

ISSN: 2782-5515



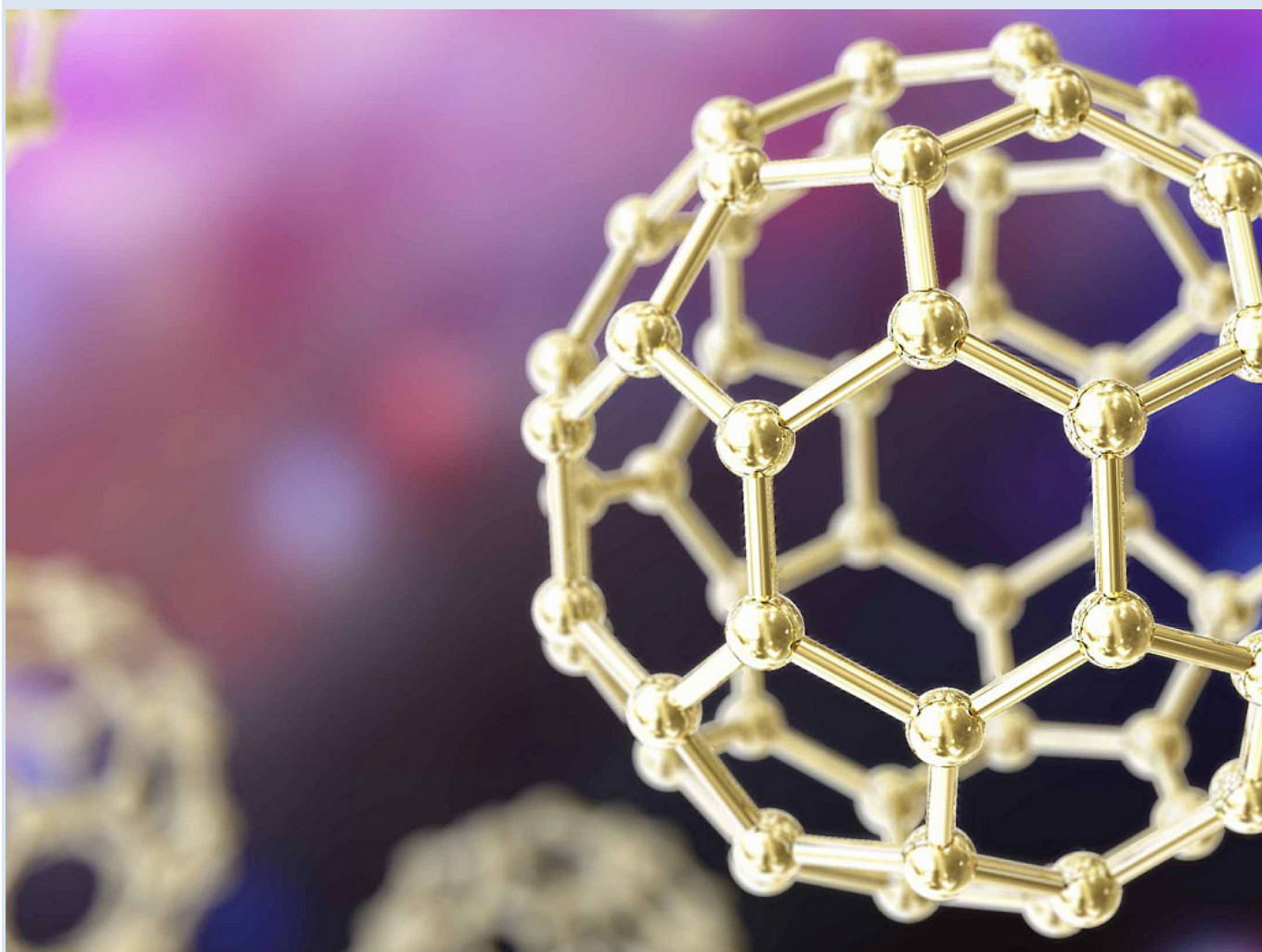
Перст

Информационный бюллетень

перспективные технологии
наноструктуры сверхпроводники фуллерены

Том 30, выпуск 7/8

июль/август 2023 г.



<https://bfm74.ru>

Черноголовка

Том 30, выпуск 7/8

июль/август 2023 г.

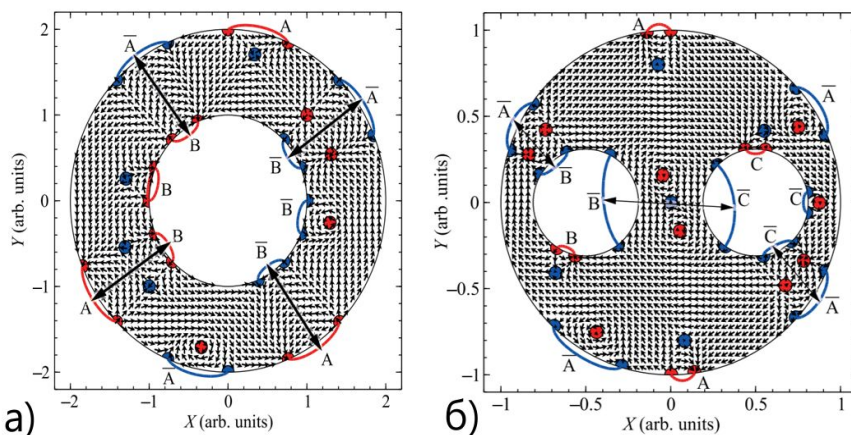
В этом выпуске:

СПИНТРОНИКА

Идеи топологии и магнитная память на колечках в наноформате

Создание элементов магнитной памяти — задача, актуальная как для традиционной электроники, так и для самых передовых ее направлений — спинтроники, скирмионики и т.п. Среди большого количества публикаций на эту тему стоит отметить одну статью, опубликованную в июльском выпуске “Писем в ЖЭТФ” [1]. К.Л. Метлов из Донецкого физико-технического института им. А.А. Галкина предложил создать память, в некотором роде напоминающую знаменитую “беговую дорожку” (racetrack memory) Стюарта Паркина [2].

Основной элемент предложенной памяти — планарный магнитный нанодиск с одним или несколькими отверстиями. В таком диске могут возбуждаться магнитные вихри — скирмионы с различным направлением вращения. Перемещение скирмионов по кольцу происходит свободно, но существует так называемая “топологическая защита”, заключающаяся в том, что изменение общего числа пар вихрь-антивихрь требует очень большой энергии. Топологическая защита, с одной стороны, повышает надежность устройства, а с другой стороны, уменьшает возможности для дальнейшего уплотнения информации. Основная идея статьи [1] заключается в использовании нанодисков с отверстиями, в которых можно организовать взаимодействие скирмионов, и, оставив топологическую защиту, записать на наноэлементе не один бит, а “бегущую строку” из нескольких взаимодействующих битов.



Наноэлементы и взаимодействующие биты. Красные и синие точки — центры вихрей и антивихрей, соответственно, черными стрелками показаны связанные состояния битов. а) - Наноэлемент с одним отверстием и 16 вихрями-антивихрями, на котором может быть закодировано 8 бит. б) - Наноэлемент с двумя отверстиями, внутри каждого из отверстий индуцируются вихри.

И далее ...

СНОВА К ОСНОВАМ

3 На пути к “четырёхмерным” кристаллам

4 Долгоживущие левитирующие капли: Лейденфрост или Марангони?

МУЛЬТИФЕРРОИКИ

5 Преломление доменных границ: принцип Ферма за пределами оптики

ДЛЯ ПРАЗДНОГО УМА

6 Золотые наночастицы помогут виноделам

ВЕСТИ С КОНФЕРЕНЦИЙ

8 Samarkand International Symposium on Magnetism (SISM-2023)

Использование элементов с большим числом отверстий даст возможность ещё плотнее записывать информацию. В статье рассмотрена методика моделирования и оптимизации распределения намагничённости, энергетические барьеры и схемы кодирования информации. Статья имеет теоретический характер, но, возможно, не за горами и эксперименты с подобными элементами памяти.

З. Пятакова

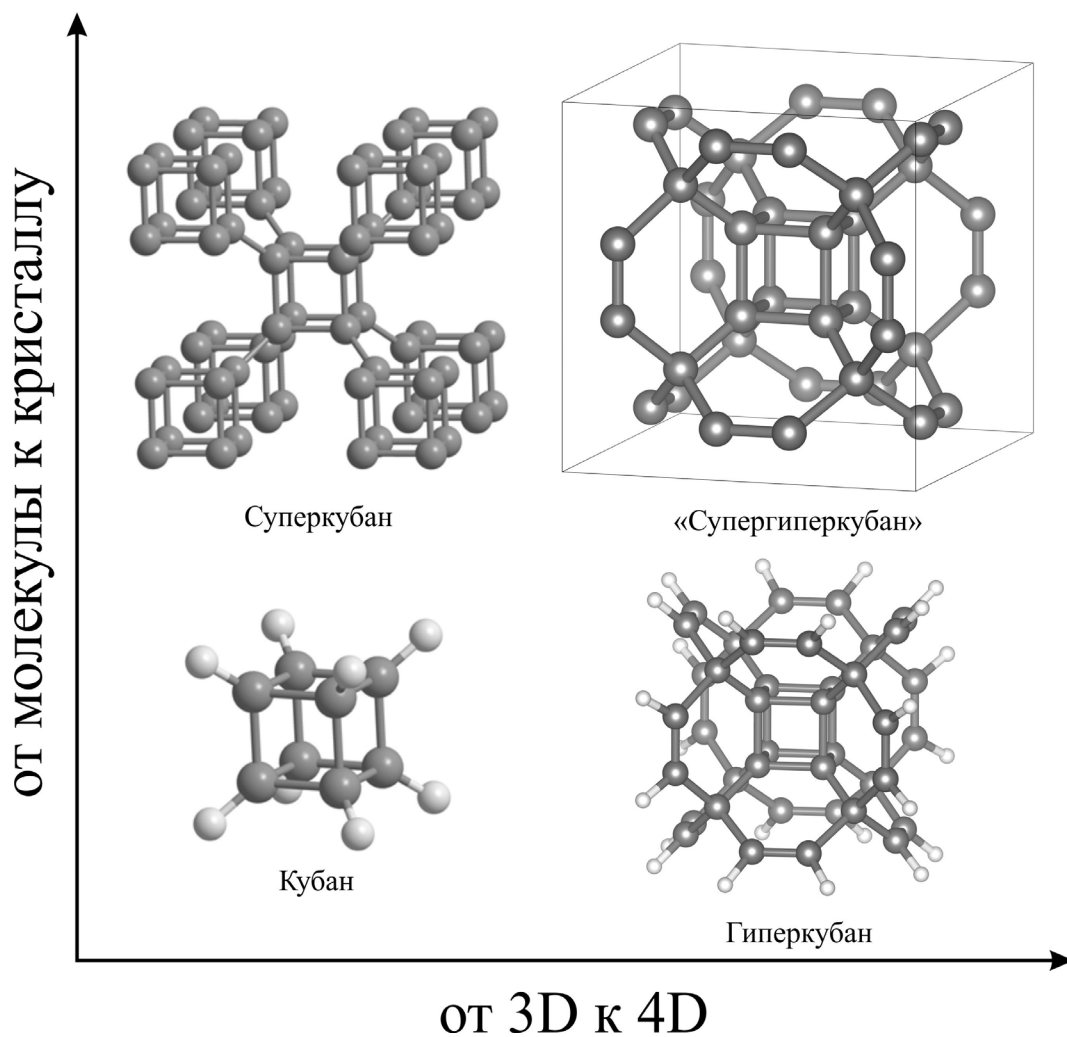
1. К.Л.Метлов, *Письма в ЖЭТФ* **118**, 95 (2023).

2. S.S.P.Parkin et al., *Science* **320**, 190 (2008).

СНОВА К ОСНОВАМ

На пути к “четырёхмерным” кристаллам

Вдохновившись углеводородным тессерактом, исследователи из МИФИ и Ульяновского гос. университета предложили несколько “четырёхмерных” ковалентных кристаллов, построенных на его основе [1]. Напомним, что углеводородный тессеракт или гиперкубан представляет собой молекулярный аналог четырёхмерного гиперкуба. Известно, что одна из проекций последнего на трёхмерное пространство представляет собой два вложенных обыкновенных куба, соответствующие вершины которых связаны между собой отрезками.



Классический углеводородный кубан C_8H_8 и фрагмент ковалентного кристалла суперкубана, построенный на его основе (слева), “четырёхмерный” гиперкубан $C_{40}H_{24}$ и фрагмент ковалентного кристалла гиперкубана с простой кубической решеткой (справа)

Углеводородный аналог такой системы (см. рис.) был впервые теоретически предсказан в 2014 году [2], а год спустя с помощью компьютерного моделирования удалось подтвердить его высокую кинетическую устойчивость [3]. И вот теперь исследователи [1] с по-

мощью теории функционала плотности выявили три типа возможной упаковки ковалентных кристаллов гиперкубана, построенных из отдельных молекул четырёхмерного гиперкуба, а именно простую кубическую (ПК), объемноцентрированную кубическую (ОЦК), по анало-

гии с известным кристаллом суперкубана для “трехмерного случая” (см. рис.), и гранецентрированную кубическую (ГЦК). Прежде всего, для оценки термодинамической устойчивости исследователи получили энергии когезии этих материалов. Оказалось, что самой высокой величиной - 7.3 эВ/атом, а вместе с тем и наибольшей термодинамической устойчивостью, обладает кристалл гиперкубана с ПК решеткой. Энергии когезии кристаллов с ОЦК и ГЦК решетками оказались немного ниже и составили 6.9 и 7.1 эВ/атом, соответственно. Затем авторы определили электронные характеристики этих ковалентных кристаллов. Из анализа электронной зонной структуры и плотности электронных состояний следует, что материалы с ПК и ОЦК решетками можно отнести к полупроводникам (ширина щели 2.23 и 1.46 эВ, соответственно), а ГЦК-кристаллы – к классу металлов. Однако последующий расчет фононных спектров показал, что в случае ГЦК решетки структура вполне может оказаться динамически неустойчива. В связи с этим дальнейшие расчеты спектров комбинационного рассеяния света и ИК-спектров авторы выполнили для ковалентных кристаллов гиперкубана с ПК и ОЦК решетками. В итоге они определили характерные пики различных структурных фаз гиперкубана, знание которых позволит точно идентифицировать и различить их во время экспериментального обнаружения. Кроме того, дополнительно полученные исследователями оптические спектры как для ПК, так и для ОЦК систем показывают максимум поглощения при ~100 нм, что соответствует дальнему УФ-диапазону. Следует отметить, что интенсивность пика для гиперкубана с ПК-решеткой значительно выше, чем для гиперкубана с ОЦК-решеткой при той же длине волны. Оценка ширины запрещенной зоны по краю поглощения ~400 нм дает величину около 3 эВ, которая коррелирует с ширинами запрещенных зон, полученными ранее.

В итоге, по мнению исследователей, сочетание уникальных электронных и оптических характеристик, а также высокая кинетическая устойчивость кристаллов гиперкубана (по крайней мере с ПК и ОЦК упаковками) делают их перспективными кандидатами для применения в электронных устройствах и фотокатализе. Кроме того, по аналогии с твердым кубаном $s\text{-C}_8\text{H}_8$ фундаментальный интерес представляет также получение анизотропного молекулярного кристалла $s\text{-HCUB}$, в котором отдельные моле-

кулы гиперкубана, ориентированные вдоль выделенного направления, связаны между собой слабыми ван-дер-ваальсовыми связями.

1. *M.M.Maslov et al., Mater. Today Commun.* **35**, 106146 (2023).
2. [ПерсТ 21, вып. 22, с. 5 \(2014\).](#)
3. [ПерсТ 22, вып. 23/24, с. 9 \(2015\).](#)

Долгоживущие левитирующие капли: Лейденфрост или Марангони?

Эффект Лейденфроста — левитация капель над раскаленной поверхностью на “подушке” из пара – одна из популярных физических демонстраций, которую часто показывают любопытным зрителям как живую, так и на видео. Ученые из Тюменского гос. университета обнаружили еще более удивительный эффект, когда левитация капель происходит над поверхностью при комнатной температуре, причем время левитации достаточно большое [1].

В эксперименте авторы исследовали поведение капель над поверхностью жидкости. Капли *n*-бутанола диаметром 2-3 мм левитировали над поверхностью полидиметилсилоксана (PDMS-5). Характерное время левитации составляло сотни-тысячи секунд, что в разы больше характерного времени левитации за счет эффекта Лейденфроста.

Какая же сила удерживает капли над поверхностью? В этой системе имеется градиент температуры. За счет испарения жидкости поверхность капли холоднее поверхности жидкости, что хорошо заметно на фотографии в инфракрасных лучах (рис. 1с). Также имеется градиент концентрации паров под каплей. При наличии этих двух градиентов вследствие термокапиллярного эффекта и концентрационно-капиллярного эффекта (эффекта Марангони) возникают потоки пара и жидкости. Оба эффекта действуют в одном направлении и вносят вклад в устойчивость капли. На рис. 1б схематически изображены потоки жидкости и пара. Судя по приведенной схеме и результатам экспериментов, приведенным в статье, потоки жидкости увлекают воздух так, что над поверхностью жидкости возникают восходящие потоки, удерживающие каплю.

Авторы [1] исследовали зависимости времени левитации капли от ее размеров, температуры, концентрации вещества капли и вида вещества поверхности. Минимальное время левитации составляло несколько секунд, максимальное около 1000 секунд. Исследовав зависимости

времени левитации от концентрации n-бутанола в капле, авторы показали, что наибольший вклад в стабильность капли вносит именно градиент концентрации вещества, то есть эффект Марангони — тот самый эффект, который отвечает за “слезы вина” в бока-

ле и “кофейные кольца”. Наибольшее время левитации имеет место при определенном соотношении между поверхностным натяжением и вязкостью капли, а значит, можно подобрать оптимальную концентрацию вещества для достижения нужного времени левитации.

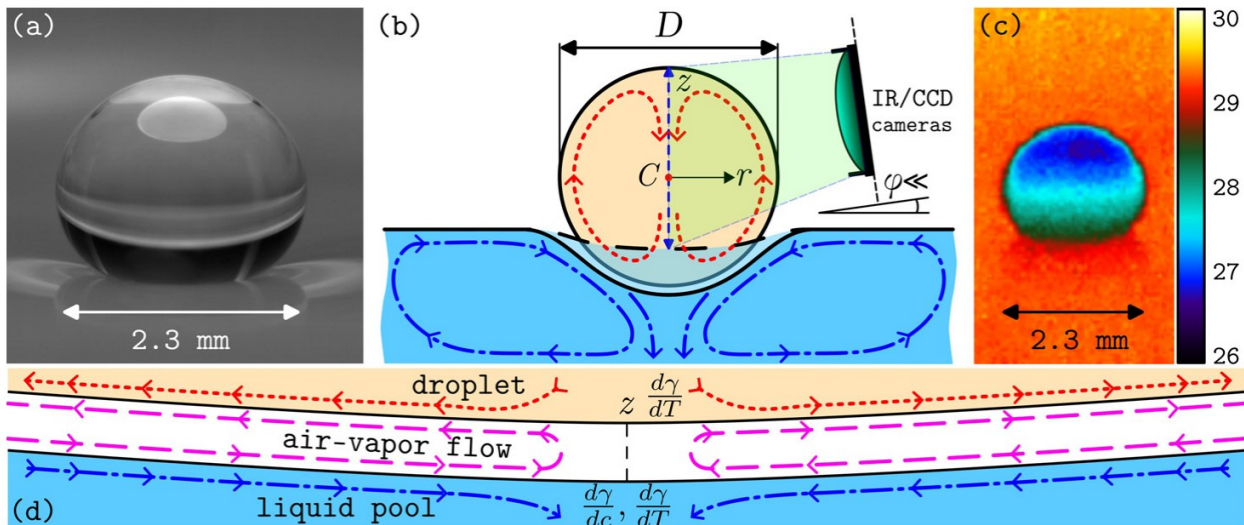


Рис. 1. а - Фотография капельки над поверхностью жидкости; б - схематическое изображение градиентов и возникающих в системе потоков; с - инфракрасное фото капельки над поверхностью жидкости.

Полученные результаты могут быть полезны для создания схем микрофлюидики, позволяя осуществлять движения капель без трения, для создания миниатюрных линз и во множестве других применений.

З. Пятакова

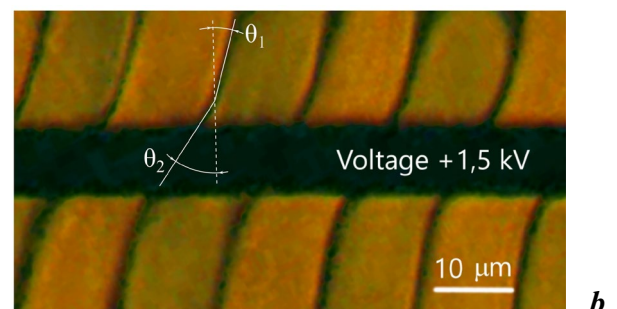
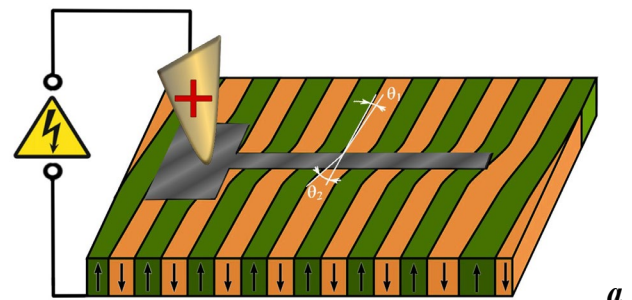
I. N.A.Ivanova, D.S.Klyuev, *Appl. Phys. Lett.* 123, 034103 (2023).

МУЛЬТИФЕРРОИКИ

Преломление доменных границ: принцип Ферма за пределами оптики

*Cuius rei demonstrationem mirabilem sane detexi.
Hanc marginis exiguitas non caperet.
(Я нашел этому поистине чудесное доказательство, но поля слишком узки, чтобы оно здесь вместились)
Пьер Ферма*

Принцип Ферма, согласно которому луч свет выбирает быстрейший из всех возможных путей, является одним из примеров экстремальных принципов в физике, имеющих универсальную значимость. В этом смысле лукавое примечание Пьера Ферма на полях “Арифметики”, относящееся к доказательству его знаменитой теоремы (см. эпиграф), подходит и для нашего случая: принципу Ферма уже тесно в узких рамках геометрической оптики.



Электроиндуцированное преломление доменных границ: а - схематическое изображение эксперимента; б - магнитооптическое изображение доменной структуры в поле электрода.

Любопытное проявление принципа Ферма в микромагнетизме наблюдали исследователи на кафедре физики колебаний физфака МГУ им. М.В. Ломоносова [1]: полосовая доменная структура преломляется при пересечении плоского электрода, на который подается электрическое напряжение (см. рис.).

Многочисленные измерения при различных относительных ориентациях направления доменных границ и полоскового электрода подтверждают выполнения закона Снелиуса: синусы углов падения и преломления при постоянном напряжении на электроде дают одно и то же отношение. При этом, в отличие от похожего явления “преломления” доменных границ на топографических неоднородностях, наблюдавшегося в [2], “показателем преломления” на электроде можно управлять, изменяя величину и знак электрического напряжения: при положительном напряжении относительный показатель преломления меньше единицы, при отрицательном – больше.

На чем же основана аналогия с оптикой? Траектория луча света пролегает таким образом, чтобы оптический путь (интеграл от показателя преломления по траектории) был наименьшим. В случае же доменной границы минимизируется функционал поверхностной энергии доменной границы: в электрическом поле плотность поверхностной энергии доменной границы изменяется, возрастая при отрицательном напряжении на электроде и уменьшаясь при положительном. Как полагают авторы [1], причиной этому служит неоднородное магнитоэлектрическое взаимодействие: пространственная модуляция намагниченности порождает электрическую поляризацию доменной границы, делая ее чувствительной к воздействию электрического поля.

А. Пятаков

1. А.А.Подклетнова и др., *Письма в ЖЭТФ* **118**, 259 (2023).
2. N.Hedrich et al., *Nat. Phys.* **17**, 574 (2021).

ДЛЯ ПРАЗДНОГО УМА

Золотые наночастицы помогут виноделам

С древнейших времен виноделы используют диоксид серы. Археологические находки говорят о том, что серой окуривали амфоры за две тысячи лет до нашей эры. Сейчас SO₂ – пищевая добавка, сертифицированная во всем мире. Она применяется для защиты виноматериалов и вина от окисления и от вредного воздействия бактерий, дрожжей на всех этапах производства. Модные сейчас “вина без серы” часто нестабильны и обладают неприятным запахом. Однако и у вина, содержащего консервант SO₂, могут испортиться вкусовые качества и аромат. Это происходит, если образуются сероводород или тиолы (метантиол и этантиол) в концентрациях выше порога чувствительности. (Интересно, что дисульфиды, которые присутствуют в большинстве вин, в малых концентрациях оказывают положительное влияние на вкус и аромат, усиливая тона тропических фруктов). Традиционно для удаления сероводорода в виноделии используют медь (медный купорос). Медь превращает H₂S в сульфид меди, который выпадает в виде осадка и удаляется путем фильтрации или переливания. (*Говорят, что у некоторых сомелье для исправления запаха вина в бутылке всегда есть при себе “медная монетка”, например, советская копейка*). Разрешены лишь очень малые добавки меди, т.к. она может вредить здоровью, экологии, а также снижает качество вина. Виноделы ищут безопасные способы избавления от соединений серы, ухудшающих вкус и аромат. Ученые из Австралии предложили новую технологию, основанную на создании наноструктурной поверхности из наночастиц золота на полимерных нанопокровках [1]. Образование прочных связей золото-сера на поверхности наночастиц позволяет удалить из вина сероводород и тиолы, ухудшающие его качество. Схема синтеза наноструктурной поверхности и использования в вине показана на рис. 1.

Полимерные нанопокровки авторы [1] получили методом плазменной полимеризации. Это очень быстрый процесс, его часто применяют для создания тонких функциональных покрытий на любых подложках, даже сложной 3D формы. Исследователи использовали два мономера – 2-метил-2-оксазолин (PO_x) и аллиламин (AA). Толщина полимеризованных покрытий 25-30 нм. На этих нанопокровках иммобилизовали наночастицы золота, полученные из

HAuCl₄. Предварительные эксперименты показали, что использование золотых наночастиц на PO_x наиболее эффективно. На рис. 2 приведены SEM изображения золотых наночастиц на PO_x на стеклянной подложке (а) и на нержавеющей сетке (b). Размер наночастиц 68 нм. Эти нано-

структурные поверхности были выбраны для дальнейших исследований. Кроме электронной микроскопии авторы [1] использовали методы газовой хроматографии и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии.

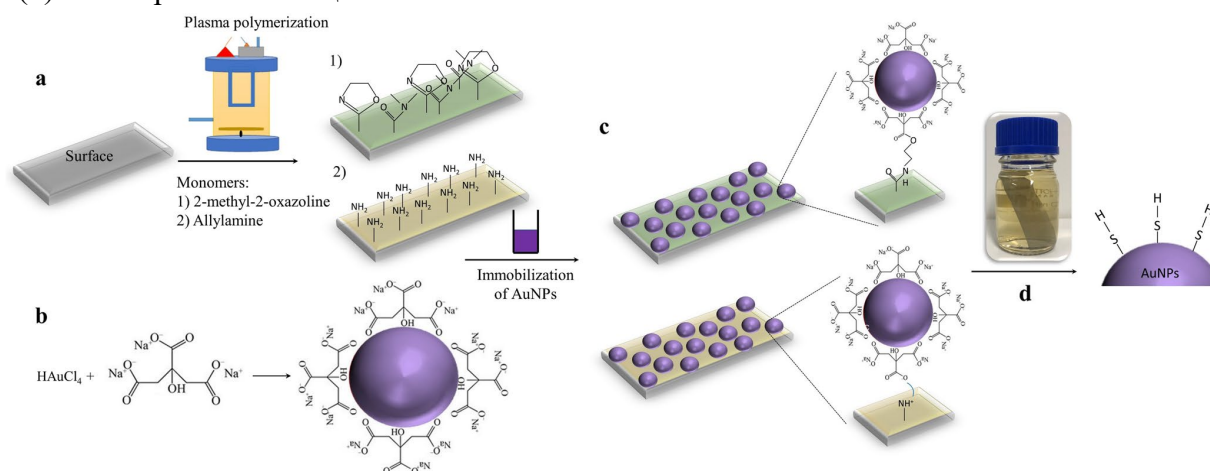


Рис. 1. Схема получения наноструктурной поверхности и её использования в производстве вина.

а - Плазменная полимеризация двух мономеров приводит к образованию на подложках тонких полимерных покрытий. б - Синтез Au наночастиц из HAuCl₄. в - Покрытые полимерами подложки погружены в раствор с Au наночастицами на 24 часа. д - Подложки с наноструктурными поверхностями погружают в вино на 3, 6 и 24 часа. Концентрации H₂S и тиолов в образцах вина измеряют до и после погружения.

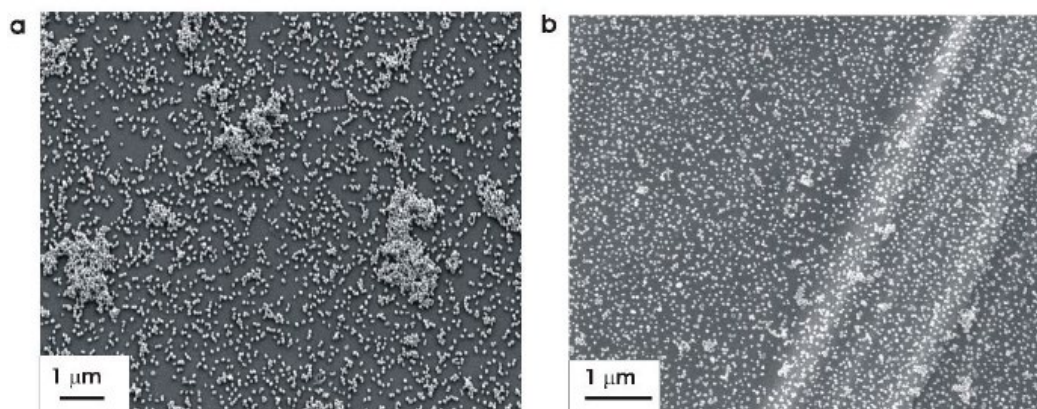


Рис. 2. SEM изображения 68 нм золотых наночастиц на PO_x на стеклянной подложке (а) и на нержавеющей сетке (b).

Была изучена эффективность удаления сероводорода, метантиола и этантиола из модельных винных растворов с разным содержанием SO₂, а также из вин Шардоне, Совиньон Блан и Сира виноделен Южной Австралии (урожай 2020 и 2021 годов). Вина были выбраны с высоким естественным содержанием H₂S и тиолов. После погружения наноструктурной поверхности на 24 часа концентрация сероводорода уменьшилась для всех исследованных белых вин (в некоторых случаях почти в 2 раза) и для большинства красных. Концентрация метантиола и этантиола также снизилась для всех белых вин. Сравнительные измерения показали, что обработка с помощью наноструктурной поверхно-

сти более эффективна, чем общепринятая с использованием меди (например, в некоторых случаях количество удаленного метантиола в 4 раза больше). Результаты изучения красных вин не так однозначны, но для отдельных образцов вина при использовании наноструктурной поверхности обнаружено резкое снижение концентрации метантиола. Процесс удаления “лишней” серы простой, одностадийный – наноструктурная поверхность добавляется непосредственно в вино, и через определенное время извлекается.

Как показали исследования, на соединения серы, усиливающие в вине ароматы тропических

фруктов, наноструктурная поверхность не оказала воздействия. Таким образом, новая технология не делает аромат беднее. Плазменная полимеризация позволяет получать полимерные покрытия на сетке из нержавеющей стали, что, конечно, более эффективно, т.к. увеличивается площадь поверхности, и удобно для практического применения. Такие наноструктурные поверхности с наночастицами золота можно использовать не только в бутылках, но и при производстве вина, например, в системах фильтрации.

О. Алексева

I. A.M. Mierczynska-Vasilev et al., npj Sci. Food 7, 5 (2023).

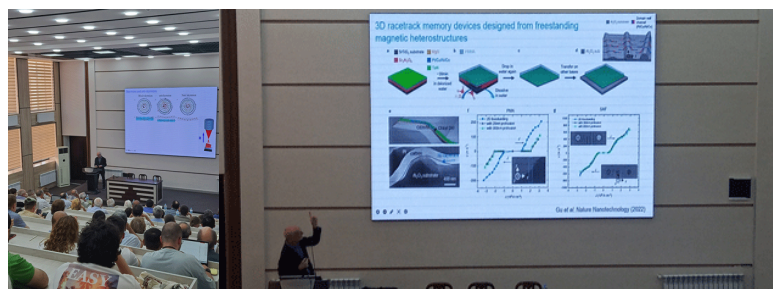
ВЕСТИ С КОНФЕРЕНЦИЙ

Samarkand International Symposium on Magnetism (SISM-2023)

С 2 по 6 июля 2023 года в Самаркандском государственном университете им. Ш. Рашидова проходила Международная конференция по магнетизму Samarkand International Symposium on Magnetism (SISM 2023). SISM продолжил традицию MISM (Moscow International Symposium on Magnetism) – самой большой конференции по магнетизму в России, ведущей свою историю с 1999 года. MISM пользовался большой популярностью, с каждым разом собирая все большее количество участников: в 2017 году их было более восьми сотен, что вывело ее в разряд крупнейших магнитных конференций в мире. Более трети гостей MISM составляли гости из дальнего зарубежья, так что в новых реалиях самым подходящим местом для продолжения традиции международных симпозиумов стал “перекресток культур” – город Самарканд. Важным обстоятельством также было то, что в Самаркандском университете действует школа магнетизма под руководством О.К. Кувандикова, воспитанники которой и составили актив организационного комитета. Особо стоит отметить роль ученого секретаря конференции М.К. Салахитдиновой в успешном проведении мероприятия.

В конференции приняло участие более двухсот человек, большую часть из которых, по традиции, составляли участники из России. Более тридцати докладов было представлено узбекскими учеными из научных организаций Самарканда и Ташкента. Значительную долю, 20% от общего числа участников, составляли гости из дальнего зарубежья: КНР, Индии,

Японии, Германии, Австрии, Испании, Италии, Греции, Бразилии, Аргентины, Австралии и США. На конференции работало 12 секций, отражающих современные направления в магнетизме: спиновая электроника, магнитофотоника, метаматериалы, магнитные полупроводники, мультиферроики, магнитокалорика и материалы с памятью формы, магнитные наноструктуры и низкоразмерный магнетизм, магнитномягкие и магнитножесткие материалы, магнетизм и сверхпроводимость, магнетизм в биологии и медицине.



Пленарный доклад Стюарта Паркина

С первым пленарным докладом выступил один из пионеров спиновой электроники Стюарт Паркин (Stuart Parkin). Он известен как изобретатель трековой памяти (racetrack memory), принцип действия которой основан на движении доменных границ. В своем докладе “Chiral spintronics” он посвятил часть слайдов новостям по этой теме (в частности, технологии отделения “беговых дорожек”-треков от подложки и перенесения их на сапфировую “монтажную плату” для создания трехмерных плотноупакованных структур), но чувствовалось, что фокус внимания уже смещен, в соответствии с велением времени, в сторону двумерных магнитных материалов. Так, наиболее наглядной демонстрацией основной идеи доклада – киральных магнитных структур стала скрученная лента из ван-дер-ваальсова магнетика: токоиндуцированная динамика доменных границ в такой ленте существенно отличалась для трех случаев: недеформированной ленты, ленты, скрученной по часовой стрелке и ленты, скрученной против часовой стрелки. Схожая идея геометрически заданного магнетизма звучала в пленарном докладе Мануэля Баскеса (M. Vázquez) из Института наук о материалах в Мадриде на примере эффектов кривизны в нанопроволоках. Хиральные эффекты в спинтронике будут наблюдаться и в недеформированных материалах при наличии магнитных спиралей в них. Этому был посвящен пленарный доклад акад. В.В. Устинова “*Toward*

helimagnet based spintronics”. Наряду с двумерными магнитными материалами, другой “горячей” темой является сверхбыстрый оптомагнетизм – ему был посвящен пленарный доклад

А.М. Калашниковой в первый день конференции “*Ultrafast opto-magnonics in the center and at the edge of the Brillouin zone*”.



Официальное открытие конференции 3 июля 2023
(главное здание Самаркандского государственного университета)

Торжественное открытие конференции с представителями руководства Университета и местных органов власти состоялось в понедельник, на второй день конференции. Впрочем, официальные лица быстро уступили место гостям конференции: Садамиши Маекава из Института физико-химических исследований Японии (RIKEN) рассказал о необычном гидродинамическом подходе к спинтронике “Hydrodynamic spintronics and current vortex”, доклад акад. Н.В. Мушникова был посвящен метамагнитным фазовым переходам в интерметаллидах. По темам остальных планарных докладов из стран дальнего зарубежья можно было судить о других актуальных направлениях в магнетизме: магنونике был посвящен доклад Сю Фен Ханя из Института физики Китайской АН, технологии синтеза и свойствам коллоидных магнитных наночастиц – доклад Клаудио Сангегорио из итальянского Института химии органометаллических соединений (CNR-ISSCOM).

Культурная программа конференции включала в себя экскурсии по городу, благо, что в Самарканде в пешей доступности были достопримечательности на любой вкус: великолепная площадь Регистан с ежедневными световыми шоу; для любителей древности – городище Афрасиаб, мавзолеи и некрополи; для тех, кто любит места поживее – сиябский базар; тем, кто не устал от науки на конференции – обсерватория Улугбека.



Презентации и экскурсии

Последний день конференции был отведен для поездки в другой древнейший культурный и торговый центр Среднего Востока – Бухару. Более подробную информацию можно найти на сайте <https://sism.samdu.uz>.

**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