

ISSN: 2782-5515



ИФТТ РАН
ISSP RAS

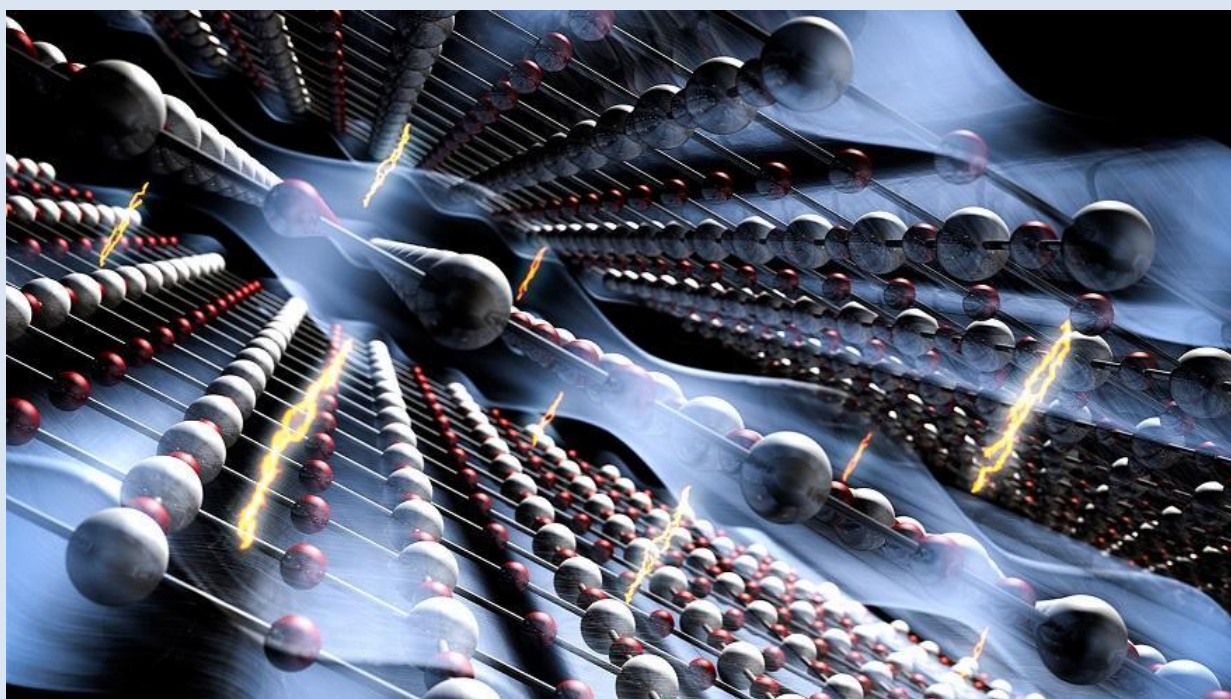
Перст

Информационный бюллетень

перспективные технологии
наноструктуры сверхпроводники фуллерены

Том 31, выпуск 9

сентябрь 2024 г.



<https://imperiousgroup.com/tpost/iv6gznp5f1-odna-iz-poslednih-fundamentalnih-problem>

Черноголовка

Том 31, выпуск 9

сентябрь 2024 г.

В этом выпуске:

СНОВА К ОСНОВАМ

Вместо пространства – время: преломление акустической волны на временной границе

Поведение волн на границе раздела двух сред – хорошо изученный вопрос, и даже в школьной физике это рассматривается достаточно подробно. Когда волна – неважно какой природы, акустическая ли или электромагнитная – падает на границу раздела двух сред, то она отражается и преломляется, причем при преломлении меняется длина волны, а частота остается прежней. Всё ясно, если речь идет о пространственной границе раздела двух сред. Но любопытству учёных нет предела: а что произойдет, если граница будет не в пространстве, а во времени? Временная граница раздела означает быстрое изменение параметров всей среды в определенный момент времени. Теоретические разработки в этом направлении велись еще в начале нашего века [1] в области фотоники и метаматериалов с изменяющимися во времени параметрами, однако недавно механизмы “временного преломления” были продемонстрированы экспериментально исследователями из California Institute of Technology и Bowdoin College (США) [2] (имеется также популярное изложение результатов этой работы [3]).

Физической моделью для исследования распространения волн на временной границе послужила система кольцевых магнитов, скользящих на жестком стержне (рис. 1а). Взаимное отталкивание магнитов моделирует “пружины” – упругое взаимодействие между массами. Величину этого взаимодействия можно менять за счет подачи электрического сигнала на дополнительные катушки, симметрично навитые вокруг магнитов. В некоторый момент времени на катушки подавали импульс тока, изменяя таким образом эффективную жесткость “пружин” (рис. 1б). Картину колебаний магнитов считывали лазерным доплеровским виброметром.

В начальный момент первую массу приводят в движение, и по цепочке начинает распространяться волна. В определенный момент времени экспериментаторы подают ступенчатый сигнал на катушки, и меняется жесткость системы. Параметры падающей волны определяют по колебаниям первой массы, а преломленной волны – по колебаниям последней массы в цепочке. Картина колебаний (рис. 2а) показывает, что в системе происходит преобразование частоты. Отношение частот падающей и преломленной волны оказывается равным отношению скоростей распространения этих волн в системе

И далее ...

ГРАФЕН

- 3 Графен на Луне
- 4 Управление щелью в “гантельном” графене

МАГНИТЫ

- 5 Чудеса самоорганизации магнитных доменов: кноский лабиринт и греческий орнамент в модели Ландау-Гинзбурга

ВЕСТИ С КОНФЕРЕНЦИЙ

- 6 О работе Международного симпозиума “Spin Waves – 2024”

с исходной и с измененной жесткостью. Таким образом, для преломления волн на временной границе работают аналоги формул Френеля, только вместо изменения длины волны изменяется частота. Рассчитаны также дисперсионные соотношения для волн, и продемонстрировано соответствие теоретических и экспериментальных данных.

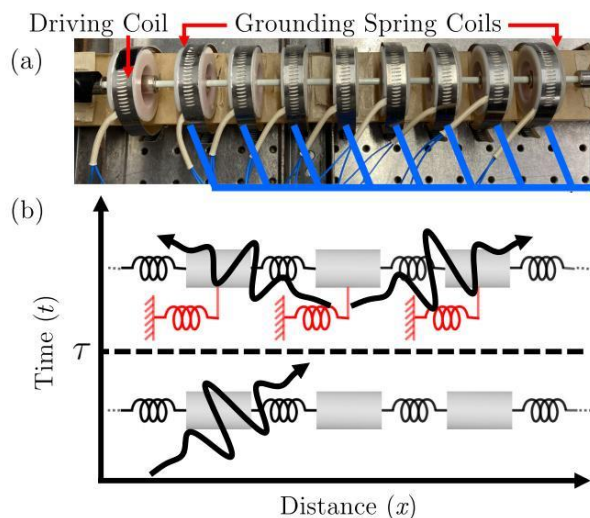


Рис. 1. а – Фото физической модели: цепочка колеблющихся масс; б – схема временной границы для волн, распространяющихся в системе. В момент времени τ включают дополнительные катушки.

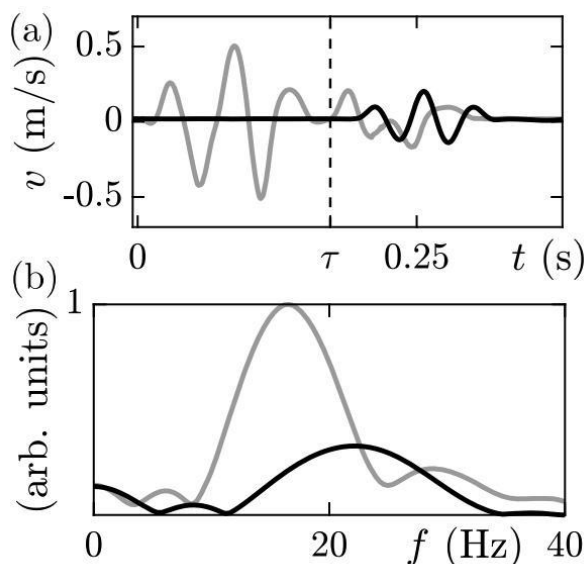


Рис. 2. Экспериментальные результаты: колебания первой (серая кривая) и последней (черная кривая) массы в цепочке: а – зависимость скорости колебаний от времени; б – спектр колебаний.

Стоит отметить, что преобразование частоты здесь происходит не вследствие нелинейных эффектов, а вследствие законов сохранения энергии и импульса, а значит, эффективность такого преобразования будет достаточно высокой. Об этом можно судить и по эксперимен-

тальным графикам – амплитуда преломленной волны (рис. 2 а,б) не сильно уступает амплитуде падающей.

Таким образом, механические системы, подобные исследованным в работе [2], можно использовать для эффективного преобразования частоты в задачах обработки акустических сигналов. Такие системы перспективны и в оптике, важно только помнить, что время перестройки параметров системы должно быть меньше характерных периодов колебаний, что вызывает ряд трудностей для экспериментальной реализации.

З. Пятакова

1. J.T.Mendonça et al., *Phys. Rev. A* **62**, 033805 (2000).
2. B.L.Kim et al., *Phys. Rev. Lett.* **133**, 077201 (2024).
3. R.Berkowitz, *Physics* **17**, 126 (2024).

ГРАФЕН

Графен на Луне

О существовании в космосе фуллеренов C_{60} и C_{70} , в том числе в твердой фазе, и даже о возможном образовании углеродных нанотрубок уже рассказывал ПерсТ (например, [1]). А как же графен? Действительно, изучая ИК спектры, зарегистрированные телескопами, ученые предположили, что некоторые их особенности могут соответствовать графену. По оценкам это примерно 1.9% межзвездного углерода, а конкретная структура определяется процессами образования. Убедительные свидетельства существования графена в космосе опубликовали недавно китайские ученые [2]. Правда, они обнаружили его не в межзвездной среде, а впервые в природном виде – в лунном грунте! Исследователи проанализировали фрагменты грунта, который в конце 2020 года доставила их автоматическая лунная станция “Чанъэ-5” (Чанъэ – китайская богиня Луны). Использовали микроскопию высокого разрешения (HRTEM), рамановскую спектроскопию и другие методы. В образце размером 2.9×1.6 мм (рис. 1) детально изучили несколько участков с высоким содержанием углерода. Там и был обнаружен графен (от 2 до 7 слоев) – либо в отдельных чешуйках вблизи микрочастиц с железом, либо встроенный в углеродную оболочку, окружающую частицы минерала, также содержащего железо.



Рис. 1. Образец лунного грунта, изученный авторами работы [2].

Исследования чешуек при высоком разрешении показали, что как в двухслойных, так и в многослойных структурах расстояние между слоями составляет 0.35 нм, т.е. близко к 0.34 нм, межплоскостному расстоянию графита (002), рис. 2.

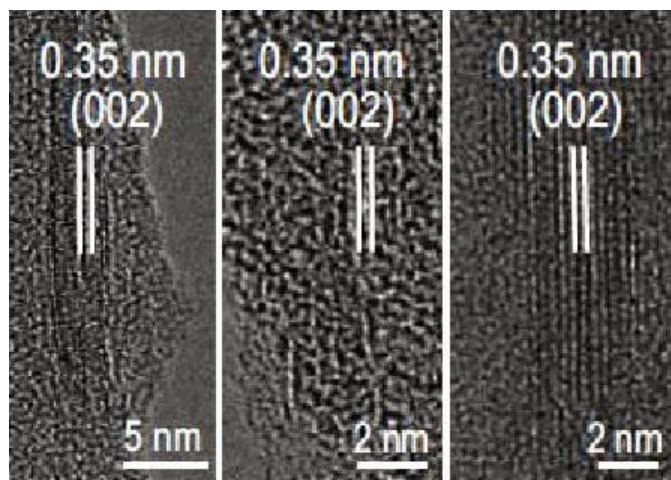


Рис. 2. HRTEM изображения чешуек графена.

Некоторые HRTEM изображения слоев графена в тонкой углеродной оболочке вокруг “ядра”, частицы минерала, показаны на рис. 3. Расстояния между слоями (0.36 – 0.39 нм) здесь больше номинального (0.34 нм), что соответствует графену с несколькими дефектами. Обнаружение графена в структурах ядро-оболочка и в чешуйках вблизи частиц, содержащих железо, позволило авторам [2] выдвинуть гипотезу его формирования. Графен не отслаивается от графита, а образуется в высокотемпературных каталитических процессах на поверхности Луны. Влияет и солнечный ветер, и каталитическое действие железосодержащих минералов. Возможно, воздействие также оказала вулканическая активность на ранних стадиях существования Луны.

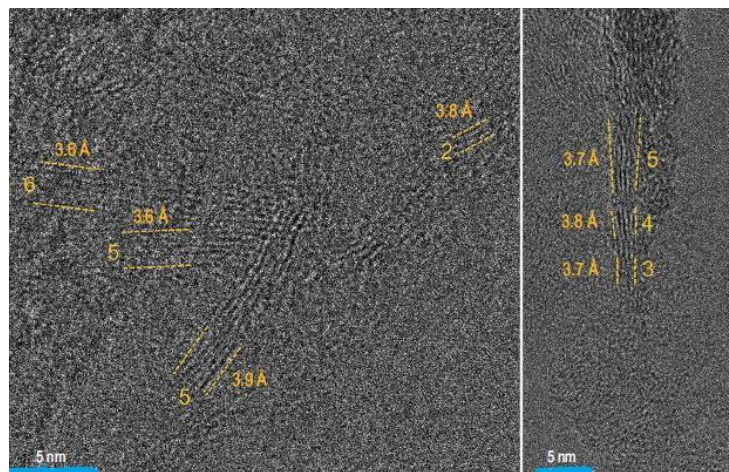


Рис. 3. HRTEM изображения слоев графена в углеродной оболочке частиц минерала. Цифрами показано количество слоев.

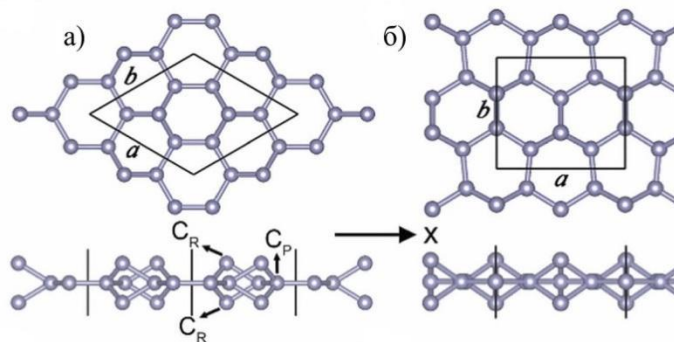
Китайские ученые считают, что продолжение лунной программы важно не только для астрономии, геологии, познания эволюции Луны. Предположения об образовании природного графена под действием катализаторов-минералов могут оказаться полезными для развития недорогих масштабируемых методов синтеза высококачественного графена.

О. Алексеева

1. [ПерсТ 30, вып. 3, с.1 \(2023\).](#)
2. W.Zhang et. al., Natl. Sci. Rev. **11**, nwae211 (2024).

Управление щелью в “гантельном” графене

В теперь уже далеком 2013 году впервые была предложена гексагональная “гантельная” структура для силицена (HDB), которая, как оказалось, обладает аномально высокой устойчивостью, подтвержденной впоследствии как теоретически, так и экспериментально. И вот совсем недавно исследователи из Китая и Бельгии [1] на основании полученных данных численных расчетов с использованием теории функционала плотности сообщили о возможном существовании монослоев гексагонального гантельного графена (HDB C₁₀) и прямоугольного гантельного графена (RDB C₁₀). Структура предсказанных двумерных материалов достаточно любопытна, поскольку построена из расположенных в двух различных пространственных положениях атомов углерода: лежащих в плоскости (C_P) и приподнятых над ней (C_R), что очень напоминает известный спортивный снаряд, см. рисунок.



Атомная структура монослоев гексагонального гантельного графена (HDB C_{10} , а) и прямоугольного гантельного графена (RDB C_{10} , б). Черными линиями обозначена элементарная ячейка двумерного кристалла.

Все базовые расчеты авторы выполняли в программном пакете VASP в рамках обобщенного градиентного приближения с использованием функционала PBE и PAW-псевдопотенциалов, а для уточнения полученных электронных характеристик они применили уже гибридный функционал HSE06. Исследователи уточняют, что как в случае гексагональной, так и прямоугольной решеток выбранная ячейка содержала десять атомов углерода: шесть атомов типа C_P и четыре атома типа C_R (см. рис.). Сначала авторы убедились в динамической устойчивости двумерных кристаллов, получив их фононные спектры, а затем рассчитали электронные характеристики. Об их высокой кинетической устойчивости свидетельствуют и данные молекулярно-динамического моделирования из первых принципов. Атомная структура не теряла свою целостность в течение 5 пс при достаточно высокой (1000 K) температуре. В итоге оказалось, что гантельные графены (как в конфигурации HDB, так и RDB) являются непрямозонными полупроводниками с механическими свойствами, сопоставимыми с традиционным графеном, и демонстрирует высокую подвижность носителей. К слову, ширина полупроводниковой щели, полученная с помощью функционала PBE, составила 1.69 и 2.63 эВ для HDB и RDB структур, соответственно. Для настройки электронных характеристик гантельного графена, а именно управления шириной запрещенной зоны, авторы предложили использовать процедуру гидрирования, другими словами, допирование поверхности материала атомами водорода. Оказывается, помещая водород на атомы C_R , можно изменять электронную зонную структуру гантельного графена в широких пределах: от полупроводника до полуметалла. Производные от гантельного графена

системы, содержащие от одного до четырех атомов водорода на ячейку, вида $C_{10}H_n$ ($n = 1, 2, 3, 4$) также оказались кинетически устойчивыми, как и незамещенный образец ($n = 0$). Авторы отмечают, что если ячейка содержит один или три атома-допанта, то это приводит к появлению характерных особенностей на зонной структуре в виде уплощенных зон вблизи уровня Ферми. При адсорбции сразу двух атомов водорода на поверхности возможно два случая, когда атомы расположены на одной или на противоположных сторонах графена. Последний вариант оказывается нестабильным, а односторонняя гидrogenизация приводит к устойчивому кристаллу и отсутствию щели на электронной зонной структуре. Что касается HDB и RDB гантельных графенов, содержащих четыре адсорбированных атома водорода на ячейку, то они также устойчивы, но относятся уже к классу широкозонных полупроводников. В конечном итоге исследователи полагают, что гантельный графен вполне возможно получить экспериментально в ближайшей перспективе. По сравнению с традиционным, гантельный графен обладает большим числом адсорбционных узлов, куда можно “прикрепить” водород, что предложит исследователям максимальную вариативность при настройке зонной структуры. Таким образом, гантельный графен в случае его синтеза станет прекрасным примером зонной инженерии с помощью гидрирования.

М. Маслов

1. Y.Song et al., *Nano Energy* **127**, 109763 (2024).

МАГНИТЫ

Чудеса самоорганизации магнитных доменов: кносский лабиринт и греческий орнамент в модели Гинзбурга–Ландау

В конце 80-х годов прошлого века, на волне интереса к синергетике, внимание специалистов по микромагнетизму привлекли работы группы Г.С. Кандауровой, описанные в обзоре [1], в которых был приведен яркий пример самоорганизации в мире магнитных доменов: неупорядоченная лабиринтная доменная структура пленок ферритов-гранатов под действием переменного низкочастотного (0.1 – 10 кГц) магнитного поля образует устойчивые динамические структуры, такие как кольцевые конфигурации доменных конфигураций и спиральные домены. Однако условия зарождения спиральных доменов в неупорядоченной до-

менной структуре исследованы недостаточно, также вызывает дискуссии механизм образования спиральных доменов. Недавняя работа Д.С. Мехоношина и Л.А. Памятных из Уральского федерального университета [2] позволяет по-новому взглянуть на эти явления.

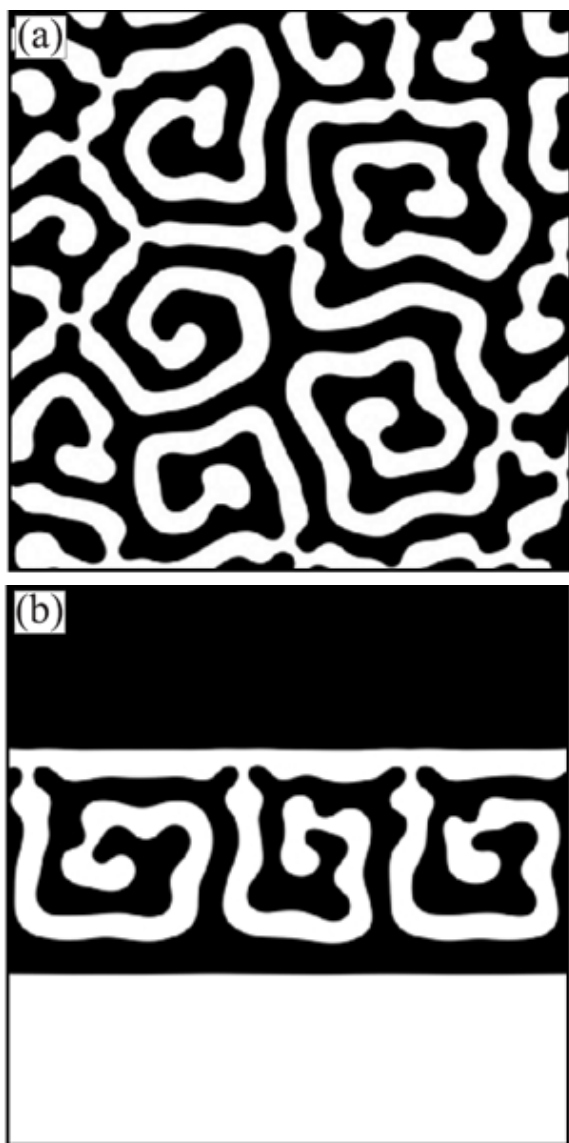


Рис. 1. Динамические доменные конфигурации, возникающие под действием переменного магнитного поля: а – плотная упаковка спиральных доменов; б – образование цепочки спиральных доменов при линейном убывании амплитуды осциллирующего магнитного поля и дополнительном воздействии неоднородного постоянного магнитного поля [2].

В качестве метода исследования авторами [2] выбрана модифицированная модель Гинзбурга–Ландау. Как известно, эта феноменологическая теория, используя простую идею разложения энергии в ряд по степеням параметра порядка, оказалась очень эффективным инструментом при анализе фазовых переходов. В модифицированной модели, использованной

[2], в качестве параметра порядка вводится скалярная величина, равная нормальной компоненте приведенного вектора намагниченности пленки. Использование только одной компоненты вектора намагниченности существенно уменьшает время расчетов по сравнению с полномасштабным микромагнитным моделированием и позволяет рассматривать динамику областей большого размера (десятки и сотни периодов доменной структуры) на больших временных интервалах (десятки периодов магнитного поля).

Данная методика позволила воспроизвести образование замысловатой, как лабиринт Минотавра, системы спиральных доменов с плотной упаковкой (рис. 1а), выявить амплитудные и частотные диапазоны существования такого рода структур. Любопытный эффект возникает в области, где постоянное магнитное поле неоднородно: на стыке областей с мономономенным состоянием (рис. 1б) в области, где постоянное магнитное поле по модулю меньше поля насыщения, можно наблюдать “греческий орнамент” в виде цепочки спиральных доменов.

Работа [2] также заставила по-новому взглянуть на сам механизм образования динамических структур. Так, долгое время считалось, что причиной образования спиральных доменов является гиротропная сила, которая приводит к закрутке конца растущего полосового домена, равно как и к боковому сносу движущегося цилиндрического домена (подобно тому, как эффект Магнуса отклоняет летящий мяч). Однако в рамках модели, рассмотренной в данной работе, гиротропная сила возникнуть не может, поскольку параметр порядка описывается скалярной величиной. Таким образом, формирование спирального домена может быть связано исключительно с неустойчивостями формы доменов, вызываемых магнитостатическим взаимодействием.

А. Пятаков

1. Г.С.Кандаурова, УФН **172**, 1165 (2002).
2. Д.С.Мехоношин, Л.А.Памятных, Письма в ЖЭТФ **120**, 260 (2024).

ВЕСТИ С КОНФЕРЕНЦИЙ

О работе Международного симпозиума “Spin Waves – 2024”

С 26 по 29 августа в Саратовском национальном исследовательском государственном университете имени Н.Г. Чернышевского проходил Международный симпозиум “Spin Waves –

ПерсТ, 2024, том 31, выпуск 9

2024". На базе СГУ симпозиум проходил впервые. Соорганизаторы научного съезда – Институт радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН и Научный совет РАН по физике конденсированного состояния.

Открыл симпозиум академик РАН, директор Института радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН Сергей Аполлонович Никитов. Он остановился на необычной истории этого научного форума, которая началась ещё в прошлом столетии в виде неформального семинара представителей фундаментальной науки в Санкт-Петербурге (Ленинграде). Затем исторический экскурс продолжили член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник Института физических проблем имени П.Л. Капицы РАН Александр Иванович Смирнов и организатор предыдущих международных симпозиумов "Spin Waves" в Санкт-Петербурге – главный научный сотрудник Физико-технического института имени

А.Ф. Иоффе РАН Роман Васильевич Писарев.

Симпозиум по спиновым волнам традиционно проводится вот уже более 50 лет каждые два-три года в Санкт-Петербурге в Физико-техническом институте имени А.Ф. Иоффе РАН. Первым организатором симпозиума был проф. А.Г. Гуревич – автор известных книг по теме спиновых волн. В 2007 году, после некоторого перерыва, симпозиум был возрожден и снова проведен в Санкт-Петербурге. В период 2007-2018 годов симпозиумы по спиновым волнам стали площадкой для активного международного сотрудничества, в организационный и программный комитеты входили ведущие исследователи со всего мира. В 2024 году началась новая глава в истории симпозиума – он прошел в Саратове – городе, где уже несколько десятилетий ведутся перспективные исследования спиновых волн и их приложений.



а



б



в



г

Рис. 1 – Выступающие с речью на открытии Международного симпозиума "Spin Waves – 2024":

а – академик РАН, директор Института радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН С.А. Никитов, б – главный научный сотрудник Института физических проблем имени П.Л. Капицы РАН А.И. Смирнов, в – главный научный сотрудник Физико-технического института имени А.Ф. Иоффе Р.В. Писарев. г – Пленарное заседание Международного симпозиума "Spin Waves – 2024" в Большой физической аудитории III корпуса СГУ.

Тематика, связанная с исследованием спиновых волн в магнитоупорядоченных средах, стала развиваться в Саратовском университете начиная с 1980-х годов. Основоположником этого научного направления в СГУ считается В.С. Стальмахов – заслуженный деятель науки РСФСР, который с 1970 по 1991 год заведовал кафедрой общей физики. Он внёс весомый вклад в развитие на базе СГУ нового научного направления – магнитоэлектроники, где изучались волновые явления в магнитоупорядоченных средах в СВЧ и КВЧ диапазонах. В 1990-е годы после распада Советского Союза благодаря усилиям одного из его сподвижников – профессора Ю.П. Шараевского, спин-волновая тематика закрепляется в рамках научной школы профессора, члена-корреспондента РАН Д.И. Трубецкого. Проводятся исследования нелинейных спиновых волн (солитонов), а также динамического хаоса в магнитных плёнках и автоколебательных системах на их основе.

В 2010 году Саратовский университет выигрывает мегагрант под руководством приглашённого ученого С.А. Никитова. Им создаётся лаборатория “Метаматериалы”, занимающаяся изучением волновых и колебательных процессов в искусственно созданных периодических структурах – фотонных, магнонных и фононных кристаллах. Сегодня лаборатория «Метаматериалы» успешно развивает свою деятельность, а её сотрудники принимают активное участие в выполнении грантов Российского

научного фонда, государственного задания, а также одного из четырёх стратегических проектов СГУ “ИКТ – электроника” по программе “Приоритет 2030”.

В 2024 году в симпозиуме приняли участия более 100 представителей научного сообщества от Крыма и до Дальнего Востока. На симпозиуме свои результаты представляли также ученые из Испании, США и Германии. Работало 8 устных секции по разным областям магнетизма, но больше всего докладов было представлено в секциях, посвященных магнонике и спиновому возбуждению в низкоразмерных квантовых структурах. Помимо секций с устными докладами работала также стендовая секция, на которой было представлено более 50-и докладов. Конференция проводилась в гибридном формате – были выступления как в очной форме, так и в режиме онлайн. Особенно это было удобно для иностранных участников и тех, кто по определенным причинам не смог посетить конференцию лично.

В рамках конференции был организован конкурс на лучший стендовый доклад, трем победителям этого конкурса были вручены грамоты и памятные призы. Помимо этого, была проведена экскурсия по лаборатории “Метаматериалы” с демонстрацией работы установки мандельштам-бриллюэновской спектроскопии, которая на данный момент является единственной действующей установкой в России.



Рис. 2. Общее фото участников симпозиума “Spin Waves – 2024”

А. Бир

Информационный бюллетень ПерсТ
издается информационной группой ИФТТ РАН

Главный редактор: И. Чугуева, e-mail: ichugueva@yandex.ru

Научные редакторы К. Кугель, Ю. Метлин

В подготовке выпуска принимали участие: О. Алексеева, А. Бир, М. Маслов, А. Пятаков, З. Пятакова

Выпускающий редактор: И. Фурлетова