи было разработано и создано уникальное оборудование, позволяющее проводить исследования при различных режимах турбулентности. Экспериментальная установка представляла собой стеклянный куб размером 100×100×100 см, усиленный стальным каркасом и установленный на вращающуюся платформу. Куб полностью заполняли дистил-

лированной водой и герметично закрывали стеклянной крышкой для проведения сверху видеосъёмки процессов. Скорость вращения платформы может варьироваться от 0.06 до 0.72 оборотов в секунду. Для визуализации движения воды внутри кубического аквариума в воду были добавлены декорирующие частички полиамида PA-12 среднего размера 90 мкм нейтральной плавучести. Видеорегистрацию движения частичек, подсвеченных лазерным лучом, проводили скоростной камерой. Полученные видеоданные обчитывали на компьютере с помощью метода кросскорреляционной обработки PIV (Particle Image Velocimetry) (рис. 1).



Рис. 1. Экспериментальная установка. Кубометр воды вращается с угловой скоростью до 1 оборота в секунду.

Возбуждение течения осуществляли путем создания мелкомасштабных вихрей вблизи боковых ребер куба. В объеме жидкости наблюдались когерентные столбовые вихри-циклоны, простирающиеся от дна до крышки куба. Время существования циклонов значительно превышало время вязкого затухания за счет трения о дно и крышку, так называемого слоя Экмана.

Экспериментально показано, что существуют два турбулентных режима квазидвумерного течения в сосуде с горизонтальными границами. Режимы отличаются разным количеством вихрей-циклонов и их профилями (рис. 2). В обоих режимах циклоны являются устойчивыми во времени структурами, которые существуют дольше времени вязкого затухания. Переход между режимами происходит при пороговом значении макрочисла Россби $Ro \star M \approx 0.1$, показывающем отношение амплитуды скорости течения и групповой скорости инерционных волн.

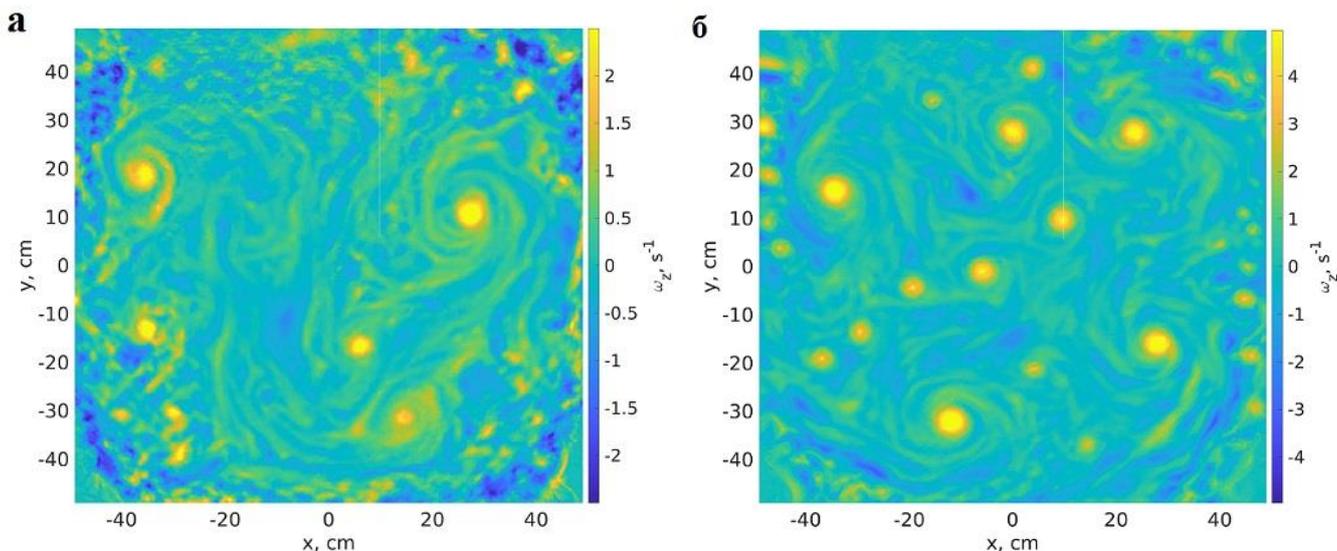


Рис. 2. Поле завихренности, усредненное по $1/3$ с в момент $t = 166$ с после начала съемки: **a** – низкая скорость вращения 0.12 об/с; **б** – высокая скорость вращения 0.72 об/с.

Сравнение экспериментальных данных с результатами построенных ранее теоретических моделей показало большее соответствие модели, построенной с учетом влияния слоя Экмана на вихрь [2, 3].

О. Камынина

1. Д.Д.Тумачев и др., *Письма в ЖЭТФ* **118**, 430 (2023).
2. I.Kolokolov et al., *Phys. Rev. Fluids* **5**, 034604 (2020).
3. V.M.Parfenyev and S.S.Vergeles, *Phys. Fluids* **33**, 115128 (2021).

КОНФЕРЕНЦИИ

39-е Совещание по физике низких температур (международная конференция), 3-7 июня 2024 года, г. Черноголовка

39-е Совещание по физике низких температур (международная конференция), посвященное 300-летию Российской академии наук, состоится с 3-го по 7-е июня 2024 года в Черноголовке на базе Института физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна РАН (ИФТТ РАН).

Организаторами конференции выступают Научный Совет РАН по физике конденсированных сред, Научный Совет РАН по физике низких температур, Институт физики твердого тела им Ю.А. Осипьяна РАН и Институт физических проблем им. П.Л. Капицы РАН при поддержке Российской академии наук и Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Совещание продолжит ряд научных мероприятий, регулярно проходящих в нашей стране начиная с 50-х годов, и связано с именами нобелевских лауреатов П.Л. Капицы, Л.Д. Ландау, В.Л. Гинзбурга и А.А. Абрикосова. Первое Всесоюзное совещание по физике низких температур состоялось в 1954 году под председательством академика П.Л. Капицы, в то время возглавлявшем Научный совет АН СССР по проблеме “Физика низких температур”.

Тематика конференции:

1. Квантовые жидкости и кристаллы (Q)
2. Фундаментальные вопросы сверхпроводимости (S)
3. Низкотемпературный магнетизм (L)
4. Электронные явления при низких температурах (включая наноструктуры и низкоразмерные системы) (N)
5. Низкотемпературная физика диэлектриков (D)
6. Техника низкотемпературного эксперимента и прикладные вопросы (T)
7. Медицинские приложения (B)
8. Материалы для низкотемпературных применений (M)

Важные даты:

Регистрация участников – *15 марта 2024 г.*
Прием тезисов докладов – *15 марта 2024 г.*
Оплата оргвзноса – *15 мая 2024 г.*

Подробная информация и регистрация на сайте мероприятия: <http://www.issp.ac.ru/fnt2024/>

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

Выпускающий редактор: И. Фурлетова