

ISSN: 2782-5515



Перст

Информационный бюллетень

перспективные технологии
наноструктуры сверхпроводники фуллерены

Том 33, выпуск 1/2

январь/февраль 2026 г.



Черноголовка

Том 33, выпуск 1/2

январь/февраль 2026 г.

В этом выпуске:

МИКРОТЕХНОЛОГИИ

Структурированная поверхность помогает создавать вакуум

С развитием технологий трехмерной печати появилась возможность создавать структуры со сложной пространственной геометрией, применяемые в различных областях техники. Для многих технологических процессов необходим высокий вакуум, и задачи оптимизации вакуумной техники, увеличения ее эффективности, снижения стоимости и габаритов остаются актуальной на протяжении многих лет. Обычно эти цели пытаются достичь с помощью двухэтапной схемы создания вакуума: первый этап предполагает удаление газа механическим или турбомолекулярным насосом, а на втором этапе давление снижают с помощью “геттерных” (от английского “get” – “получать”) материалов, адсорбирующих остаточные газы. Оптимизация этого этапа сводится к подбору эффективных геттеров и контролю их состояния.

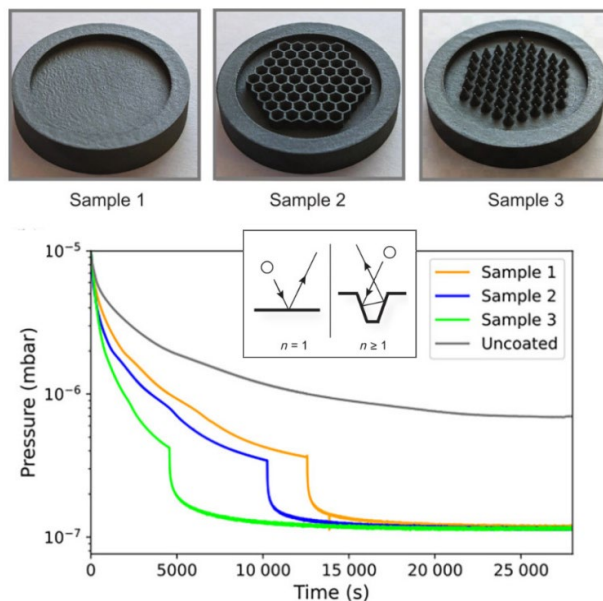


Рис.1. Исследуемые образцы и график снижения давления. На вставке: иллюстрация столкновения молекулы газа с плоской и структурированной поверхностью.

В недавней статье [1] исследователи из Univ. of Nottingham (Великобритания) и двух британских инженерных фирм предложили новую идею увеличения эффективности этого этапа: с помощью структурированных поверхностей, создаваемых посредством 3D печати и покрытых не испаряемыми геттерами. Такие покрытия широко применяют в ускорителях

И далее ...

СВЕРХПРОВОДНИКИ

3 Искусственный интеллект разбирается в беспорядке: новый метод изучения сверхпроводников

5 Пиннинг вихрей раскрывает майорановские секреты

ВАН-ДЕР-ВААЛЬСОВЫ МАТЕРИАЛЫ

5 Аксионные магнито-поляритоны в двумерных антиферромагнетиках

НАНОМАТЕРИАЛЫ

7 Нановолокна. Что нужно для масштабного производства и широкого применения

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

8 Золотая матрица наномира

10 На обратной стороне Луны обнаружены одностенные углеродные нанотрубки

НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ

11 Лазерное “пробуждение” серебряных подложек для сверхчувствительной сенсорики

КОНФЕРЕНЦИИ

12 XIV Научно-практический семинар “Актуальные проблемы физики конденсированных сред” и выездная сессия Научного Совета РАН по физике конденсированных сред (ФКС-2026), с 5 по 8 апреля 2026 г., Красноярск

частиц, вакуумных камерах, сенсорах, квантовых технологиях и других областях, где важно долгое время поддерживать чрезвычайно низкое давление. После активации поверхность геттера становится “активной” и способна эффективно поглощать газы, удерживая их внутри себя на длительное время. В данной работе использовали геттер на основе V-Zr-Ti, активирующийся при температуре 200 °С. Сама откачка газа происходила при комнатной температуре.

Авторы экспериментально исследовали процесс откачки газа с тремя видами поверхностей: плоской (образец 1, рис.1) и структурированной в виде “пчелиных сот” (образец 2) или конусов (образец 3). Период структуры выбрали порядка 2 мм. На графике (рис. 1) показан процесс откачки газа за счет поглощения на разных образцах. Видно, что на образцах 2 и 3 давление падает быстрее, чем на плоском образце 1, причем образец 3 более эффективно снижает давление, чем образец 2. Также проведено численное моделирование процесса поглощения газов с помощью метода Монте-Карло.

Увеличение эффективности откачки газов при использовании покрытий с неиспаряемыми геттерами на структурированных поверхностях происходит не только за счет увеличения площади поверхности, ключевую роль играет и форма микроструктуры: сложная геометрия приводит к тому, что молекулы газа сталкиваются с поверхностью многократно, прежде чем покинуть такую “ловушку” (вставка на рис. 1) Это многократное взаимодействие значительно увеличивает вероятность захвата молекулы, даже если сама вероятность захвата при одном столкновении невелика. Благодаря этому эффекту выигрыш в эффективности откачки может быть больше, чем просто увеличение площади поверхности: в экспериментах и моделировании показан рост эффективности почти в 4 раза при увеличении площади лишь в 2.3 раза.

Дальнейшие исследования процессов поглощения на различных структурированных поверхностях позволят достигать еще больших эффективностей откачки, а значит создавать более компактные устройства, использующие высокий вакуум.

3. Пятакова

1. N.Cooper et al., *Phys. Rev. Appl.* **25**, 014047 (2026).

ПерсТ, 2026, том 33, выпуск 1/2

СВЕРХПРОВОДНИКИ

Искусственный интеллект разбирается в беспорядке: новый метод изучения сверхпроводников

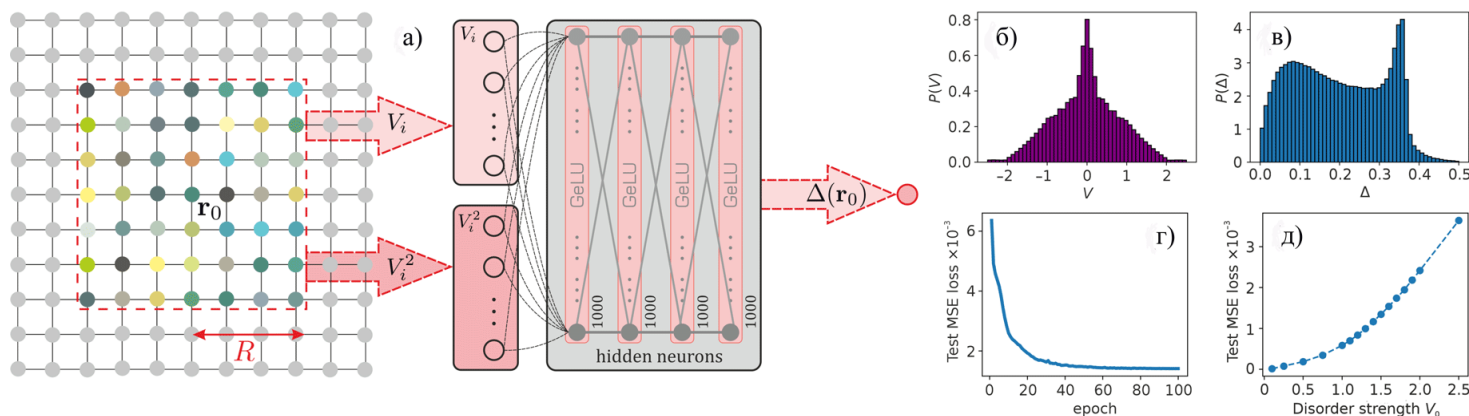
Решение уравнений Боголюбова-де Жена для описания сверхпроводящего состояния в сильно неупорядоченных системах является крайне ресурсоемкой задачей с вычислительной сложностью $O(N^6)$ для системы $N \times N$. Это существенно ограничивает возможность прямого численного моделирования, особенно в случае сильно неупорядоченных сверхпроводников, где пространственные флуктуации щели играют решающую роль в таких явлениях, как вызванное беспорядком усиление спаривания и переход сверхпроводник-изолятор. Группа российских исследователей МИФИ, МФТИ и ВШЭ предложила масштабируемый подход на основе машинного обучения, который позволяет предсказывать распределение сверхпроводящей щели в s -волновых сверхпроводниках непосредственно из локальной конфигурации беспорядка, радикально снижая вычислительную сложность до $O(N^2)$ [1].

Авторы разработали нейронную сеть, которая обучалась на самосогласованных решениях уравнений Боголюбова-де Жена для двумерных квадратных решеток размерностью 24×24 . В качестве модельной системы использовали модель Хаббарда с притяжением, описывающую сверхпроводящее состояние в дискретных системах. Исследователи рассматривали различные степени беспорядка, задаваемые потенциалом беспорядка V_i на каждом узле решетки, который выбирали из равномерного распределения в интервале от $-V_0$ до V_0 , где V_0 определяет силу беспорядка. Для проведения расчетов исследователи фиксировали фактор заполнения (число электронов на узел) и константу взаимодействия таким образом, чтобы обеспечить выполнение условия для средней щели $\frac{\bar{\Delta}}{E_F} \simeq 0.1 \ll 1$. При этом длина когерентности оказывается относительно малой ($\xi \approx 3$). Архитектура нейронной сети (см. рис.) состоит из четырех полносвязных скрытых слоев, каждый из которых содержит 1000 нейронов с функцией активации GeLU. Общее количество обучаемых параметров превысило один миллион. Входные данные представляют собой величины потенциала беспорядка и квадраты этих величин для каждого узла в области размером $2R \times 2R$ с центром в точке \mathbf{r}_0 , где R выбирается

равным длине когерентности. Результатом работы сети является величина сверхпроводящей щели Δ в точке \mathbf{r}_0 . Обучающий набор данных был сгенерирован из 100 реализаций потенциала беспорядка с различными значениями V_0 в диапазоне от 0 до 2.5, что в совокупности дало около 10^7 независимых образцов благодаря использованию симметрий решетки.

Авторы продемонстрировали, что обученная нейронная сеть с высокой точностью воспроизводит пространственные профили сверхпроводящей щели, полученные из уравнений Боголюбова-де Жена, для всех рассмотренных режимов беспорядка – от слабого ($V_0 = 0.25$) до сильного ($V_0 = 2.5$). При слабом беспорядке ошибка предсказания минимальна, а с увеличением силы беспорядка точность несколько снижается. Тем не менее, нейросеть корректно воспроизводит среднюю щель для всех значений V_0 . Это подтверждается симметричностью распределений ошибок и практически точным совпадением предсказанных нейросетью средних величин с результатами прямых расчетов. Ключевым преимуществом предложенного подхода является возможность применения обученной нейронной сети к системам существенно большего размера, чем те, что

использовались для обучения. Исследователи продемонстрировали это, применив нейросеть, обученную на решетке 24×24 , к системе размером 40×40 . Нейросеть дала высокоточные предсказания со среднеквадратичной ошибкой порядка 10^{-3} , сопоставимой с той, что наблюдается для систем меньшего размера. При этом время вычислений возросло практически линейно с общим числом узлов решетки $O(N^2)$, в то время как решение уравнений Боголюбова-де Жена потребовало бы $O(N^6)$. Эффективность метода особенно ярко проявилась при изучении перехода сверхпроводник-изолятор при сильном беспорядке. Авторы использовали перколяционный подход, при котором систему рассматривают как совокупность сверхпроводящих и несверхпроводящих кластеров, характеризующихся ненулевой и “исчезающей” (нулевой) щелью, соответственно. Перколяционный кроссовер можно количественно описать с помощью вероятности P обнаружения сверхпроводящего кластера, охватывающего систему и соединяющего противоположные границы. Эта вероятность монотонно убывает с увеличением беспорядка силы V_0 , от $P = 1$ при слабом беспорядке до $P = 0$ при сильном беспорядке.



Архитектура нейронной сети и процедура обучения: для каждого узла \mathbf{r}_0 входные данные состоят из величин потенциала беспорядка V_i и квадратов этих величин V_i^2 в области размером $2R \times 2R$ с центром в \mathbf{r}_0 ; результатом работы сети является локальная сверхпроводящая щель Δ в точке \mathbf{r}_0 , ее истинная величина рассчитывается из уравнений Боголюбова-де Жена (а); статистические характеристики набора данных: гистограмма распределения потенциала беспорядка (б) и параметра сверхпроводящего порядка (в) во всех пространственных точках. Здесь $P(V)$ и $P(\Delta)$ обозначают плотность вероятности потенциала беспорядка V и параметра порядка Δ , встречающихся во всем обучающем наборе данных, соответственно. Эффективность обучения нейронной сети: среднеквадратичная ошибка (MSE) как функция числа эпох (г) и силы беспорядка V_0 (д) после одинакового числа эпох $N_e = 100$.

Благодаря низкой вычислительной сложности, нейросеть позволила исследователям рассчитать $P(V_0)$ для системы размером 100×100 , что совершенно недоступно для прямого решения

уравнений Боголюбова-де Жена. Результаты показали, что с увеличением размера системы зависимость $P(V_0)$ приближается к ступенчатой функции, что свидетельствует о формировании

резкого перехода сверхпроводник-изолятор в термодинамическом пределе. В итоге авторы пришли к выводу, что машинное обучение предоставляет мощный инструмент для микроскопического описания неупорядоченных s -волновых сверхпроводников, открывая возможности для систематического исследования крупномасштабных систем и предлагая универсальный подход к изучению квантовых явлений в более сложных сверхпроводящих материалах с различными механизмами спаривания, для которых необходимо учитывать комплекснозначную природу параметра порядка.

М. Маслов

I. V.D.Neverov et al., Phys. Rev. B 113, 024515 (2026).

Пиннинг вихрей раскрывает майорановские секреты

Майорановские нулевые моды (MZM), локализованные в сердцевинах (корах) вихрей топологических сверхпроводников, уже долгое время рассматривают как перспективные объекты для организации отказоустойчивых квантовых вычислений. Однако их однозначная экспериментальная идентификация затруднена из-за крайне малого энергетического зазора, отделяющего их от обычных состояний Кароли-де Жена-Матрикона (CdGM). И вот совсем недавно исследователи из ВШЭ, МИФИ, МФТИ и Sorbonne Univ. (Франция) [1] на основании численных расчетов с использованием микроскопического подхода Боголюбова-де Жена (BdG) сообщили о неожиданном способе улучшить наблюдаемость этих мод с помощью введения немагнитных примесей. Полученные результаты достаточно любопытны, поскольку опровергают интуитивное представление о том, что любой беспорядок лишь “размывает” спектр и мешает измерениям. Все расчеты авторы выполняли для гибридной системы, состоящей из s -волнового сверхпроводника, полупроводника с рашбовским спин-орбитальным взаимодействием и ферромагнитного изолятора, решая уравнения BdG для определения пространственной структуры параметра порядка и локальной плотности состояний. Исследователи уточняют, что наличие потенциала примеси в центре вихря (центра пиннинга) приводит к сдвигу энергий тривиальных состояний CdGM, в то время как сама майорановская мода – топологическое состояние – остается “привязанной” к нулевой энер-

гии. Сначала авторы рассмотрели “чистую” систему и подтвердили, что без примесей пик MZM практически неотличим от соседних возбуждений из-за малого отношения сверхпроводящей щели к энергии Ферми. Введение же примеси работает как энергетический фильтр: оно существенно увеличивает энергетическую щель между MZM и ближайшими возбужденными состояниями, изолируя полезный сигнал. Об устойчивости эффекта свидетельствуют расчеты для различных параметров потенциала примеси: при увеличении силы потенциала “обычные” уровни монотонно удаляются от центра запрещенной зоны, оставляя MZM в гордом одиночестве. В результате авторам удалось продемонстрировать, что контролируемое создание дефектов представляет собой эффективную альтернативу поиску экзотических материалов с гигантской сверхпроводящей щелью. К слову, немагнитная природа примесей здесь играет ключевую роль, поскольку магнитные примеси подавляют сверхпроводящую щель и искажают сигнал, затрудняя идентификацию MZM.

В конечном итоге исследователи полагают, что преднамеренное включение центров пиннинга в архитектуру образцов, то есть использование “грязных” в определенном смысле систем, существенно упростит экспериментальное обнаружение майорановских мод и может стать ключом к практической реализации топологических квантовых вычислений.

М. Маслов

I. V.D.Neverov et al., Research 9, 1087 (2026).

ВАН-ДЕР-ВААЛЬСОВЫ МАТЕРИАЛЫ

Аксионные магнон-поляритоны в двумерных антиферромагнетиках

“Квазичастица становится привычным словом... без него не обходятся даже авторы газетных статей...”, – так начинается одна из брошюр общества “Знание” 1973 года [1]. Не стоит удивляться, что в наше время квазичастицы уже фигурируют в названиях целых разделов электроники, примером чему служит *плазмоника* – она использует элементарные возбуждения гибридного типа – поверхностные плазмон-поляритоны, в которых колебания электромагнитного поля на границе раздела диэлектрика с металлом связаны с колебаниями электронной плотности в металле. Список гибридных квазичастиц постоянно пополняется: так, относительно недавно были обнаружены элек-

тромагноны, связывающие полярные моды и спиновые волны в кристалле мультиферроика [2].

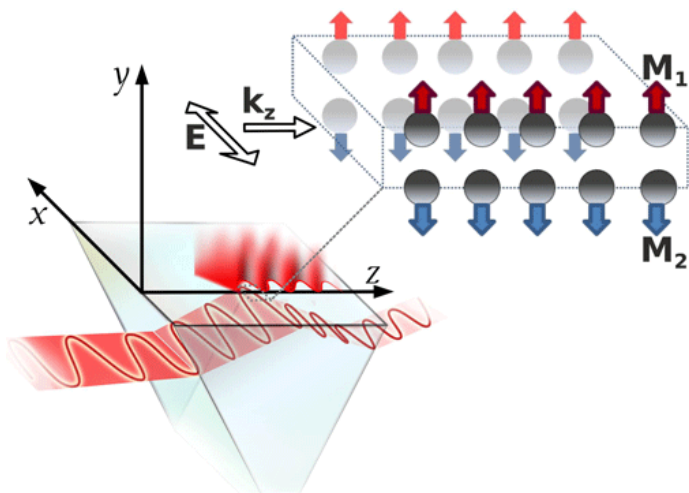


Рис. 1. Схематическое изображение аксионных магнон-поляритонов, возникающих при падении s-поляризованной электромагнитной волны на поверхность двумерного антиферромагнетика (E – электрическое поле электромагнитной волны, k_z – проекция волнового вектора на плоскость двумерного антиферромагнетика, M_1 и M_2 – намагниченности слоев двумерного антиферромагнетика).

В работе российских исследователей [3] предсказано существование еще одного типа гибридных возбуждений, возникающих на поверхности двумерных антиферромагнетиков – аксионных магнон-поляритонов. По аналогии с поверхностными плазмон-поляритонами они представляют собой составные квазичастицы, возникающие при взаимодействии фотона с элементарными возбуждениями среды, роль которых играют в данном случае уже не плазмоны, а магноны. Подобно электромагнотонам, в их образовании участвует магнитоэлектрическое взаимодействие, но природа его иная, чем в мультиферроиках, о чем и говорит прилагательное “аксионный”. Таким термином, заимствованным из теории поля, называют линейную связь между магнитной индукцией и напряженностью электрического поля, что привносит “аксионную” специфику в электродинамику сред, в которых такая связь наблюдается. К этим средам, наряду с топологическими изоляторами, относятся и материалы с линейным магнитоэлектрическим эффектом (которые часто ошибочно приписывают к мультиферроикам). С появлением ван-дер-ваальсовых магнетиков, в которых молекулярные слои слабо связаны между собой и легко отделяются в виде ультратонких пленок, интерес к новым

разновидностям поверхностных элементарных возбуждений только возрастает.

В качестве объекта рассмотрения авторами [3] выбран двойной молекулярный слой триоксида хрома CrI_3 – двумерного антиферромагнетика, служащего модельным объектом при рассмотрении эффектов в ван-дер-ваальсовых магнитных материалах, благодаря относительно простой кристаллической структуре и разнообразным свойствам, среди которых примечательно и магнитоэлектрическое взаимодействие, в 30 раз превышающее линейный магнитоэлектрический эффект в референтном магнитоэлектрике Cr_2O_3 . Благодаря такой связи магнитного параметра порядка и электрического поля на дисперсионной зависимости для магнонов возникает запрещенная зона, отделяющая частоту магнитного резонанса от нижней частоты аксионных магнон-поляритонов (рис. 2).

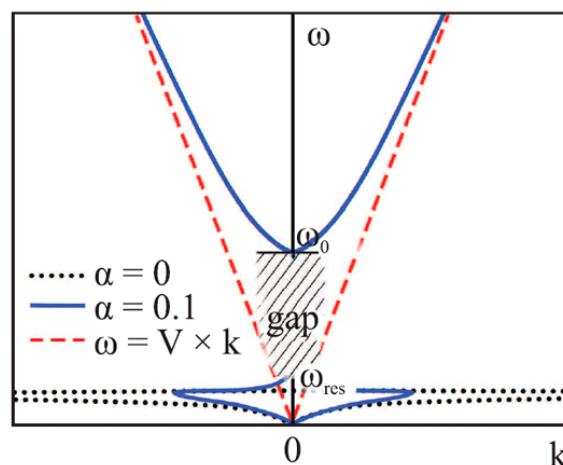


Рис. 2. Дисперсионные зависимости для связанных колебаний спиновых и электромагнитных волн в двумерном антиферромагнетике CrI_3 . Gap – запрещенная зона для магнон-поляритонов, альфой обозначается параметр затухания Гильберта. Штриховой красной линией показана фотонная мода при скользющем падении электромагнитной волны [3].

При этом, чем больше магнитоэлектрическое взаимодействие, тем круче идут ветви высокочастотных мод и тем легче квазичастицы. Оценка, приведенная в [3] дает величину эффективной массы аксионных магнон-поляритонов в 10^{-7} массы электрона.

А. Пятаков

1. М.И.Каганов, *Магноны и плазмоны*, “Знание”. 1/1973 Серия Физика. Москва 1973
2. А.Pimenov et al., *Nature Phys.* 2, 97 (2006) (см. также *ПерсТ* 18, вып. 22, с. 2 (2011)).
3. А.К.Звездин и др., *Письма в ЖЭТФ*, 123, 113 (2026).

НАНОМАТЕРИАЛЫ

Нановолокна. Что нужно для масштабного производства и широкого применения

Многочисленные научные исследования продемонстрировали, что наноматериалы (нанопорошки, нанотрубки, нановолокна и др.) могут быть эффективно использованы в энергетике, электронике, химической технологии, биомедицине и других областях. Однако необходимо признать, что лишь малую часть изученных наноматериалов стали производить в промышленных масштабах. Исследователи из Univ. of Pardubice и Brno Univ. of Technology (Чехия) сфокусировали внимание на полимерных и неорганических нановолокнах и проанализировали, что требуется для их превращения в реальный продукт [1]. Авторы выделяют три необходимые условия. Первое – обеспечение воспроизводимости наноматериалов при масштабном производстве. Второе – стоимость нового продукта должна быть заметно ниже стоимости традиционного или, при сравнимой стоимости, новый продукт должен иметь улучшенные характеристики. Третье – высокая стабильность нового материала и увеличение срока работы.

Нановолокна могут удовлетворить этим трем условиям. Существующие технологии синтеза, электропрядение и центрифугальное прядение (рис. 1), позволяют в промышленных масштабах производить нановолокна хорошего качества с контролируемым диаметром.

Электропрядение (рис. 1а) подходит практически для всех полимеров, растворимых в органических растворителях и воде. Диаметр синтезированных нановолокон очень маленький, от 10 до 500 нм. Недостатки – высокая стоимость (которая, в основном, определяется стоимостью растворителя и сырья) и проблемы безопасности (использование высоковольтных источников питания, токсичность и пожароопасность растворителя). Для центрифугального прядения (рис. 1б) используют центрифуги с прядильными отверстиями. Производительность при оптимизации конструкции очень высокая, стоимость низкая (зависит от стоимости полимерного сырья), производство безопасное, но волокна более крупные, типичный диаметр нановолокон от 200 до 5000 нм.

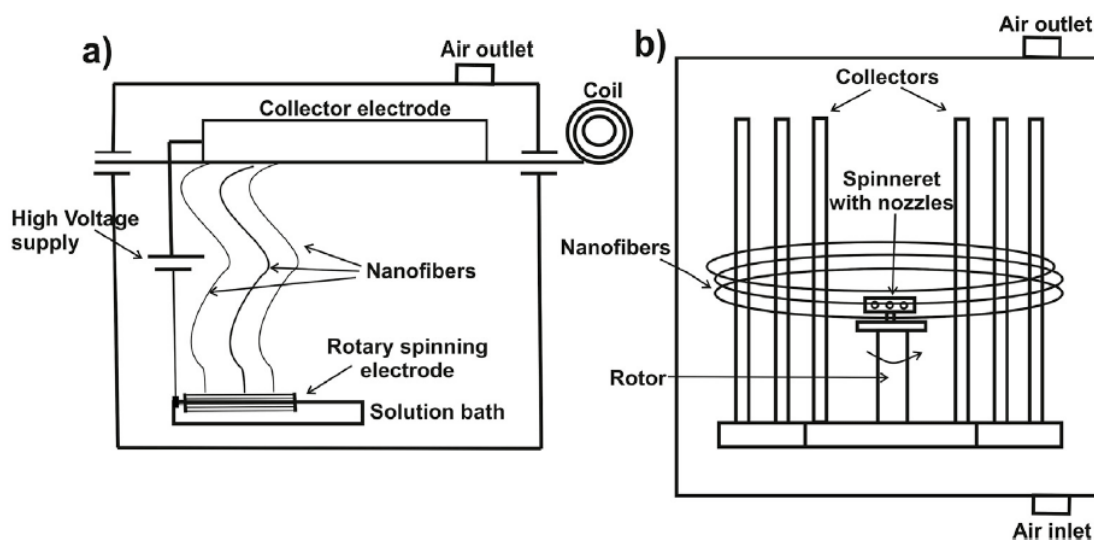


Рис. 1. Схемы синтеза нановолокон: а – электропрядение и б – центрифугальное прядение

На рис. 2 приведены примеры полимерных и неорганических нановолокон, полученных методами центрифугального прядения и электропрядения.

Для неорганических нановолокон, эффективных и подчас уникальных в некоторых областях, например, в катализе, основные затраты связаны с преобразованием прекурсора в полностью неорганические волокна. Высокая стоимость пока ограничивает масштабное производство.

Требования к стабильности зависят от области применения. В ряде случаев, например, в биомедицине при заживлении ран или в косметике, биополимерные нановолокна как раз должны деградировать, а не накапливаться в организме. Проблему стабильности при использовании нановолокон для длительной фильтрации решают путем модифицирования поверхности, например, с помощью нанесения нанопокровов, плазменной обработки.

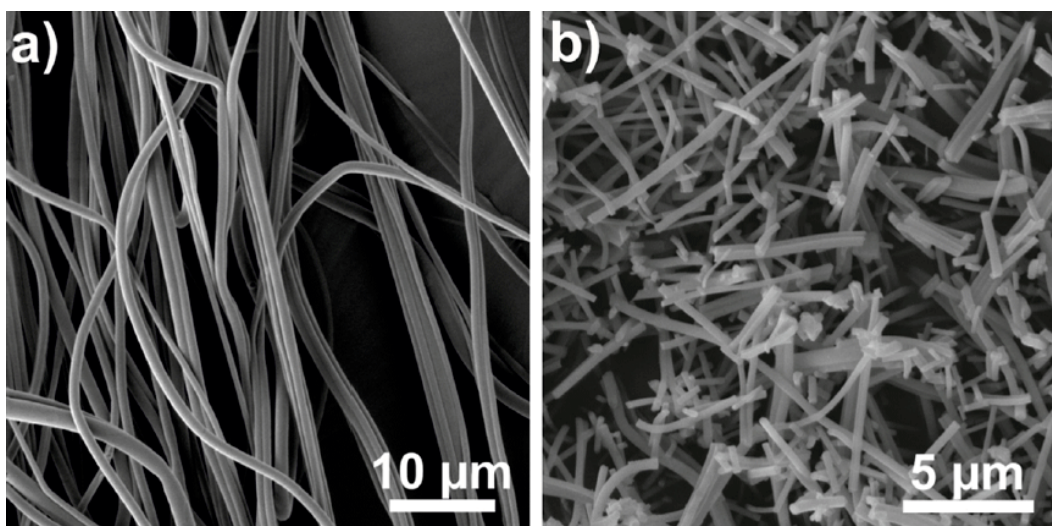


Рис. 2. SEM изображения (а) полимерных нановолокон (диаметр 9252 нм), полученных центрифугальным прядением и (б) неорганических TiO_2 нановолокон (диаметр 292 нм), полученных электропрядением.

Заметим, что уровень технологии уже позволяет выпускать опытно-промышленные партии нановолокон для использования в области фильтрации и косметики. К сектору фильтрации относятся фильтрация жидкости (воды, сточных вод), воздуха (включая фильтры чистых комнат, средства индивидуальной защиты). В косметике полимерные нановолокна используют для приготовления косметических масок с антибактериальной активностью [2].

Анализ авторов [1] показывает, что для масштабного производства и широкого применения нановолокон ученым и технологам предстоит вместе преодолеть ряд препятствий. Необходимо повысить общую производительность процессов получения нановолокон, провести оптимизацию систем полимер/растворитель, разработать способы модификации синтезированных нановолокон для расширения областей применения.

О. Алексеева

1. *L.Hromadko et al., Front. Nanotechnol. 7, 1706183 (2025).*
2. *M.Rihova et al., J. Control. Release 383, 113777 (2025).*

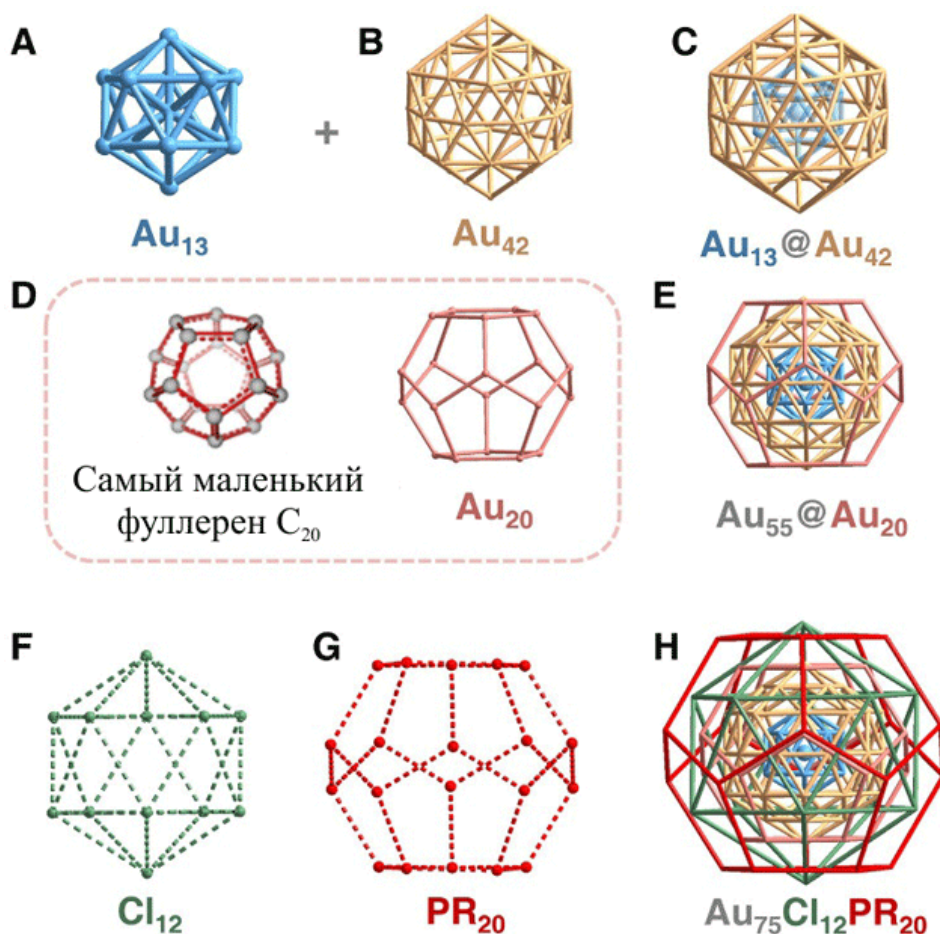
ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

Золотая матрешка наномира

В 1981 году был впервые синтезирован фосфин-стабилизированный золотой нанокластер $\text{Au}_{55}(\text{PPh}_3)_{12}\text{Cl}_6$, названный “золотом Шмида”, который привлек пристальное внимание исследователей благодаря своим уникальным электронным характеристикам и перспективным применениям в нанoeлектронике и биологии, что привело даже к созданию коммерческих продуктов для биовизуализации. Кластер Шмида стал своеобразной моделью для изучения перехода от свойств отдельных атомов к характеристикам объемного металла. Кроме того, наносистемы такого типа проявляют необычные каталитические свойства, отличающиеся от объемного золота, которое химически инертно. Однако, несмотря на комплексное применение широкого арсенала экспериментальных и теоретико-расчетных подходов, включая порошковую рентгеновскую дифракцию, просвечивающую электронную микроскопию высокого разрешения, рентгеновское рассеяние, аналитическое ультрацентрифугирование и прецизионное компьютерное моделирование, точная атомная структура этого загадочного объекта оставалась неустановленной более сорока лет. В результате предлагались различные структурные формы, включая кубооктаэдр, икосаэдр, гибриды икосаэдра и кубооктаэдра, и даже аморфная структура. И вот совсем недавно международная группа исследователей из Финляндии и Китая сообщила о прорыве в этой области [1].

Применив стратегию фторирования для стабилизации фосфиновых лигандов, авторам удалось синтезировать и закристаллизовать крупнейший на сегодняшний день золотосодержащий кластер вида $\text{Au}_{75}(\text{P}(\text{C}_6\text{H}_4-4-\text{CF}_3)_3)_{20}\text{Cl}_{12}$.

Структура полученной системы оказалась весьма примечательной: подобно русской матрешке, она образована последовательными оболочками $\text{Au}_{13}@\text{Au}_{42}@\text{Au}_{20}@\text{Cl}_{12}@\text{(PR)}_{20}$ (см. рис.).



Анатомия кластера Au_{75} . Первая оболочка (обозначена синим): икосаэдр Маккея Au_{13} (A). Вторая оболочка (обозначена желтым): икосаэдр Маккея Au_{42} (B). Ядро Au_{55} (C). Третья оболочка (обозначена розовым): оболочка Au_{20} с фуллереноподобной структурой C_{20} (D). Атомная структура нанокластера Au_{75} (E). Четвертая оболочка (обозначена зеленым): икосаэдрическая оболочка Cl_{12} (F). Пятая оболочка (обозначена красным): оболочка $(\text{PR})_{20}$ с фуллереноподобной конфигурацией C_{20} (G). “Матрешечная” конфигурация нанокластера Au_{75} (H).

Первые две оболочки формируют ядро Au_{55} , соответствующее “золоту Шмида”, а третья оболочка Au_{20} демонстрирует топологию, напоминающую наименьший фуллерен C_{20} . Именно поэтому авторы назвали полученную наносистему “золотым фуллереном, инкапсулирующим золото Шмида”. Анализ методом теории функционала плотности, выполненный с использованием программного пакета GPAW, подтвердил суператомный характер электронной структуры фторированного кластера Au_{75} и стабилизирующую роль фуллереноподобной клетки. Молекулярно-динамическое моделирование, проведенное в пакете GROMACS, продолжительностью до трех микросекунд также

продemonстрировало, что фторирование существенно повышает устойчивость лигандной оболочки. Фемтосекундная спектроскопия переходного поглощения выявила необычную динамику возбужденных состояний кластера Au_{75} : двухфазную кинетику релаксации с временами 2.67 и 7.33 пс, что резко контрастирует с наносекундными временами жизни в малых молекулярных кластерах, таких как Au_{11} и Au_{25} . Авторы объясняют эту уникальную динамику возбужденных состояний архитектурой “русской матрешки”, где сильная электронная связь на интерфейсе ядро Au_{55} /квазифуллерен Au_{20} создает эффективные каналы релаксации, в то время как искривленная фуллереновая то-

пология накладывает геометрические ограничения, подавляющие делокализацию электронов. В конечном итоге исследователи полагают, что успешный синтез Au₇₅ открывает новую эру в химии больших фосфиновых нанокластеров золота. Использование фторированных лигандов не только решило давнюю проблему кристаллизации и прояснило структуру “золота Шмида”, но и раскрыло потенциал фторхимии для стабилизации крупных металлических нанокластеров с уникальными оптическими и электронными свойствами, открывая новые возможности для их применения в катализе и биологических приложениях.

М. Маслов

I. P. Pan et al., J. Am. Chem. Soc. 148, 4579 (2026).

На обратной стороне Луны обнаружены одностенные углеродные нанотрубки

Китайские ученые продолжают внимательно изучать лунный грунт. Перст уже рассказывал, что в образцах, доставленных с видимой стороны Луны автоматической лунной станцией “Чанъэ-5” (*Чанъэ – китайская богиня Луны*), был обнаружен графен [1]. Исследователи предположили, что он образовался в высокотемпературных процессах при каталитическом действии железосодержащих минералов. Недавно опубликованы новые результаты [2]. Автоматическая лунная станция “Чанъэ-6” впервые доставила грунт с обратной стороны Луны (примерно 1900 г)! Его изучение с помощью различных методов микроскопии (включая просвечивающую электронную микроскопию высокого разрешения) и спектроскопии привело к обнаружению углеродных нанотрубок (рис. 1).

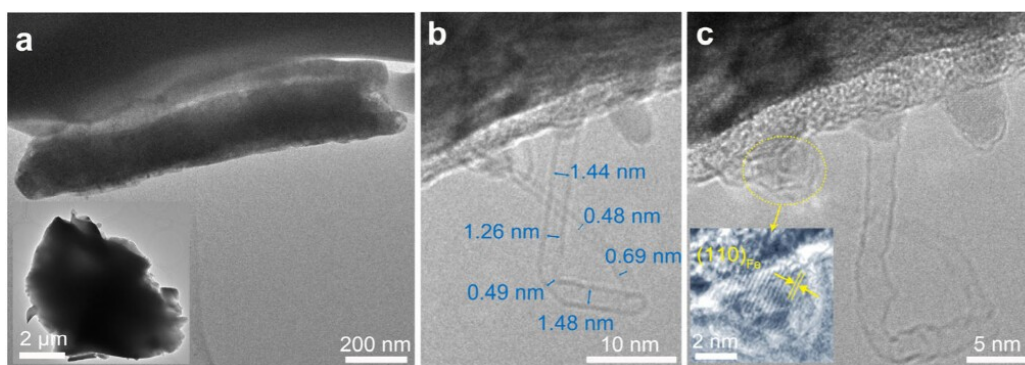


Рис. 1. Углеродные нанотрубки (включая одностенные) в образцах лунного грунта: **a** - ТЕМ изображение микрочастицы грунта, на которой обнаружены нанотрубки; **b**, **c** - HRTEM изображения нанотрубок. На врезке (**c**) показана наночастица Fe на кончике узкой нанотрубки.

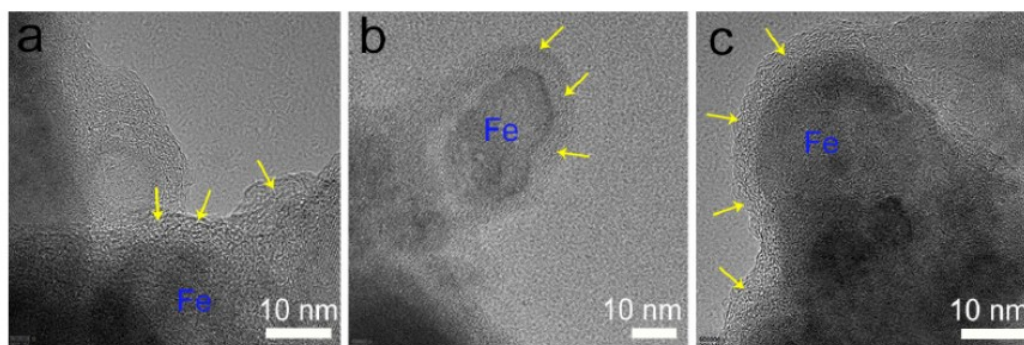


Рис. 2 HRTEM изображения графитового углерода

Измерения показали, что внутренний диаметр нанотрубок меньше 1.5 нм (рис. 1b). Размер самой узкой части равен 0.48 нм, что близко к 0.40 нм, теоретически предельному размеру одностенной нанотрубки. По-видимому, из-за ударов микрометеоритов некоторые из нано-

трубок изогнуты. Нанотрубки довольно короткие (5-30 нм), т.к. растут в пространстве, ограниченном скоплением минералов. У основания нанотрубки обнаружены частицы Fe (рис. 1с, врезка), что подтверждает выводы о формировании под действием катализатора.

Результаты продемонстрировали, что существуют природные одностенные углеродные нанотрубки. И они в лунном грунте!

Кроме того, ученые идентифицировали в образцах с обратной стороны Луны графитовый углерод в оболочках микрочастиц, содержащих Fe (рис. 2).

Образование нанотрубок и графитового углерода так же, как и графена, происходило при каталитическом действии железа в экстремальных условиях, связанных с ранней вулканической активностью на поверхности Луны, бомбардировкой микрометеоритами, воздействием солнечного ветра. На иллюстрации китайских исследователей [2] схематически представлено образование одностенных нанотрубок на Луне (рис. 3).

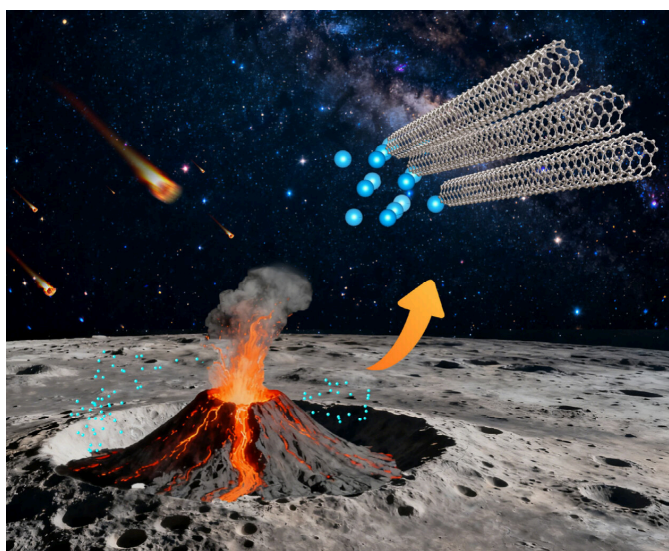


Рис. 3 Схема образования углеродных нанотрубок на Луне

Интересно, что грунт с обратной стороны Луны содержит больше дефектов, что, по-видимому, связано с более интенсивным воздействием микрометеоритов. Данные авторов [2] показали, что обратная сторона Луны геологически более активная, чем видимая сторона, что важно для изучения геохронологии.

Исследователи считают, что их открытия могут привести к смене парадигмы, к фундаментальным изменениям в углеродной науке. Конечно, понимание того, как возникли графен и одностенные нанотрубки в экстремальных лунных условиях, также поможет найти новые подходы к разработке и синтезу перспективных наноматериалов на Земле.

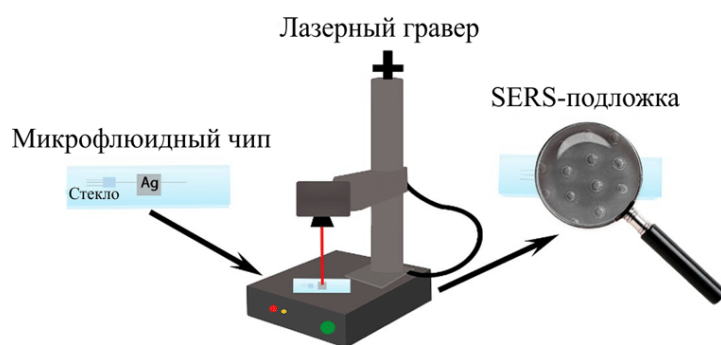
О. Алексеева

1. [ПерсТ31, вып. 9 с.3 \(2024\).](#)
2. W.Zhang et al., *Nano Lett.* **26**, 917 (2026).

НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ

Лазерное “пробуждение” серебряных подложек для сверхчувствительной сенсорики

Поверхностно-усиленная рамановская спектроскопия (SERS) в последние годы зарекомендовала себя как высокочувствительный метод, находящий применение в биомедицине, контроле безопасности пищевых продуктов и экологическом мониторинге. Однако практическое использование SERS-систем, особенно на основе серебряных подложек, существенно ограничено их временной нестабильностью, вызванной загрязнением и окислением поверхности. И вот совсем недавно исследователи из России [1] предложили оригинальный метод изготовления и концепцию работы SERS-подложек, которые активируются непосредственно перед экспериментом, что открывает дополнительные возможности их интеграции в автоматизированные микрофлюидные системы. Суть предложенного подхода заключается в следующем (см. рис.): на стеклянную подложку, служащую основой спектральной регистрационной камеры микрофлюидного чипа, наносят сплошной плоский слой серебра толщиной около 200 нм.



Схематическое изображение активации SERS-подложки лазером.

Такая подложка может храниться длительное время без потери функциональности. Непосредственно перед использованием с помощью лазерного гравёра в серебряном слое создается упорядоченный массив SERS-активных точек. Лазерная гравировка частично разрушает сплошной слой серебра, создавая плазмонную структуру, состоящую из наноразмерных металлических зерен. Авторы детально исследовали морфологию полученных структур методами атомно-силовой микроскопии (АСМ), Кельвин-зондовой силовой микроскопии (КЗСМ) и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Оказалось, что в зависимости от режима гравировки формируются два различ-

ных типа плазмонных наноструктур: агломераты наночастиц на стекле (тип I, при высокой мощности лазера) и наночастицы на металлическом слое (тип II, при меньшей мощности). Для описания усиления локального электрического поля в таких структурах исследователи применили теоретическую модель Сарычева, разработанную для перколяционных материалов. Расчеты показали, что наноструктуры типа I обеспечивают в среднем на порядок большее усиление поля по сравнению с типом II, что хорошо согласуется с экспериментальными данными. Чувствительность изготовленных подложек авторы оценивали с помощью конфокальной рамановской микроспектроскопии, используя в качестве модельного анализа фенилаланин. Было установлено, что SERS-активные точки типа II демонстрируют более однородное и гомогенное распространение плазмонных наноструктур, что делает их предпочтительными для практического применения. Предел обнаружения для таких систем составил примерно 0.15 мкМ по концентрации фенилаланина, что достаточно для анализа следовых количеств веществ. Эффективность разработанных SERS-подложек была продемонстрирована на примере детектирования внеклеточных везикул, выделенных из клеточной линии HEK293T. Для однозначной идентификации отдельных везикул на фоне плазмонных наночастиц исследователи разработали метод совместного использования АСМ и КЗСМ, позволяющий различать объекты по их электрическим свойствам. Прецизионное совмещение конфокального микроспектрометра и зонда сканирующего зондового микроскопа позволило получить SERS-спектры достоверно идентифицированных отдельных везикул и провести их компонентный анализ. Важным преимуществом предложенных подложек является простота их интеграции как в микрофлюидные чипы, изготовленные фотолитографическими методами, так и в одноразовые картриджные системы, развитие которых в последние годы идет особенно активно. При этом упорядоченное расположение SERS-активных точек с четко определенными координатами открывает возможность автоматизированного сбора спектров, что повышает статистическую достоверность и надежность получаемых данных. Сочетание высокочувствительного SERS-детектирования биомолекул, простоты изготовления подложек и современных достижений в технологиях lab-on-a-chip открывает широкие

возможности для внедрения предложенных SERS-подложек в разработку автоматизированных диагностических систем нового поколения.

М. Маслов

I. M.S.Shestopalova et al., ACS Sensors 11, 589 (2026).

КОНФЕРЕНЦИИ

XIV Научно-практический семинар “Актуальные проблемы физики конденсированных сред” и выездная сессия Научного Совета РАН по физике конденсированных сред (ФКС-2026), с 5 по 8 апреля 2026 года, Красноярск

Мероприятие пройдет в Институте физики им. Л.В. Киренского СО РАН ФИЦ КНЦ СО РАН одновременно с Научными чтениями памяти Леонида Васильевича Киренского.

В рамках сессии предполагаются как устные, так и стендовые доклады. По материалам мероприятия будет опубликован в электронном виде сборник тезисов с присвоением DOI. К началу конференции авторы-участники сессии могут подготовить статьи для публикации в рецензируемом журнале “Поверхность”, входящем в российские и международные системы цитирования.

Правила оформления статей размещены на сайте: <http://www.issp.ac.ru/journal/surface/>.

Статьи и сопроводительные документы надо посылать ученому секретарю Совета по ФКС Б.Б. Страумалу straumal@issp.ac.ru

XXIII Конференция “Сильно коррелированные электронные системы и квантовые критические явления”, 21 мая 2026 года в ФИАН (Ленинский пр. 53, Москва)

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.

Важные даты

12 января, 2026 - Начало регистрации, подачи тезисов и оплаты оргвзноса

3 апреля, 2026 - Окончание приема тезисов докладов

22 апреля, 2026 - Окончание регистрации

Информация о конференции размещена на сайте конференции.

Сайт <https://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