

# ЛЕКЦИИ



## БИОСОВМЕСТИМЫЕ СПЛАВЫ НА ОСНОВЕ НИКЕЛИДА ТИТАНА

С.Г. Аникеев\*, В.Э. Гюнтер, М.И. Кафтаранова, В.Н. Ходоренко, Н.В. Артюхова, С. Пахолкина, Е.А. Большевич

Томский государственный университет, Томск, Россия

\*e-mail: [anikeev\\_sergey@mail.ru](mailto:anikeev_sergey@mail.ru)

Биосовместимые материалы на основе никелида титана являются перспективными материалами благодаря тому, что обладают уникальной совокупностью свойств: памятью формы при изменении температуры, сверхэластичностью при температуре тела, коррозионной стойкостью в условиях длительной знакопеременной деформации, высокими параметрами проницаемости и смачиваемости. Используя различные технологии получения и обработки материалов на основе TiNi можно создавать широкий спектр монолитных и пористо-проницаемых материалов для медицины.

*Монолитные полуфабрикаты на основе TiNi.* Данный класс материалов характеризуется оптимальным сочетанием удельного веса, прочности и пластичности, износо- и циклостойкости, коррозионной стойкости и значительным сопротивлением усталости. Детальный анализ коррозионной стойкости, фармакодинамических и антимикробных свойств, особенностей дезинфекции и стерилизации, а также токсикология и канцерогенность определили соответствующий новый класс материалов с высоким уровнем медицинских, технических требований и спецификаций.

*Пористо-проницаемый материал на основе TiNi.* Пористые сплавы на основе никелида титана, получаемые методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) и спекания, нашли применение благодаря хорошим функциональным свойствам и анатомическому соответствию структуры порового пространства биологическим тканям организма, а также простоте и высокой производительности метода получения.

*Тонкие нити TiNi, текстильные и волокнистые материалы на их основе.* Путем волочения проволоки на основе никелида титана получают тонкие сверхэластичные нити диаметром 30 – 60 мкм. Сверхтонкие нити обладают нанокристаллической структурой, что обеспечивает высокие прочностные и деформационные характеристики, что имеет особое значение для решения задач при реконструкции мягких тканей организма человека. Разработанный класс материалов активно используется в офтальмологии, челюстно-лицевой хирургии, онкологии.

*Композитные материалы на основе комбинации монолитных, пористых и текстильных материалов TiNi.* Полученные материалы объединяют достоинства монолитных и пористых материалов, применяются для направлений, где есть повышенные требования к деформационным и прочностным характеристикам устройств на основе TiNi. Пористо-монолитные конструкции на основе никелида титана активно используются в челюстно-лицевой хирургии, онкологии, стоматологии, где призваны решать сложнейшие медицинские задачи.

*Инструментарий на основе материалов TiNi.* Многие методы оперативного лечения основаны на применении нового класса созданных инструментов, имеющих высокий уровень таких свойств, как износостойкость, гибкость и эластичность режущей рабочей части инструмента, возможность изменения формы в соответствии с требованиями хирурга. Разработан хирургический, стоматологический инструментарий с изменяемой геометрией рабочей области.

Исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030).

## К ВОПРОСУ О РАЗВИТИИ ПОНЯТИЯ МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЯ

С.А. Гудин

Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия  
e-mail: [gudin@imp.uran.ru](mailto:gudin@imp.uran.ru)

Уильям Томсон (лорд Кельвин) в 1856 – 1857 годах [1] обнаружил изменение сопротивления в железе и никеле при помещении их в сильное магнитное поле, так начались исследования эффекта магнитосопротивления. В течение следующих ста лет влияние магнитного поля на удельное сопротивление при комнатных температурах считалось слабым, т.к. сила Лоренца в сотни раз слабее сил Кулона. Соответственно, этот слабый эффект влияния магнитного поля на сопротивление практически и не изучался. В 1929 г. П. Л. Капица опубликовал данные по изменению проводимости в сильных магнитных полях до 30 Тл для 35 металлов [2] для диапазона температур от комнатной до 77 К.

Первое использование эффекта магнитосопротивления ( $MR$ ) — создание датчиков магнитного поля на основе изменения электросопротивления устройства при внесении его в магнитное поле, но ниша использования этого эффекта была узка, да и датчики появились не сразу. Так еще в 30-40х годах двадцатого века при возникновении крайней необходимости измерить величину магнитного поля использовали механические устройства, измеряющие угол поворота подпружиненной магнитной стрелки. Появление компьютеров кардинально изменило потребности промышленности в использовании эффекта магнитосопротивления. Без использования этого эффекта не может работать ни один жесткий диск (HDD) компьютера. Создание в девяностых годах XX века головок считывания для HDD на основе пермаллоевых тонких дисков, использовавших эффект анизотропного магнитосопротивления, позволило считывать информацию при изменении сопротивления порядка 2% при переходе головки считывания от одного домена к другому. Открытие в 1988 г. А. Фертом и П. Грюнбергом гигантского магнитосопротивления (GMR) привело как к бурному росту работ, исследующих MR, так и к созданию на основе эффекта GMR головки считывания с величиной эффекта магнитосопротивления от 6 до 12% (при комнатной температуре), что привело к увеличению плотности записи информации до 50 Гбит/дюйм<sup>2</sup>. Другим следствием открытия гигантского магнитосопротивления стало переоткрытие в допированных манганитах колоссального магнитосопротивления (CMR), превышающего по величине на несколько порядков GMR. CMR было переоткрыто, так как впервые в допированных манганитах сопротивление в магнитном поле было померено в 1954 году, но тогда на такую большую величину  $MR$  никто не обратил внимания и не понял неординарности открытия. Открытие эффекта колоссального магнитосопротивления с параметром  $MR(H) \gg 1$  стало вызовом для существующей электронной теории вещества. В цикле из 9 работ, данные которых можно посмотреть в [3-5] проведены теоретические исследования магниторезистивных свойств допированных манганитов в магнитных полях от 0 до 90 кОе и в диапазоне температур от 4 до 400 К, предложены механизмы проводимости, определяющие большую величину MR, разработан метод разделения вкладов в магнитосопротивление от нескольких механизмов проводимости

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ «Квант» № 122021000038-7.

1. W. Thomson, Proceedings of the Royal Society of London **8**, 546 (1857).
2. P. Kapitza, Proceedings of the Royal Society of London, Series A **123**, 292 (1929).
3. С.А. Гудин, Н.И. Солин ЖЭТФ, **157**, 648 (2020).
4. С.А. Гудин, ФТТ **63**, 1978 (2021).
5. А.Г. Гамзатов, С.А. Гудин, Т.Р. Арсланов и др., Письма в ЖЭТФ **115**, 218 (2022).

## СПИН-ФЛУКТУАЦИОННЫЕ ПЕРЕХОДЫ

С.В. Демишев

Институт физики высоких давлений РАН им. Л. Ф. Верещагина, Москва, Троицк, Россия

Институт общей физики РАН, Москва, Россия

e-mail: [sergey\\_demishev@mail.ru](mailto:sergey_demishev@mail.ru)

Под спин-флуктуационным переходом (СФП) понимается изменение характеристик спиновых флуктуаций в магнетике под воздействием управляющих параметров (например, температуры или состава материала), не связанное непосредственно с образованием фаз с дальним магнитным порядком [1]. Поэтому СФП в большинстве случаев выходят за рамки стандартной теории фазовых превращений, для которой характерно рассмотрение флуктуаций как некоторого сопутствующего магнитному переходу явления. В докладе рассматривается современное состояние проблемы СФП с точки зрения теории и эксперимента, в том числе на примере спиральных магнетиков  $MnSi$  и  $Mn_{1-x}Fe_xSi$ , магнитных полупроводников  $Hg_{1-x}Mn_xTe$ , легированных компенсированных полупроводников  $Ge:As(Ga)$  и сильно коррелированного металла со скрытым порядком  $CeV_6$ . Рассмотрены основные методы исследования СФП (рассеяние нейтронов и электронный парамагнитный резонанс). Обсуждаются СФП в фазе спинового нематика, в изинговских неупорядоченных системах, в парамагнитных и магнитоупорядоченных фазах, квантовых критических системах, а также СФП, обусловленные изменением спиновой динамики. При обсуждении проблемы СФП используется спин-поляронная модель, которая объединяет кажущиеся на первый взгляд разнородными объекты исследования. Отмечается, что в настоящее время СФП изучены недостаточно подробно и дальнейшие исследования в этом направлении могут оказаться одной из точек роста в современной физике магнитных явлений.

1. С.В. Демишев, Спин-флуктуационные переходы. УФН, принята к публикации. DOI: [10.3367/UFNr.2023.05.039363](https://doi.org/10.3367/UFNr.2023.05.039363)

## НАНОРАЗМЕРНЫЕ ПРЕПАРАТЫ ДЛЯ ТЕРАПИИ И ДИАГНОСТИКИ РАКА, ОДОБРЕННЫЕ ДЛЯ КЛИНИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ

А.М. Дёмин

Институт органического синтеза им. И.Я. Постовского УрО РАН, Екатеринбург, Россия

e-mail: [demin@ios.uran.ru](mailto:demin@ios.uran.ru)

Несмотря на широкий спектр препаратов и методов лечения, согласно Всемирной организации здравоохранения (WHO) (World Health Organization) онкологические заболевания занимают либо первое, либо второе место в причинах смерти пациентов после заболеваний сердечно-сосудистой системы. Поэтому в настоящее время огромное внимание уделяется как повышению эффективности и понижению острой токсичности известных противоопухолевых препаратов, так и созданию альтернативных терапевтических и диагностических средств, в том числе, на основе различных наноматериалов. В данных целях разрабатываются материалы на основе полимерных/биополимерных наночастиц, в том числе, и мицелл, магнитных наночастиц (МНЧ), наночастиц (НЧ) на основе  $\text{SiO}_2$ , благородных металлов (золота, серебра), квантовых точек, углеродных НЧ и др., обладающих уникальными свойствами, которые позволяют реализовать специфические методы диагностики или лечения рака [1,2].

В докладе рассмотрены принципы создания современных наноразмерных материалов для терапии и диагностики рака, одобренных для клинического использования в мировой практике.

Среди средств для терапии рака рассмотрены препараты, содержащие известные противоопухолевые лекарственные средства: Doxil/Caelyx, Myocet, Abraxane, Nanoxel, Genexol PM, Nanoxel M, Lipusu, Mepact, Onivyde, Vyxeos, Apealea, Liporaxel и др.

Среди диагностических средств рассмотрен ряд препаратов на основе МНЧ с биосовместимой оболочкой (декстран,  $\text{SiO}_2$  и т.д.), которые уже проходили клинические испытания или даже получали разрешение для применения в клинике (например, в Food and Drug Administration (FDA), US или в European medicines agency (EMA), EU). Среди них наибольшую известность получили Feridex IV/Feridex/Endorem, Sinerem/Combixel, Resovist, Clariscan, Magtrace/Sienna+, NanoTherm [3]. Несмотря на это, лишь немногие используются в настоящее время. В большинстве случаев производство одобренных для MRI препаратов было прекращено или клинические испытания были приостановлены, что зачастую было обусловлено их недостаточной специфичностью накопления в целевых тканях или по коммерческим причинам. Поэтому в настоящее время для повышения эффективности терапевтических и диагностических препаратов НЧ используют ряд подходов, заключающихся, например, в создании новых наноматериалов с контролируемым способом высвобождения лекарственных препаратов (переменным магнитным полем, лазером, pH среды и т.д.), в том числе, содержащих векторные молекулы, повышающие специфичность накопления препаратов в опухолях [4-6].

Работа выполнена в рамках темы государственного задания на 2023 год (AAAA-A19-119011790130-3).

1. S. Wang *et al.*, *Nano Today* **45**, 101512 (2022).
2. Kritika *et al.*, *Mater. Adv.* **3**, 7425 (2022).
3. D.D. Stueber *et al.*, *Pharmaceutics* **13**, 943 (2021).
4. A. Pusta *et al.*, *Pharmaceutics* **15**, 1872 (2023).
5. A.G. Pershina *et al.*, *Colloids and Surf. B* **221**, 112981 (2023).
6. A.M. Demin *et al.*, *Int. J. Mol. Sci.* **23**, 9093 (2022).

---

## ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФЕРРОМАГНЕТИКОВ. МЕТОДЫ ИХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ. ТЕОРИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТ

И.К. Камилов

Институт физики им. Х.И. Амирханова ДФИЦ РАН, Махачкала, Россия  
e-mail: [ik.kamilov@mail.ru](mailto:ik.kamilov@mail.ru)

К фундаментальным характеристикам ферромагнетиков в первую очередь относятся такие их параметры как самопроизвольная намагниченность ( $M_s$ ) и температура Кюри ( $T_C$ ). До сих пор нет абсолютно точных методов их определения. Попытки их нахождения или их оценки продолжаются до сих пор. Они важны для всей физики магнитных явлений, в том числе и физики магнитных фазовых переходов и критических явлений.

Важнейшими параметрами для установления особенностей физических величин в окрестности точки фазовых переходов второго рода являются критические индексы и критические амплитуды.

Теория предсказывает, в частности, что вблизи  $T_C$  самопроизвольная намагниченность изменяется по степенному закону, т.е.  $M_s = B\varepsilon^\beta$ , где  $B$  — критическая амплитуда,  $\varepsilon$  — приведенная температура,  $\varepsilon = (T_C - T)/T_C$ ,  $\beta$  — критический индекс. Поведение многочисленных физических параметров, таких как магнитная восприимчивость, теплоемкость, критическая изотерма, скорость и поглощение звука, описываются соответствующими статическими и динамическими критическими индексами. Знание их необходимо для оценки магнитных критических индексов, используемых для проверки магнитных уравнений состояния, полученных в рамках скейлинговой РГ-теории,  $\varepsilon$  — разложения и принципа универсальности и т.д.

Предлагаемый обзорный доклад посвящен последовательному изложению теоретических и экспериментальных методов оценки самопроизвольной намагниченности и температуры фазового перехода второго рода в ферромагнетиках в основном для начинающих исследователей магнитных свойств ферромагнетиков.

## ТУРБУЛЕНТНОСТЬ И ЕЕ ВИДЫ

Е.А. Кочурин

Институт электрофизики Уральского отделения РАН, Екатеринбург, Россия  
Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия  
e-mail: [kochurin@iep.uran.ru](mailto:kochurin@iep.uran.ru)

Современная физика нелинейных явлений разделяет турбулентное движение на два типа. Первый тип носит название слабой или волновой турбулентности. Такая турбулентность может возникать в системах с малым параметром, например, при распространении волн малой амплитуды на поверхности жидкости. Физическая теория, описывающая статистический характер взаимодействия таких слабонелинейных волн была разработана в работах ак. Захарова и соавторов [1]. Захаровым были найдены точные решения для функции распределения квазичастиц-волн в виде стационарных степенных функций в импульсном пространстве. Такие решения получили название спектров Колмогорова-Захарова по аналогии со спектром классической вихревой турбулентности (знаменитый закон  $-5/3$  или спектр Колмогорова-Обухова). Спектры слабой турбулентности описывают стационарный переход энергии в малые масштабы в результате взаимодействия нелинейных волн. Важнейшим достижением теории слабой турбулентности оказалось то, что она может аналитически предсказывать показатели спектров турбулентности в произвольных нелинейных волновых системах. Так, хорошо известно, что слабая турбулентность может наблюдаться при распространении звуковых волн, поверхностных гравитационных и капиллярных волн, нелинейных волн в оптике, а также нелинейных магнитогидродинамических волн в лаборатории и космосе [2]. К настоящему моменту времени спектры слабой турбулентности с высокой точностью подтверждены экспериментально для волн на поверхности жидкости.

Второй тип турбулентности возникает в ситуации, когда малый параметр в системе отсутствует, и поведение системы является сильнонелинейным. Теория сильной турбулентности впервые предложена в работе Кадомцева и Петвиашвили [3]. Согласно этой теории сложное турбулентное состояние представляется в виде ансамбля сильнонелинейных ударных волн. Спектр сильной турбулентности реализуется, к примеру, для акустической турбулентности газодинамических ударных волн. К сильной турбулентности также относят классическую вихревую турбулентность, описываемую спектром Колмогорова-Обухова, так как для уравнения Навье-Стокса в общем случае отсутствует малый параметр, по отношению к которому можно применять теорию возмущений.

Таким образом, в настоящий момент времени существуют два подхода к статистическому описанию сложного нелинейного волнового движения. Стоит отметить, что области применимости этих теорий сильно отличаются. В общем случае промежуточного уровня нелинейности разделить турбулентность на слабую или сильную не удастся. Объединение этих теорий — большой вызов для современной физики нелинейных явлений.

1. V. E. Zakharov, N. N. Filonenko *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* **4**, 506, (1967).
2. V. Zakharov, G. Falkovitch, V. S. Lvov, *Kolmogorov Spectra of Turbulence I: Wave Turbulence*, 1992.
3. Б.Б. Кадомцев, В.И. Петвиашвили, *ДАН СССР* **208**, 794 (1973).



## БАБОЧКА ХОФШТАДТЕРА: ФРАКТАЛЬНАЯ СТРУКТУРА УРОВНЕЙ ЭНЕРГИИ БЛОХОВСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ, ПЕРПЕНДИКУЛЯРНОМ ПЛОСКОСТИ ДВУМЕРНОЙ РЕШЕТКИ

И.А. Ларионов

Казанский (Приволжский) Федеральный Университет, Казань, Россия

e-mail: [lariонов.MRSLab@mail.ru](mailto:lariонов.MRSLab@mail.ru)

Бабочка Хофштадтера — фрактальная структура уровней энергии блоховских электронов в магнитном поле, перпендикулярном плоскости двумерной (2D) (изначально квадратной) решетки как функция доли магнитного потока через элементарную ячейку, была открыта Дугласом Хофштадтером в 1976 году [1]. Значения допустимых уровней энергии электрона на двумерной решётке как функции магнитного поля образуют структуру, ныне известную как фрактал и является одной из немногих реализаций фракталов в физике. Примечательно, что термин «фрактал» был введен Бенуа Мандельбротом в то же самое время [2,3]. Воздействие перпендикулярного магнитного поля на периодический электростатический потенциал приводит к самоподобному, рекуррентному, энергетическому спектру уровней Ландау 2D электронов, напоминающему бабочку. Математическое описание спектра было разработано М.Я. Азбелем в 1964 году [4] на основе цепных дробей.

Экспериментально наблюдать бабочку Хофштадтера довольно сложно. Щели фрактального спектра велики, когда магнитный поток сравним с квантовым потоком, другими словами, магнитная длина  $l_B = (\hbar c / e B)^{1/2}$  того же порядка, что и период электростатического потенциала Блоха. Для реального кристалла такой период есть постоянная решетки, которая имеет порядок величины менее нанометра и для которой, следовательно, требуются чрезвычайно большие магнитные поля свыше 1000 Тл, что экспериментально в лабораторных условиях недостижимо. В 1990-х годах были получены электростатические потенциалы с намного большими периодами, чем постоянная решетки, порядка 100 нм, путем изготовления плоских литографически сформированных сверхрешеток для двумерного электронного газа в гетероструктурах GaAs/AlGaAs [5,6], в которых наблюдались признаки спектра Хофштадтера при транспортных измерениях.

Фрактальный спектр Хофштадтера был также наглядно реализован в микроволновом волноводе с периодическим расположением рассеивателей [7]. В этой фотонной системе матрица пропускания имитирует гамильтониан блоховских электронов в магнитном поле и также приводит к уравнению Харпера и фрактальной бабочке Хофштадтера. О подобной реализации гамильтониана также сообщалось в оптических решетках с ультрахолодными атомами [8] и в сверхпроводящих кубитах [9]. Фрактальные спектры Хофштадтера можно наблюдать также и в гексагональной решетке, что было реализовано в гетероструктуре графен на гексагональной решётке бор-азот (hBN: graphene/hexagonal boron nitride (hBN) heterostructure) [10,11], при измерении (магнето-)сопротивления и емкости.

1. D.R. Hofstadter, Phys. Rev. B **14**, 2239 (1976).
2. B. Mandelbrot, Les objets fractals: forme, hasard et dimension, NBS (1975).
3. Benoît Mandelbrot, Fractals: Form, Chance and Dimension, W.H. Freeman and Co. (1977).
4. М.Я. Азбель, ЖЭТФ **46**, 929 (1964).
5. T. Schlosser, K. Ensslin, J.P. Kotthaus and M. Holland, Europhys. Lett. **33**, 683 (1996).
6. C. Albrecht *et al.*, Phys. Rev. Lett. **86**, 147 (2001).
7. U. Kuhl and H.-J. Stöckmann, Phys. Rev. Lett. **80**, 3232 (1998).
8. M. Aidelsburger *et al.*, Phys. Rev. Lett. **111**, 185301 (2013).
9. P. Roushan *et al.*, Science **358**, 1175 (2017).
10. C. R. Dean *et al.*, Nature **497**, 598 (2013); B. Hunt *et al.*, Science **340**, 1427 (2013).
11. L.A. Ponomarenko *et al.*, Nature **497**, 594 (2013).

## ИНДУЦИРОВАННАЯ ТОКОМ СПИНОВАЯ ПОЛЯРИЗАЦИЯ В КВАНТОВОЙ ТОЧКЕ

В.Н. Манцевич<sup>1\*</sup>, Д.С. Смирнов<sup>2</sup><sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия<sup>2</sup>ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия\*e-mail: [vmantsev@gmail.com](mailto:vmantsev@gmail.com)

Полупроводниковые квантовые точки являются перспективными объектами для масштабирования квантовой обработки информации с использованием локализованных спинов в качестве кубитов. Одним из способов создать спиновую поляризацию является неравновесное протекание тока, приводящее к нарушению симметрии временной инверсии [1]. Однако, как правило, степень индуцированной током спиновой поляризации невелика. Это связано со слабостью спин-орбитального взаимодействия и малой величиной соотношения скорости дрейфа и скорости Ферми. Нами продемонстрировано, что спиновая поляризация может резко возрасти при низких температурах из-за эффекта Кондо [2].

В качестве модельного объекта рассмотрена квантовая точка, расположенная рядом с квантовым проводом. Между квантовой точкой и квантовым проводом возможно спин-зависимое туннелирование электронов. Ранее нами была продемонстрирована возможность создавать в такой системе спиновую поляризацию в квантовой точке за счет протекания электрического тока по квантовому проводу [3]. В данной работе методом неравновесных функций Грина, показано, что многочастичные корреляции между квантовой точкой и квантовым проводом могут увеличить спиновую поляризацию в квантовой точке при низких температурах почти на два порядка [2]. Увеличение спиновой поляризации связано с образованием пика Кондо в плотности состояний и спиновой нестабильностью из-за сильного кулоновского взаимодействия. Предложенный эффект может быть реализован в современных наноструктурах с двумерным электронным или дырочным газом [4] и использоваться для эффективного манипулирования локализованными электронными спинами в квантовых точках.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №23-72-10008.

1. Е. Л. Ивченко и Г. Е. Пикус, Письма в ЖЭТФ **27**, 640 (1978).
2. V. N. Mantsevich and D.S. Smirnov, Phys. Rev. B **108**, 035409 (2023).
3. V. N. Mantsevich and D.S. Smirnov, Nanoscale Horiz. **7**, 752 (2022).
4. L. W. Smith *et al.*, Phys. Rev. Lett. **128**, 027701 (2022).

## ФОРМИРОВАНИЕ НОВЫХ СТАБИЛЬНЫХ И МЕТАСТАБИЛЬНЫХ ФАЗ В СПЛАВАХ АЛЮМИНИЯ ПРИ ТЕРМИЧЕСКИХ И БАРИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

С.Г. Меньшикова<sup>1\*</sup>, Н.М. Щелкачев<sup>2</sup>, А.К. Аржников<sup>1</sup>, А.С. Данилова<sup>1</sup>, В.В. Бражкин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Ижевск, Россия

<sup>2</sup>Институт физики высоких давлений им. Л.Ф. Верещагина РАН, Москва, Троицк, Россия

\*e-mail: [svetmensch@udman.ru](mailto:svetmensch@udman.ru)

Получение материалов с заданными структурой и свойствами при известных термодинамических параметрах (температуре, давлении, химическом составе) является одной из основных и наиболее актуальных задач физики и химии конденсированного состояния. Для относительно простых соединений, состоящих из небольшого числа компонент, эта задача более-менее успешно решается как компьютерным моделированием, так и экспериментально. В работе исследуются как простые бинарные сплавы, так и относительно сложные многокомпонентные аморфно-нано-кристаллические композиты на основе алюминия системы Al-ПМ-РЗМ (ПМ-переходный металл, РЗМ-редкоземельный металл) (с тремя, четырьмя и пятью компонентами), пятикомпонентные высокоэнтропийные сплавы Al-ПМ. Сплавы имеют перспективы практического применения как конструкционные материалы, также могут рассматриваться в качестве защитных покрытий. Для таких сложных систем решение вопроса о получении материалов с заданными структурой и свойствами требует новых нестандартных методов и подходов.

Решается задача предсказания фазового состава, доли аморфных, кристаллических и нанокристаллических фаз и их морфологических особенностей, в зависимости от условий получения. Сочетание различных экстремальных воздействий: быстрое охлаждение из расплава, высокие давления и температуры, используемых в работе, позволяют расширить область метастабильных состояний, получить новые соединения, новые модификации известных соединений. Особое внимание уделено установлению закономерностей между исходной структурой расплава и образованием фаз со сложной кристаллической структурой (фаз Лавеса и т.п.) при данных экстремальных воздействиях на расплав.

Объединены экспериментальные, теоретические расчеты и компьютерное моделирование структуры и свойств сплавов в жидком и твердом состояниях. Эксперимент включает в себя следующие методы: рентгеноструктурный анализ, высокоразрешающая электронная микроскопия, дифференциальная сканирующая калориметрия и др. Задействованы сравнительно новые методы компьютерного моделирования, основанные на сочетании первопринципных методов функционала плотности и машинного обучения. Массивы данных по структуре и термодинамическим параметрам, полученные в эксперименте и первопринципном моделировании, используются для обучения нейросетей, с помощью которых предсказываются наиболее оптимальные параметры соединений. Кроме того, машинное обучение используется для формирования потенциалов межатомного взаимодействия для классических атомистических расчетов. Это позволяет эффективно моделировать структуры в широком диапазоне параметров с *ab-initio* точностью, и даже на несколько порядков быстрее *ab-initio*.

Для ряда сплавов системы Al-ПМ-РЗМ определены закономерности процессов структурообразования, механизмов и кинетики структурно-фазовых превращений при вышеуказанных экстремальных воздействиях, получены данные о структурном и химическом ближнем порядке в расплавах, а также экспериментальные данные о процессах затвердевания этих расплавов и структурообразованию в сплавах.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №22-22-00674.

## РЕЗОНАНСНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ СИЛЬНО КОРРЕЛИРОВАННЫХ СИСТЕМ И НАНОСТРУКТУР

К.Н. Михалёв

Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия  
e-mail: [mikhalev@imp.uran.ru](mailto:mikhalev@imp.uran.ru)

Среди локальных методов исследования систем с дальним магнитным порядком и с сильными электрон — электронными корреляциями важное место занимает ядерный магнитный резонанс (ЯМР), который эффективно используется в последнее время для изучения магнитных и зарядовых неоднородностей в соединениях и наноструктурах на основе переходных металлов [1]. Резонансная спектроскопия позволяет анализировать на наноскопическом уровне, с одной стороны — спиновое и зарядовое распределение в ближайшем окружении различных ионов, формирующих кристаллическую решетку этих соединений, а с другой — низкочастотную спиновую динамику избирательно на позиции каждого атома в структуре исследуемого соединения. В последнее время было показано, что этот метод является более эффективным при анализе фазового состава наночастиц и нанокompозитов, чем дифракция рентгеновских лучей.

В предлагаемом докладе дается обзор работ по ЯМР в манганитах, мультиферроиках и наноструктурах, включая оригинальные результаты, полученные в ИФМ УрО РАН. В докладе будут затронуты следующие темы:

- особенности метода ЯМР при изучении соединений с сильными электронными корреляциями и дальним магнитным порядком;
- наноскопическое фазовое расслоение и магнитные поляроны в манганитах по данным ЯМР  $^{55}\text{Mn}$ ,  $^{87}\text{Sr}$  и  $^{17}\text{O}$  [2,3];
- мультиферроики и несоразмерные магнитные структуры: делафосситы и квазиодномерные соединения по данным ЯМР  $^{63,65}\text{Cu}$ ,  $^{17}\text{O}$ ,  $^{43}\text{Cr}$ ;
- резонансная спектроскопия наночастиц и нанокompозитов: фазовый анализ и новые размерные эффекты [4,5].

1. К. Н. Михалев, З. Н. Волкова, А. П. Геращенко, ФММ **115**, 204 (2014).
2. A. Trokiner *et al.*, Phys. Rev. B **93**, 174413 (2016).
3. A. Germov J.Á. *et al.*, Phys. Rev. B **96**, 104409 (2017).
4. A. Yu. Germov *et al.*, Materials Today Communications **27**, 102382 (2021).
5. K. Mikhalev *et al.*, J. of Magnetism and Magnetic Materials **563**, 169837 (2022).

## ЯН-ТЕЛЛЕРОВСКИЕ МАГНЕТИКИ

А.С. Москвин

Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия  
e-mail: [alexander.moskvin@urfu.ru](mailto:alexander.moskvin@urfu.ru)

Широкий класс материалов с различной кристаллической и электронной структурой от квази-2D нетрадиционных сверхпроводников (купраты, никелаты, ферропниктиды/халькогениды, рутенаты  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  и  $\text{RuO}_2$ ), 3D-систем типа манганитов  $\text{LaMnO}_3$ , ферратов  $(\text{CaSr})\text{FeO}_3$ , никелатов  $\text{RNiO}_3$ , до оксидов и фторидов серебра  $\text{AgO}$  и  $\text{AgF}_2$ , основан на ян-теллеровских  $3d$  и  $4d$ -ионах. Эти необычные материалы, получившие название ян-теллеровских (JT) магнетиков, характеризуются чрезвычайно богатым разнообразием фазовых состояний от необычных немагнитных и магнитных изоляторов до необычных (strange, bad) металлических и сверхпроводящих состояний. Нетрадиционные свойства JT-магнетиков связаны с неустойчивостью их высокосимметричных JT «прародителей» с основным орбитальным E-состоянием к переносу заряда с анти-ян-теллеровским диспропорционированием и образованием системы эффективных локальных композитных спин-синглетных или спин-триплетных, электронных или дырочных бозонов S-типа, движущихся в немагнитной или магнитной решетке [1,2].

Нами рассмотрены особенности реакции анти-JT-диспропорционирования, свойства электронно-дырочных димеров, эффективные гамильтонианы для одно- и двухзонных JT-магнетиков, возможные фазовые состояния, включая специфическое фазовое расслоение, представлен краткий обзор физических свойств реальных JT-магнетиков.

Работа выполнена при поддержке проекта FEUZ-2023-0017 Министерства Образования и Науки Российской Федерации.

1. A. S. Moskvin, J. Phys: Condensed Matter **25**, 085601 (2013).
2. A. S. Moskvin, Magnetochemistry (2023), to be published.

## ОСОБЕННОСТИ ДИАГНОСТИКИ НЕРАВНОВЕСНОЙ ПЛАЗМЫ

И.Л. Музюкин

Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия

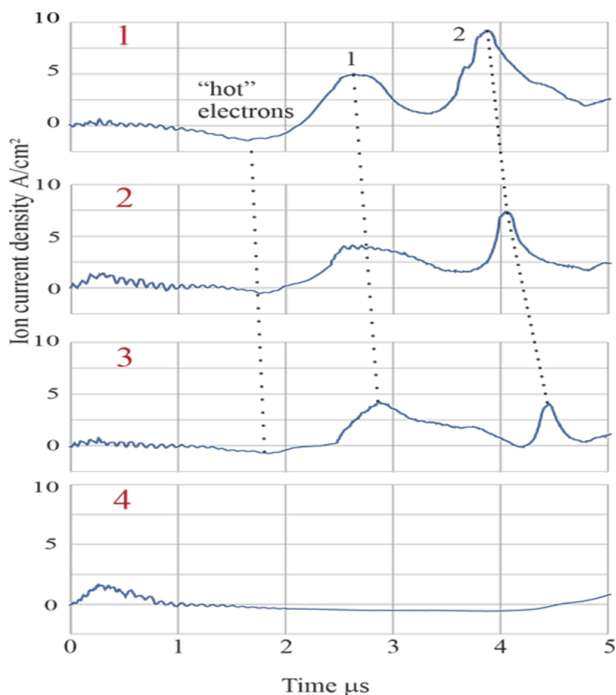
e-mail: [plasmon@mail.ru](mailto:plasmon@mail.ru)

Рис. 1. Осциллограммы сигналов с малогабаритных ионных коллекторов, расположенных на расстояниях 140, 155, 175, 180 мм (повернут на  $180^\circ$ ).

Диагностика плазмы, как правило, процесс сложный и не интуитивный. Этот факт вытекает из самого определения плазмы как ионизированного газа, в котором существенны коллективные явления. Среди таких коллективных явлений обычно выделяют образование плазменных слоев и разрывов, развитие плазменных неустойчивостей и турбулентностей, распространение волн в бесстолкновительной плазме. Все эти эффекты существенны, а местами являются определяющими в вопросах диагностики плазмы. Особенно это касается плазмы неравновесной.

Очень часто экспериментаторы ошибаются, приняв распространение волновых возмущений в плазме за перемещение пучков ионов или электронов. Например, на рис. 1 показано, как распространяются единичные волны в плазме импульсного дугового разряда. Видно, что всплески не расширяются, как следовало бы ожидать, если бы всплески соответствовали свободному распространению пучков частиц. Характер изменения профиля всплеска по мере распространения свидетельствует о волновой природе этих всплесков.

Использование различных детекторов, теория которых разрабатывалась для плазмы, находящейся в равновесии, приводит к парадоксам, которые являются не следствием необычных физических эффектов, а лишь неправильной интерпретацией полученных экспериментальных данных.

## О НЕКОТОРЫХ АКТУАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМАХ ОЦЕНКИ РЕСУРСА МАТЕРИАЛОВ АВИАЦИОННОГО МОТОРОСТРОЕНИЯ

О.Б. Наймарк

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия  
e-mail: [naimark@icmm.ru](mailto:naimark@icmm.ru)

Исследование стадийности поврежденности и перехода к разрушению является актуальной проблемой авиационного моторостроения и предполагает изучение многомасштабных закономерностей развития дефектов в перспективных материалах (сплавах, композитах, керамиках). Развиваемые теоретические и экспериментальные подходы основаны на развиваемых представлениях о закономерностях критичности эволюции ансамблей дефектов, обоснование моделей нелинейной кинетики поврежденности, зарождения и распространения трещин в поврежденной среде в широком диапазоне интенсивностей нагружения; экспериментальной верификации моделей с использованием созданного оборудования, позволяющего изучение поведения материалов при усталостных (включая сверхмногоцикловую), динамических и ударно-волновых нагружениях; обоснование подходов по оценке ресурса и мониторингу материалов и конструкций авиационного моторостроения при комбинированных динамических и усталостных нагружениях.

Теоретические и экспериментальные исследования, создание методических основ оценки ресурса и мониторинга материалов и конструкций авиационного моторостроения представлены по следующим направлениям:

1. Экспериментальные и теоретические исследования стадийности развития разрушения сплавов авиационного моторостроения в условиях сверхмногоцикловой усталости, в том числе в условиях комбинированного динамического и циклического нагружения, с целью обоснования методов оценки надежности, ресурса и мониторинга применительно к пространственным критическим ситуациям, обусловленным резким падением усталостного ресурса после случайного соударения лопаток вентиляторов газотурбинных двигателей с посторонними предметами (foreign object damage).
2. Экспериментальные и теоретические исследования стадийности разрушения композитных материалов авиационного моторостроения при усталостных и динамических нагружениях (в том числе комбинированных) для создания методических основ оценки надежности и ресурса, разработки моделей разрушения материалов лопаток вентиляторов газотурбинных двигателей нового поколения в широком диапазоне интенсивностей нагружения с учетом многомасштабной кинетики развития дефектов.
3. Экспериментальное и теоретическое исследование закономерностей разрушения керамических материалов в широком диапазоне интенсивностей нагружения (динамические, ударно-волновые) для создания методических основ оптимизации свойств керамических материалов при интенсивных силовых и температурных воздействиях.

Фундаментальной основой теоретических исследований и развиваемых представлений о стадийности поврежденности и перехода к разрушению являются установленные закономерности критичности развития дефектов — структурно-скейлинговые переходы, что позволило: обосновать нелинейные модели кинетики поврежденности, связать стадийность перехода от дисперсного к макроскопическому разрушению с автомодельными решениями — коллективными модами ансамблей дефектов; предложить описание механизмов зарождения трещин и их развития в широком диапазоне интенсивностей воздействия при усталостном (включая сверхмногоцикловую), динамическом и ударно-волновом нагружениях.

Исследования выполнены при поддержке Российского научного фонда (проект № 21-79-30041).

## ТЕОРИЯ ФУНКЦИОНАЛА ПЛОТНОСТИ — ДОБРО ПОЖАЛОВАТЬ В РЕАЛЬНЫЙ МИР

И.А. Некрасов\*, Н.С. Павлов

Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия

\*e-mail: [nekrasov@iep.uran.ru](mailto:nekrasov@iep.uran.ru)

Доклад призван продемонстрировать современные возможности расчетных методов на основе теории функционала электронной плотности в различных областях физики конденсированного состояния для определения различных свойств как уже существующих, так и возможных кристаллических материалов.

Оказывается, что из первых принципов (беря за основу только химический состав, даже без кристаллической структуры) можно вычислить различные физические свойства кристаллических материалов.

Современное развитие алгоритмов и вычислительных мощностей открыли возможности для расчета:

1. кристаллической структуры ее симметрии и стабильности как при нормальных условиях, так и в зависимости от внешних воздействий (например, давления и даже конечной температуры), учесть дефекты и поверхности;
2. фононного спектра, прочностных характеристик (модуля Юнга, модуля сдвига, коэффициент Пуассона и др.);
3. зависимости энтропии, теплоёмкости от температуры;
4. магнитного порядка и магнитных свойств;
5. температурной зависимости проводимости, теплопроводности;
6. сверхпроводящих свойств;
7. оптических свойств (диэлектрической проницаемости, коэффициентов отражения, пропускания и др.).
8. электронного спектра и спектров различных рентгеновских фотоэмиссионных экспериментов
9. и много еще чего...

Это открывает колоссальные возможности для поиска новых материалов, а также для описания и объяснения наблюдаемых свойств уже синтезированных материалов.



## НОВЕЙШИЕ ПОДХОДЫ К ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ И ТЕОРЕТИЧЕСКИМ ИССЛЕДОВАНИЯМ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ

С.М. Пещерова<sup>1\*</sup>, А.Г. Чуешова<sup>1</sup>, М.А. Хорошева<sup>2</sup>, Е.А. Осипова<sup>4</sup>, Л.И. Федина<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>2</sup>Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук, Черноголовка, Россия

<sup>3</sup>Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>4</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

\*e-mail: [spescherova@mail.ru](mailto:spescherova@mail.ru)

Кремний на сегодняшний день является самым востребованным и самым изученным материалом. Более 50 лет ученые по всему миру активно исследовали структуру и свойства кремния, благодаря чему спектр его применения непрерывно расширялся. Однако, стремительное развитие цифровых методов анализа экспериментальных данных и подходов к моделированию открывает новые горизонты для материаловедения. Благодаря этому установление глобальных взаимосвязей структуры и свойств кремния с условиями кристаллизации становится возможным. В качестве объекта исследования в данной работе выбран поликристаллический металлургический кремний, как наиболее сложный вид кремния из-за ориентационной и примесной анизотропности. Помимо этого, процессы генерации дефектов (дислокаций, межзеренных границ и тд) крайне чувствительны даже к незначительным флуктуациям температур и напряжений в процессе направленной кристаллизации. Соответственно, даже самые современные подходы к моделированию роста поликристаллического кремния (Ansys, ProCast) не позволяют получить достоверные результаты, необходимые для прогнозирования требуемых свойств материала. Так, например, метод клеточных автоматов предлагает учитывать поликристаллическую структуру, генерируя случайным образом границы без учета их кристаллографических и энергетических особенностей, в результате чего ключевые факторы не принимают участие в расчетах. Это проблема может быть успешно решена благодаря моделированию структуры методом машинного обучения с применением генеративных нейронных сетей на основе цепей Маркова. В совокупности с уже имеющимися данными об энергиях границ различного типа модуль генерации поликристаллической структуры, встроенный в метод клеточных автоматов, может стать высокоэффективным «цифровым двойником» сложнейшего процесса роста кристаллов. Модели «цифровых двойников» позволяют не только симулировать сложные физические процессы и прогнозировать различные свойства материалов. Именно такой комплексный подход является целью настоящих исследований, и любой накопленный успешный опыт в данном направлении имеет огромное значение для будущего науки в целом. В рамках доклада будут рассмотрены традиционные экспериментальные методы анализа структуры кремния (SEM, HREM, EBSD) и его свойств (LBIC, EBIC, CL), а также подходы к моделированию структуры методами машинного обучения на имеющихся у научного коллектива результатах. Также будут освещены вопросы, связанные с выбором стратегий подготовки данных (Data Science) и методов анализа больших данных (Big Data). Поскольку у каждой научной области есть своя характерная специфика, связанная с природой отображения тех или иных физических явлений посредством экспериментальных и теоретических исследований, самой важной задачей является разработка глобального алгоритма комплексных исследований с учетом характерных особенностей как самого материала, так и информативных данных о нём. На примере поликристаллического кремния будут продемонстрированы наиболее оптимальные подходы к созданию универсальной модели его цифрового двойника.

## ВЯЗКОСТЬ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ РАСПЛАВОВ: ЭКСПЕРИМЕНТ, ТЕОРИЯ, МОДЕЛИРОВАНИЕ И МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ

Р.Е. Рыльцев

Институт металлургии УрО РАН, Екатеринбург, Россия  
e-mail: rrylcev@mail.ru

Металлургическими расплавами называют металлические и оксидные (шлаковые) системы, приведенные в жидкое состояние путем некоторого высокотемпературного процесса (как правило — плавления в ходе нагрева). Изучение свойств металлургических расплавов играет большую роль в процессе изготовления твердых материалов и прогнозировании их свойств. В частности, знание транспортных характеристик расплавов, таких как вязкость или коэффициенты диффузии, является необходимым для технологии металлургических процессов получения материалов.

Надежное экспериментальное определение вязкости металлургических расплавов является сложной задачей в силу высоких температур плавления. Действительно, необходимо нагреть систему до температур порядка тысячи градусов контролируя температурные условия и минимизируя эффекты взаимодействия расплава с окружающей средой и элементами экспериментальных установок. Такие измерения являются весьма трудоемкими и содержат большое число источников погрешностей. Для некоторых тугоплавких систем измерения вязкости в настоящий момент не могут быть проведены в принципе.

В связи с этим особую роль приобретают методы теоретического предсказания вязкости. Одним из самых универсальных предсказательных инструментов является атомистическое моделирование позволяющее рассчитать любые характеристики атомного транспорта исходя из траекторий частиц. Ключевой проблемой этого подхода является соотношение точности и вычислительной эффективности. Действительно, высокоточные *ab initio* методы позволяют изучать системы, состоящие всего лишь из сотен частиц на временах порядка десятков пикосекунд, что является недостаточным для расчета вязкости. С другой стороны, методы классической молекулярной динамики позволяют моделировать системы из  $10^6$  —  $10^9$  атомов на временах вплоть до микросекунд. Однако точность такого моделирования ограничена необходимостью использования эмпирических межчастичных потенциалов.

В последние годы появился подход, позволяющий эффективно решать данную проблему [1]. Он основан на использовании методов машинного обучения для генерирования потенциалов межатомного взаимодействия (MLIP — Machine Learning Interatomic Potentials). Расчет вязкости является одним из перспективных приложений MLIP. В последние годы в этом направлении получены многообещающие результаты [2]. Вместе с тем, были выявлены новые проблемы, решение которых является настоящим вызовом для вычислительного материаловедения. Основная проблема — это трудоемкость изготовления MLIP, что не позволяет использовать их для быстрого и масштабного исследования свойств одновременно множества систем, особенно малоизученных. Данные проблемы могут быть решены путем создания гибридных моделей машинного обучения, объединяющих первопринципные расчеты и методы data mining. Развитие таких моделей является одной из актуальных задач.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 22-22-00506.

1. Y. Mishin, Acta Mater. **214**, 116980 (2021).
2. N. Kondratyuk, R. Ryltsev, V. Ankudinov, N. Chtchelkatchev, J. Mol. Liq. **380**, 121751 (2023).

НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОЛЛОИДНЫХ РАСТВОРОВ  
НАНОКРИСТАЛЛОВ CdSe РАЗНОЙ МОРФОЛОГИИА.М. Смирнов<sup>1,2\*</sup>, Б.М. Саиджонов<sup>1</sup>, С.Г. Дорофеев<sup>1</sup>, Р.Б. Васильев<sup>1</sup>, В.Н. Манцевич<sup>1</sup>,  
В.С. Днепровский<sup>1</sup><sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия<sup>2</sup>Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова, Москва, Россия\*e-mail: [alsmir1988@mail.ru](mailto:alsmir1988@mail.ru)

Полупроводниковая нанофотоника занимает одно из приоритетных направлений в развитии современной науки и технологии. Исследование свойств полупроводниковых квантовых точек (КТ) продолжается с начала 1980-х годов. Стремительный рост числа публикаций, посвящённых физике КТ, начался с выходом первых экспериментальных работ, описывающих оптические свойства нанокристаллов CuCl в стеклянной матрице [1, 2], а двумя годами позже — теоретических работ, объясняющих ряд важнейших фундаментальных свойств полупроводниковых нанокристаллов [3-5]. Позже были синтезированы и исследованы коллоидные растворы микрокристаллов и КТ [6]. Основные свойства нанокристаллов, были изучены в течение десяти лет, но исследования, направленные на изучение новых особенностей оптических, нелинейно-оптических и электрооптических процессов в КТ, продолжают до настоящего времени. Определение величин оптических нелинейностей и фундаментальных свойств новых наноструктур является ключевым фактором для использования их преимуществ при создании и улучшении характеристик широкого круга оптоэлектронных устройств, таких, как солнечные батареи, сверхчувствительные сенсоры, дисплеи, лазерные системы и компоненты, системы освещения, биосенсоры, широкополосные оптические телекоммуникационные системы, оптические переключатели, оптические ограничители и т.д. Внедрение новых наноструктур в технологию создания оптоэлектронных устройств для повышения их эффективности становится возможным благодаря точному и детальному пониманию физических процессов, протекающих в них.

Поиск новых низкоразмерных систем, в которых возможно управление оптическими и электронными свойствами путём воздействия оптическими методами в непрерывном и импульсном режимах при комнатных температурах, является одной из приоритетных задач. Помимо КТ, особый интерес для исследователей представляет сравнительно новый тип наночастиц — полупроводниковые коллоидные легированные нанокристаллы, нанокристаллы в виде тетраподов [7] и нанокристаллы планарной геометрии (нанопластинки) [8]. Эти наносистемы отличаются возможностью перестройки оптических резонансов, высокой энергией связи экситонов, при этом линии экситонных резонансов достаточно узкие, а также возможностью эффективной перекачки энергии между резонансами.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 23-72-10008.

1. А.И. Екимов *и др.*, Физика и химия стекла **6**, 511 (1980).
2. А. Екимов *и др.*, Письма в ЖЭТФ **34**, 363 (1981).
3. Ал.Л. Эфрос *и др.*, Физика твердого тела **16**, 1209 (1982).
4. А. Екимов *и др.*, Физика и техника полупроводников **16**, 1215 (1982).
5. R. Rossetti *et al.*, The Journal of chemical physics **79**, 1086 (1983).
6. E. Matijević *et al.*, Journal of Colloid and Interface Science **86**, 476 (1982).
7. P. Peng *et al.*, Nano letters **5**, 1809 (2005).
8. S. Ithurria *et al.*, Journal of the American Chemical Society **130**, 16504 (2008).

## ПРОСТЫЕ МОДЕЛИ ТЕРМОДИНАМИКИ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ И ТЕМПЕРАТУРАХ

К.В. Хищенко

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия  
Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия  
Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия  
e-mail: [konst@ihed.ras.ru](mailto:konst@ihed.ras.ru)

Уравнения состояния материалов представляют интерес для численного моделирования физических явлений в конденсированном веществе при высокой концентрации энергии. В настоящей работе дается краткий обзор моделей для описания термодинамических свойств различных материалов в широком диапазоне давлений и плотностей. Основное внимание уделяется полуэмпирическим моделям, в которых функции термодинамических величин задаются согласно теоретическим представлениям, а константы в этих функциях находятся с привлечением экспериментальных данных. Приводятся примеры построения уравнений состояния тугоплавких металлов (гафний [1], тантал [2] и другие) при высоких давлениях и температурах.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 19-19-00713, <https://rscf.ru/project/19-19-00713/>.

1. K.V. Khishchenko, Phys. Wave Phenom. **31**, 123 (2023).
2. K.V. Khishchenko, Phys. Wave Phenom. **31**, 273 (2023).

## ЧТО СКРЫВАЕТ ТОКОВЫЙ ШУМ В ЭЛЕКТРОННЫХ ПРОВОДНИКАХ?

В.С. Храпай

ИФТТ РАН им. Ю.А. Осипьяна, Черноголовка, Россия

e-mail: [dick@issp.ac.ru](mailto:dick@issp.ac.ru)

Шумовой сигнал в токе или напряжении преимущественно рассматривается экспериментаторами как паразитный эффект, от которого необходимо избавиться. Эта точка зрения не вполне справедлива, если речь идет не о внешних наводках, а о спонтанных флуктуациях тока/напряжения в самом проводнике. Такие флуктуации очень малы, зато содержат в себе информацию, которую трудно, а часто и невозможно, извлечь из стандартных типов отклика. Хорошо известно, что шумовой сигнал позволяет измерить заряд квазичастицы и определить статистику протекания заряда, а в структурах со сверхпроводником обнаружить андреевское отражение [1].

В этом докладе я расскажу о том, какую роль играют фермиевские корреляции в дробовом шуме и как на этом построить шумовой спектрометр [2,3]. Об особенностях шумов в многотерминальных системах со сверхпроводником и о том, как измерить эффективность процесса куперовского расщепления [4,5]. Если позволит время, я коснусь вопроса о корреляционном времени флуктуационного процесса и о том, как это время проявляется в модуляционном шуме сопротивления на резистивном переходе в сверхпроводнике [6].

Работа поддержана проектом РНФ 22-12-00342.

1. Ya. M. Blanter, M. Büttiker. *Physics Reports*. **336**, 1–166 (2000).
2. E. S. Tikhonov *et al.*, *Scientific Reports*. **6**, 30621 (2016).
3. E. S. Tikhonov *et al.*, *Phys. Rev. B* **102**, 085417 (2020).
4. A. O. Denisov *et al.*, *Semicond. Sci. Technol.* **36**, 09LT04 (2021).
5. E. S. Tikhonov, V. S. Khrapai, unpublished (2023).
6. E. M. Baeva *et al.*, T-fluctuations and dynamics of the resistive transition in thin superconducting films. Preprint at <http://arxiv.org/abs/2202.06309> (2022).