

ISSN: 2782-5515



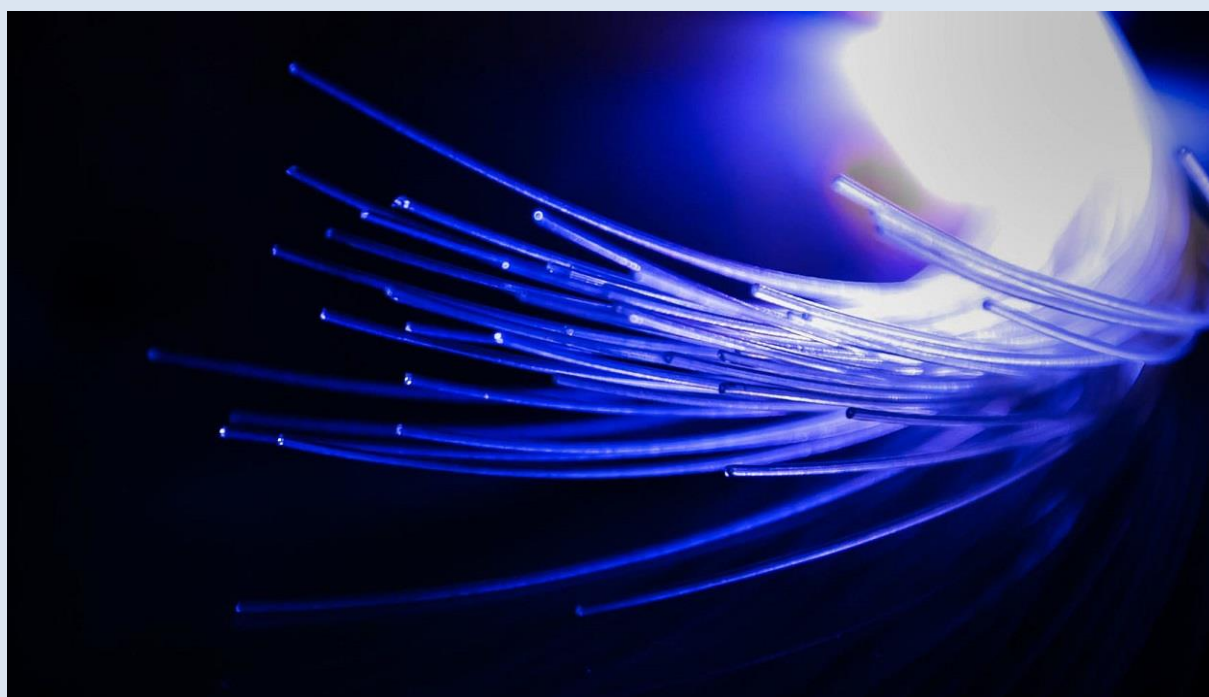
# Перст

Информационный бюллетень

перспективные технологии  
наноструктуры сверхпроводники фуллерены

Том 32, выпуск 9

сентябрь 2025 г.



Фотоника/<https://m-gen.ru/raznoe-2/fotonika-cto-eto-cto-takoe-fotonika-fakultet-fotoniki-i-optoinformatiki-universitet-itmo.html>

Черноголовка

В этом выпуске:

## НАНОМАТЕРИАЛЫ

### *Медицинский клей на основе нановолокон хитозана*

Природный полисахарид хитин содержится в панцирях морских крабов, креветок, в кутикулах насекомых, клеточных стенках грибов. Биосовместимые и биоразлагаемые нанокompозиты на основе хитина и его производного хитозана используют для регенеративной медицины и тканевой инженерии [1,2]. Молекула хитозана содержит много функциональных групп, которые обуславливают его уникальные свойства – сорбционные, антиоксидантные, радиопротекторные. В России активно проводят исследования хитина и хитозана. Летом 2025 года в Нижнем Новгороде прошла XVII Международная конференция “Современные перспективы в исследовании хитина и хитозана”, на которой обсуждали наиболее перспективные направления фундаментальных и практических исследований хитозана. Большое внимание было уделено медико-биологическим исследованиям. В последние годы особый интерес вызывает получение и использование нановолокон хитозана, в том числе в медицине – например, в России разработаны ранозаживляющие повязки на основе этих нановолокон, они есть в аптеках.

Недавно исследователи из Univ. of Colorado Boulder (США) и McGill Univ. (Канада) [3] предложили методику существенного улучшения свойств биоадгезивов с помощью нановолокон хитозана. Биоадгезивы (материалы, способные приклеиваться к биологической ткани) нужны не только для заживления ран, но и для восстановления тканей, биомедицинских имплантатов, доставки лекарств. Обычно они состоят из полимеров (гидрогелей), часто с добавлением наноматериалов. Несмотря на сильную адгезию, предел выносливости поверхности раздела ткани и биоадгезива невысок, и циклическая нагрузка приводит к возникновению трещин. Добавление наночастиц в некоторых случаях улучшает лечебный эффект биоадгезива, но, к сожалению, адгезия наночастиц к ткани гораздо ниже, чем адгезия полимерного компонента. Как показали исследования авторов [3], нановолокна хитозана способны образовать прочные связи и с тканью, и с гидрогелем, и между собой. Размеры нановолокон обычно 150-200 нм в длину и 5-10 нм в ширину. Поскольку нановолокна сами по себе не способны проникать глубоко в ткань, исследователи разработали три способа их внедрения – использование химического усилителя, микроигл и ультразвука (рис. 1).

И далее ...

- 4      Лепестковый графин для аккумуляторных батарей

## ФОТОНИКА

- 5      Эффект Эйнштейна–де Гааза в наноалмазе

## МУЛЬТИФЕРРОИКИ

- 6      Мультиферроики третьего типа: сегнетоэлектрическое упорядочение порождает магнитное

## ФУЛЛУРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

- 7      Спорткары на фуллереновых шасси

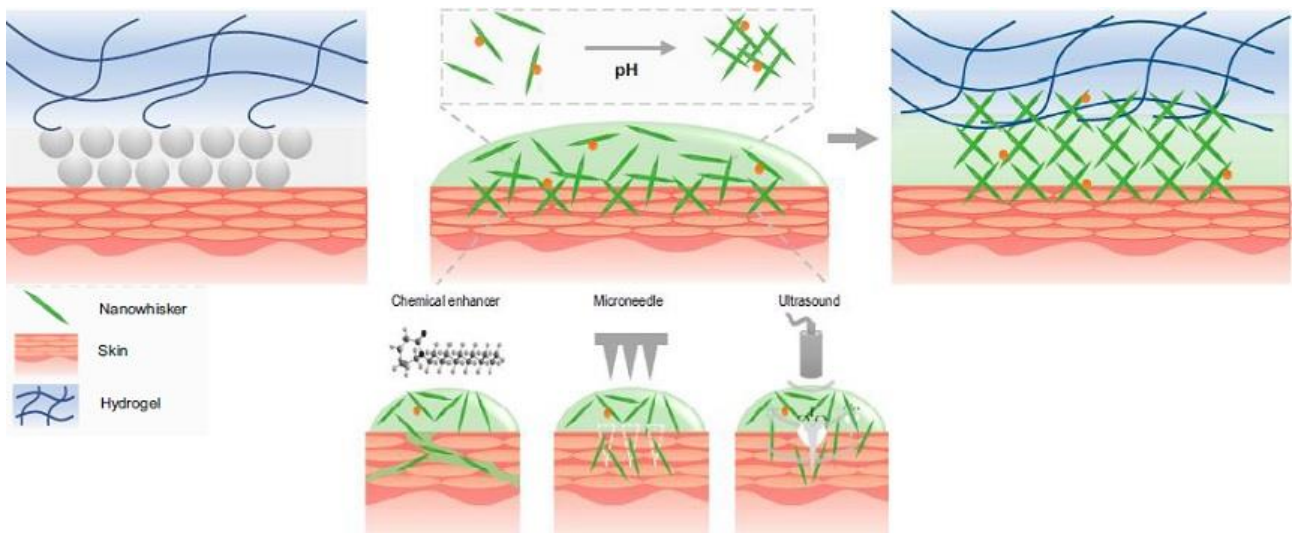


Рис. 1. Схема создания медицинского клея. Обычный адгезив с наночастицами (показан слева) приводит к слабой адгезии за счет физической адсорбции. Клей на основе нановолокон хитозана обеспечивает сильную связь между тканью и гидрогелем. Оранжевыми кружками обозначены функциональные наночастицы нановолокон.

В экспериментах авторы [3] нанесли на свиную кожу суспензию нановолокон и прижали ее сверху гидрогелем. Испытали все три способа внедрения нановолокон в ткань. Наилучшие результаты (самую сильную адгезию 1185 Дж/м<sup>2</sup> и предел выносливости 382 Дж/м<sup>2</sup>) обеспечило воздействие ультразвука (рис. 2). Это намного превышает адгезивную способность всех известных биоадгезивов как с наночастицами, так и с полимерами.

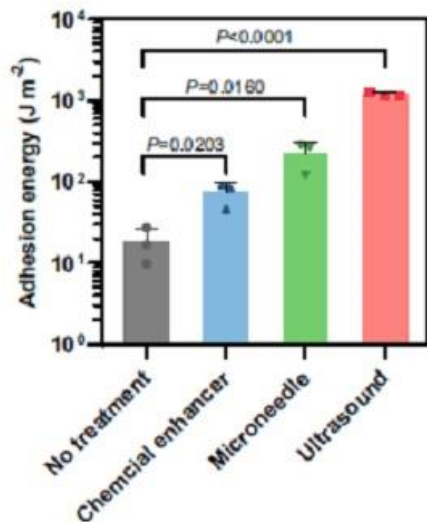


Рис. 2. Энергия адгезии между свиной кожей и гидрогелем для разных методов внедрения нановолокон хитозана в ткань.

Для изучения механизма адгезии использовали просвечивающую электронную микроскопию (ПЭМ) (рис. 3). В отсутствие обработки слой гидрогеля и кожи разделены промежутком (рис. 3a,b). Адгезия нановолокон слабая, даже

не выдерживает дегидратации образца (рис. 3b). При обработке ультразвуком (рис. 3d,e) нановолокна проникают глубоко в кожу. Между кожей и гидрогелем образуется новая промежуточная фаза – плотная сетка нановолокон шириной примерно 2 мкм (рис. 3e).

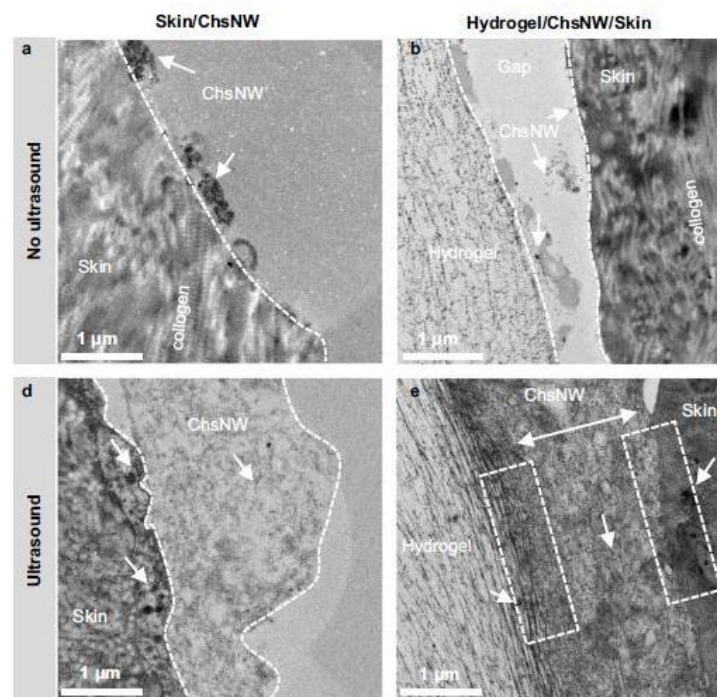


Рис. 3. ПЭМ изображения гидрогеля на коже с использованием клея на основе нановолокон. Вверху – кожа/нановолокна и гидрогель/нановолокна/кожа без воздействия ультразвука; внизу те же изображения, но при внедрении нановолокон с помощью ультразвука. Пунктир указывает границы фаз, нановолокна отмечены белыми стрелками.

Исследователи предложили такой механизм. Нановолокна с помощью ультразвука проникают глубоко в ткань, притягивают гидрогель и образуют плотную жёсткую сетку. Функциональные группы на поверхности нановолокон обеспечивают электростатическое взаимодействие и формирование водородных связей между самими волокнами и между волокнами и тканями.

Исследования показали, что нановолоконный клей можно использовать не только на коже, но и на других тканях с барьерным эффектом, таких как сухожилия или трахея.

В новый медицинский клей можно ввести функциональные наночастицы. Авторы [3] при проведении исследований уже использовали наночастицы Au для усиления контраста изображений ПЭМ. Эти и другие наночастицы, например  $\text{TiO}_2$ , позволят обеспечить сонодинамические и фототермические эффекты, важные для лечения онкологических и прочих заболеваний, а также откроют новые возможности медицинского и технологического применения нановолоконных биоадгезивов.

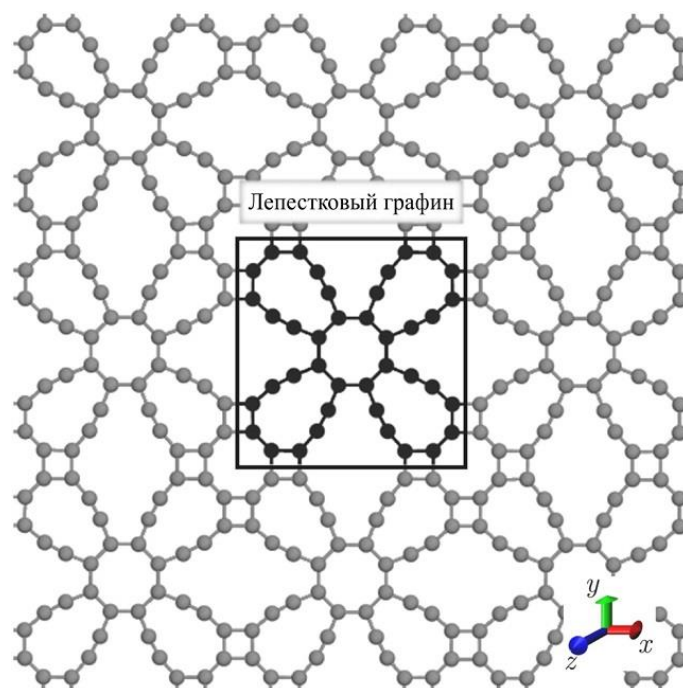
О. Алексеева

1. [ПерсТ 29, вып.11, с.3 \(2022\).](#)
2. [ПерсТ 22, вып.8, с.2 \(2015\).](#)
3. *S.Jiang et al., Nature Commun. 16, 6826 (2025).*

### Лепестковый графин для аккумуляторных батарей

Литий-ионные аккумуляторы стали основной технологией хранения энергии в современном мире, широко применяемой в мобильных устройствах, электромобилях, системах резервного хранения энергии и т.д. Однако, поскольку спрос на более высокую плотность запасаемой энергии и более длительный срок службы вместе с требованиями повышенной безопасности использования продолжает расти, исследования материалов для все более эффективных аккумуляторов не теряют актуальности. Двумерные материалы благодаря своей уникальной структуре, выдающимся электронным характеристикам, большой площади поверхности и механическим свойствам привлекают к себе значительное внимание исследователей и являются перспективными кандидатами на роль анодов металл-ионных аккумуляторов. Так, для литий-ионных и натрий-ионных аккумуляторов в качестве образцовых анодных материалов часто называют графеноподобные

наноструктуры, и в работе [1] исследователи из нескольких университетов Бразилии предлагают на эту роль новый углеродный низкоразмерный аллотроп – лепестковый графин (petal-graphyne, PLG).



Атомная структура лепесткового графина (PLG). Черным цветом обозначена элементарная ячейка, содержащая 40 атомов углерода. Лепестковый графин представляет собой пористую структуру, построенную из четырех-, восьми-, десяти- и шестнадцатичленных колец.

Лепестковый графин – структура, состоящая из четырех-, восьми-, десяти- и шестнадцатичленных углеродных колец с уникальной комбинацией  $sp$  и  $sp^2$  гибридизации (см. рис.). С помощью теории функционала плотности с применением программного пакета CASTEP авторы провели комплексное изучение его структурных, механических, электронных и электрохимических характеристик, включая расчеты фоновых спектров, выполнение молекулярно-динамического моделирования, определение диффузионных барьеров методом натянутой упругой ленты (nudged elastic band, NEB), а также детальный анализ электронной зонной структуры и оптических свойств. Полученные результаты показывают, что лепестковый графин проявляет металлическую природу, характеризующуюся множественными пересечениями зон на уровне Ферми, обеспечивая высокую электропроводность, а также демонстрирует заметную теоретическую емкость накопления энергии 1004 мАч/г для ионов лития, натрия и их смеси Li/Na, что превосходит как традици-

онные графитовые аноды (372 мАч/г), так и более современные графеновые (744 мАч/г).

Исследователи установили, что пористая структура PLG способствует адсорбции ионов металлов на поверхности материала при потенциальном запуске процессов литиирования/натрийирования. При этом металлы Li и Na исследователи размещали селективно, чтобы избежать кластеризации во время циклов заряда/разряда. Максимальная концентрация металла достигается при адсорбции 18 атомов Li и 18 атомов Na на монослое. Достаточно низкие величины энергетических барьеров диффузии ионов металлов в плоскости, равные 0.28 эВ (Li) и 0.25 эВ (Na), предполагают хорошую подвижность ионов, в то время как межслоевые барьеры диффузии, равные 0.50 эВ (Li) и 0.43 эВ (Na), подтверждают возможность транспорта и в многослойных конфигурациях. Оценка авторами среднего напряжения холостого хода (OCV) составила 0.47 В для Li, 0.51 В для Na и 0.54 В для смеси Li/Na, что свидетельствует о стабильных электрохимических характеристиках. При этом, анализ фоновых спектров и молекулярно-динамические расчеты подтверждают высокую динамическую и термическую устойчивость лепесткового графина (вплоть до 1000 К).

Оптический анализ PLG выявил сильное поглощение в ультрафиолетовой области, высокую отражательную способность во всем спектральном диапазоне солнечного излучения, особенно в видимой его части, и профиль показателя преломления, соответствующий металлическим материалам, что также делает лепестковый графин неплохим кандидатом для оптоэлектронных приложений. Что касается механических характеристик, то PLG обладает анизотропией: максимальная величина модуля Юнга, рассчитанная авторами, составила 180 Н/м, а минимальная – всего 60 Н/м. По сравнению с другими графинами, которые демонстрируют величины модуля Юнга в диапазоне от 180 Н/м до 220 Н/м, лепестковый графин обладает меньшей общей жесткостью из-за составляющих его крупных многочленных углеродных колец.

В итоге, по мнению ученых, результаты исследования позволяют рассматривать лепестковый графин в качестве перспективного кандидата для аккумуляторов следующего поколения благодаря сочетанию высокой емкости накопления энергии, эффективного ионного транспорта и

значительной механической и кинетической устойчивости.

*М. Маслов*

*I. K.A.L.Lima et al., J. Energy Storage 130, 117235 (2025).*

## ФОТОНИКА

### Эффект Эйнштейна–де Гааза в nanoалмазе

Эффект Эйнштейна–де Гааза – закручивание ферромагнетика при намагничивании – является ярким подтверждением связи механического и магнитного моментов, а соответствующий эксперимент – одним из основополагающих квантовомеханических опытов. С развитием зондовых методов появилась идея регистрации этого эффекта по колебаниям кантилевера: об этом см., например, заметку в ПерсТе [1].

Магнитомеханическая связь очевидна, если речь идет о ферромагнетиках, но что, если эффект проявляется в немагнитных материалах? В недавней статье ученых из Sorbonne Univ. (Франция) [2], сообщается об обнаружении силы, создаваемой nanoалмазом с NV-центрами, помещенным в магнитное поле.

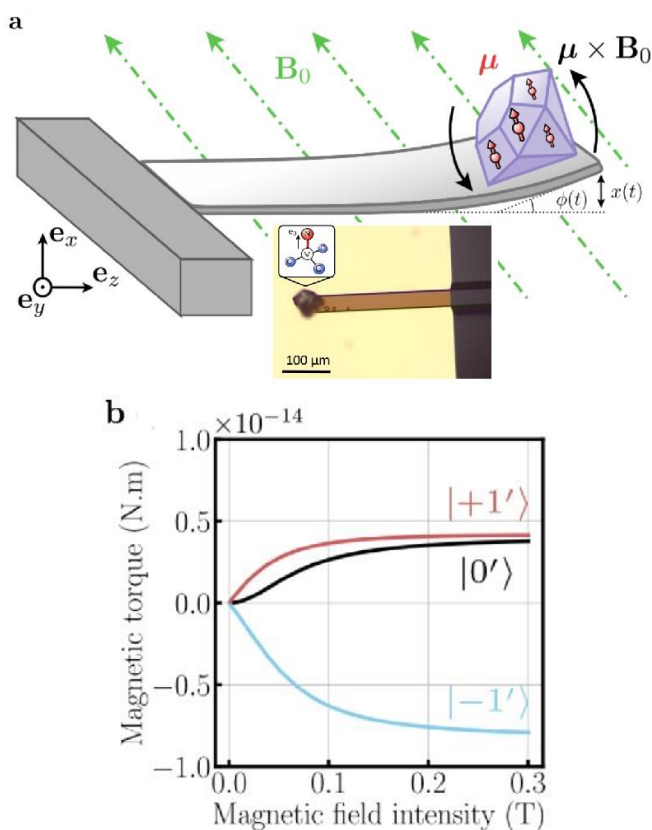


Рис. 1. **a** – Схема взаимодействия кантилевера и nanoалмаза, микрофотография кантилевера с nanoалмазом; **b** – зависимость момента силы от величины магнитного поля для различных состояний NV-центров (проекций спина на ось внешнего магнитного поля).

Образец наноалмаза закрепляли на кантилере с помощью клея и помещали в магнитное поле (рис. 1а).

В магнитном поле энергетические уровни NV-центров расщепляются на три состояния по проекции спина электрона на ось магнитного поля:  $|0\rangle$ ,  $|+1\rangle$  и  $|-1\rangle$ . Для возбуждения переходов между уровнями наноалмаз облучали зеленым лазерным светом. При переходах электронов в состояния с различными проекциями спина, по закону сохранения момента импульса, возникает механический момент силы, зависящий от величины и направления магнитного поля (рис. 1b). Момент силы проявлялся во вращении кантилера и детектировался с помощью оптического датчика, основанного на интерферометре Майкельсона.

Исследованный эффект имеет большие перспективы для применения в микроэлектромеханических устройствах, давая еще одну возможность контроля механических сил с помощью света.

3. Пятакова

1. [ПерсТ 13, вып. 18, с.3 \(2006\).](#)

2. M.Perdriat et al., *Phys. Rev. B* **112**, 094419 (2025).

## МУЛЬТИФЕРРОИКИ

### *Мультиферроики третьего типа: сегнетоэлектрическое упорядочение порождает магнитное*

В конце нулевых годов текущего столетия, когда нарастающий вал работ по тематике мультиферроиков потребовал какой-то систематизации, Даниил Ильич Хомский предложил простую и быстро приобретающую популярность классификацию: мультиферроиками первого типа называть среды, в которых сегнетоэлектрическое и магнитное упорядочения возникают независимо, а мультиферроиками второго типа – вещества, в которых эти упорядочения взаимосвязаны [1]. При этом подразумевалось, что в мультиферроиках второго типа магнитное упорядочение, нарушая инверсионную симметрию кристалла, порождает сегнетоэлектрическое. О том, что взаимосвязь может реализоваться и по другому сценарию – сегнетоэлектрическое упорядочение вызывает магнитное – речи не шло, поскольку такая возможность не следовала из симметричных посылок, для нее не находилось ни внятного механизма, ни, тем более, примеров конкретных веществ. Потребовалось открытие двумерных магнитных материалов (ван-дер-ваальсовых магнетиков), а также развитие методов первопринципных расчетов (и высокая степень доверия к ним), чтобы *мультиферроики третьего типа* стали приобретать реальные черты.

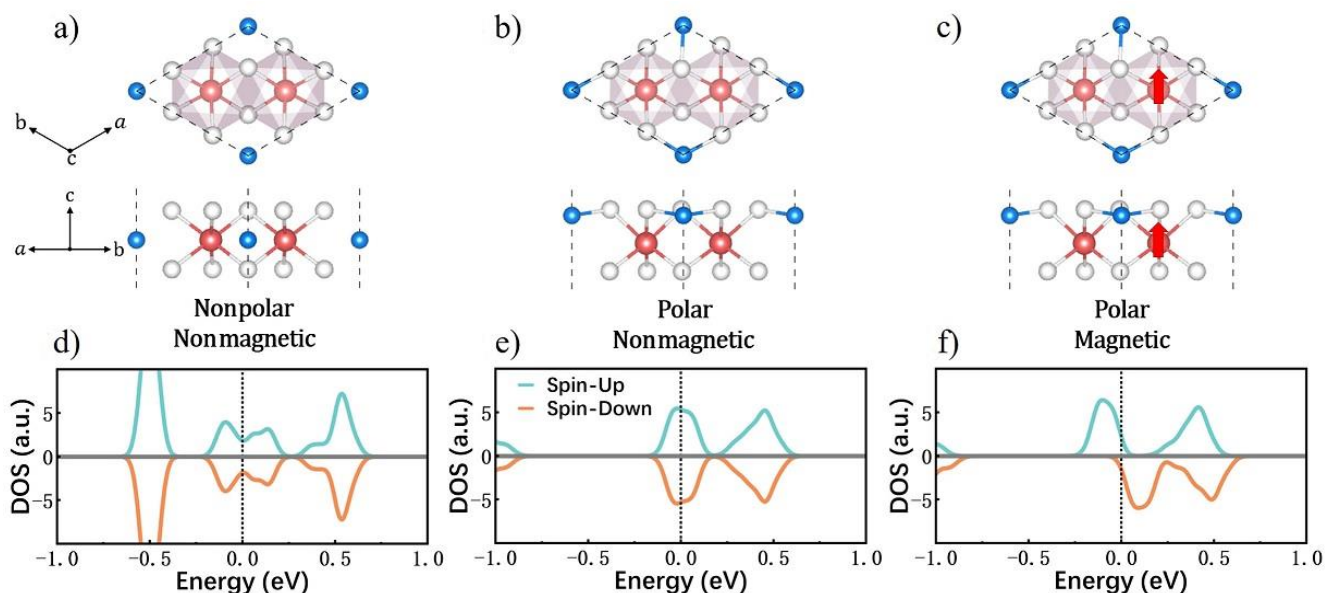


Рис. 1. Вид сверху и в разрезе для атомной структуры Cu-InI<sub>3</sub>, а также график зависимости плотности электронных состояний от энергии для трех случаев: **a** – ионы меди расположены внутри монослоя; **b** – ионы меди смещены к поверхности монослоя; **c** – ионы меди смещены к поверхности монослоя, а ионы индия магнитоупорядочены. Белые, красные и синие шарики представляют ионы иода, индия, и меди, соответственно. DOS – плотность электронных состояний, цветами показаны состояния для противоположных направлений спина. Уровень Ферми показан пунктирной линией.

В статье ученых из Nanjing Univ. of Science and Technology, Nanjing Forestry Univ. (Китай) [2] возможность сегнетоэлектрически индуцированной намагниченности рассматривается на примере сорбции ионов меди одномолекулярным слоем трииодида индия (рис. 1). Рассчитав методом теории функционала плотности (DFT) электронные состояния сначала для centrosymmetric конфигурации (рис. 1а), в которой ионы меди абсорбируются в объеме монослоя, а затем для нецентросимметричной (адсорбция Cu близко на поверхности, рис. 1б), ученые заметили, что последняя конфигурация не только предпочтительнее по энергии, но и характеризуется большей плотностью состояний коллективизированных электронов на уровне Ферми. Рассчитав обменный сдвиг (рис. 1в), можно сделать вывод, что его произведение на плотность состояний превышает единицу, что, согласно критерию Стонера, достаточно для перехода в ферромагнитное состояние.

Авторы [2] отмечают, что аналогичный рецепт получения двумерных мультиферроиков применим и к другим галогенидам индия – хромиду и бромиду, а в качестве адсорбированных атомов могут выступать ионы золота и серебра.

*А. Пятаков*

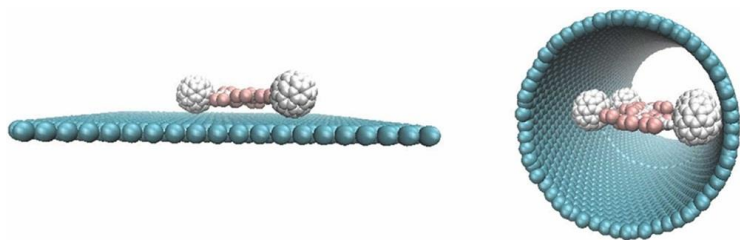
1. *J. van den Brink, D.I.Khomskii, J. Phys.: Condens. Matter 20, 434217 (2008).*

2. *J.Jiang et al., Phys. Rev. Lett. 134, 196801 (2025).*

## ФУЛЛУРЕНА И НАНОТРУБКИ

### Спорткары на фуллереновых шасси

В работе [1] ученые из Sharif Univ. of Technology (Иран) изучили движение наноавтомобилей на основе фуллеренов на двух поверхностях: углеродной плоскости (графене) и углеродных нанотрубках (см. рис.).



Подложки (“треки”) для моделирования. Фронтальный вид листовой подложки (графен, слева) и трубчатой подложки (углеродная нанотрубка, справа).

Они рассмотрели шесть различных нанокаров с фуллереновыми колесами  $C_{36}$ ,  $C_{50}$ ,  $C_{60}$ ,  $C_{76}$ ,  $C_{80}$  и  $C_{90}$ . Авторы преследовали две основные цели. Во-первых, оценить, демонстрируют ли наноавтомобили с отличными от привычного  $C_{60}$  фуллереновыми колесами улучшенные динамические характеристики и, во-вторых, определить оптимальную конфигурацию поверхности для управления движением нанокара. Для анализа авторы использовали распространенный метод классической молекулярной динамики, реализованный в программном пакете LAMMPS. Ковалентное взаимодействие описывалось потенциалом Терзоффа, а слабое ван-дер-ваальсово взаимодействие – потенциалом Леннарда-Джонса.

Исследователи следили за эволюцией машин в течение 40 нс с шагом по времени 1 фс в температурном диапазоне от 75 до 600 К. Молекулярно-динамическое моделирование проводили с использованием NVT-ансамбля. Контроль температуры осуществлялся с помощью термостата Нозе-Гувера. Полученные результаты показывают, что характеристики нанокара сильно зависят от размера колес, кривизны “трека” и температуры. Авторы отмечают, что углеродные нанотрубки обеспечивают более контролируемую среду для движения нанокара по сравнению с листами графена благодаря своей изогнутой геометрии. Кривизна трубки увеличивает энергию взаимодействия между колесами нанокара и подложкой, ограничивая боковое отклонение и способствуя направленному движению. Выравнивание цилиндрической поверхности нанотрубки и колес фуллерена приводит к усилению ван-дер-ваальсовых взаимодействий, что способствует более плавному движению на большие расстояния. Этот эффект особенно выражен при высоких температурах, когда качение преобладает над скольжением. Инерция также играет важную роль в формировании поведения нанокара, особенно при низких температурах. Более легкие нанокары, например, построенные на шасси  $C_{36}$  и  $C_{50}$ , демонстрируют превосходную подвижность при низких температурах благодаря меньшей инерции, что позволяет им легче начинать движение. Однако с повышением температуры вклад инерции уменьшается, и более крупные нанокары с более высокой энергией взаимодействия, такие как  $C_{80}$  и  $C_{90}$ , демонстрируют улучшенную подвижность благодаря способности поддерживать вращательное движение. При промежуточных температурах “интерфе-

ренция” качения и скольжения способна дестабилизировать движение, что объясняет неоптимальные характеристики некоторых наноавтомобилей в определенных условиях. В конечном итоге авторы пришли к выводу, что более чем в 70% случаев углеродные нанотрубки являются предпочтительным “треком” для фуллереновых нанокаров, особенно при высоких температурах, где их способность ограничивать движение повышает динамические характеристики наномашин. При этом традиционные наномобили на основе  $C_{60}$  показывали оптимальную производительность менее чем в 10% изученных условий. Полученные результаты ставят под сомнение доминирование последних, и предлагают оптимизацию молекулярных машин для целевых приложений, таких как доставка лекарственных средств или молекулярный транспорт, с помощью замены колес  $C_{60}$  на другие фуллерены. В целом исследование открывает новые перспективы для применения наномобилей в областях, где требуется контролируемое перемещение на наноуровне.

Понаблюдать за движением нанокара по графеновому треку в реальном времени можно по ссылке:

<https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S0924424725003528-mmc1.mp4>

*М.Маслов*

*1. M.A.Bakhtiari et al., Sens. Actuators A: Phys. 389, 116546 (2025).*

**Информационный бюллетень ПерсТ  
издается информационной группой ИФТТ РАН**

Главный редактор: И. Чугуева, e-mail: [ichugueva@yandex.ru](mailto: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