

В этом выпуске:

## СВЕРХПРОВОДНИКИ

### Конкуренция псевдощели и сверхпроводимости в $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$

За последние годы широкое распространение получила точка зрения, что псевдощелевая фаза в купратных ВТСП характеризуется нарушением электронной симметрии, не связанной со сверхпроводимостью (возможно, зарядовой). В работе [1] на температурных зависимостях ARPES-спектров оптимально допированного ВТСП  $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$  с  $T_c = 98$  К обнаружена сингулярность спектрального веса при  $T = T_c$  (рис. 1), которую авторы объяснили конкуренцией псевдощелевого и сверхпроводящего параметров порядка (рис. 2). По-видимому, сверхпроводящее упорядочение каким-то образом влияет на псевдощель.

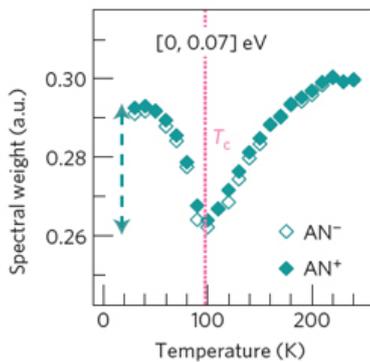


Рис. 1. Температурные зависимости спектрального веса для двух импульсов вблизи антиузловой зоны Бриллюэна.

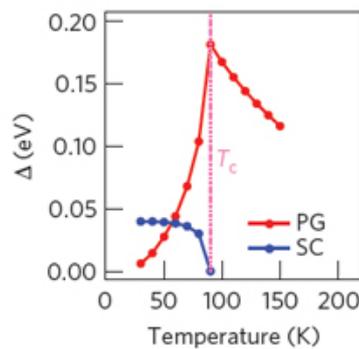


Рис. 2. Температурные зависимости псевдощелевого (PG) и сверхпроводящего (SC) параметров порядка (расчет).

1. M.Hashimoto et al., *Nature Mater.* 14, 37 (2015).

### Колоссальный термомагнитный отклик в экзотическом сверхпроводнике $URu_2Si_2$

В большинстве сверхпроводников флуктуации параметра порядка, обусловленные наличием несконденсированных куперовских пар выше  $T_c$ , хорошо описываются теориями гауссовых флуктуаций. На эксперименте информацию о сверхпроводящих флуктуациях дает эффект Нернста, который заключается в возникновении электрического поля  $E(\parallel y)$ , перпендикулярного градиенту температур  $\nabla T(\parallel x)$  и магнитному полю  $H(\parallel z)$ . В работе [1] (Япония, США) сообщается о наблюдении колоссального сигнала Нернста в тяжелофермионном сверхпроводнике  $URu_2Si_2$  с  $T_c = 1.45$  К. Коэффициент Нернста на шесть порядков больше, чем должно быть для гауссовых флуктуаций, и увеличивается с ростом времени рассеяния носителей на примесях, что также не согласуется со стандартными моделями. Авторы объясняют полученные результаты новым типом флуктуаций, связанных с нарушением симметрии параметра

И далее ...

## ГРАФЕН

- 2 Увеличение модуля упругости дефектного графена

## КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

Кубиты почтой

## СПИНТРОНИКА

- 3 Спиновый полевой транзистор с полным электрическим контролем

- 4 Интеркалированные усилители в графене

## МУЛЬТИФЕРРОИКИ

- 4 “Есть такое в свете чудо”: фотоиндуцированные эффекты в мультиферроиках

## НАНОТЕХНОЛОГИИ

- 5 Синтез кремнезёмных реплик иерархических биологических структур

## ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

- 7 Цепочки в нанотрубках

## СИНХРОТРОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

- 8 Определение парциальных вкладов колебаний атомов железа в FeSi

## НОВЫЕ ИЗДАНИЯ

9

## КОНФЕРЕНЦИИ

9

сверхпроводящего порядка относительно обращения времени (хиральная фаза или фаза Берри).

*I. T. Yamashita et al., Nature Phys. 11, 17 (2015).*

## ГРАФЕН

### Увеличение модуля упругости дефектного графена

Ожидается, что легкий и необычайно прочный графен может найти практическое применение в “гибкой электронике”, а также использоваться в качестве “присадки” для улучшения механических свойств различных материалов. Вопрос: не мешают ли этому дефекты структуры, неизбежно образующиеся в графене на стадии его синтеза? В ряде недавних теоретических работ было показано, что продольный модуль Юнга графена  $E_{2D}$  уменьшается при увеличении концентрации вакансий  $n_V$  – в полном соответствии с “физической интуицией”. Однако авторы статьи [1] (Испания, Нидерланды), используя атомный силовой микроскоп (рис. 1a) и облучая графен ионами  $Ar^+$  с энергией 140 эВ (рис. 1b), получили прямо противоположный результат: резкий рост  $E_{2D}$  при  $n_V \sim 0.2\%$  (рис. 2), лишь затем переходящий в падение (рис. 3a).

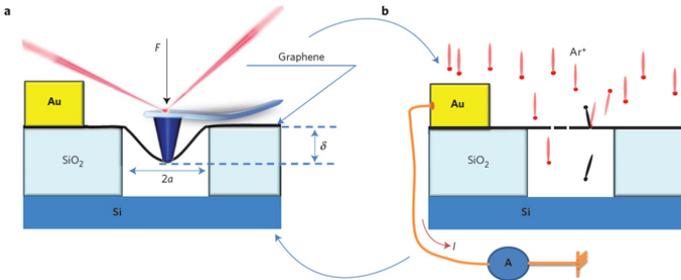


Рис. 1. а – Схема устройства для определения механических характеристик графеновых мембран; б – контролируемое увеличение концентрации структурных дефектов посредством ионного облучения.

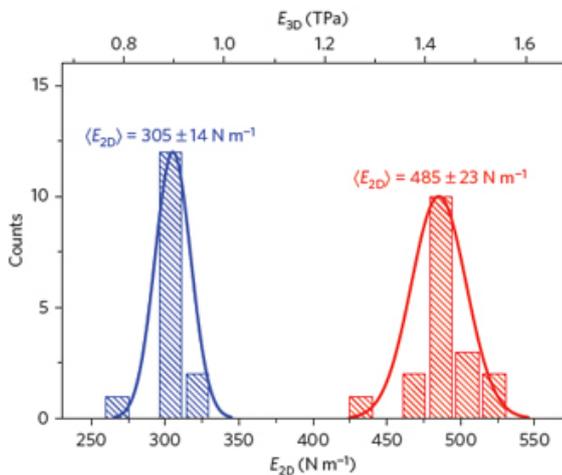


Рис. 2. Гистограмма распределения  $E_{2D}$ , полученная по результатам нескольких измерений до (слева) и после (справа) облучения. Концентрация дефектов  $4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ . Чтобы облегчить сравнение с 3D материалами, на верхней горизонтальной оси приведены величины  $E_{2D}$ , деленные на межслоевое расстояние в графене (0.34 нм).

По их мнению, причина такого необычного поведения дефектного графена заключается в подавлении поперечных флуктуаций дефектами. Напротив, устойчивость графена к разлому при увеличении  $n_V$  быстро падает (рис. 3b), в соответствии со стандартными континуальными моделями.

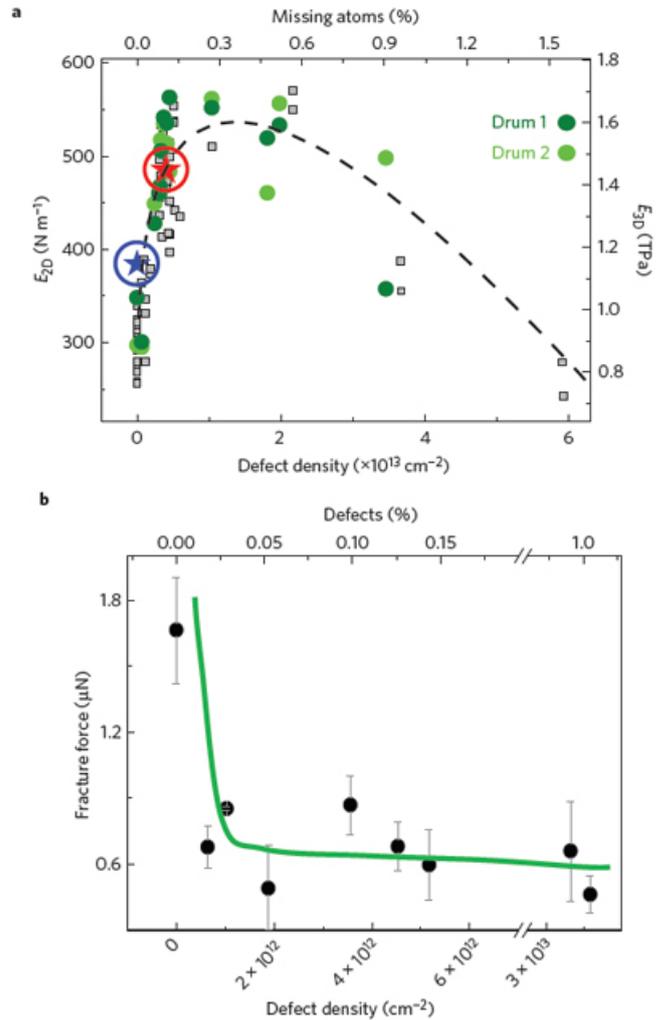


Рис. 3. Модуль Юнга (а) и предельная сила для разлома (б) как функции концентрации дефектов.

*Л. Опенов*

*I. G. Lopez-Polin et al., Nature Phys. 11, 26 (2015).*

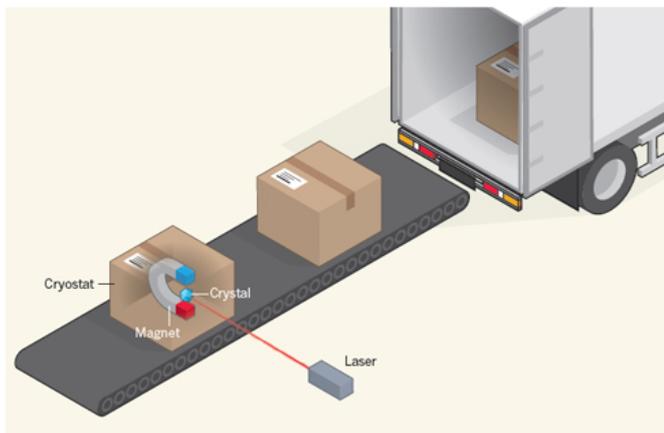
## КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

### Кубиты почтой

Считается, что для передачи квантовой информации на большие расстояния лучше всего подходят фотоны – быстрые и слабо взаимодействующие с окружением частицы. Однако и они не идеальны: рассеиваются, дифрагируют, поглощаются, в результате чего портятся их хрупкие суперпозиционные состояния. Это приводит к ограничениям на предельную дальность передачи информации: около 200 км по оптоволокну и 140 км по открытому пространству – меньше, чем от Москвы до Питера. В работе [1] (Австралия, США, Франция, Германия, Новая Зеландия) показано, что при  $T = 2 \text{ К}$  и  $H = 1 \text{ Тл}$  ядерные спины примесей  $^{151}\text{Eu}^{3+}$  в ортосиликате кремния сохраняют когерентность очень долго – в течение  $(370 \pm 60) \text{ мин}$ . Поэтому для пе-

*ПерсТ, 2015, том 22, выпуск 1/2*

редачи закодированной в ансамбле таких спинов квантовой информации оказывается проще (и надежнее) физически переместить содержащий эти спины кристалл, нежели прибегать к услугам посредников-фотонов, благо сравнительно компактные рефрижераторы и источники магнитного поля в нашем распоряжении имеются. Если пофантазировать, то дальнейшее уменьшение скорости декогерентизации кубитов и повышение рабочей температуры до комнатной может сделать возможным появление “квантовых паспортов” и даже “квантовых денег” [2].



Квантовая почтовая служба. Квантовая информация записывается в коллективные возбуждения ядерных спинов кристалла  $^{151}\text{Eu}^{3+}$ , после чего этот кристалл перемещается в пункт назначения наземным или воздушным транспортом.

Л. Опенов

1. M.Zhong et al., *Nature* **517**, 177 (2015).

2. J.J.L.Morton, K.Mølmer, *Nature* **517**, 153 (2015).

## СПИНТРОНИКА

### Спиновый полевой транзистор с полным электрическим контролем

Идея создания полевого транзистора на основе не зарядов, а спинов возникла около 25 лет назад. Для инъекции спиновых токов в полупроводники, управления этими токами и их регистрации первоначально предполагалось использовать ферромагнитные материалы или внешние магнитные поля. Однако этот подход не привел к успеху из-за низкой эффективности инъекции и проблем с интеграцией в большие схемы. В работе [1] (Тайвань, Великобритания) показано, что замена ферромагнитных электродов на квантовые точечные контакты (КТК) позволяет осуществлять полный контроль полупроводникового спинового вентиля исключительно электростатическими средствами (рис. 1а). Каждый КТК представляет собой короткий узкий канал в двумерном электронном газе и формируется при подаче отрицательного напряжения на пару верхних электродов (рис. 1б). Если потенциалы этих электродов различаются, то возникает локальное электрическое поле, которое (вследствие спин-орбитального взаимодействия) играет роль эффективного магнитного поля для электронных спинов. Его направление можно изменить на противоположное, просто поменяв знак разности потенциалов на электродах. Инжектируемые электроны становятся полностью поляризованными по спину, когда уровень Ферми в контактах опускается ниже точки пересечения спиновых подзон в КТК (рис. 1с).

тивного магнитного поля для электронных спинов. Его направление можно изменить на противоположное, просто поменяв знак разности потенциалов на электродах. Инжектируемые электроны становятся полностью поляризованными по спину, когда уровень Ферми в контактах опускается ниже точки пересечения спиновых подзон в КТК (рис. 1с).

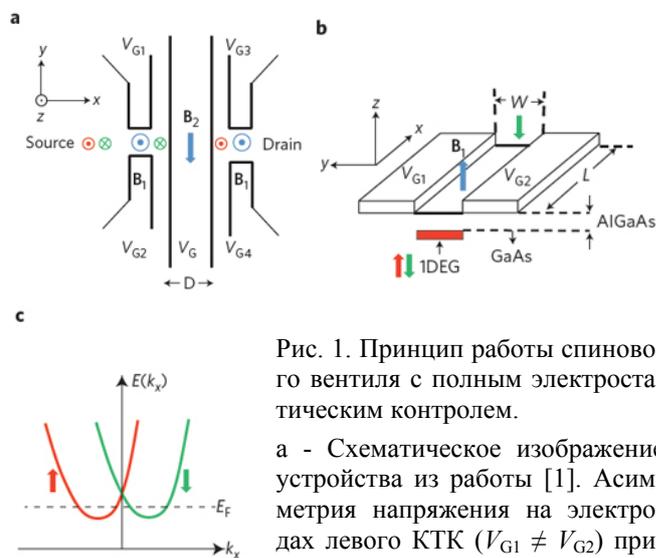


Рис. 1. Принцип работы спинового вентиля с полным электростатическим контролем.

а - Схематическое изображение устройства из работы [1]. Асимметрия напряжения на электродах левого КТК ( $V_{G1} \neq V_{G2}$ ) приводит к тому, что в канал между двумя КТК инжектируются только электроны со спином “вниз” (зеленый кружок с крестиком). Эффективное магнитное поле  $\mathbf{B}_1$  в каждом КТК направлено “вверх” (синие кружки с точками). В области  $D$  спины прецессируют под действием эффективного магнитного поля  $\mathbf{B}_2$ , обусловленного спин-орбитальным взаимодействием Рашбы. Вследствие такой прецессии спиновый ток может достигать как максимума, так и минимума. Данный рисунок соответствует случаю, когда после прохождения среднего канала направление спиновой поляризации меняется на противоположное, в результате чего спины “вверх” в правом КТК (красный кружок с точкой) заблокированы, и ток минимален.

б - КТК с электростатическим ограничением. При подаче на электроды отрицательного напряжения  $V_{G1}$ ,  $V_{G2}$  в двумерном электронном газе на границе AlGaAs/GaAs формируется узкая перемычка с одномерным электронным газом (1DEG, красный цвет).

с - Асимметрия спин-орбитального взаимодействия в латеральном направлении снимает вырождение дисперсии электронов со спинами “вверх” и “вниз” (красный и зеленый цвет, соответственно) в узкой части КТК. Если уровень Ферми  $E_F$  в контактах (штриховая линия) лежит ниже точки пересечения спиновых подзон, то в полупроводниковый канал между двумя КТК инжектируются только электроны со спином “вниз”.

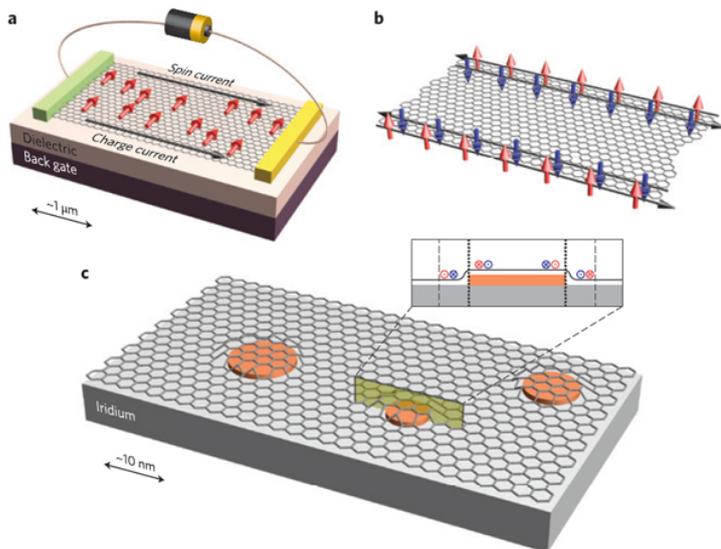
Спиновые транзисторы могут найти применение в датчиках, спиновых фильтрах и интерферометрах, спинтронных устройствах, квантовой информатике.

По материалам заметки “Closer to an all-electric device”, M.Cahay, *Nature Nanotech.* **10**, 21 (2015).

1. P.Chuang et al., *Nature Nanotech.* **10**, 35 (2015).

## Интеркалированные усилители в графене

Благодаря большой (несколько микрон) длине спиновой диффузии графен может найти применение в спинтронике. Однако создание спин-поляризованных токов (рис. 1a,b) – лишь полдела. Этими токами надо еще и управлять. Роль “эффективного менеджера” здесь могло бы сыграть спин-орбитальное взаимодействие (СОВ), но оно в графене слишком слабое. В работе [1] (Испания, Россия) показано, что интеркаляция монослойных островков Pb между графеном и подложкой Ir(111) приводит к резкому усилению СОВ и его пространственной модуляции (рис. 1c).



а – Полевой транзистор на основе графена с ферромагнитными электродами, обеспечивающими инжекцию и транспорт зарядового и спин-поляризованного токов.

б – Спин-поляризованные топологические состояния на зигзагообразных границах графеновой наноленты. Каждая граница имеет два канала, в которых электроны с противоположными проекциями спинов двигаются в противоположных направлениях.

с – Схематическое изображение графенового образца с интеркалированными свинцовыми островками из работы [1]. На вставке – поперечное сечение вдоль одного из островков.

Диаметр островков составлял от 4 до 12 нм, а среднее расстояние между ними – около 35 нм. Пространственная неоднородность интенсивности СОВ генерирует псевдомагнитные поля, что ведет к конфайнменту дираковских фермионов и появлению Ландау-подобных уровней в плотности электронных состояний.

По материалам заметки  
“Intercalated boosters”,  
M.Kralj, *Nature Phys.* **11**, 11 (2015).

1. F.Calleja et al., *Nature Phys.* **11**, 43 (2015).

## МУЛЬТИФЕРРОИКИ

### “Есть такое в свете чудо”: фотоиндуцированные эффекты в мультиферроиках

Феррит висмута в области магнитоэлектрических явлений занимает такое же место, как кремний в полупроводниковой электронике: большая часть исследований и разработок крутятся вокруг него. Ученые из Southwest Univ. (Китай) получили новую модификацию феррита висмута – в виде тонких пластинок, обладающих удивительными свойствами – они размагничиваются и одновременно электрически поляризуются в свете обыкновенной лампы накаливания [1].

Пластинки толщиной 20 нм имели правильную форму квадрата размером несколько микрон (рис. 1a). Пластинки проявляли ферромагнитные свойства с необычно большой для феррита висмута намагниченностью насыщения около 25 Гс (в объемных образцах магнитный момент либо полностью скомпенсирован за счет спиновой модуляции, либо соответствует слабому ферромагнитному состоянию). Под воздействием белого света намагниченность уменьшалась на десятки процентов при освещенности в десятки милливатт на квадратный сантиметр, а электрическая поляризация и вовсе возрастала на сотни процентов. Под действием света менялись также магнитоэлектрические свойства образца.

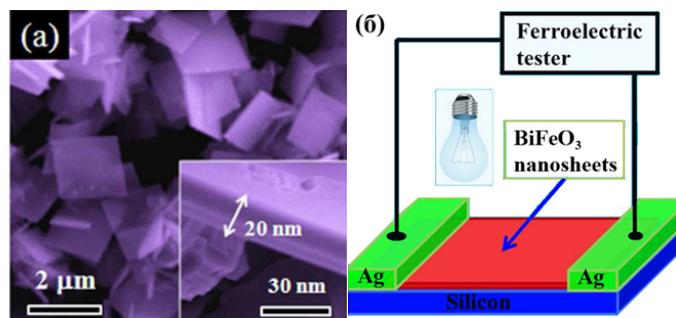


Рис. 1 Пластинки  $\text{BiFeO}_3$  наноразмерной толщины: а – изображение нанопластинок феррита висмута в сканирующем зондовом микроскопе; б – схема измерения сегнетоэлектрических свойств пластинок феррита висмута.

Авторы [1] проверили температурную зависимость намагниченности и электрической поляризации полученных образцов, чтобы удостовериться, что данные явления не сводятся к банальному нагреву пластинок. Действительно, намагниченность даже при нагреве до 200 градусов Цельсия изменялась всего на 12%, а поляризация должна была бы падать, а не расти. Как полагают исследователи, причиной данных явлений является улавливание свободных носителей зарядов, возникших вследствие внутреннего фотоэффекта сегнетоэлектрическими доменными границами, что увеличивает их подвижность. Так объясняется фотоиндуцированное изменение сегнетоэлектрических свойств феррита

висмута, а воздействие света на магнитные свойства, как полагают авторы [1], опосредовано магнитоэлектрическим эффектом. Здесь, впрочем, следует соблюдать осторожность, так как в статье ничего не говорится о роли кремниевой подложки, на которой происходили измерения (рис. 1б), а это следовало бы проверить. В любом случае, сами по себе эффекты, наблюдаемые при комнатной температуре в системе, изображенной на рис. 1б, достаточно сильны, и могут поэтому представлять практический интерес.

А. Пятаков

*I. B. Sun et al., J. Phys. Chem. C 118, 18814 (2014).*

## НАНОТЕХНОЛОГИИ

### Синтез кремнезёмных реплик иерархических биологических структур

Использование электронной микроскопии (ЭМ) в биологии позволяет получать важную информацию о структуре клеток и тканей. Приборы и методы исследований постоянно совершенствуются, однако способы подготовки биологических образцов остаются практически неизменными. Это специальные, довольно сложные процедуры, необходимые для сохранения структуры биологических объектов в особых условиях (высокий вакуум и воздействие электронов). Образцы должны быть обезвожены или заморожены. Традиционный метод подготовки при комнатной температуре заключается в химической фиксации (обычно альдегидами), последующей дегидратации в органических растворителях и заливке в эпоксидную смолу. Затем делают ультратонкие срезы для исследований. Конечно, действие химических реагентов и высушивание приводят к определенным изменениям нано- и микроструктуры. Также применяют методы криофиксации. Ее преимущества в отсутствии химического воздействия, быстрой подготовке образцов. Для того чтобы избежать разрыва клеток при кристаллизации воды проводят сверхбыструю заморозку при высоком давлении. Криоэлектронная микроскопия требует специального оборудования, в том числе для получения замороженных срезов. Все существующие варианты подготовки не позволяют детально изучать макрообъекты. Получение ультратонких срезов, конечно, разрушает 3D структуру. Кроме того, при использовании SEM на биологические образцы необходимо наносить проводящие пленки, а равномерное нанесение на 3D структуры невозможно.

Американским ученым (Sandia Natl. Lab. и Univ. New Mexico) недавно удалось разработать простой и оригинальный способ подготовки для ЭМ образцов сложных биологических систем, даже на уровне целого организма [1]. Авторы работы использовали окремнение биообъектов – подход, подсказанный природой.

Ископаемые остатки животных и растений не только дают нам информацию о древних эпохах, но помогают изучать механизмы физических и химических преобразований, которые приводят к биоминерализации. Иногда происходит полная замена первичного химического состава – образуются псевдоморфозы. Наиболее совершенными являются кремнезёмные псевдоморфозы, среди которых окаменелые деревья, раковины и даже микроорганизмы [2]. На фотографии показаны окремнённые ископаемые в плитке известняка [3].



Водные растворы переносят кремнезем, он пропитывает биоматериал, проходя во все микропоры, осаждаются в аморфном состоянии или (позже) образует настолько мелкие кристаллы, что сохраняется вся иерархическая структура. Ученые долго обсуждали возможные механизмы окремнения и пришли к выводу, что воспроизвести такой процесс в лабораторных условиях невозможно из-за его чрезмерной длительности [2]. Тем не менее, авторам работы [1] удалось добиться успеха! Конечно, им помогли не только уроки природы, но и результаты других исследований, полученные в последнее время. В частности, было показано, что компоненты клеток/молекул (белки, пептиды, полисахариды) способны инициировать и регулировать осаждение на поверхность кремнезема  $\text{SiO}_2$  из раствора кремниевой кислоты [e.g. 4]. Однако в этих экспериментах нельзя было контролировать 3D структуру. Авторы [1] предположили, что управлять осаждением кремнезема могут не только отдельные компоненты молекул, но и целые клетки и даже более крупные объекты. Сначала ученые синтезировали биоконкомпозиты клетка/ $\text{SiO}_2$  (использовали культуры клеток различных тканей млекопитающих и кремниевую кислоту) и путем прокалывания преобразовали их в кремнезёмные реплики – как на подложке, так и в клеточных суспензиях (рис. 1) [5].

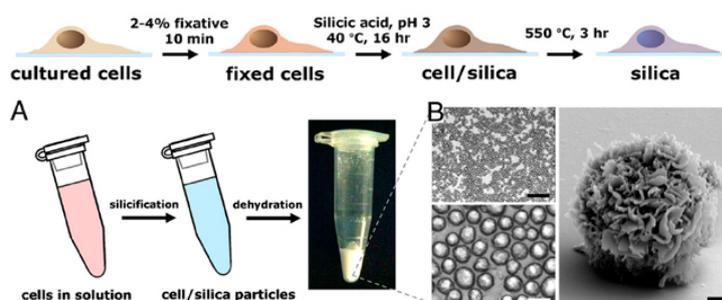


Рис. 1. Вверху: схема получения реплик клеток на плоской подложке, внизу: схема получения из клеточной суспензии и SEM изображение композита диаметром ~ 9 мкм.

Реплики полностью воспроизвели форму и размеры клеток, морфологию внешней поверхности и внутриклеточную архитектуру. Вдохновленные результатами, ученые перешли к макрообъектам [1]. Использовали эмбрионы цыплят, состоящие из мягких тканей и уже сформировавшихся внутренних органов. Кремнизацию проводили в кислой среде (pH 3), содержащей  $\text{Si}(\text{OH})_4$  (0,1 M) при  $37^\circ\text{C}$  в течение 7 дней. В этих условиях, так же, как и раньше на отдельных клетках, сформировался слой  $\text{SiO}_2$  толщиной 4-10 нм, точно воспроизводящий все уровни иерархической структуры, от клетки до организма в целом. Схематично процесс показан на рис. 2. Сначала образуется биокompозит, затем, после прокаливания на воздухе (удаление органического вещества) – кремнезёмная реплика. После дегидратации и прокаливания размеры и форма практически не изменились. SEM изображения отдельных областей (указаны стрелками e, f, g на рис. 2d), которые были получены с увеличением до 6 порядков, подтвердили точность реплики на всех уровнях структуры.

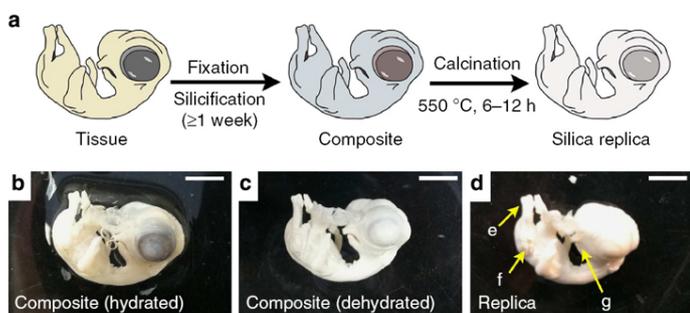


Рис. 2. (a) Схема формирования реплики 9-дневного эмбриона цыпленка. Оптические изображения композита до и после дегидратации (b,c),  $\text{SiO}_2$  реплики (d). Стрелкой указаны области, дополнительно исследованные при последовательном увеличении (~ до 6 порядков). Шкала 5 мм.

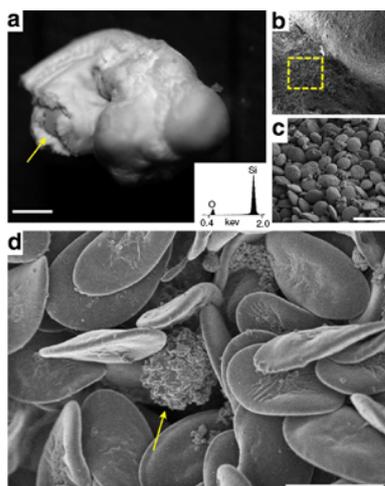


Рис. 3. Сохранение структуры глубоких тканей в кремнезёмной реплике 4-дневного эмбриона цыпленка. а – Реплика эмбриона. Шкала 1 мм. b,c – Последовательно увеличенные SEM изображения области, указанной стрелкой на рис. 3a (шкала на рис. c – 20 мкм). d – Кремнезёмная реплика лейкоцита (указан стрелкой) среди биокompозитов эритроцитов в кровеносном сосуде печени (шкала 10 мкм).

Затем авторы [1] изучили кремнизацию внутренних органов и тканей 4-дневного эмбриона цыпленка (рис. 3). Были получены SEM изображения области излома реплики (по линии, указанной стрелкой на рис. 3a), включающей долю печени. Результаты подтверждают кремнизацию глубоких тканей (рис. 3b,c) и даже лейкоцитов в кровеносном сосуде печени эмбриона (рис. 3d, стрелка).

Высокую точность воспроизведения всей иерархической структуры вплоть до наноуровня обеспечивает самоограничивающийся процесс конденсации кремниевой кислоты. На всех биомолекулярных поверхностях имеются белки или другие компоненты, которые действуют как катализаторы осаждения, и по мере того, как  $\text{SiO}_2$  их закрывает, процесс замедляется. Эксперименты показывают, что толщина слоя  $\text{SiO}_2$  не превышает 10 нм. Тем не менее, благодаря этому нанослою структура сохраняется при прокаливании в окислительной атмосфере, несмотря на большую потерю веса. Более того, авторы сумели сделать реплики проводящими, проведя карбонизацию биокompозита в восстановительной или инертной атмосфере (рис. 4). Это значит, что найден новый простой и общий подход к подготовке образцов биологических материалов для электронной микроскопии. Для детального исследования 3D структуры эти образцы можно механически рассекать.

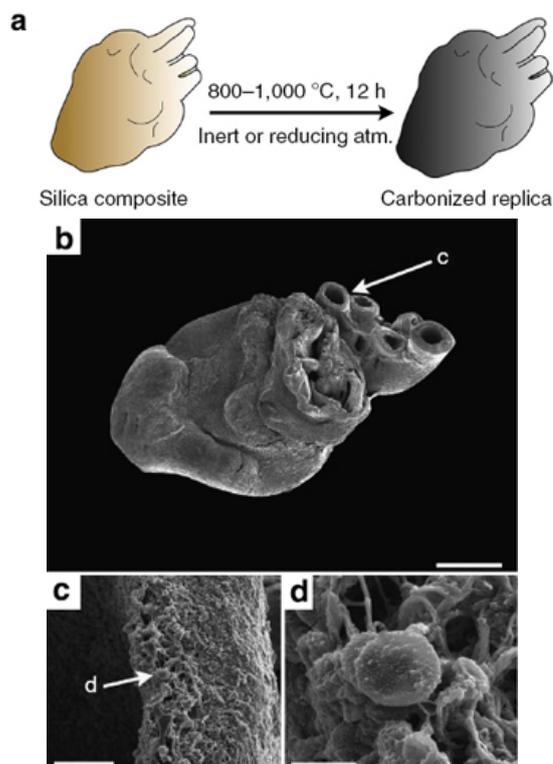


Рис. 4. Преобразование кремнезёмной биореплики тканей в проводящие образцы. а – Схема пиролиза окремнённого сердца в карбонизованную реплику. b – SEM изображение сердца, карбонизованного при  $1000^\circ\text{C}$  (получено без нанесения металлического покрытия!). Фон вычтен для ясности (шкала 1 мм). c,d – увеличенное изображение стенки артерии (шкала 30 мкм (c) и 5 мкм (d)).

Для медицины, биологии, нанотоксикологии очень важны исследования поведения наночастиц в организме (биораспределение, взаимодействие с клетками, тканями и др.). Но обнаружить отдельные наночастицы в глубоких тканях, особенно с низкой плотностью, чрезвычайно сложно. Новый подход [1] позволяет, по словам авторов, “найти иголку в стоге сена”, не нарушая 3D структуру “стога”. Ученые ввели наночастицы золота (200 нм) в вену эмбриона цыпленка. Такие крупные наночастицы вскоре после инъекции обычно осаждаются в печени. Поэтому была приготовлена карбонизованная реплика печени и сделан срез для изучения внутренней структуры. Используя детектирование обратно рассеянных электронов, авторы обнаружили отдельные наночастицы в стенках капилляра (рис. 5).

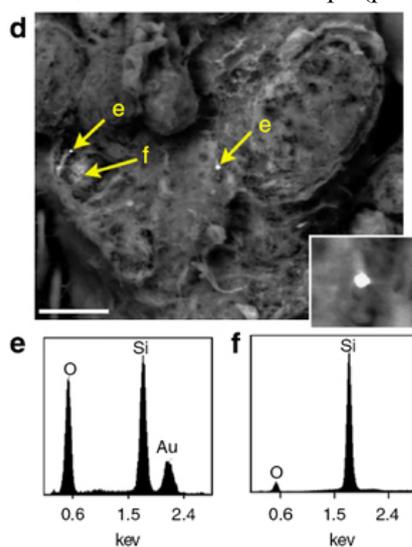


Рис. 5. ЭМ изображение среза карбонизованной реплики печени. Шкала 5 мкм. Стрелкой (е) показаны наночастицы золота.

Очень важным следствием полученных результатов является возможность использования биологических объектов (тканей, органов) для создания нового класса прочных неорганических нанокомпозитов со сложной иерархической структурой. Достаточно после окремнения удалить биомолекулярную основу путем прокаливании при высокой температуре. Другим способом синтезировать такие материалы, состоящие из “деталей”, имеющих самые разные формы и размеры (в диапазоне от нано- до макроуровня), невозможно. Ведущий исследователь работ [1,5] В. Каehr (Sandia Natl. Lab.) мечтает о разработке новых биомиметических материалов, в том числе для энергетики [6]. Какой, например, великолепный 3D электрод можно создать, используя в качестве основы печень с её огромной удельной поверхностью и разными каналами от капилляров до артерий...

О. Алексеева

1. J.L.Townson et al., *Nature Commun.* **5**, 5665 (2014).
2. Р. Айлер. *Химия кремнезема* — М.: Мир, 1982. — 416 с.

3. <http://www.ammonit.ru/text/669.htm>

4. И.Э. Памирский и др., *Успехи наук о жизни*, №5, 47 (2012).

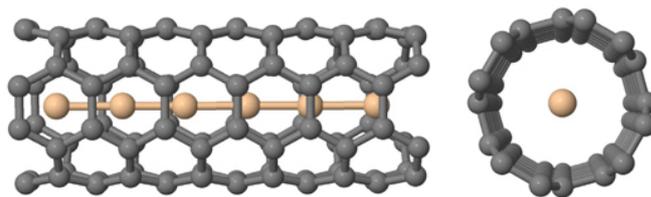
5. B.Kaehr et al., *PNAS* **109**, 17336 (2012).

6. Sandia Labs News Releases, December 8, 2014

## ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

### Цепочки в нанотрубках

Исследователи из Индии и Ирака предложили интересные функциональные материалы для нанoeлектроники, очень напоминающие коаксиальную кабель. Эти наноструктуры представляют собой одностенные углеродные нанотрубки (УНТ), допированные атомами Si, Ge, Au и Tl [1]. По сути, это эндоэдральные комплексы, построенные из УНТ (зигзагообразных  $(n,0)$  и кресельного типа  $(n,n)$ , где  $n = 4 - 6$ ) с внедренными в углеродный каркас атомными цепочками с максимальной “длиной” в шесть атомов (см. рис.).



Структура эндоэдрального комплекса  $Si_6@C_{44}$

С помощью программного комплекса SIESTA в рамках теории функционала плотности авторы попытались определить зависимость таких характеристик образцов, как энергия связи, энергия ионизации, энергия сродства к электрону, величина НОМО-LUMO щели от диаметра УНТ и типа допанта. Так, для кресельных УНТ, допированных Si, Ge и Tl, энергия связи оказалась максимальной для систем с индексами хиральности  $(6,6)$ , для допированных же золотом УНТ максимальной энергией связи обладают комплексы с индексами  $(5,5)$ . Результаты расчетов НОМО-LUMO щелей свидетельствуют о значительном влиянии допантов на электронные свойства эндоэдральных комплексов: УНТ кресельного типа под воздействием цепочек-гостей демонстрируют металлические свойства, а зигзагообразные, наоборот, полупроводниковые. Авторы отмечают, что в случае зигзагообразных нанотрубок, устойчивыми оказываются лишь кремний- и германийсодержащие УНТ с индексами хиральности  $(5,0)$  и  $(6,0)$ . По мнению исследователей, прогноз использования предложенных ими наноструктур в электронных устройствах благоприятный, осталось лишь разработать эффективную методику их получения. Однако вопросы синтеза в публикации традиционно не затрагиваются.

М.Маслов

1. N.M.Umran et al., *Physica E* **65**, 68 (2015).

## СИНХРОТРОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

### Определение парциальных вкладов колебаний атомов железа в FeSi

Моносилицид железа FeSi давно известен своими необычными магнитными и электронными свойствами: при низких температурах это – полупроводник (с малой щелью 30мэВ) и с незначительной парамагнитной восприимчивостью, с ростом температуры имеет место плавная металлизация и появляется парамагнитная восприимчивость, но дальнего магнитного порядка нет. Аномальные температурные зависимости наблюдаются также и для модуля упругости, теплоемкости и теплового расширения следом за изменением плотности состояний в электронном спектре. Естественно ожидать, что перестройка электронной структуры проявится и в электрон-фононном взаимодействии (ЭФВ), и в спектре колебаний решетки. Ранее методами инфракрасной спектроскопии, комбинационного рассеяния света и неупругого рассеяния нейтронов было установлено существенное смягчение оптически активных фононов при нагревании, однако из этих экспериментов было невозможно извлечь информацию о парциальном вкладе колебаний атомов Fe или Si в общее смягчение спектра.

Такая возможность была реализована российско-немецкой группой [1] с использованием метода ядерного резонансного неупругого рассеяния (ЯНР) рентгеновского излучения. Метод ЯНР основан на эффекте Мессбауэра. Ядра с изотопом  $^{57}\text{Fe}$  могут возбуждаться гамма-квантом, энергия которого отличается от точной энергии ядерного резонанса на некоторую величину  $dE$  только тогда, когда одновременно в кристалле рождается или поглощается фотон с энергией  $dE$ . Таким образом, сканируя энергию падающих лучей, можно измерить парциальную плотность колебательных состояний для атомов железа. Эксперимент был проведен в Гренобле на станции ID18 Европейского центра синхротронного излучения (ESRF).

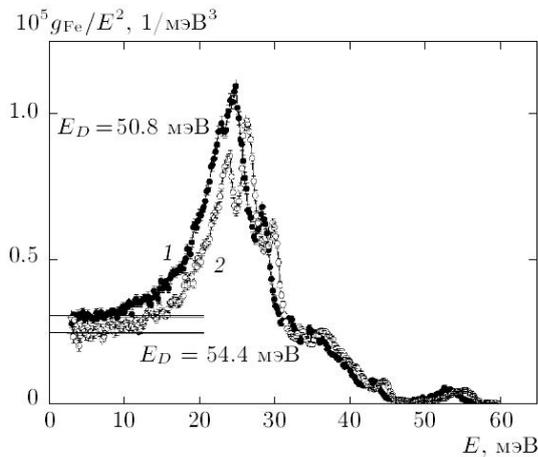


Рис. 1. Парциальные спектры тепловых колебаний атомов железа в FeSi при температурах 297К (1) и 46К (2).

Из результатов измерений (рис. 1) видно, что вклад железа в высокочастотные колебания ( $E > 30\text{мэВ}$ ) невелик. А вот низкочастотная область от 20 до 30 мэВ заметно смягчается с ростом температуры. В спектре можно выделить два пика:  $E_1 = 22.97\text{мэВ}$  и  $E_2 = 26.13\text{мэВ}$ . Согласно первопринципным расчетам для изоструктурного MnSi, эти пики соответствуют продольной акустической моде на границе зоны Бриллюэна и низкочастотной слабодисперсной оптической моде. Анализ спектров при разных температурах выявил температурную зависимость характерных фононных энергий (рис. 2) и ширины линий (рис. 3).

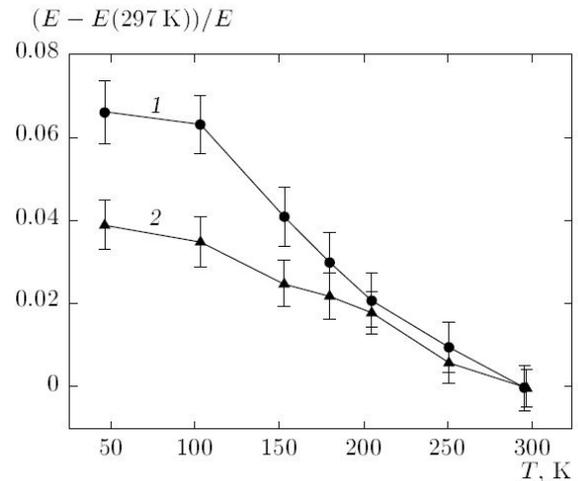


Рис. 2. Температурные зависимости относительных изменений энергии Дебая (1) и средней по спектру энергии колебаний (2).

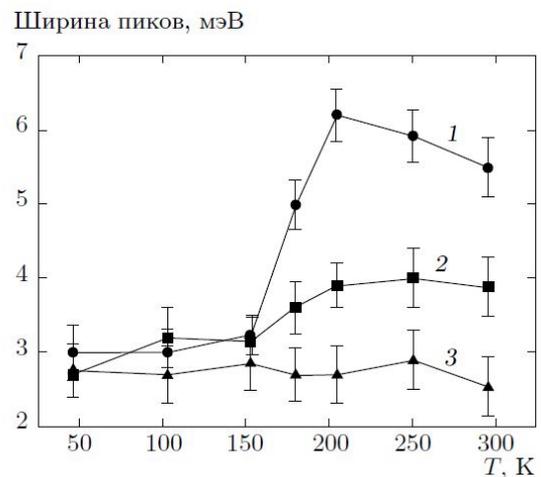


Рис. 3. Температурные зависимости ширины первых трех пиков  $E_1$ ,  $E_2$  и  $E_3$ .

Анализ зависимостей (рис. 2 и 3) показывает, что относительное изменение энергии длинноволновых акустических фононов, определяющих энергию Дебая, существенно больше, чем средней энергии. Кроме того, обе зависимости имеют характерный излом при  $T = 100\text{К}$ . Авторы [1] доказывают, что полученные особенности отражают перестройку электронного спектра. При низких температурах, когда силицид железа является узкозонным полупроводником, энергия и ширина линии фононов слабо за-

висят от температуры. С ростом температуры щель уменьшается, и появляются термически активированные зонные электроны. Это начинается при  $T=100\text{K}$  и заканчивается при  $200\text{K}$ , когда электронная щель уже закрылась, что подтверждается и увеличением ширины пиков на рис. 3. Поскольку в низкочастотные моды велик вклад колебаний атомов железа, это означает наибольший вклад ЭФВ в тех модах, где доминирует вклад железа. При температуре выше  $200\text{K}$ , когда электронная щель уже закрылась, ширина пиков перестает расти. Таким образом, продемонстрирована прямая связь изменений энергетических положений пиков в спектре колебаний с закрытием щели в электронном спектре с ростом температуры. Доказано также доминирование вклада  $d$ -электронов Fe в электрон-фононное взаимодействие для низкочастотных мод.

С. Овчинников

1. П.П.Паршин и др., *ЖЭТФ* **145**, 279 (2014).

## НОВЫЕ ИЗДАНИЯ

Недавно вышла книга M.Ya. Amusia, K.G. Popov, V.R. Shaginyan, V.A. Stefanowicz, "Theory of Heavy-Fermion Compounds: Theory of Strongly Correlated Fermi-Systems"

Springer Publishing Company. Springer Series in Solid-State Sciences, 182, 360 p, (2014)

Heidelberg, New York, Dordrecht, London

(<http://link.springer.com/book/10.1007%2F978-3-319-10825-4>)

Эта книга является развитием темы, с которой мы познакомили наших читателей в 2009 г.: К.Г. Попов и В.Р. Шагинян, Ферми-конденсатный фазовый переход кардинально меняет ферми-жидкость, (*ПерсТ* **16**, вып. 7, с. 2 (2009)).

Сильно коррелированные ферми-системы находятся в ряду очень интересных и перспективных материалов, и их теоретическое описание представляет одну из самых больших проблем в физике конденсированного вещества. В книге изложена теория фермионной конденсации этих систем и на ее основе дано объяснение многочисленным и важным экспериментальным фактам, собранным в современной и интересной физике сильно коррелированных систем.

Прочитав книгу, читатель найдет, что самые разнообразные сильно коррелированные ферми-системы обладают одинаковым универсальным поведением, отличным от наблюдаемого поведения в обычных металлах и ферми-жидкостях. Именно такое поведение, выявленное в рамках изложенной в книге оригинальной теории сильно коррелированных ферми-систем, позволяет сделать вывод, что в этих системах реализуется новое состояние вещества, обладающее уникальными свойствами.

## КОНФЕРЕНЦИИ

**International Conference "Spin physics, spin chemistry and spin technology" (SPCT-2015), June 1-5 2015, St. Petersburg, Russia**

The Conference is organized by Ioffe Institute, St.Petersburg and Kazan E.K. Zavoisky Physical-Technical Institute, Kazan.

Topics:

Spin-dependent properties of semiconductors

Spin-dependent chemical reactions

Spins in low-dimensional structures

Magnetic resonance imaging

Optically induced spin polarization

Chemically induced spin polarization

Strongly correlated spin systems

Magnetic impurities and molecules

Spin dynamics

Spin transport

Spin-dependent phenomena in heterostructures

Spin-based devices

Quantum computing with spins

Spin based crystallography, spin based nanometrology

Solar energy research with spins

Developments of spin detection and control methodology

Important dates

The deadline for submitting abstracts is **February 1, 2015**

Website: [www.spinconf.com](http://www.spinconf.com)

**NATO Workshop: Nanomaterials for security (NS-2015) 30 August -3 September 2015, Odessa, Ukraine**

**Topics** will include nanomaterials, nanotechnology, sensors, biosensors, nanotoxicology.

Important dates

Deadline for registration : **15 April 2015**

Contact Prof. Sergei Kruchinin

Bogolyubov Institute for Theoretical Physics, Metrologichna 14b, 03680, Kiev, Ukraine

Fax: 380 44 526 5998

Phone: 380 44 521 34 66

E-mail: [skruchin@i.com.ua](mailto:skruchin@i.com.ua)

Web: <http://www.natonano.com>

**International conference: Electron correlation in nanostructures (ECN-2015), 3-6 September 2015, Odessa, Ukraine**

**Topics** will include electron correlation in nanostructures, superconductivity, graphene, spintronics.

Important dates

Deadline for registration: **15 April 2015**  
Contact Prof. Sergei Kruchinin  
Bogolyubov Institute for Theoretical Physics,  
Metrologichna 14b, 03680, Kiev, Ukraine  
Fax: 380 44 526 5998  
Phone: 380 44 521 34 66  
E-mail: [sergeikruchinin@yahoo.com](mailto:sergeikruchinin@yahoo.com)  
Web: <http://www.natonano.com>

**4th International Conference on Mathematical Modeling in Physical Sciences (IC-MSQUARE 2015) June 5-8 2015, Mykonos island, Greece**

*Topics*

Some of the main topics of the IC-MSQUARE are:

- mathematical modeling in fundamental physics
- computational chemistry, biology, and biophysics
- evolutionary computation
- new generation computing tools

*Important dates*

Abstract submission deadline **March 6 2015**

Web: <http://www.icmsquare.net>

**International Conference on “Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications” (PHENMA 2015), May 19-22, 2015, Azov, Russia**

*Topics*

**Materials:** Ferro-Piezoelectrics, Semiconductors, High-Temperature Superconductors, Energy Harvesting Materials, Environmental Materials, Medical Materials, Composite, Ceramics, Thin Films, Nanomaterials, etc.

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

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

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

**Applications:** MEMS, Hetero-structures, Piezotransducers, Piezoactuators, Piezogenerators, Light-Emitting Diodes, Multimedia Communication, Fiber Reinforced Composites, etc.

*Important dates*

Deadline for Abstracts: **February 1, 2015**

Web: <http://phenma2015.math.sfedu.ru>

**6th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics (META'15), 4-7 August 2015, New York, USA**

*Topics*

- Metamaterials and negative index materials
- Metatronics and graphene metamaterials
- Plasmonics and nanophotonics
- Plasmon-enhanced photovoltaics, photocatalysis, and solar fuels
- Photonic and Plasmonic crystals and cavities
- Materials for photonics (Graphene, MoS<sub>2</sub>, WS<sub>2</sub>, etc)
- Photonics based on 2D materials
- Quantum photonics
- Nanobiophotonics
- Structured light
- Near-field optics and nano-optics
- Transformational electromagnetics, cloaking
- Acoustic metamaterials
- Optomechanics
- Chiral and bianisotropic materials
- FSS, HIS and Extraordinary transmission
- Modeling, Computational Techniques and Verification of Theory
- Educational aspects
- Emerging applications

*Important dates*

Deadline for submission of papers: **9 February 2015**

Web: <http://metaconferences.org/ocs/index.php/META15>

Экспресс-бюллетень ПерсТ издается совместной информационной группой  
ИФТТ РАН и НИЦ «Курчатовский институт»

Главный редактор: И.Чугуева, e-mail: [irina@issp.ras.ru](mailto:irina@issp.ras.ru)

Научные редакторы К.Кугель, Ю.Метлин

В подготовке выпуска принимали участие О.Алексеева, М.Маслов, С.Овчинников, Л.Опенев, А.Пятаков

Выпускающий редактор: И.Фурлетова

Адрес редакции: 119296 Москва, Ленинский проспект, 64<sup>а</sup>