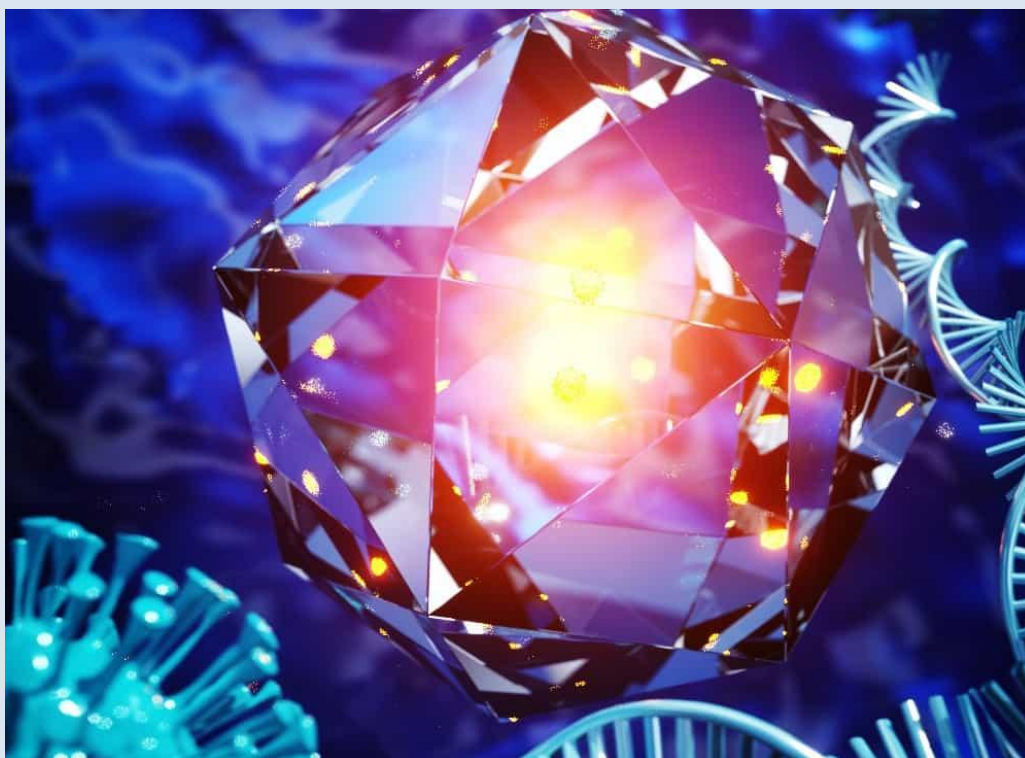


# Перст

Информационный бюллетень  
перспективные технологии  
наноструктуры сверхпроводники фуллерены

Том 31, выпуск 4

апрель 2024 г.



*Nanodiamond/physicsworld.com/ a/spin-enhanced-nanodiamonds  
-could-improve-disease-diagnosis/*

Черноголовка

В этом выпуске:

## НАНОМАТЕРИАЛЫ

### Летняя одежда в наноалмазах

Как обеспечить охлаждение тела человека в жаркую погоду? Оптимальный вариант заключается в выборе подходящей одежды. Развитие нанотехнологий и появление новых наноматериалов дают возможность создавать ткани с терморегулирующими свойствами. Учёные из RMIT Univ. (Австралия) [1] решили использовать наноалмазы, обладающие прекрасной теплопроводностью. Но как их внедрить в ткань? Исследователи предложили простой эффективный способ – с помощью электропрядения создать на ткани нановолокнистое покрытие с наноалмазами (рис. 1).

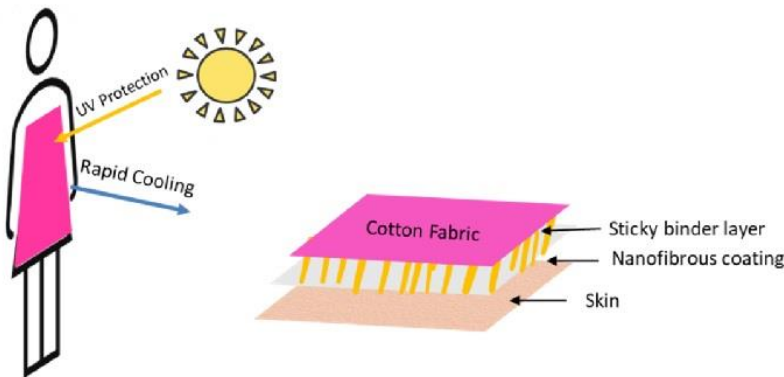


Рис. 1. Схематическое изображение хлопковой ткани с нановолокнистым слоем.

В экспериментах авторы [1] использовали образцы хлопковой ткани размером 30x30 см. Для закрепления волокон с одной стороны ткань покрыли клейким связующим слоем на основе полиуретана. Затем приготовили раствор полиуретана с наноалмазами и с помощью электропрядения сформировали нановолокнистое покрытие. Сторона с нановолокнами обращена к коже для отвода тепла от тела. Другая сторона остается непокрытой, чтобы снизить воздействие окружающей атмосферы.

Были изучены три образца хлопковой ткани CND-8,-10,-12 с разной концентрацией наноалмазов (цифры соответствуют объему раствора полиуретана с наноалмазами в мл). Для сравнения использовали образец с волокнистым слоем полиуретана без наноалмазов (CPU-10), образец только с клейким связующим слоем (CB) и контрольный образец из хлопковой ткани.

И далее ...

## МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

4 Снова об азотном топливе

## ФОТОНИКА

5 Световые пули обмениваются поляризацией при столкновениях

## МУЛЬТИФЕРРОИКИ

6 Динамический мультиферроик: магнит из вальсирующих ионов

## КОНФЕРЕНЦИИ

7 39-е Собрание по физике низких температур (Международная конференция). 3-7 июня 2024 года, Черногоровка, Московская область

7 Одиннадцатая Всероссийская конференция с международным участием "Топливные элементы и энергоустановки на их основе", 24-27 июня 2024 года, Черногоровка, Московская область

8 Международная Конференция "Наноглерод и Алмаз" (НиА'2024), 1-5 июля 2024 года, Санкт-Петербург, Россия

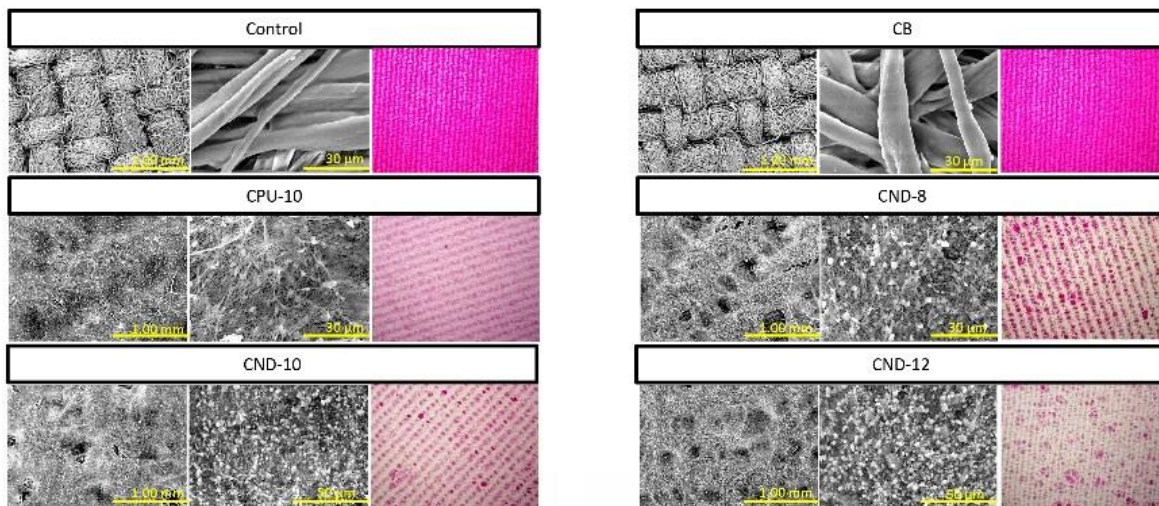


Рис. 2. SEM и оптические изображения образцов. Control - контрольный образец из хлопковой ткани, СВ - образец с клейким связующим слоем, CPU-10 - образец с волокнистым слоем из полиуретана без наноалмазов, CND-8,-10,-12 – образцы с разной концентрацией наноалмазов.

SEM изображения и оптические фотографии образцов представлены на рис. 2. На контрольном образце видны выступающие волокна, образец СВ с клейким связующим слоем имеет более гладкую поверхность. Остальные образцы покрыты нановолокнистым пористым слоем. При добавлении наноалмазов покрытие менее однородное, но наноалмазы по поверхности распределены равномерно. Видно, что их концентрация в образце CND-12 выше, чем в образце CND-8.

Для изучения тепловых свойств (теплового сопротивления, теплопроводности, температуропроводности, скорости нагрева и охлаждения и др.) использовали специальный прибор на основе горячей пластины, метод лазерной вспышки и ИК термографию. Для измерения теплопроводности образцы размещали стороной с покрытием к источнику тепла, с другой стороны находились детекторы температуры.

Результаты представлены на рис. 3. Видно, что у контрольного образца теплопроводность минимальная; наличие полиуретана ее несколько повышает (CPU-10), а все образцы с наноалмазами CND имеют высокую теплопроводность (чем больше наноалмазов, тем она выше).

Для определения скорости радиационного нагрева и охлаждения образцы помещали на определенном расстоянии от нагретой пластины, к которой была обращена сторона без покрытия. С другой стороны образцов находились датчики температуры. Ткань с наноалмазами показала более высокую скорость охлаждения, чем остальные образцы. Результаты

ИК термографии подтвердили и уточнили полученные выводы.

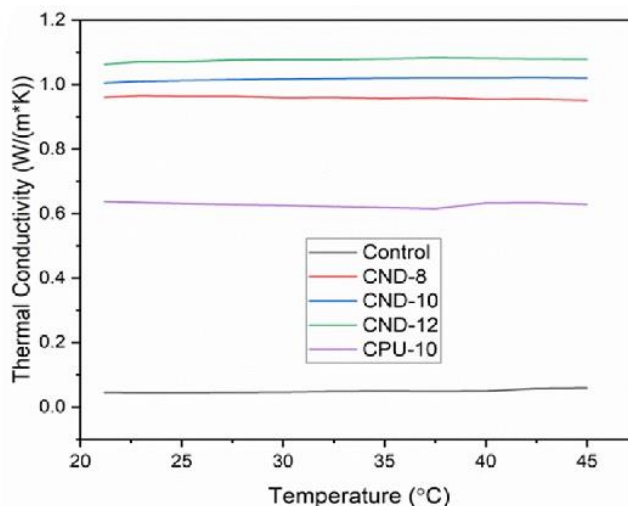


Рис. 3. Теплопроводность образцов, помещенных стороной с покрытием к источнику тепла.

Далее были проведены эксперименты в условиях, близких к реальным – на воздухе под действием солнечного излучения. Образцы ткани помещали на материал, имитирующий кожу человека (сторона без покрытия обращена к солнцу), с помощью сенсора регистрировали температуру “кожи” (рис. 4). Результаты показали, что при воздействии солнечного излучения ткань, содержащая наноалмазы, быстрее отдает тепло в окружающую среду. Кроме того, авторы [1] провели исследования поглощения УФ излучения солнца и выяснили, что образцы ткани с наноалмазами обеспечивают отличную защиту от этого воздействия. Остается проверить долговечность такой ткани, особенно при многократной стирке.

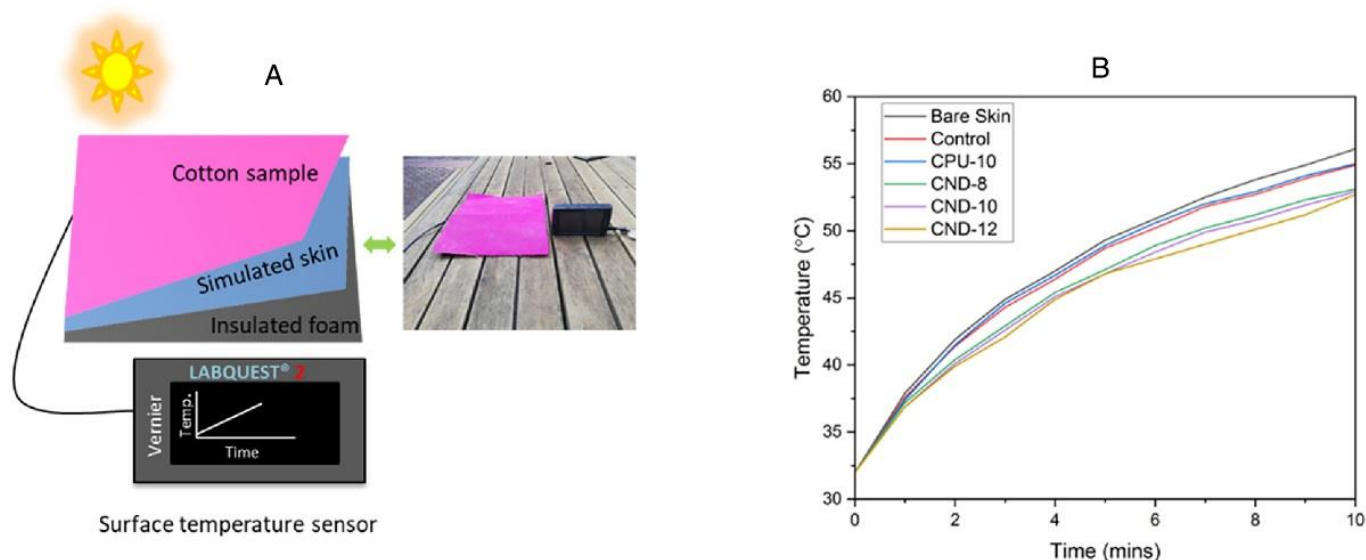


Рис. 4. Температура “кожи” в условиях, близких к реальным (А) и покрытой разными образцами ткани (В).

Авторы работы [1] продемонстрировали, что метод электропрядения позволяет получить на ткани волокнистое покрытие с наноалмазами. Такое покрытие, нанесенное с одной стороны ткани, повышает теплопроводность и обеспечивает более эффективную теплопередачу, а также улучшает защиту от УФ излучения, что важно для летней одежды. Это одно из первых исследований, направленных на создание умной ткани с наноалмазным покрытием. Результаты, несомненно, представляют интерес для текстильной промышленности.

О. Алексеева

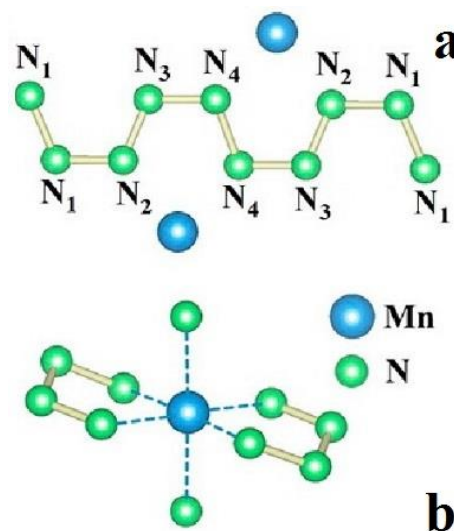
1. A.Rehman et al., *Polym. Adv. Technol.* 35e 6222 (2024).

## МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

### Снова об азотном топливе

Полимерный азот, построенный с помощью одинарных ковалентных связей, является типичным представителем семейства азотосодержащих высокоэнергетических материалов (high-energy-density material, HEDM). Высвобождение существенной по химическим меркам энергии происходит как раз за счет перехода в привычный молекулярный азот с образованием прочных тройных ковалентных связей. Так, для чисто азотных систем энерговыделение может превышать 2 эВ/атом, потому они часто рассматриваются в качестве топливных элементов с высокой плотностью запасаемой энергии. Однако получить, а затем и стабилизировать такие соединения нелегко, для этого кроме высоких давлений и температур нередко требуется присутствие особых катализаторов.

Ученые из Jilin Univ. и Zhengzhou Univ. (Китай) [1] как раз в таких экстремальных условиях при помощи алмазной наковальни синтезировали новый полинитрид марганца  $MnN_4$  с двусторонними транс-цис цепочками  $[N_4]_n$  (см. рис.).



Атомная структура полинитрида марганца  $P-1$   $MnN_4$ : квазиодномерные зигзагообразные азотные цепочки  $[N_4]_n$ . Атомы азота для четырех неэквивалентных позиций Вайкоффа отмечены от  $N_1$  до  $N_4$  (сверху); два “неплоских” пятичленных металлоцикла  $Mn[N_4]$  (снизу). Синие и зеленые шарики представляют собой атомы Mn и N, соответственно.

Экспериментальный анализ (рамановская спектроскопия, рентгеноструктурный анализ при переменных давлениях) и теоретические расчеты с помощью теории функционала плотности свидетельствуют, что  $MnN_4$  успешно стабилизируется в диапазоне давлений 56–127 ГПа и обладает  $P-1$  симметрией. Подробная оценка химического связывания показывает, что перенос заряда от атома марганца к азотной цепоч-

ке составляет около  $1.2e$ , и атомы азота в такой квазиодномерной структуре соединены прочными ковалентными связями. Оказывается, что в полинитриде  $MnN_4$  атомы марганца координированы шестью атомами азота в виде искаженного октаэдра (см. рис. а). При этом они расположены в различных позициях Вайкоффа. Так два атома  $N_4$  в сочетании с соседними  $N_3$  и  $N_2$  (см. обозначения на рис. а,b) формируют пятичленный металлоцикл  $Mn[N_4]$ . Любопытно, что при удалении марганца атомы азота независимо образуют зигзагообразные цепочки  $[N_4]_n$ . Длины ковалентных связей между атомами азота при 108 ГПа составляют от 1.24 до 1.43 Å. Это указывает на то, что четыре связи N–N относятся к одинарным, а одна – к двойным. По оценкам авторов высокая массовая доля азота (50.45%) в  $MnN_4$  свидетельствует о высокой энергоэффективности материала. Так, массовая плотность энергии составляет 2.97 кДж/г, а объемная – 13.84 кДж/см<sup>3</sup>, что больше, чем у большинства известных полинитридов. Модуль объемного сжатия  $MnN_4$  составляет около 255 ГПа, что также превышает величины, характерные для других полинитридов переходных металлов, таких как  $FeN_2$  (250 ГПа),  $TaN_5$  (205 ГПа) и  $ZnN_4$  (169 ГПа), и позволяет отнести его к твердым материалам.

В конечном итоге авторы убеждены, что  $MnN_4$  вполне можно рассматривать как НЕМД, а предложенная ими методика его синтеза при соответствующей доработке поможет получить и другие высокоэнергетические фазы немолькулярного азота.

*М. Маслов*

*I. Y. Zhang et al., J. Phys. Chem. Lett. 15, 4256 (2024).*

## ФОТОНИКА

### **Световые пули обмениваются поляризацией при столкновениях**

Световые пули – сверхкороткие импульсы света, образующиеся в нелинейной среде за счет явления самофокусировки – активно применяются для нелинейно-оптических исследований с высоким пространственным и временным разрешением, дистанционных методов широкополосного зондирования, а также для передачи световой энергии высокой мощности на большие расстояния. Они характеризуются сильной локализацией световой энергии и широким спектром.

Световая пуля представляет собой уединенную волну – солитон, который по ряду параметров похож на движущуюся частицу. Солитоны могут сталкиваться между собой, ударяясь подобно бильярдным шарам, или проходить друг сквозь друга, обмениваясь энергией. До недавнего времени исследования ограничивались взаимодействием солитонов с одной поляризацией. В работе В.П. Рубана из Института теоретической физики им. Л.Д.Ландау РАН [1], опубликованной в апрельском номере “Письма в ЖЭТФ” теоретически исследован процесс столкновения двух световых пуль различной поляризации.

Автор разработал трехмерную модель взаимодействия двух солитонов в многомодовом оптическом волокне с градиентным распределением показателя преломления. При определенном соотношении величин нелинейности и дисперсии решение в виде солитонов является устойчивым. Если рассмотреть не линейные, а круговые поляризации, то уравнения процесса взаимодействия солитонов становятся проще, и описание процесса может в итоге быть сведено к ньютоновской динамике.

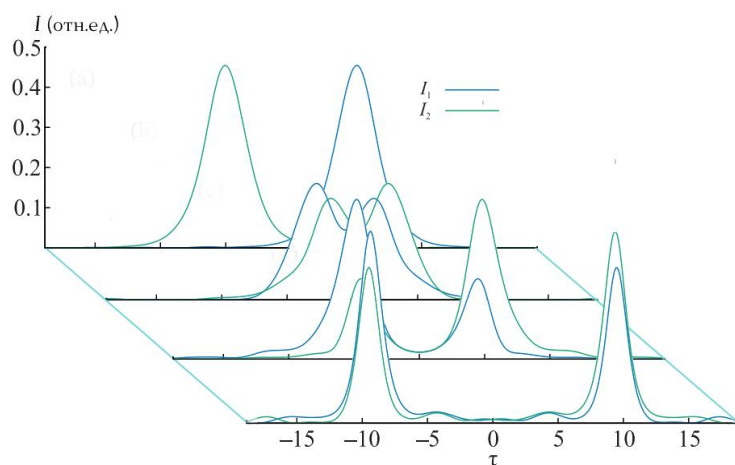


Рис. 1. Лобовое столкновение двух световых пуль одинаковой интенсивности, но противоположных круговых поляризаций ( $I_1$  и  $I_2$ ). Этапы взаимодействия и перераспределение поляризации. (адаптировано из статьи [1])

На рисунке показаны результаты расчета процесса столкновения двух оптических пуль противоположной круговой поляризации. При взаимодействии друг с другом световые пули “обмениваются” поляризациями: обе после взаимодействия имеют две компоненты круговой поляризации. Подбирая поляризацию и скорость сближения взаимодействующих световых пуль, можно “на выходе” получить любую заданную поляризацию света. В зависимости от

скорости сближения световых пульс и их поляризаций столкновения могут быть как упругими, так и неупругими.

Решениями уравнений динамики световых пульс также были случаи, когда солитоны отталкиваются друг от друга, почти не меняя поляризацию. Полное численное моделирование пространства возможных случаев взаимодействия солитонов в данной работе не было проведено, это сделать в рамках одной статьи невозможно, но уже по тем результатам, которые есть, видно, что включение поляризации в рассмотрение динамики столкновения солитонов открывает непаханое поле возможностей.

З. Пятакова

1. В.П.Рубан, *Письма в ЖЭТФ* **119**, 579 (2024).

## МУЛЬТИФЕРРОИКИ

### *Динамический мультиферроик: магнит из вальсирующих ионов*

Спиральные мультиферроики, в которых наличие ненулевой производной по координате от намагниченности приводит к возникновению макроскопической электрической поляризации – довольно частый сюжет статей по магнитоэлектричеству. Однако мыслим и “дуальный” сюжет – возникновение намагниченности от вращающихся по кругу электрических диполей, в нем роль магнитных векторов играет электрическая поляризация, а градиента – производная по времени. Как учат нас классики философии, всё, что разумно, имеет право на существование, что в переводе на физический язык означает: существуют те эффекты, которые разрешает симметрия. Надо только подобрать подходящий объект, на котором данный эффект будет заметно проявляться и доступные экспериментатору способы его детектирования.

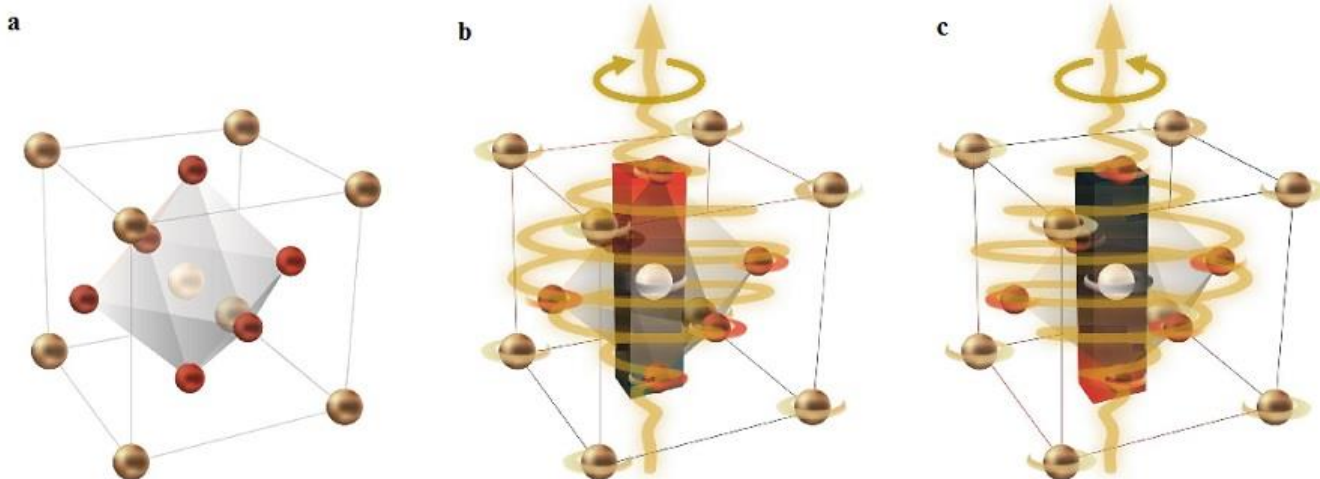


Рис. 1. Динамический мультиферроик титанат стронция: а - невозмущенная структура перовскита  $\text{SrTiO}_3$ ; б - возникновение циркулярного движения ионов под действием терагерцового импульса излучения с круговой поляризацией; в - изменение намагниченности при смене круговой поляризации. Диаметры “орбит” ионов сильно преувеличены в иллюстративных целях и не превышают 1% от размера элементарной ячейки.

И то и другое удалось международной команде ученых из университетов Италии, Швеции и Японии [1]: в качестве такого “податливого” вещества они выбрали титанат стронция, причиной, вызывающей явление, служили импульсы терагерцового излучения, а детектирование возникающей намагниченности осуществляли с помощью магнитооптического эффекта Керра.

Перовскит титанат стронция – материал замечательный во многих отношениях. Его называют “виртуальным сегнетоэлектриком”, поскольку кристаллическая решетка в нем характеризуется сегнетоэлектрической неустойчиво-

стью и уже готова к фазовому переходу, но квантовые флуктуации препятствуют сегнетоэлектрическому упорядочению. Эта мягкая мода при комнатной температуре соответствует частоте 2.7 ТГц, уменьшаясь до 0.2ТГц при гелиевых температурах, чем и обусловлен выбор авторами публикации [1] терагерцовых импульсов в качестве накачки.

Важно также подчеркнуть, что динамический мультиферроик как явление, не сводится к уравнению Максвелла для тока смещения, поскольку намагниченность в титанате стронция пропорциональна векторному произведению

электрической поляризации на ее производную по времени, что физически означает движение ионов в кристаллической решетке по кругу.

Авторы [1] были приятно удивлены, что возникающая намагниченность, измеренная с помощью эффекта Керра, составляла 0.1 магнетона Бора на ячейку, что совсем немало (на четыре порядка выше расчетной). В попытке объяснить это расхождение, они, по не вполне понятным причинам, отринули обратный эффект Фарадея (возникновение намагниченности под действием циркулярно-поляризованного излучения), а прибегли к эффекту, обратному эффекту Эйнштейна-де-Гааза, также называемому эффектом Барнетта – возникновению намагниченности под действием механического вращения. Хотя в случае ионов, “вальсирующих” в титанате стронция, не возникает вращения тела как целого, тем не менее, по утверждению авторов [1], “имеется когерентное движение фононов”. В результате такого “фононного эффекта Барнетта” орбитальный момент фононов передается полному моменту импульса  $J$  электронов, что приводит к усилению эффекта примерно в такое число раз, в какое масса нуклона больше массы электрона. Тут еще надо учесть, что в ядре атома примерно поровну протонов и нейтронов, и каждому электрону в нейтральном атоме соответствует целых два нуклона с массой в 2000 раз превышающей массу электрона – так, мол, и набираются недостающие 4 порядка.

*А. Пятаков*

*1. M. Basini et al., Nature 628, 534 (2024).*

## **КОНФЕРЕНЦИИ**

**39-е Собрание по физике низких температур (Международная конференция).**

**3 - 7 июня 2024 года, г. Черногловка, Московская область**

Собрание по физике низких температур регулярно проводится в нашей стране, начиная с 50-х годов, и является наиболее представительным форумом в данной области отечественной науки, представленной именами нобелевских лауреатов П.Л. Капицы, Л.Д. Ландау, В.Л. Гинзбурга и А.А. Абрикосова. В настоящее время значительная часть исследований физических свойств вещества проводится с использованием низких температур, так как в этом случае удается существенно уменьшить влияние тепловых возбуждений и наблюдать целый ряд принципиально новых явлений. В частности,

**ПерсТ, 2024, том 31, выпуск 4**

по этой причине с данной областью науки связаны такие фундаментальные открытия XX века, как явления сверхтекучести и сверхпроводимости. Фактически, физика низких температур в настоящее время в значительной степени определяет развитие современных представлений о строении вещества. Большинство направлений физики низких температур является фундаментальной основой для развития таких областей как разработка перспективных материалов и создание новых устройств для энергетики, микроэлектроники, приборостроения и телекоммуникаций. Основной целью Собрания является представление новых экспериментальных и теоретических результатов в физике низких температур.

### **Направления исследований:**

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

Сайт: <http://www.issp.ac.ru/fnt2024>

**Одиннадцатая Всероссийская конференция с международным участием “Топливные элементы и энергоустановки на их основе”, 24-27 июня 2024 года, Черногловка, Московская область**

### **Тематика конференции**

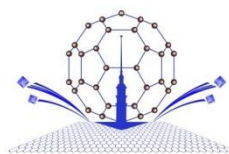
- Анионные проводники. Изготовление газоплотных пластин анионных проводников. Тонкопленочные технологии.
- Катодные материалы для ТОТЭ. Получение и свойства. Новые материалы со смешанной ионно-электронной проводимостью. Исследование самодиффузии анионов кислорода в материалах с ионно-электронной проводимостью.
- Анодные материалы для ТОТЭ. Структура и свойства композиционных анодов. Серотолерантные аноды.
- Процессы переноса заряда и протекания окислительно-восстановительных реакций на

электродах топливных элементов. Изучение механизмов деградации и методы увеличения ресурса топливных элементов.

- Мембранно-электродные блоки. Технология нанесения многослойных электродов. Подготовка паст.
- Дизайн ячеек ТОТЭ. Технологии изготовления ячеек и их характеристики.
- Высокотемпературные клеи и герметики.
- Защитные покрытия. Отработка режимов нанесения. Длительные ресурсные испытания.
- Расчет конструкции и изготовление токовых коллекторов.
- Расчет конструкции стека, включая моделирование газораспределения, тепловыделения и упругих напряжений. Моделирование электрохимических процессов.
- Энергоустановки на ТОТЭ.
- Твердополимерные электролиты и мембраны. Новые материалы с высокой протонной проводимостью.
- Процессы переноса заряда в протон-обменных мембранах, кроссовер водорода, кислорода и азота.
- Высокоэффективные катализаторы для водородно-воздушных топливных элементов. Катализаторы, толерантные к СО, катализаторы для окисления спиртов.
- Методы исследования материалов, компонентов единичных топливных элементов и стеков. Импедансная спектроскопия.
- Энергоустановки на топливных элементах с протонообменной мембраной.
- Топливные процессоры для производства синтез-газа. Конверсия спиртов и углеводов.
- Методы получения водорода и материалы для хранения водорода.

- Щелочные топливные элементы и ЭУ на их основе.
- Гибридные энергоустановки.
- Экономические оценки эффективности использования энергоустановок на базе топливных элементов и их себестоимости.

Сайт: <http://www.issp.ac.ru/fuelcell2024>



**Международная конференция “Наноклерод и Алмаз” (НиА’2024), 1 - 5 июля 2024, Санкт-Петербург, Россия**

#### **Тематики конференции:**

Доклады и сообщения, включенные в программу конференции, будут распределены по следующим тематическим секциям:

- алмазы;
- углеродные нанотрубки;
- графен и его производные;
- углеродные наноструктуры и фуллерены;
- применения углеродных наноструктур и алмазов.

В рамках конференции НиА’2024 пройдет однодневная (3 июля 2024 года) Школа-конференция молодых учёных “Наноклерод и Алмаз. Получение, свойства, применения и методы диагностики”.

Рабочий язык Конференции и Школы - русский.

E-mail: [ncd2024@mail.ioffe.ru](mailto:ncd2024@mail.ioffe.ru)

Web site: <https://ncd2024.ioffe.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, М. Маслов, А. Пятаков, З. Пятакова

Выпускающий редактор: И. Фурлетова