

ISSN: 2782-5515



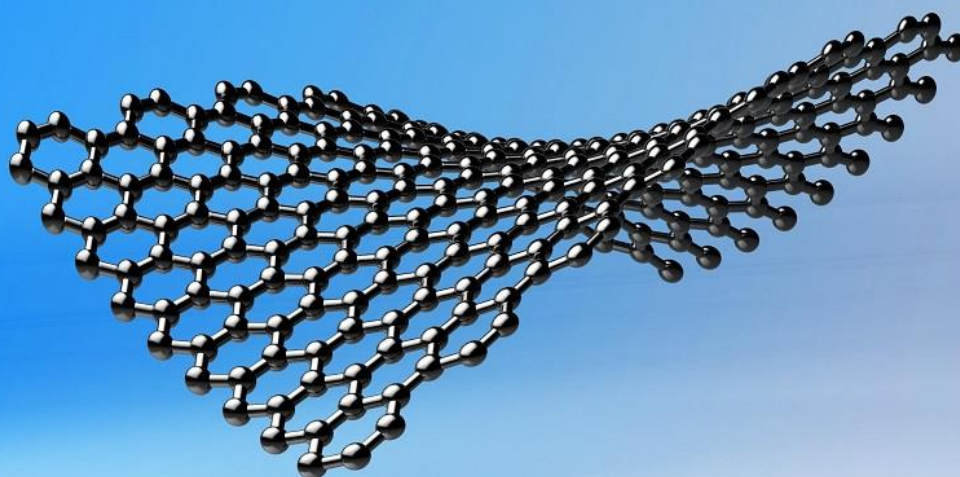
# Перст

Информационный бюллетень

перспективные технологии  
наноструктуры сверхпроводники фуллерены

Том 31, выпуск 3

март 2024 г.



*Графен*

Черноголовка

Том 31, выпуск 3

март 2024 г.

В этом выпуске:

## ФОТОНИКА

### *Световые качели для магнонов: параметрическое возбуждение спиновых волн в антиферромагнетиках*

Создание магнонного лазера – источника когерентных магнонов – актуальная задача для разработки широкого спектра миниатюрных электронных устройств. Идея управления магнонами с помощью оптического излучения является одним из мостиков между фотоникой и спинтроникой. Принципы параметрического усиления, широко применяемые в фотонике для создания мощных лазерных импульсов, могут быть применены и для спиновых волн. Так, в недавней статье [1] приводятся результаты экспериментального и теоретического исследования, проясняющие механизм параметрического возбуждения магнонов под действием коротких лазерных импульсов в антиферромагнетике.

В работе исследуется двухподрешеточный кристалл кубической симметрии, такой, например, как  $\text{RbMnF}_3$ . На антиферромагнетик воздействуют короткими импульсами оптического излучения. В результате обратного эффекта Коттона-Мутона под воздействием линейно поляризованного света меняется намагниченность среды. В результате действия короткого импульса электромагнитного поля в магнетике возникают спиновые волны – магноны. Обнаружить эти волны можно по прямому эффекту Коттона-Мутона, пропуская через среду зондирующий импульс излучения. Во многих работах, посвященных анализу динамики магнонов в подобных кристаллах, вектор антиферромагнетизма считается постоянным по модулю, но это позволяет рассмотреть магноны только в центре зоны Бриллюэна, то есть стоячие спиновые волны. В данной же статье проведен анализ с более общих позиций, и волновое число возникающих спиновых волн может быть отличным от нуля.

Естественно ожидать в такой среде наличия резонансных явлений. Однако классический силовой резонанс, имеющий место при совпадении частоты возбуждающего импульса с частотой магнонов, здесь оказывается слабее другого вида резонанса – параметрического, возникающего, когда частота магнонов в два раза меньше частоты накачки. Параметрическое возбуждение колебаний знакомо каждому, кто качался на качелях, поэтому интересно разобраться в механизмах взаимодействия света и магнитной подсистемы, приводящих к этому эффекту.

И далее ...

## ДЛЯ ПРАЗДНОГО УМА

3 Нанопластик в морской воде

4 Сколько веревочке не виться... а переход произойдет

## НАНОМАТЕРИАЛЫ

6 Двумерные металлы для графеновых датчиков

7 Легированные искусственные двумерные алмазы

## КОНФЕРЕНЦИИ

8 International Conference on “Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications” (PHENMA 2024), November 6 – 11, 2024, Indore India

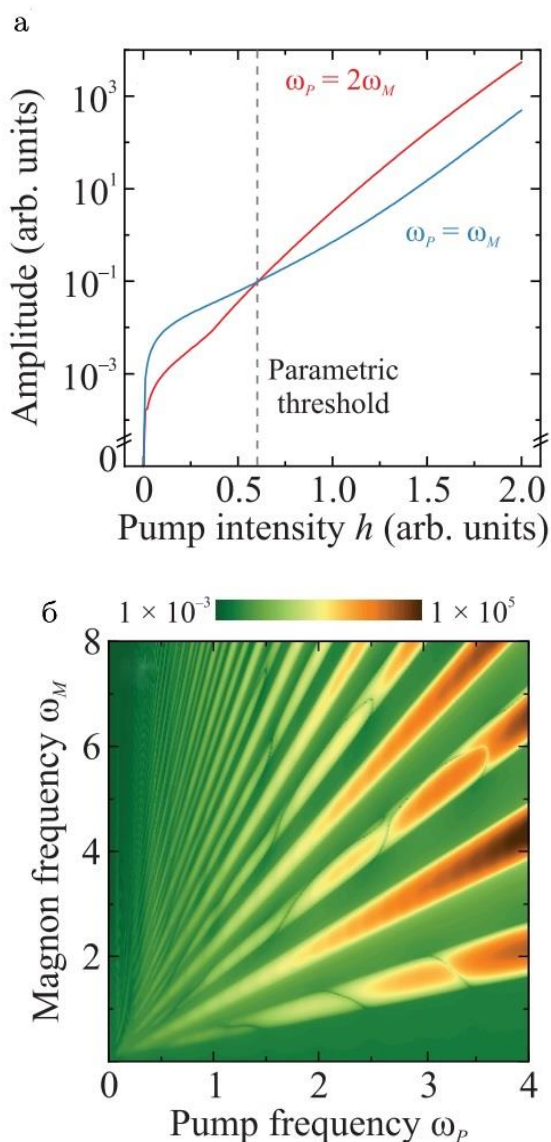


Рис. 1. Параметрический резонанс магнонов в антиферромагнетике: **а** - зависимость амплитуды спиновых волн от интенсивности накачки при накачке на частоте магнонов (синяя кривая) и на удвоенной частоте магнонов (красная кривая); **б** - двумерная картина параметрических резонансов при различных соотношениях частоты магнонов и частоты накачки (цветом показана амплитуда спиновых волн в логарифмическом масштабе).

В механизм параметрического возбуждения магнонов вносят вклад несколько магнитооптических эффектов. Во-первых, это обратный магниторефрактивный эффект, заключающийся в модуляции величины магнитного обменного взаимодействия оптическими волнами (подробнее об этом можно прочитать, например, в работе [2]). Этот эффект создает условия для параметрической неустойчивости, действуя подобно модуляции момента инерции на качелях. Во-вторых, сама раскачка колебаний возникает за счет обратного эффекта Коттона-Мутона, при котором линейно поляризованный свет

создает вращающий момент, действующий на спины. Комплекс этих магнитооптических явлений порождает достаточно большую амплитуду результирующих спиновых волн, которая может наблюдаться в эксперименте, построенном на принципе “накачка-зондирование”.

Как и любое параметрическое возбуждение колебаний, возбуждение магнонов световыми волнами обладает пороговым характером (рис. 1а), то есть существует пороговая интенсивность волны накачки, ниже которой резонанса не наблюдается. При накачке на частотах, кратных частотам магнонов, также наблюдаются резонансные явления (рис. 1б). Авторы [1] теоретически рассчитали временные характеристики возникающих спиновых волн и их поляризационные свойства, а также дали рекомендации для дальнейших экспериментальных исследований. Таким образом, у нас есть еще один мощный механизм оптического управления спиновыми волнами – параметрическое воздействие.

3. Пятакова

1. А.К.Звездин и др., *Письма в ЖЭТФ* **119**, 355 (2024).

2. R.Mikhaylovskiy et al., *Nat. Commun.* **6**, 8190 (2015).

## ДЛЯ ПРАЗДНОГО УМА

### *Нанопластик в морской воде*

Загрязнение пластиком природных вод является серьезной экологической проблемой. Каждый год в океаны попадают миллионы тонн пластиковых отходов. УФ излучение и другие воздействия приводят к образованию наночастиц, опасных для живых организмов. Исследования активно проводят в разных странах, включая Россию. Так, например, в работе [1] представлена схематическая карта распространения микро- и нанопластика в поверхностных водах России (морских, речных, озерных). Проведенный авторами анализ показывает, что определить состав и количество таких загрязнений очень сложно. Для исследований в основном используют пиролитическую газовую хроматографию с масс-спектрометрией, но это не даёт информации о размерах и морфологии нанопластика. Уникальный метод SSBD (*shrinking surface bubble deposition*) недавно разработали исследователи из Univ. Notre Dame и Texas A&M Univ. (США) [2]. Этот метод осаждения и сжатия пузырьков основан на фо-

тотермическом эффекте лазерного воздействия на плазмонные наночастицы серебра. Используя SSBD, авторы работы обнаружили и изучили нанопластик в образцах морской воды из двух океанов.

Схема процесса показана на рис. 1. Образец морской воды смешивают с суспензией наночастиц серебра размером ~ 10 нм и помещают в кварцевую кювету, на дне которой находится стеклянная пластинка. Лазерный луч фокусируют на стекле. Фототермический эффект лазерного воздействия на плазмонные Ag наночастицы вызывает появление на поверхности пластинки пузырьков, на которых аккумулируются частицы нанопластика. После увеличения пузырьков до 40 мкм лазерное воздействие прекращают. Пузырьки сжимаются, затем исчезают, оставив на стеклянной подложке сгруппированные наночастицы и серебра, и пластика. Стекло с наночастицами вынимают, высушивают и проводят исследование нанопластика.

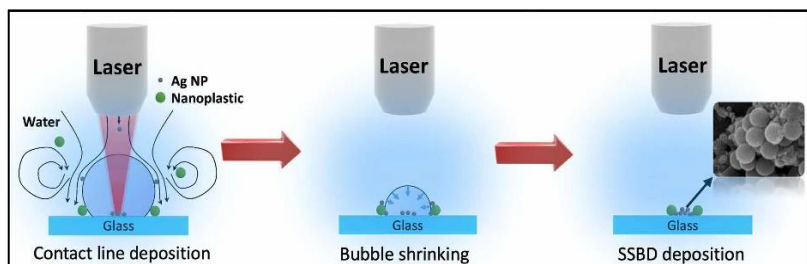


Рис. 1. Схема процесса SSBD, разработанного авторами [2]. Лазерный нагрев образца морской воды с плазмонными наночастицами Ag вызывает образование пузырьков на стеклянной подложке. На поверхности пузырьков собираются наночастицы пластика, которые после сжатия и исчезновения пузырьков остаются на стекле.

Авторы [2] изучили образцы морской воды, взятые вблизи побережья Китая, США, Южной Кореи и из Мексиканского залива. Для выяснения морфологии и типа пластика использовали электронную микроскопию и рамановскую спектроскопию. Был обнаружен нанопластик из нейлона, полистирола (PS) и полиэтилентерефталата (PET) (рис. 2). Это материалы, часто применяемые для производства пищевых пленок и упаковок, бутылок для воды, одежды, рыболовных сетей. Как видно на SEM изображениях морфологии и формы нанопластиков разнообразны – нановолокна, нанохлопья, наноструктуры из шариков с палочками. Примечательно, что они резко отличаются от сфе-

рических наночастиц, которые синтезируют в лабораториях для оценки токсичности.

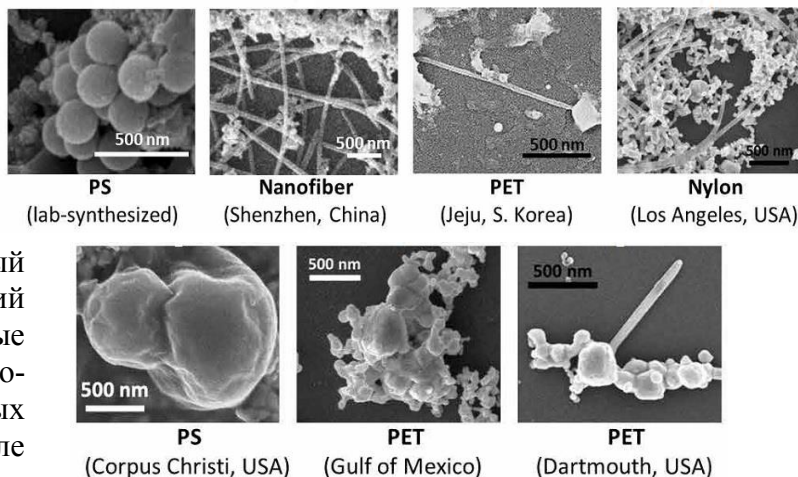


Рис. 2. SEM изображения нанопластика в разных образцах морской воды (на первом слева изображении показаны наночастицы полистирола, синтезированные в лаборатории).

Неожиданным оказалось обнаружение нанопластика PET в воде, взятой из Мексиканского залива на глубине 311 м. Этот факт свидетельствует о том, что загрязнение не ограничено поверхностным слоем океана.

Метод, разработанный авторами [2], и проведенные ими исследования важны для правильной оценки влияния нанопластика на жизнь морских обитателей.

*О. Алексеева*

1. Е.С.Казак и др., *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология* № 6, 110 (2022).
2. S.Moon et al., *Sci. Adv.* **10**, eadh1675 (2024).

### **Сколько веревочке не виться... а переход произойдет**

Все наматывали макароны на вилку, а может быть, кто-то играл с пряжей, наматывая ее на палец. Однако только внимательный взгляд физика может разглядеть в этом клубке материал для Phys.Rev.Lett.

По крайней мере, это удалось ассистенту физического факультета Токио Metropolitan Univ. Мари Тани. Она обратила внимание на резкую границу между двумя сценариями намотки: поначалу пряжа или шнурок наматываются плотно расположенными витками, но на очередном обороте, когда длина свешивающегося конца меньше некоторой критической, шаг спирали скачкообразно увеличивается (рис. 16). Вместе с коллегой Хирофуми Вада она опубликовала

работу [1], в которой комплексно исследован данный феномен: были проведены натурные и численные эксперименты, и на основе теории Эйлера-Кирхгофа для гибких стержней разработана аналитическая модель.

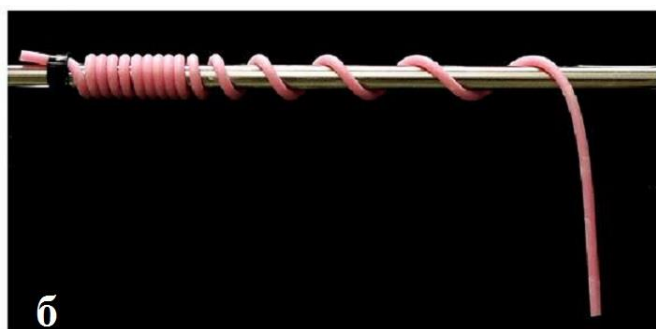
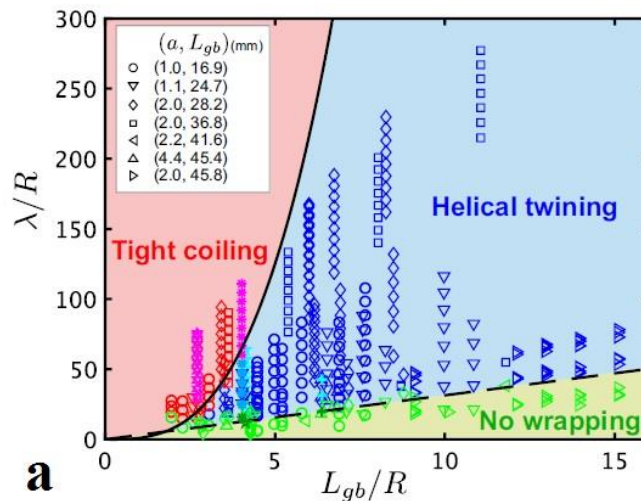


Рис. 1. **а** - Когда-то правила этикета предписывали накручивать спагетти на вилку, опираясь при этом на ложку ([ru.freerik.com](http://ru.freerik.com)); **б** - существует два сценария намотки, между которыми образуется хорошо различимая граница.

В этом месте заметки мы обычно пишем про технические средства, потребовавшиеся для проведения экспериментальных исследований, но в данном случае это даже трудно назвать оборудованием: стальные стержни радиусом от 1 до 8 мм, шнуры радиусом 1–5 мм и длиной от 10 см до метра, детская присыпка и клейкая лента.

В результате многочисленных опытов авторам [1] удалось выявить три режима: плотное наматывание, наматывание по спирали и отсутствие наматывания, которые можно изобразить в виде диаграмм на рис. 2. По осям диаграмм откладываются безразмерные величины: по горизонтали – параметр характеристической длины  $L_{gb}$  (gravitobending length), зависящий от изгибной жесткости и погонной плотности шнура, нормированный на эффективный радиус намотки, по вертикальной оси – нормированная на ту же величину длина  $\lambda$  свободно свешивающегося конца. Как видно из диаграммы, чем больше длина свободного конца и чем мягче

шнурок, тем больше вероятность реализации плотной намотки (красная область на рис. 2а). Для более жесткого или недостаточно длинного шнура витки становятся более редкими (синяя область на рис. 2а), либо шнурок просто перестает оборачиваться вокруг стержня (зеленая область).



**а**

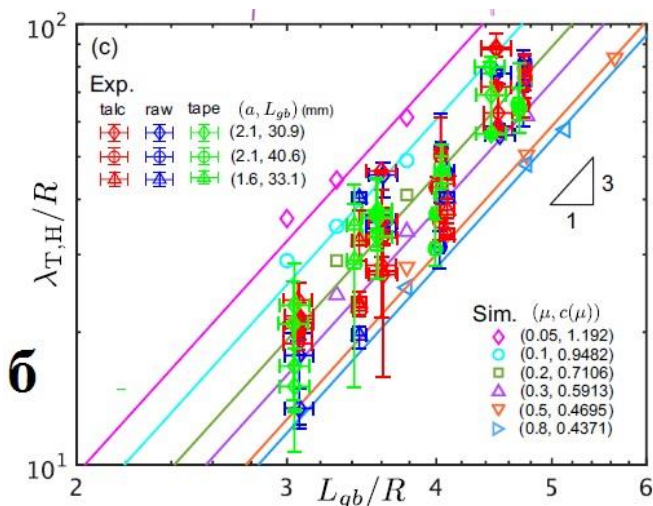


Рис. 2. Диаграммы сценариев намотки в безразмерных координатах: **а** - диаграмма в линейном масштабе с тремя областями: tight coiling – плотная намотка, helical twining – спиральные витки, по wrapping – шнурок не делает ни одного оборота вокруг стержня. Символом “ $a$ ” в легендах графика обозначают радиус шнура,  $R=R_0+a$  – эффективный радиус намотки, где  $R_0$  – радиус стержня,  $L_{gb}$  – “gravitobending length”, характеристическая длина, равная кубическому корню из отношения изгибной жесткости к силе тяжести на единицу длины,  $\lambda$  – длина свешивающегося конца; **б** - та же диаграмма в двойном логарифмическом масштабе при различных величинах коэффициента трения  $\mu$ : raw – исходные материалы, talc – намотка с детской присыпкой, tape – с клейкой лентой. Кубическая парабола с коэффициентом  $c(\mu)$ , разделяющая области между плотной и спиральной намотками на рис. 2а, представляется на рис. 2б уже семейством прямых

линий с коэффициентом наклона 3 и точками пересечений с осью ординат равными  $\lg(c(\mu))$ . Exp, Sim – результаты натуральных и численных экспериментов, соответственно.

От исследователей не укрылось и то, что реализация того или иного режима зависит еще и от коэффициента трения, варьировать который удалось с помощью талька и скотча. На диаграмме рис. 26 в двойном логарифмическом масштабе приведены границы между режимами плотной и разреженной намотки при различных коэффициентах трения, полученные с помощью численных и натуральных экспериментов. Видно, что чем больше коэффициент трения, тем короче может быть свисающий конец шнура, при котором еще возможен сценарий плотной намотки.

В чем практическая ценность подобных изысканий, и есть ли она? Как полагают авторы [1], полученные данные могут быть полезны при разработке роботизированных систем мягкого захвата, а также искусственных мышц.

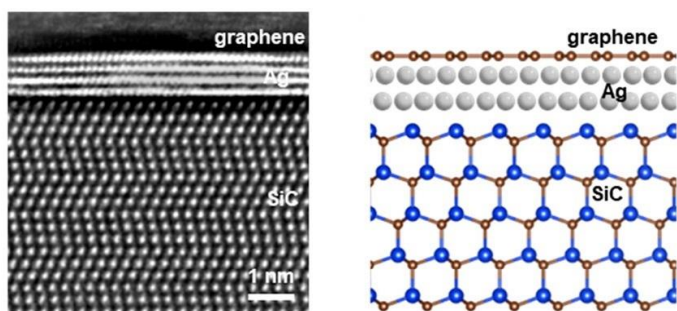
*А. Пятаков*

*1. M.Tani, H.Wada, Phys. Rev. Lett. 132, 058204 (2024).*

## НАНОМАТЕРИАЛЫ

### *Двумерные металлы для графеновых датчиков*

Исследователям из Pennsylvania State Univ., Rice Univ. (США) и Qilu Univ. of Technology (Китай) [1] с помощью конфайнментной гетероэпитаксии (CNet) удалось успешно разместить несколько слоев металла (серебра, галлия или индия) толщиной в один атом, совокупность которых они назвали “двумерным металлом”, между подложкой из карбида кремния и графеном.



Двумерный металл (на примере серебра), расположенный между графеном и подложкой из карбида кремния: изображение, полученное с помощью просвечивающей растровой электронной микроскопии (слева) и схематическое изображение двумерного металла (справа).

В итоге получилась сэндвичевая структура (см. рис.), в которой атомы металла оказываются связанными с подложкой ковалентно, а с графеном – посредством слабого ван-дер-ваальсового взаимодействия. Предложенный авторами подход можно считать альтернативным химическому допированию графена для тонкой подстройки уровня Ферми. Как раз это и было основной целью исследователей. Дело в том, что недавно обнаруженное явление усиления комбинационного рассеяния света, которое использует графен в качестве подложки, способно генерировать чистые и воспроизводимые спектры молекул с повышенной интенсивностью сигнала. Такое усиленное графеном комбинационное рассеяние (GERS) открывает уникальные возможности для оптического зондирования с высокой молекулярной селективностью. Механизм GERS основан на переносе заряда между анализируемыми молекулами и графеном, что существенно изменяет поляризуемость молекул и усиливает рамановские сигналы. Такой процесс переноса сильно зависит от выравнивания зон между графеном и анализируемыми молекулами. Поэтому с помощью перенастройки уровня Ферми графена становится возможным эффективно менять степень переноса заряда и, в конечном итоге, существенно улучшить идентификацию молекул с использованием GERS. Исследователи на основе данных кельвин-зондовой силовой микроскопии продемонстрировали возможность такой настройки, внедряя атомы Ag, Ga или In, между графеном и карбидом кремния. На примере фталоцианина меди (CuPc) они установили усиление комбинационного рассеяния при выравнивании уровня Ферми графена с наивысшей занятой молекулярной орбиталью (НОМО) CuPc. Этот эффект объясняется укреплением связывания и увеличением переноса заряда между молекулами CuPc и графеном. Последнее, к слову, подкрепляется и дополнительными вычислениями в рамках теории функционала плотности в программе VASP с использованием функционала PBE и учетом поправок Гримме для слабого ван-дер-ваальсового взаимодействия. Дальнейшие исследования различных молекул, включая родамин 6G (R6G), родамин Б (RhB), кристаллический фиолетовый (CV) и  $F_{16}CuPc$ , также подтвердили, что настройка уровня Ферми с помощью двумерных металлов способствует повышению эффективности GERS. Таким образом, авторы ожидают, что представленные ре-

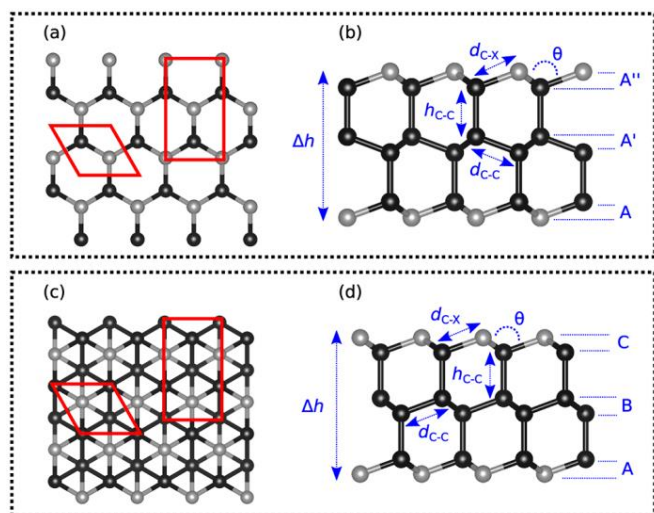
зультаты будут способствовать разработке высокочувствительных и надежных сенсоров для медицинских, экологических и промышленных приложений.

*М. Маслов*

*I. N.Zhang et al., ACS Nano 18, 8876 (2024).*

### Легированные искусственные двумерные алмазы

Двумерные алмазы привлекают особое внимание научного сообщества. В частности, это связано с зависимостью их электронных, механических и структурных характеристик не только от способа получения, но от внедренных в образцы атомов-допантов. Следует отметить, что “чистые” 2D-алмазы оказываются неустойчивыми в условиях окружающей среды, поэтому и возникает необходимость их легирования, например, атомами бора или азота. В результате образуются композитные структуры, которые могут быть в дальнейшем использованы в нанооптике и нанoeлектронике, а также в качестве селективных датчиков.



Схематичное изображение оптимизированных структур  $C_4X_2$  ( $X = B$  или  $N$ ): вид сверху (a) и сбоку (b) конфигурации  $AA'A''-C_4X_2$ , вид сверху (c) и сбоку (d) конфигурации  $ABC-C_4X_2$ . Черными и серыми сферами обозначены атомы C и X, соответственно. Красные линии обозначают границы элементарных ячеек. Условные элементарные ячейки (обозначены красным прямоугольником) используются для определения упругих свойств. Обозначения  $d_{c-x}$ ,  $h_{c-c}$ ,  $\Delta h$  и  $\theta$  соответствуют внутрислоевым и межслоевым расстояниям, толщинам структур и внутрислоевым валентным углам, соответственно.

В работе [1] авторы из Univ. de São Paulo (Бразилия) проанализировали различные свойства легированных бором или азотом 2D-алмазов. Эталонные системы вида  $C_4X_2$  ( $X = B$  или  $N$ ),

которые приведены на рисунке, обладают так называемой “сэндвичевой” структурой: незамещенный монослой графена размещается между допированными графеновыми листами. При этом процент атомов замещения во внешних слоях достигает 50%. Авторы рассмотрели четыре различные конфигурации ( $AA'A''-C_4N_2$ ,  $ABC-C_4N_2$ ,  $AA'A''-C_4B_2$ ,  $ABC-C_4B_2$ ), в которых все связи являлись ковалентными. Итоговые толщины образцов  $C_4N_2$  и  $C_4B_2$  составили 4.7 и 4.2 Å, соответственно.

С помощью теории функционала плотности в программе Quantum ESPRESSO исследователи определили набор структурных, механических и электронных характеристик материалов с использованием PAW-псевдопотенциалов и функционалов PBE и optB88-vdW. Последний использовали для учета слабого ван-дер-ваальсового взаимодействия. Для более точного определения величин диэлектрической щели они применили гибридный функционал HSE. Кроме того, в программе VASP авторы провели *ab initio* NVT-молекулярно-динамические расчеты с целью установления кинетической устойчивости рассматриваемых материалов. Исследователи рассмотрели температурный диапазон от 300 до 1000 K, шаг молекулярной динамики составил 1 фс, а полное время моделирования – 5 пс.

В результате расчет стандартных энтальпий образования подтвердил термодинамическую устойчивость 2D-алмазов. Анализ фононных спектров показал отсутствие мнимых частот, что свидетельствует об их динамической устойчивости. Данные молекулярно-динамических расчетов подтверждают, что при комнатной температуре (300 K) все конфигурации  $C_4X_2$  оказались стабильными. Однако уже при достижении 1000 K ковалентные связи в системе  $C_4B_2$  начинали разрываться, в то время как образцы  $C_4N_2$  не подверглись деградации и разрушению. Полученные результаты согласуются с дальнейшими вычислениями упругих характеристик. Материалы  $C_4X_2$  являются механически устойчивыми, поскольку они удовлетворяют критериям Борна, и обладают высокими значениями модуля Юнга и коэффициента Пуассона.

Электронные свойства у всех конфигураций  $C_4X_2$  являются схожими. Так, у всех рассматриваемых материалов на зонной структуре в Г-точке наблюдается характерный параболический вид энергетических зон. При этом эффек-

тивные массы электронов и дырок в материалах  $C_4N_2$  больше, чем у  $C_4B_2$ . Стоит отметить, что полученные величины эффективных масс сравнимы с фторированными и гидрированными 2D-алмазами. Расчет диэлектрических щелей показал, что ширина запрещенной зоны традиционного алмаза (4.57 эВ) меньше, чем у  $C_4N_2$  (5.4 – 5.6 эВ), но больше, чем у  $C_4B_2$  (1.6 – 2.0 эВ).

В итоге, принимая во внимание термодинамическую, динамическую и механическую устойчивость 2D-алмазов и их уникальные электронные и упругие характеристики, авторы рассчитывают, что эти материалы займут достойное место в качестве базовых элементов нано- и оптоэлектроники. Осталось дожидаться экспериментального подтверждения теоретических результатов.

*А. Грекова*

*I. B. Ipaves et al., ACS Appl. Electron. Mater. 6, 386 (2024).*

## КОНФЕРЕНЦИИ

*International Conference on “Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications” (PHENMA 2024), November 6 – 11, 2024, Indore India*

### Scope of the Conference

The scope of the conference includes the following topics:

**Materials:** Ferro-Piezoelectrics, Semiconductors, Superconductors, Environmental Materials, Composite, Ceramics, Thin Films, Nanomaterials, Advanced Materials for Additive Manufacturing, Metal Engineering Materials, Functionally Graded Materials etc.

**Synthesis & Processing:** Powder Processing, Processing Technologies, Piezoelectric Technologies, MEMS-Processing, etc.

**Characterization and Research Methods:** Material Design, Microstructure Properties, Chemical Properties, Physical Properties, Mechanical Properties, Strength Properties, Finite-Element Modeling, Mathematical Modeling, Physical Modeling, Physical Experiment, etc.

**Applications:** MEMS, Hetero-structures, Piezotransducers, Energy Harvesting, Superconductive Devices, Light-Emitting Diodes, Multimedia Communication, Fiber Reinforced Composites, Construction Health Monitoring, Lubricant and Tribology, etc.

**Underwater Technologies:** Underwater Communication, Marine Engineering, Power System, Ocean Energy, etc.

**Biomedical Engineering:** Medical Materials, Nanotechnology in Medicine, Medical Instrumentation, Physical Methods in Medicine, Waste, Biological Product Processing, etc.

**Industry and Management:** CAD/CAM/CAE Application, Industrial Instruments, EDM, Materials Machining, Machines, Design and Building Constructions, etc.

### Abstracts

The abstracts up to one page in WORD (\*.docx) should be submitted by e-mail before **May 1, 2024** to: [parinov\\_ia@mail.ru](mailto:parinov_ia@mail.ru) and duplicated to [iparinov@sfn.edu](mailto:iparinov@sfn.edu). Authors will be notified by **June 1, 2024** whether the contribution has been accepted. The format to be used is a text within one standard A4 page. A 12 point font should be used. The title appears centered. It is separated by an empty line from the author's name, also centered. The name of the author who presents the contribu-



tion should be underlined. An empty line separates the name from the author's affiliations and e-mail of corresponding author, also centered. The abstracts can include figures, tables and references. The Abstracts book will be published before conference.

The official language of the conference will be English.

Deadline for Abstracts: **May 1, 2024**

Notification of Acceptance: **June 1, 2024**

Preliminary registration of abstracts: **May 1, 2024**

Registration fee Payment: **November 1, 2024**

E-mail: [parinov\\_ia@mail.ru](mailto:parinov_ia@mail.ru)

Web-Site: <http://phenma2024.sfedu.ru/>

**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, А. Грекова, М. Маслов, А. Пятаков, З. Пятакова

Выпускающий редактор: И. Фурлетова