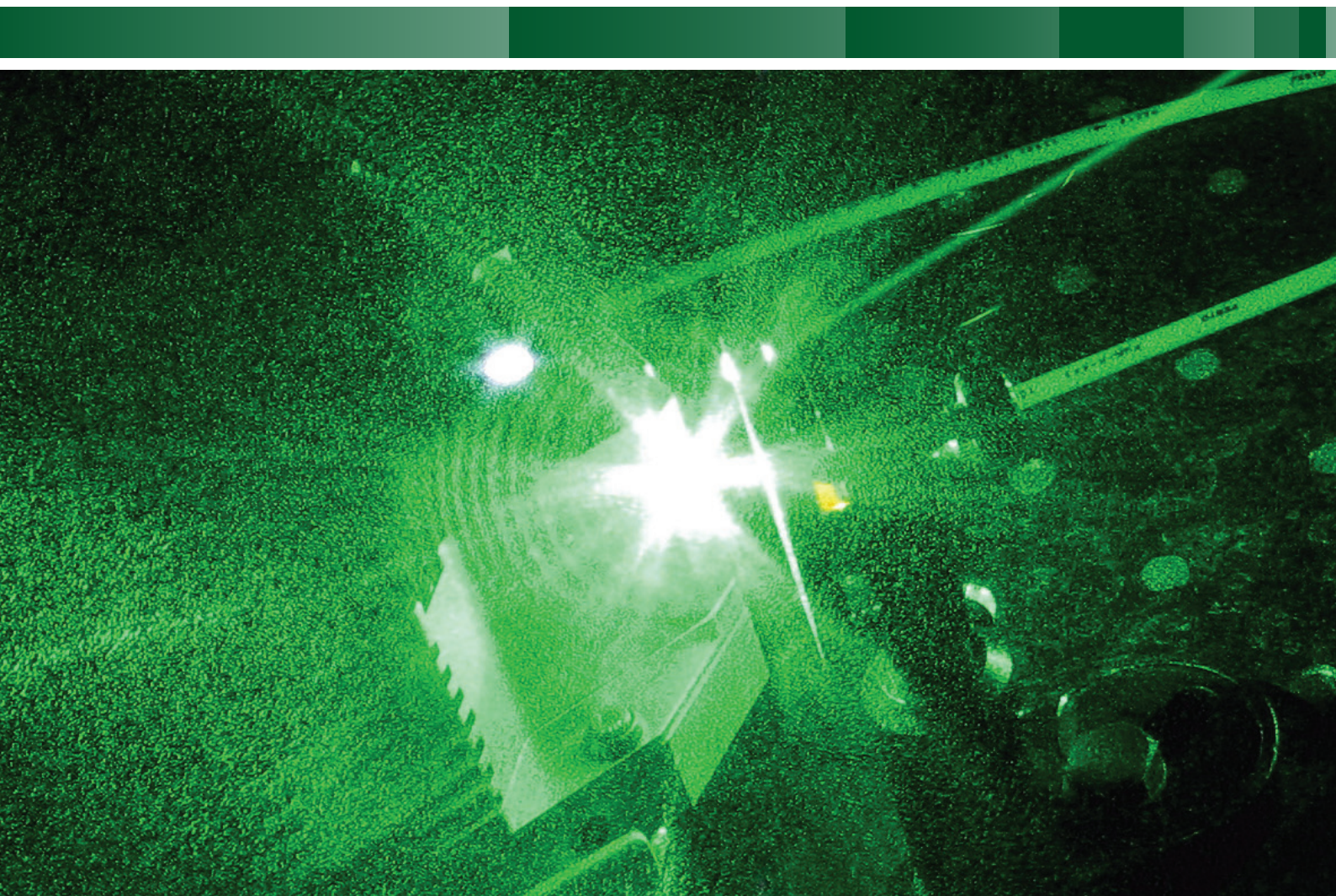


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук»

# Казанский физико-технический институт имени Е. К. Завойского



Исследования и разработки  
2016–2020





КФТИ

# Предисловие

Уважаемые коллеги!

С первого года 21 века Казанским физико-техническим институтом издаётся Ежегодник КФТИ. Фактически, пишется своего рода институтская летопись, в которой достаточно полно отражается картина всего происходящего и содержится ценная информация о сотрудниках, научной и организационной деятельности, памятных событиях и многом другом.

В связи с 70-летием физтеха было принято решение периодически, раз в пять лет, издавать сборник наиболее значимых научных результатов. Предполагается, что представленный материал должен быть изложен таким образом, чтобы любой читатель мог получить исчерпывающее представление о сути и уровне проводимых коллективом института исследований.

Мы исходим из того, что составление подобного дайджеста научных достижений приобретает особую актуальность в связи с объединением всех институтов Российской академии наук в Казани в единый Федеральный исследовательский центр

(ФИЦ КазНЦ РАН). Надеемся, что это поможет нашим коллегам по ФИЦ быстрее и полнее оценить потенциал физтеха и его возможности в решении новых мультидисциплинарных задач.

Следует отметить, что и для научных сотрудников физтеха подготовка такого сборника является весьма полезным делом. Необходимость сжато и понятно сформулировать значимый результат, полученный за последние пять лет, заставляет критически оценить затраченные на его достижение материальные и временные ресурсы, учит организовать научную работу так, чтобы она приводила к результатам, которые можно считать достижениями. Наконец, учит умению изложить этот результат не «птичьим» языком специфических научных терминов, но популярным, доступным для неспециалистов и рядовых читателей языком.

Опыт подготовки этого издания показывает, что не только получение достойных результатов требует большого труда, но и их представление обществу требует немалых усилий. Всем большое спасибо за проделанную работу.

Руководитель КФТИ, профессор РАН  
А. А. Калачев

Научный руководитель КФТИ, академик РАН  
К. М. Салихов



# Принципы спинового обмена

## Новая парадигма спинового обмена и его проявления в спектроскопии ЭПР

Интенсивные исследования спинового обмена ведутся с начала 60-х годов прошлого века. Большой интерес к этой проблеме связан с тем, что спиновый обмен используется как модельная реакция для определения частоты бимолекулярных столкновений молекул в сложных средах, например, в биологических системах.

Наиболее подходящим методом для определения скорости спинового обмена является ЭПР-спектроскопия.

В 2019 году была сформулирована новая парадигма спинового обмена на основе теоретических результатов К. М. Салихова, которые были подтверждены экспериментами, проведёнными в различных лабораториях.

Новая парадигма спинового обмена раскрывает ряд принципиально новых свойств этого явления и его проявления в ЭПР-спектроскопии, которые не были отражены в существующей парадигме. Принципиально важное отличие новой парадигмы от существующей состоит в том, что новая парадигма вводит в рассмотрение коллективные моды движения спинов, в то время как в существующей парадигме проявления спинового обмена в спектрах ЭПР пытаются объяснить на основе одночастичного подхода.

С точки зрения проявления спинового обмена в ЭПР-эксперименте принципиальное значение имеет перенос спиновой когерентности от спина-партнёра по взаимодействию при столкновении. Именно этот процесс ответствен за формирование коллективных мод движения спинов и смешанную форму резонансных линий в спектре ЭПР.

Смена парадигмы спинового обмена привела к совершенно новой интерпретации эффекта обменного сужения спектра ЭПР и к новому

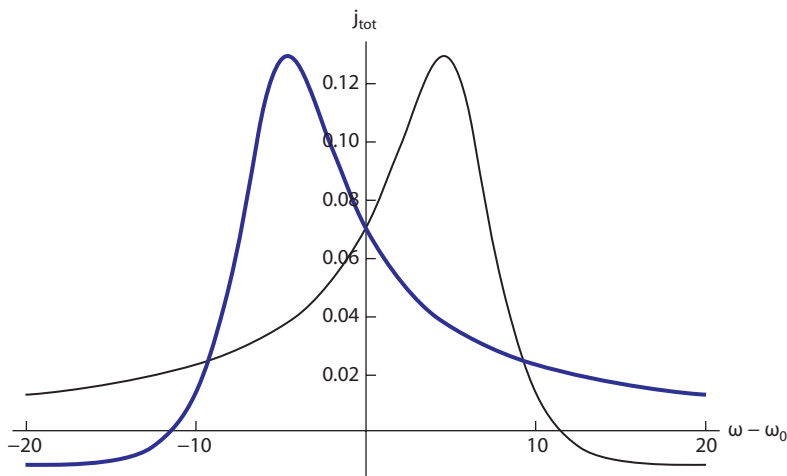


Рис. 1: Вызванная спиновым обменом асимметричная форма линий спектра ЭПР в системе спинов с двумя разными собственными резонансными частотами. Параметры модели: разница собственных резонансных частот спинов  $a = 10$  Гс, скорость эквивалентного спинового обмена  $V = 3$  Гс, частота Раби СВЧ-поля  $\omega_1 = 1$  Гс,  $1/T_1 = 0.05$  Гс,  $1/T_2 = 0.1$  Гс. Для перевода единицы измерения в гауссах в круговую частоту  $\omega$  надо умножить на  $1.76 \cdot 10^7$ . В системе спинов с двумя разными собственными резонансными частотами коллективные (независимые друг от друга!) моды движения дают линии асимметричной формы. При этом низкополевая и высокополевая компоненты спектра имеют вклады дисперсии с противоположными знаками.

протоколу определения скорости спинового обмена из анализа формы спектра ЭПР.

Новая парадигма спинового обмена создала теоретическую основу для повышения точности определения частоты столкновений молекул в сложных средах. Действительно, были сформулированы новые кинетические уравнения для намагниченности спинов в разбавленных парамагнетиках, в которых последовательным образом учитывается вклад диполь-дипольного взаимодействия в парамагнитную релаксацию спинов и учитывается возможность реализации неэквивалентного спинового обмена. Новая парадигма даёт хороший импульс развитию применений спинового обмена в молекулярной биологии, физике и химии. Она уже привела к постановке новых экспериментов.

### Существующая парадигма спинового обмена и его проявления в спектрах ЭПР

1. Обменное гейзенберговское взаимодействие сохраняет суммарный спин и вызывает эквивалентный обмен спиновыми состояниями между двумя частицами при их столкновениях, т.е. константы скорости декогеренции спинов,  $K_{ex, sd}$ , переноса спиновой когерентности на выделенный спин от партнёра по столкновению,  $K_{ex, sc}$ , и скорости переноса энергии спинового возбуждения,  $K_{ex, sec}$ , имеют одинаковое значение и равны  $K_{ex}$ .

2. Спиновый обмен сокращает время жизни спина электрона каждого парамагнитного зонда в определённом состоянии. В результате в области сравнительно медленного спинового обмена линии спектра ЭПР уширяются. Например, k-ая

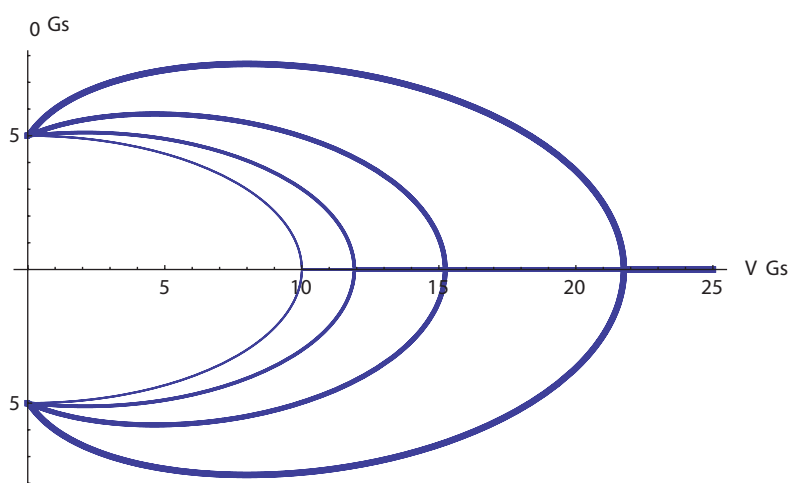


Рис. 2: Зависимость резонансных частот от скорости спинового обмена,  $V = K_{ex}C$  ( $C$  – концентрация спинов), при разных значениях частоты Раби  $\omega_1 = 0.01, 0.5, 1, 2$  Гс (чем больше  $\omega_1$ , тем толще кривая). Другие параметры такие же, как на рис 1. В области линейного отклика спиновой системы, когда  $\omega_1 = 0.01$  Гс, с ростом скорости переноса спиновой когерентности две резонансные частоты сближаются и при достижении  $V = a = 10$  Гс в спектре ЭПР наблюдается только одна резонансная частота, происходит коллапс спектра в одну линию. Но при достаточно больших значениях СВЧ-мощности с ростом скорости переноса спиновой когерентности сначала резонансные частоты коллективных мод «расталкиваются», разница резонансных частот становится больше, чем разница собственных частот спинов  $a = 10$  Гс. С дальнейшим ростом  $V$  резонансные частоты сближаются, и происходит коллапс спектра. Однако в отличие от ситуации линейного отклика в условиях насыщения (при больших мощностях СВЧ-поля) коллапс (эффект обменного сужения) спектра происходит при скорости переноса спиновой когерентности существенно больше, чем начальная разница резонансных частот спинов, т.е. при  $V > a$ !

линия за счёт спинового обмена уширяется как ( $\varphi_k$ -статистический вес  $k$ -ой компоненты спектра):

$$\Delta\omega_{1/2}(k) = (1 - \varphi_k)K_{ex}C.$$

3. Спиновый обмен вызывает сдвиг резонансных частот спинов в области сравнительно медленного обмена.

4. Каждая резонансная линия ЭПР имеет симметричную (чётную) форму лоренцевского распределения.

5. Быстрый обмен спиновой когерентности «усредняет» до нуля все взаимодействия, ответственные за распределение резонансных частот спинов. Это подразумевает, что «выравниваются» резонансные частоты всех спинов. В результате наблюдается эффект, получивший название обменное сужение спектра ЭПР.

6. Сильное микроволновое поле уширяет наблюдаемые в эксперименте резонансные линии спектра ЭПР.

7. Дальнейшее диполь-дипольное спин-спиновое взаимодействие также, как и обменное взаимодействие при случайных столкновениях частиц, проявляется в спектрах ЭПР. В отличие от обменного

взаимодействия, диполь-дипольное взаимодействие не вносит вклада в перенос спиновой когерентности от партнёра по взаимодействию. Это означает, что диполь-дипольное взаимодействие не вызывает сдвига резонансных частот и эффекта сужения спектра ЭПР.

### Новая парадигма спинового обмена и его проявления в спектрах ЭПР

1. В ходе столкновения двух парамагнитных частиц их суммарный спин может не сохраняться, так как даже сравнительно слабое спин-зависящее взаимодействие в изолированных частицах, например, сверхтонкое взаимодействие ( $a$ ) неспаренного электрона с магнитными ядрами, может существенно повлиять на результат столкновения, если продолжительность встречи двух частиц  $\tau_c$  достаточно велика,  $a\tau_c \geq 1$ , причём  $K_{ex,sd} \neq K_{ex,set} \neq K_{ex,sc}$  и  $K_{ex,sd} \geq K_{ex,set}$ .

2. Диполь-дипольное взаимодействие вызывает перенос спиновой когерентности от партнёра по

взаимодействию, причём в типичных условиях ЭПР-экспериментов вклады обменного и диполь-дипольного взаимодействий в скорость переноса спиновой когерентности вычитаются, а не складываются, как можно было ожидать.

3. Перенос спиновой когерентности создаёт коллективные моды движения спинов. Это коренным образом меняет наши представления о характере парамагнитной релаксации спинов. Важно подчеркнуть, что за формирование коллективных мод движения спинов ответственна «отдача» когерентности при столкновении в смысле третьего закона Ньютона.

4. Каждая коллективная мода даёт резонансную линию со своей резонансной частотой и шириной.

5. В случае медленного спинового обмена линии спектра ЭПР имеют смешанную форму, представляют сумму симметричной лоренцевской кривой поглощения и антисимметричной лоренцевской кривой дисперсии:

$$J(\omega_{0k}) = J_0(1/(1 + (\omega - \omega_{0k})^2 T_{2k}^2)) + P_{dis}(\omega - \omega_{0k})T_{2k}/(1 + (\omega - \omega_{0k})^2 T_{2k}^2).$$

6. В случае быстрого переноса когерентности микроволновое поле возбуждает только одну коллективную моду. Другие коллективные моды дают «запрещённые» линии. Этим объясняется так называемый эффект обменного сужения спектра.

7. В сильных СВЧ-полях формируются магнитные поляритоны – связанные состояния спинов и фотонов. В области медленного спинового обмена наблюдаемые в ЭПР-эксперименте частоты резонанса зависят от мощности СВЧ-поля. Условие обменного сужения спектра также изменяется с мощностью СВЧ-поля.

1. Салихов К.М. Состояние теории спинового обмена в разбавленных растворах парамагнитных частиц. Новая парадигма спинового обмена и его проявление в ЭПР спектроскопии. УФН **189**, 1017–1043 (2019)
2. Salikhov K.M. Fundamentals of spin exchange. Story of a paradigm shift. Springer (2019)
3. Salikhov K.M. New paradigm of spin exchange and its manifestations in EPR spectroscopy. Appl. Magn. Reson. **51**, 297–325 (2020)
4. Salikhov K.M. Interpretation of the nature of the mixed form of resonance lines of the EPR spectrum in a new paradigm of spin exchange. Abnormal “resonance” of non-resonant spins. J. Phys. Chem. B **124**, 6628–6641 (2020)

# Квантовые биения и относительность времени в динамике открытых квантовых систем

## Эффекты спиновой динамики в стационарной ЭПР-спектроскопии

При исследовании спектров электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) синтетического форстерита ( $Mg_2SiO_4$ ), легированного трёхвалентными ионами тулия ( $Tm^{3+}$ ), в диапазоне частот 244–280 ГГц обнаружены узкие резонансные сигналы. В этой области частота резонансных переходов соответствует начальному расщеплению в нулевом магнитном поле и очень слабо зависит от величины магнитного поля (рис. 1а). На рис. 1б представлены спектры ЭПР, детально показывающие форму узких линий. Появление линии в магнитном поле около  $\pm 11$  мТл связано с резким уменьшением резонансного поглощения в экстремуме частотно-полевой зависимости резонансных переходов.

Резкое увеличение поглощения микроволнового излучения в нулевом магнитном поле мы объясняем квантовой интерференцией электронно-ядерных состояний с одинаковой энергией, которая является частным случаем квантовых биений с нулевой частотой.

При построении последовательной непротиворечивой теории этого явления нами было сформулировано положение об относительности времени в динамике открытых квантовых систем. Мы вводим определение локальных полностью некогерентных подсистем квантовой системы, в которых квантовая система находится с определённой вероятностью в каждый момент времени в процессе

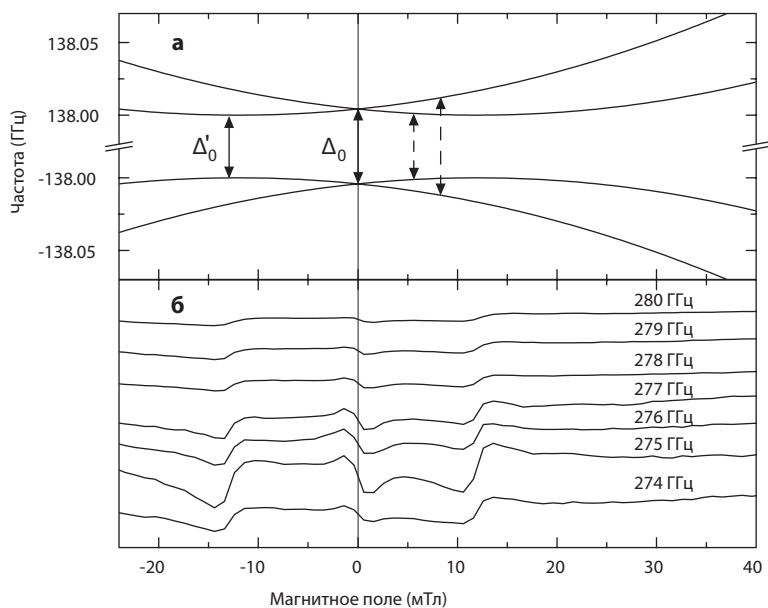


Рис. 1: а) Теоретические зависимости энергии (в единицах частоты) электронно-ядерных уровней от магнитного поля для иона с расщеплением электронных уровней в кристаллическом поле  $\Delta_0 = 276$  ГГц. Штриховые линии показывают разрешённые переходы между сверхтонкими подуровнями с одинаковыми проекциями ядерного магнитного момента. б) Спектры ЭПР иона  $Tm^{3+}$  в форстерите вблизи нулевого значения магнитного поля. Цифры в правой части спектров показывают рабочую частоту спектрометра.

непрерывного наблюдения (измерения). Для таких подсистем произвольный момент времени в лабораторной системе координат является начальным моментом взаимодействия с внешним (измерительным) полем. Такой динамический «многовременной» вклад объясняет возникновение квантовых биений на нулевой частоте в ЭПР-спектроскопии при пересечении энергетических уровней (аналог эффекта Ханле в оптической спектроскопии).

1. Соловаров Н.К., Тарасов В.Ф., Жариков Е.В. Эффекты спиновой динамики в субмиллиметровой ЭПР-спектроскопии примесных ионов тулия в синтетическом форстерите. Письма в ЖЭТФ **104**, вып. 2, 91–96 (2016), DOI: 10.7868/S0370274X16140058
2. Тарасов В.Ф., Соловаров Н.К., Жариков Е.В. Проявление эффекта Ханле в субмиллиметровой ЭПР-спектроскопии примесных ионов тулия в синтетическом форстерите. Оптика и спектроскопия **121**, вып. 4, 614–620, (2016), DOI: 10.7876/S0030403416100251
3. Соловаров Н.К., Тарасов В.Ф. Относительность времени в динамике открытых квантовых систем. ЖЭТФ **154**, вып. 3(9), 506–51 (2018), DOI: 10.1134/S0044451018090055

# Шаг к созданию сверхпроводящего ключа для компьютеров будущего

Создан сверхпроводящий спиновый клапан на базе полуметаллического ферромагнетика с рекордными значениями величины эффекта

В первые два десятилетия XXI века существует огромный теоретический и экспериментальный интерес к разработке логических элементов для сверхпроводящей спинтроники. Помимо базовых элементов, для компьютеров будущего необходимы и пассивные элементы, которые будут включать/выключать сверхпроводящий ток. Таким устройством может послужить сверхпроводящий спиновый клапан (ССК). Сверхпроводящий спиновый клапан представляет собой чередующуюся последовательность ферромагнитных (Ф) и сверхпроводящих (С) слоёв. Комбинируя количество и порядок следования слоёв Ф- и С-материалов, можно управлять свойствами спинового клапана. Это связано с тем, что на границе слоёв С/Ф свойства меняются не скачкообразно – существует область взаимопроникновения свойств двух материалов. Данное явление называется эффектом близости сверхпроводник/ферромагнетик. Сверхпроводящий спиновый клапан построен на антагонизме двух явлений – сверхпроводимости и ферромагнетизма. Ферромагнетизм предполагает параллельную ориентацию спинов, а сверхпроводимость – антипараллельную, так как спины электронов, составляющих куперовскую пару, противоположно направлены. Именно поэтому при

проникновении куперовской пары из С-слоя в Ф-слой происходит её разрушение, поскольку энергия обменного взаимодействия внутри ферромагнетика гораздо больше энергии связи куперовской пары.

Принцип работы ССК построен на идее контроля температуры перехода в сверхпроводящее состояние ( $T_c$ ) путём изменения взаимной ориентации намагниченностей Ф-слоёв. Впервые теоретическая модель ССК была предложена в Стэнфордском

университете в 1997 году профессором Бисли [S. Oh, D. Youm, M. R. Beasley, Appl. Phys. Lett. 71, 2376, 1997]. Они предложили конструкцию ССК в виде Ф1/Ф2/С. Впервые экспериментально реализовать ССК удалось нашей группе в 2010 году в структуре  $\text{CoO}_x/\text{Fe1}/\text{Cu}/\text{Fe2}/\text{In}$  [P. V. Leksin et al., Appl. Phys. Lett. 97, 102505, 2010]. В дальнейшем нами были очень подробно изучены ССК, в которых в качестве ферромагнитного материала использовались железо

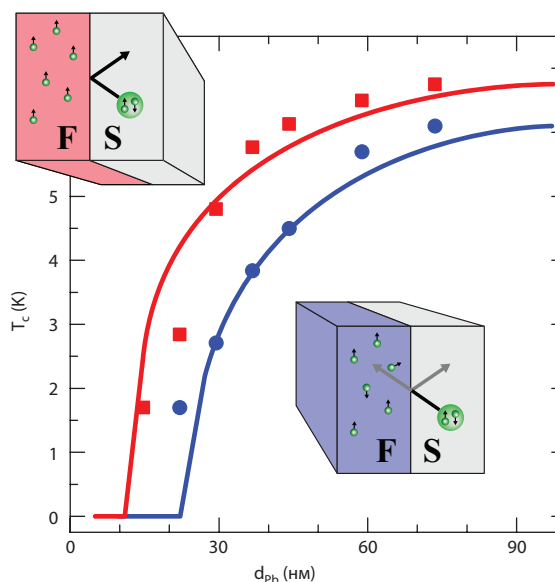
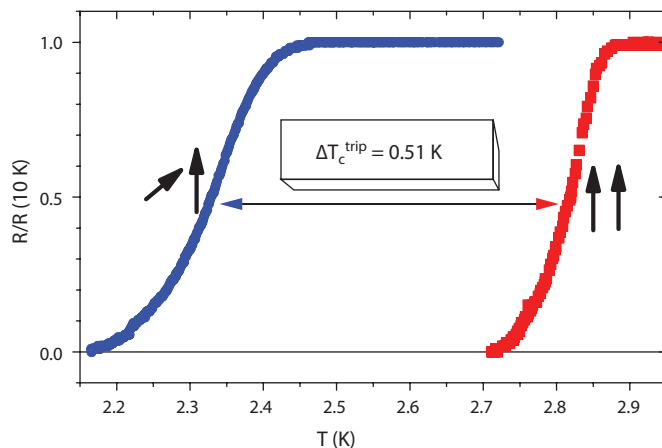


Рис. 1: Зависимость температуры перехода в сверхпроводящее состояние от толщины слоя свинца ( $d_{Pb}$ ). Синие точки – серия образцов  $\text{HA}(12 \text{ нм})/\text{Cu}(1.5 \text{ нм})/\text{Pb}(d_{Pb})$ , приготовленная при  $T_{sub} = 300 \text{ К}$ ; красные квадратики – серия образцов  $\text{HA}(12 \text{ нм})/\text{Cu}(1.5 \text{ нм})/\text{Pb}(d_{Pb})$ , приготовленная при  $T_{sub} = 600 \text{ К}$ .





**Рис. 2:** Кривые сверхпроводящих переходов для параллельной и перпендикулярной ориентации замороженного и приложенного магнитных полей для образца MgO/Ta(5 нм)/HA(20 нм)/Cu(4 нм)/Ni(2.5 нм)/Cu(1.5 нм)/Pb(105 нм). Для данного образца наблюдается рекордное значение эффекта ССК на сегодняшний день.

и пермаллой, а в качестве сверхпроводящего материала – свинец и индий. Мы обнаружили большое разнообразие эффектов, таких как квантовая интерференция парной волновой функции сверхпроводящего конденсата, изолированная триплетная сверхпроводимость и многие другие.

На сегодняшний день большое количество исследований эффекта ССК сместилось в сторону изучения экзотической сверхпроводимости, связанной с формированием дальнедействующих триплетных компонент (ДТК) сверхпроводящего конденсата. В целом, чтобы получить максимальную величину эффекта ССК, должны быть выполнены два условия.

Первое и основное условие состоит в том, что толщина Ф2-слоя, прилегающего к С-слою, должна быть меньше глубины проникновения куперовских пар в Ф-слой. Это необходимо для того, чтобы как можно больше куперовских пар было на интерфейсе Ф1/Ф2. На практике выполнение этого условия является сложной задачей при использовании элементных ферромагнетиков, таких как железо, кобальт или никель, поскольку для таких сильных ферромагнетиков необходимо напылять слои толщиной менее 1 нм, а это трудновыполнимая техническая задача даже на современном оборудовании. Выходом из

данной ситуации будет выбор более слабых ферромагнетиков в качестве материала для Ф2-слоя: чем слабее ферромагнетик, тем толще может быть плёнка из этого материала, что существенно упрощает реализацию ССК.

Второе условие, которое должно быть выполнено, заключается в том, что материал для Ф1-слоя должен обладать максимально большой степенью поляризации зоны проводимости. Это позволит достичь максимальных значений амплитуды ДТК в конструкции сверхпроводящего спинового клапана. В случае параллельной или антипараллельной ориентации намагниченностей Ф-слоёв никакого эффекта наблюдаться не будет, а в случае ортогональной ориентации будет наблюдаться огромный провал в температуре перехода в сверхпроводящее состояние.

Оба эти требования можно выполнить, используя сплав Гейслера (НА)  $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Al}_y$  в качестве ферромагнитного материала в структурах Ф1/Ф2/С. Это связано с тем, что степень спиновой поляризации (ССП) сплава Гейслера зависит от условий приготовлений, в частности, напрямую зависит от температуры подложки при напылении. Таким образом, сплав Гейслера может быть как слабым ферромагнетиком, так и обладать высокой ССП.

На рис. 1 представлена зависимость  $T_c$  от толщины сверхпроводящего слоя для двух серий образцов, приготовленных при двух различных температурах подложки ( $T_{\text{sub}}$ ): 300 и 600 К [1]. Из данных зависимостей видно, что для двух разных серий образцов при одинаковой толщине слоя сверхпроводника  $T_c$  подавляется по-разному. В нашей работе [1] мы показали, что сплав Гейслера, напыленный при  $T_{\text{sub}} = 300$  К, является слабым ферромагнетиком и  $T_c$  подавляется сильнее (i), а при  $T_{\text{sub}} \geq 600$  К обладает высокой ССП (ii) и в этом случае  $T_c$  подавляется слабее. Метод определения ССП, описанный в нашей работе [1], является качественным, но позволяет определять ССП гораздо быстрее и проще, чем уже известными другими способами, например, методом андреевской спектроскопии.

Далее мы провели сравнительный анализ сверхпроводящих свойств двух типов ССК, содержащих сплав Гейслера  $\text{Co}_2\text{Cr}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Al}_y$  в качестве одного из двух ферромагнитных слоёв (Ф1 или Ф2) в структурах Ф1/Ф2/С. Мы использовали слой сплава Гейслера в двух ипостасях: а) в качестве слабого ферромагнетика в случае Ф2-слоя; б) в качестве полуметалла (высокое значение ССП) в случае Ф1-слоя. В первом случае мы получили большой классический эффект сверхпроводящего спинового клапана  $\Delta T_c = T_c^{\text{AP}} - T_c^{\text{P}}$ , которому способствовал существенный триплетный вклад в эффект сверхпроводящего спинового клапана. Во втором случае мы наблюдали гигантскую разницу в  $T_c$  при параллельной и ортогональной ориентации намагниченностей Ф-слоёв, достигающую 0.5 К (см. рис. 2). Данное значение является рекордной величиной эффекта ССК на сегодняшний день [2].

1. Kamashev A.A., Leksin P.V., Schumann J., Kataev V., Thomas J., Gemming T., Büchner B., Garifullin I. A. Phys. Rev. B **96**, 024512 (2017)
2. Kamashev A.A., Garif'yanov N.N., Validov A.A., Schumann J., Kataev V., Büchner B., Fominov Ya.V., Garifullin I.A. Phys. Rev. B **100**, 134511 (2019)



# Поиск систем для квантовых спиновых технологий

## Процессы декогерентности электронного спина в $Sc_2@C_{80}(CH_2Ph)$

Необходимость обработки квантовой информации с гораздо большей эффективностью, чем используемые в настоящее время «классические» вычисления, стимулирует поиск кандидатов на роль квантовых битов (кубитов). Электронные спины в молекулярных соединениях имеют преимущества в этой области из-за чётко определённой структуры и масштабируемости, хотя на сегодняшний день они всё ещё отстают от твёрдотельных кандидатов, таких как NV-центры в алмазе или P-дефекты в кремнии, с точки зрения времени их спиновой когерентности. Постепенная потеря спиновой когерентности системой ограничивает временной масштаб, в котором могут выполняться операции с кубитом. Таким образом, поиск магнитных молекул с большим временем спиновой когерентности, с одной стороны, и понимание механизмов декогерентности, с другой, остаются в центре внимания исследований. Одной из стратегий достижения этой цели является уменьшение спинового шума от самой молекулы или из окружающей среды за счёт минимизации количества магнитных ядер в непосредственной близости от спина электрона.

Инкапсуляция спиновой системы в прочном молекулярном контейнере является привлекательной стратегией для изоляции спинов от окружающей среды. Углеродная клетка стабилизирует эндоэдральные спиновые единицы химически (т.е. предотвращая разложение реактивных частиц) и уменьшает спин-спиновые взаимодействия с окружением. Известный эндоэдральный

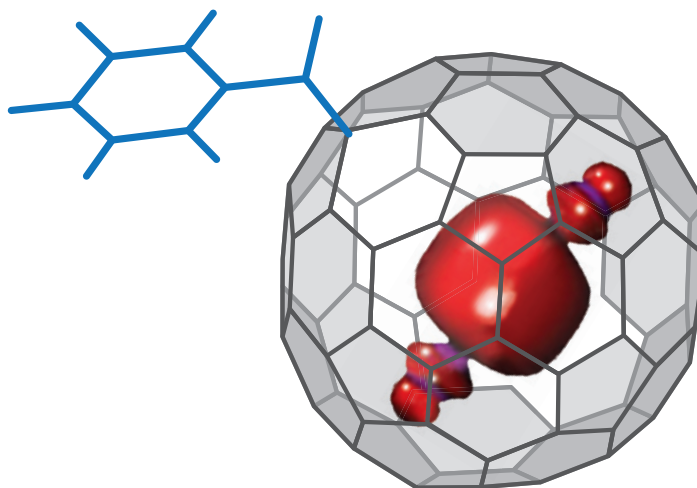


Рис. 1: Структура и распределение спиновой плотности в низкоэнергетическом конформере  $Sc_2@C_{80}(CH_2Ph)$ .

фуллерен  $N@C_{60}$  с одним атомом азота, стабилизированным внутри клетки  $C_{60}$ , показывает одно из самых высоких времён спиновой памяти среди электронных спиновых систем ( $\sim 0.2$  мс при 20 К). К сожалению,  $N@C_{60}$  требует длительной процедуры синтеза и имеет ограниченную термическую и фотоустойчивость.

Эндоэдральные диметаллофуллерены (ДМФ) с общей формулой  $M_2@C_xL$  (где  $M = Y, Sc$  или лантаноиды;  $C_x$  – тип используемого фуллерена;  $L$  – экзоэдральный лиганд, присоединённый к сфере фуллерена снаружи), образуют другую группу парамагнитных систем с эндоэдрально локализованным спином, находящийся на связывающей орбитали металл-металл, с  $spd$ -гибридным характером. Если  $M$  – лантаноид, то такие ДМФ проявляют свойства мономолекулярных магнитов из-за очень сильного обменного взаимодействия

между локализованными магнитными моментами  $4f$ -оболочки и валентным электроном.

Совместно с ИФТТ г. Дрездена (Германия) проведено исследование ДМФ с атомами скандия  $Sc_2@C_{80}(CH_2Ph)$  (рис. 1), синтезированного в группе Алексея Попова. Полная локализация спиновой плотности внутри фуллереновой клетки на димере скандия приводит к необычайно сильному сверхтонкому взаимодействию (СТВ) неспаренного электронного спина  $S = 1/2$  с двумя эквивалентными ядерными спинами изотопа  $^{45}Sc$   $I = 7/2$ . Ядра создают локальное магнитное поле на электроном, которое приводит к изменению частоты прецессии электронного спина. Количество линий определяется проекцией ядерного спина. В случае суммарного ядерного спина  $I = 7$  имеем 15 групп линий. Что и наблюдается в  $Q$ -диапазоне частот

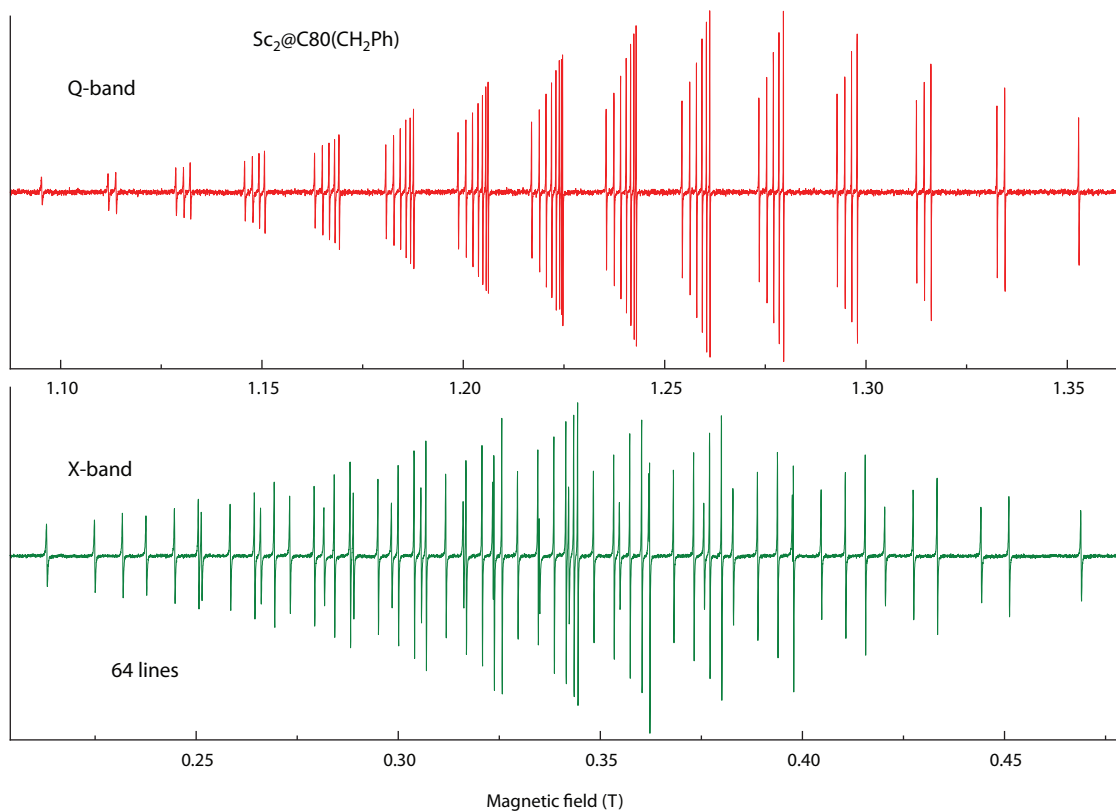


Рис. 2: Спектр ЭПР  $Sc_2@C_{80}(CH_2Ph)$  при комнатной температуре, зарегистрированный в двух частотных диапазонах: Q (верхний) и X (нижний).

(рис. 2). Однако для данной системы реализуется уникальная ситуация, когда необходимо учитывать не только проекцию ядерного спина, но и его величину. В итоге из-за различных комбинаций проекции ядерного спина и его величины спектр ЭПР состоит в общей сложности из 64 узких линий, которые можно наблюдать во всех трёх частотных диапазонах (X, Q, W). Причём в X-диапазоне частот (9.8 ГГц) все группы линий перепутаны между собой (рис. 2). От этих же величин (проекция и суммарный ядерный спин) зависит и интенсивность линий на разных переходах.

Большая константа СТВ даёт возможность частотно-селективно возбуждать отдельные переходы, что хорошо с точки зрения реализации квантовых протоколов.

Исследование показало высокую чувствительность формы спектра к микроволновой частоте, особенно взаимное положение резонансных линий с разными проекциями ядерного спина  $m$  изменяется даже при

небольшом изменении микроволновой частоты. Важно отметить, что в случае двух близлежащих линий с разными значениями полного ядерного спина  $I$  это свойство позволяет контролировать их взаимное смещение, подстраивая частоту микроволнового излучения, что является важным моментом при адресном возбуждении того или иного перехода.

В импульсных ЭПР-экспериментах по регистрации нестационарной нутации продемонстрировано квантово-когерентное поведение электронно-ядерной системы в  $Sc_2@C_{80}(CH_2Ph)$ . Это явление заключается в том, что под действием микроволнового импульса электронный спин начинает осциллировать во времени. Проявление осциллирующего характера движения системы под действием импульса является одним из требований для претендентов на роль спинового кубита.

Чтобы получить более полное представление о спиновой динамике, были измерены времена продольной  $T_1$  и поперечной  $T_m$  релаксации.

Время  $T_1$  увеличивается с понижением температуры почти на пять порядков и достигает значения 0.2 с при самой низкой температуре  $T = 5$  К. Время декогеренции  $T_m$ , измеренное с помощью протокола затухания сигнала первичного эха, сначала быстро увеличивается с 2 мкс (80 К), а затем насыщается на уровне 17 мкс (~20 К). Измеренные значения времени фазовой релаксации  $T_m$  указывают на то, что спиновая когерентность может сохраняться в течение 10 мкс в широком диапазоне температур ниже 80 К, достигая 17 мкс при температурах ниже 20 К. Результаты исследования позволяют рассматривать эндофуллерен  $Sc_2@C_{80}(CH_2Ph)$  в качестве перспективного кандидата для выполнения квантовых логических операций.

1. Zaripov R.B., Kandrashkin Yu.E., Salikhov K.M., Büchner B., Liu F., Rosekrantz M., Popov A.A., Kataev V. Unusually large hyperfine structure of the electron spin levels in an endohedral dimetallofullerene and its spin coherent properties. *Nanoscale* **12**, 20513–20531 (2020)

# Наноструктурированные компози́ты для магнитной записи информации

## Создание композитных материалов, демонстрирующих эффекты магнитной близости, и исследование их магнитных свойств

Многообещающими многофункциональными материалами являются композиты (гетероструктуры), при создании которых комбинируются соединения с различными физическими свойствами, в частности магнитными. При объединении различных типов магнитных материалов в единую гетероструктуру возникают явления, которые можно отнести к эффектам магнитной близости. Наиболее интересным из них с практической точки зрения является эффект обменного смещения (exchange bias effect), который позволяет получить структуры с однонаправленной магнитной анизотропией и использовать их, например, для создания носителей с магнитной записью информации. Как правило, эффект обменного смещения существует одновременно с другим эффектом магнитной близости, проявляющимся в изменении температур магнитного упорядочения материалов при объединении их в единый композит. Данный эффект на настоящий момент нам удалось обнаружить в композитах двух составов: антиферромагнетик  $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$  (ССТО) и ферромагнетик  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$  (LSMO) или  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$  (SFO). Полученные композиты имеют гранулированную структуру с различной формой гранул (рис. 1а, рис. 1б), при этом каждая гранула представляет собой ССТО с нановключениями ферромагнитного материала, что

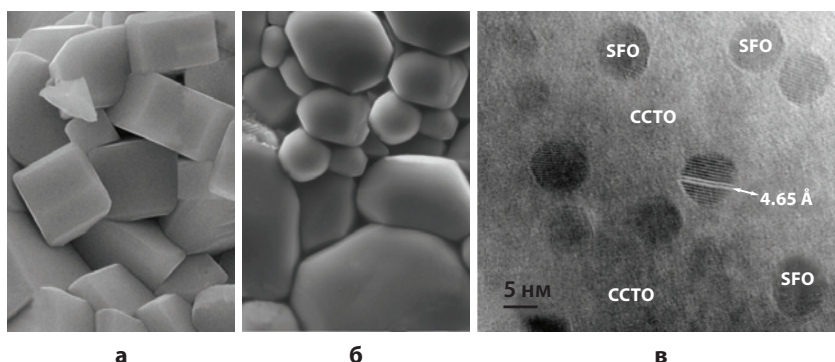


Рис. 1: СЭМ-изображения композита  $\text{LSMO}_x\text{CCO}_{1-x}$  для  $x = 0.05$  (а) и композита  $\text{SFO}_x\text{CCO}_{1-x}$  для  $x = 0.03$  (б). ПЭМ-изображения композита  $\text{SFO}_x\text{CCO}_{1-x}$  для  $x = 0.07$  (в).

легко представить себе как аналог «кекса с изюмом» (рис. 1в).

В результате исследований данных гетероструктур методом магнитометрии обнаружено сильное взаимное влияние магнитных свойств компонент композитов друг на друга: (i) температура Кюри ферромагнитной фазы в составе композита значительно ниже, чем температура упорядочения чистых ферромагнетиков; (ii) константа Вейса  $\Theta$  для парамагнитной фазы в составе композитов значительно ниже, чем в чистом ССТО  $\Theta \sim -30$  К; и другое. Взаимное влияние двух компонент композита друг на друга проявилось в поведении ширины и интенсивности линий магнитного резонанса, которые представляют собой суперпозицию вкладов от двух компонент. Обнаруженное взаимное влияние может возникать из-за близости между двумя разнородными

магнитными компонентами на атомном уровне и из-за возникновения обменных взаимодействий между ними, и может быть названо эффектом магнитной близости. Наличие последнего, в свою очередь, даёт надежду на существование эффекта обменного смещения, величина которого может модулироваться путём изменения соотношения компонент композитов, что сделает их ещё более интересными с точки зрения практического применения.

1. Gavrilova T.P., Eremina R.M., Yatsyk I.V., Gilmutdinov I.F., Kiiamov A.G., Lyadov N.M., Kabirov Yu.V. Magnetic properties of  $(\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3)_x(\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12})_{1-x}$  nanostructured composites. *J. Alloys Compd.* **714**, 213 (2017)
2. Gavrilova T.P., Deeva J.A., Yatsyk I.V., Yagfarova A.R., Gilmutdinov I.F., Lyadov N.M., Milovich F.O., Chupakhina T.I., Eremina R.M. Structural and magnetic properties of nanostructured composites  $(\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19})_x(\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12})_{1-x}$ . *Physica B: Cond. Matter* **536**, 303 (2018)

# Стрейнтронные ячейки памяти

Использование магнитоупругого эффекта в микро-наноструктурах с анизотропией формы позволяет создавать новые устройства для хранения и обработки информации

Исследование процессов перестройки намагниченности в ферромагнитных (ФМ) микро- и наноструктурах связано с необходимостью создания сред для сверхплотного хранения информации и уменьшения энергопотребления. Один из вариантов уменьшения энергии, необходимой для записи информации – это создание в носителе механических напряжений, так как за счёт магнитоупругого эффекта можно снизить энергию, необходимую для изменения магнитного состояния. Подобные исследования привели к появлению нового научного направления – «стрейнтроники» [1]. Одна из задач стрейнтроники – создание запоминающей магнитоэлектрической ячейки произвольного доступа (MeRAM). Она представляет собой гетероструктуру из двух ФМ частиц с фиксированной и относительно свободной ориентацией однородной намагниченности, разделённых туннельным барьером и нанесённых на пьезоэлектрик (рис. 1). Теоретически доказано, что электрическое сопротивление MeREM-ячейки зависит от взаимной ориентации намагниченностей слоёв.

В работах [2, 3] рассматривается возможность использования треугольных и четырёхугольных ферромагнитных частиц для создания MeRAM-ячеек (рис. 2). Они могут иметь несколько квазиоднородных стабильных состояний, которые разделены высокими энергетическими барьерами, что обеспечивает стабильность во времени. Магнитное поле переключения микрочастицы из одного стабильного состояния в другое может существенно уменьшаться,

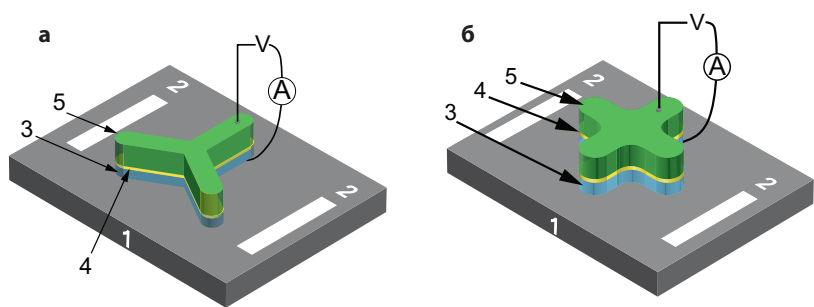


Рис. 1: Схемы MeRAM ячеек с Y- (а) и X-частицами (б). 1 – пьезокристаллическая подложка, 2 – электроды, 3 – магнитномягкая и 5 магнитножёсткая ФМ частицы, 4 – диэлектрическая прослойка.

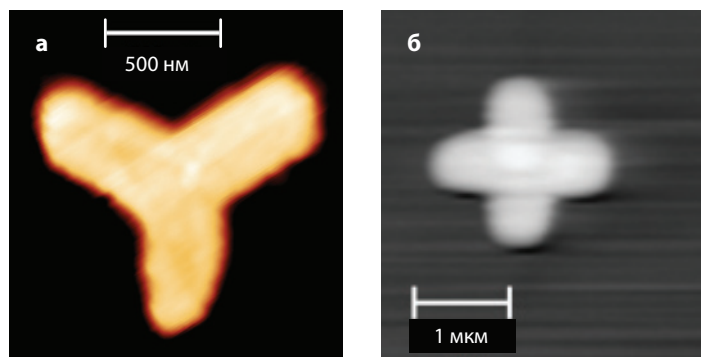


Рис. 2: Изображения Y (а) и X (б) частиц получены на атомно-силовом микроскопе Solver P47. Частицы изготовлены методом зондовой литографии в этом же микроскопе.

если приложить к ней механические напряжения. В ситуации, показанной на рис. 1, нижняя ФМ частица может испытывать сильные механические напряжения из-за контакта с пьезо-подложкой и легко перемагничиваться малыми магнитными полями, в то время как верхняя будет стабильна. Рассчитанный магниторезистивный эффект структур, представленных на рис. 1, в пределе может достигать 254 %.

1. Бухараев А.А., Звездин А.К., Пятаков А.П., Фетисов Ю.К. / Стрейнтроника — новое направление микро- и наноэлектроники и науки о материалах. УФН 188, 1288–1330 (2018).
2. Bukharaev A.A., Bizyaev D.A., Nurgazizov N.I., Chuklanov A.P., Useinov N.Kh. / Ferromagnetic particles with the configuration anisotropy for straintronic memory cells. J. Magn. Magn. Mater. 500, 166315 (2020).
3. Useinov N.Kh., Chuklanov A.P., Bizyaev D.A., Nurgazizov N.I., Bukharaev A.A. / Spin-Dependent Electron Transport in MeRAM. Phys. Solid. State 62(9), 1706 (2020).



# Квантовая интерференция в моноизотопных примесных кристаллах

Исследование электромагнитно-индуцированной прозрачности на часовых переходах в моноизотопных примесных кристаллах с целью разработки устройств квантовой памяти

Электромагнитно индуцированная прозрачность (ЭИП) представляет собой эффект квантовой интерференции, который может наблюдаться в многоуровневой атомной системе, где интерференция двух разных путей оптического возбуждения приводит к появлению узкого окна прозрачности внутри атомного спектра поглощения. Такое контролируемое изменение свойств поглощения, которое сопровождается сильной дисперсией и повышенной нелинейностью, представляет интерес для целого ряда приложений, включая замедление света, оптическую память, прецизионные измерения, усиление и генерацию без инверсии и др. В частности, управление групповой скоростью света в режиме ЭИП – перспективный подход к созданию оптической квантовой памяти, которая является основным компонентом, необходимым для реализации масштабируемых квантовых вычислений и квантовой связи на большие расстояния. В этом отношении значительный экспериментальный прогресс в последнее время был достигнут в демонстрации квантовой памяти на основе ЭИП в холодных атомных ансамблях. С другой стороны, наиболее перспективными системами для хранения информации считаются твёрдые тела, легированные редкоземельными

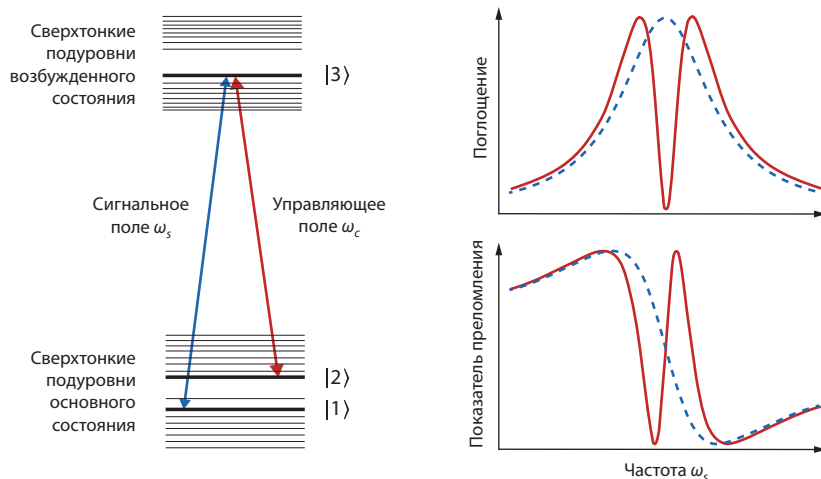


Рис. 1: Эффект ЭИП в примесных кристаллах. Слева приведена типичная  $\Lambda$ -схема оптических переходов между сверхтонкими подуровнями основного и возбуждённого электронных состояний примесных ионов, а справа – зависимость поглощения и показателя преломления от частоты сигнального поля в отсутствии (пунктирная линия) и в присутствии (сплошная линия) управляющего поля. Возникновение окна прозрачности в спектре поглощения при включении управляющего поля, сопровождаемое уменьшением групповой скорости сигнального поля, является отличительной особенностью ЭИП.

ионами (РЗИ), которые демонстрируют чрезвычайно большие времена спиновой когерентности при низких температурах (до нескольких часов), высокие оптические плотности и совместимость с оптическими интегральными схемами. Более того, твёрдые тела, легированные кримерсовскими РЗИ (ионы с чётным числом электронов, такие как  $\text{Nd}^{3+}$  и  $\text{Er}^{3+}$ ), обеспечивают оптические переходы внутри телекоммуникационных

диапазонов, что делает ненужным преобразование частоты при записи и воспроизведении квантовых состояний света. Другой особенностью этих ионов является наличие сверхтонких переходов в диапазоне 1–10 ГГц, который совместим с микроволновой квантовой фотоникой. Следовательно, изучение ЭИП в этих материалах представляет интерес как для разработки оптической квантовой памяти, так и для создания

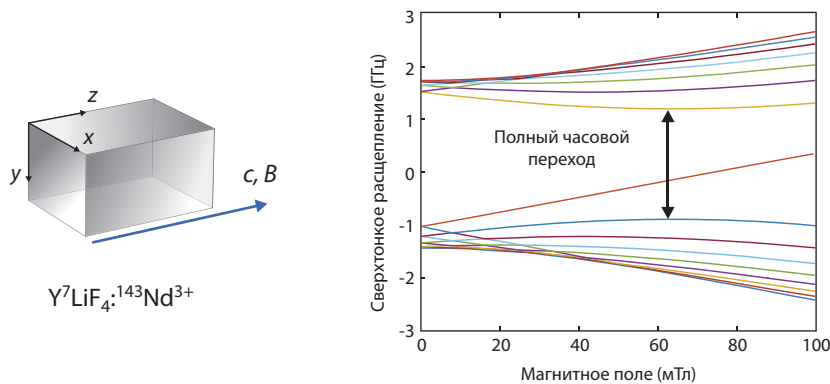


Рис. 2: Возникновение полного часового перехода между сверхтонкими подуровнями основного электронного состояния ионов неодима-143 в кристалле  $\text{YLiF}_4$  при наложении внешнего магнитного поля  $B$  вдоль оптической оси кристалла  $c$ .

интерфейса со сверхпроводниковыми квантовыми устройствами.

Одним из актуальных направлений исследований в КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН, которое ведётся в тесном сотрудничестве с коллегами из ИПФ РАН, КФУ и университетов Германии, является изучение ЭИП в моноизотопных примесных кристаллах, легированных крамерсовыми РЗИ. Моноизотопный состав как самой матрицы, так и примесных частиц, позволяет достичь предельных значений времён фазовой релаксации и оптической плотности. Кроме того, такие кристаллы могут иметь очень малое неоднородное уширение оптических переходов, что позволяет реализовать в твёрдых телах схемы квантовой памяти, основанные на нерезонансном рамановском поглощении и испускании фотонов. Примером такого материала является кристалл  $\text{YLiF}_4$ , обогащённый изотопом Li-7 и легированный трёхвалентными ионами эрбия или неодима. При малых концентрациях примесных частиц неоднородная ширина оптических переходов в этом кристалле уменьшается до  $\sim 10$  МГц [1], что является, пожалуй, наименьшим значением, наблюдаемым в примесных кристаллах.

В работе [2] эффект ЭИП впервые наблюдался в моноизотопном кристалле  $\text{Y}^7\text{LiF}_4$ , легированном трёхвалентными ионами неодима-143, на переходе  $^4\text{I}_{9/2}(1)$ - $^4\text{F}_{3/2}(1)$  (длина

волны 867 нм). Достигнута степень просветления 28%. Показано как теоретически так и экспериментально, что при определённом значении и направлении внешнего магнитного поля в рассматриваемом кристалле образуется полный часовой переход (zero-first-order-Zeeman transition) между сверхтонкими подуровнями основного электронного состояния примесных ионов  $^4\text{I}_{9/2}(1)$  (рис. 2). Отличительной особенностью такого перехода является обращение в ноль первой производной зависимости его частоты от величины внешнего магнитного поля для любого направления последнего. В результате в этом случае существенно уменьшается чувствительность частоты перехода к флуктуациям магнитного поля внутри кристалла и возрастает время когерентности. Именно полные часовые переходы представляют наибольший интерес с точки зрения создания устройств квантовой памяти. Интересно, что при наблюдении ЭИП на полном часовом переходе в этом кристалле была впервые зарегистрирована модуляционная структура окна прозрачности (период модуляции  $\sim 2$  МГц), обусловленная суперсверхтонким расщеплением сверхтонкого перехода за счёт взаимодействия ионов неодима с ближайшими ионами фтора. Результаты эксперимента открывают возможность использования суперсверхтонких состояний при-

месных ионов в данных кристаллах для реализации рамановских схем квантовой памяти.

В работе [3] эффект ЭИП впервые наблюдался в моноизотопном кристалле  $\text{Y}^7\text{LiF}_4$ , легированном трёхвалентными ионами эрбия-167. Проведены измерения зависимости спектра поглощения примесных ионов на переходе  $^4\text{I}_{15/2}(1)$ - $^4\text{I}_{13/2}(1)$  (длина волны 1530 нм) от магнитного поля, которые позволили определить параметры эффективного спинового гамильтониана для возбуждённого состояния  $^4\text{I}_{13/2}(1)$  и найти оптимальную  $\Lambda$ -схему переходов. Также как и в предыдущем эксперименте, для наблюдения ЭИП использовался полный часовой переход между сверхтонкими подуровнями основного электронного состояния  $^4\text{I}_{15/2}(1)$  примесных ионов. Однако даже в этих условиях эффект ЭИП наблюдался только при сверхнизких температурах. При охлаждении образца ниже 400 мК удалось достичь степени просветления резонансной среды 55%. Результаты проведённых исследований представляют интерес для разработки твёрдотельных управляемых оптических линий задержек и устройств оптической квантовой памяти на телекоммуникационных длинах волн. Кроме того, примесные кристаллы при сверхнизких температурах могут стать основой для микроволновой квантовой памяти и частотных преобразователей одиночных фотонов из оптического диапазона в микроволновой и обратном.

1. Kukharchyk N., Sholokhov D., Morozov O., Korablava S.L., Cole J.H., Kalachev A.A., Bushev P.A. Optical vector network analysis of ultranarrow transitions in  $^{166}\text{Er}^{3+}:\text{YLiF}_4$  crystal. *Opt. Lett.* **43**, 935–938 (2018)
2. Akhmedzhanov R., Gushchin L., Nizov N., Nizov V., Sobgayda D., Zelensky I., Kalachev A. Electromagnetically induced transparency in an isotopically purified  $\text{Nd}^{3+}:\text{YLiF}_4$  crystal. *Phys. Rev. B* **97**, 245123(1-5) (2018)
3. Kukharchyk N., Sholokhov D., Morozov O., Korablava S.L., Kalachev A.A., Bushev P.A. Electromagnetically induced transparency in a mono-isotopic  $^{167}\text{Er}^{3+}:\text{YLiF}_4$  crystal below 1 Kelvin: microwave photonics approach. *Opt. Express* **28**, 29166–29177 (2020)

# Источники квантовых состояний света на основе фотонных молекул

## Новые схемы генерации однофотонных состояний на основе спонтанного четырёхволнового смешения в системе кольцевых микрорезонаторов

Разработка эффективных источников неклассических состояний света является одной из основных задач квантовых оптических технологий. В частности, высококачественные однофотонные и двухфотонные источники необходимы для реализации эффективных протоколов дальнейшей квантовой связи, использующих квантовые повторители. Внедрение последних позволит преодолеть существующий предел радиуса действия квантовых сетей (порядка 100 км) и создать, в конечном счёте, квантовый интернет, обладающий безусловной стойкостью. Кроме того, такие источники необходимы для реализации аппаратно-независимой квантовой криптографии и линейных оптических квантовых вычислений. Перспективным подходом к решению проблемы является разработка источников однофотонных и двухфотонных состояний света на основе нелинейных оптических явлений, таких как спонтанное параметрическое рассеяние и спонтанное четырёхволновое смешение (СЧВС). Последнее, в частности, может наблюдаться во многих centrosymmetric материалах, обладающих ненулевой кубической восприимчивостью, к которым относится, например, широко используемый в квантовой электронике нитрид кремния.

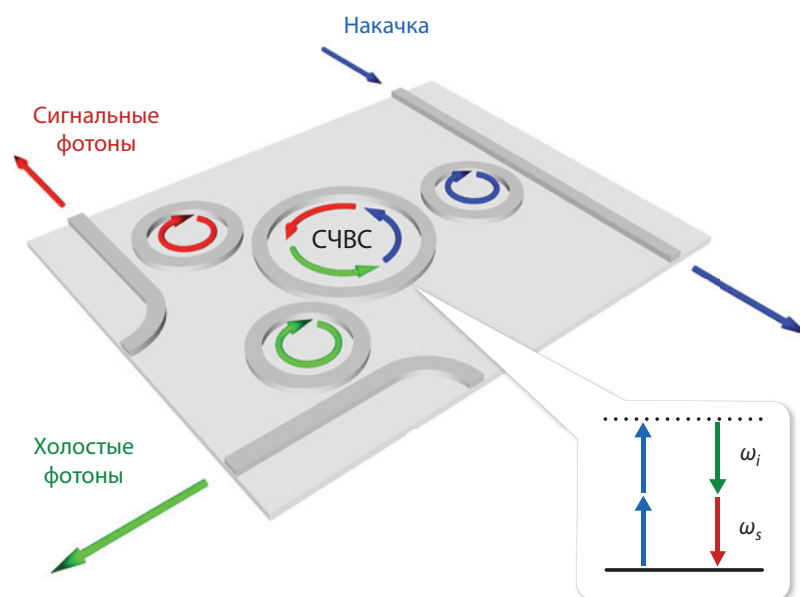
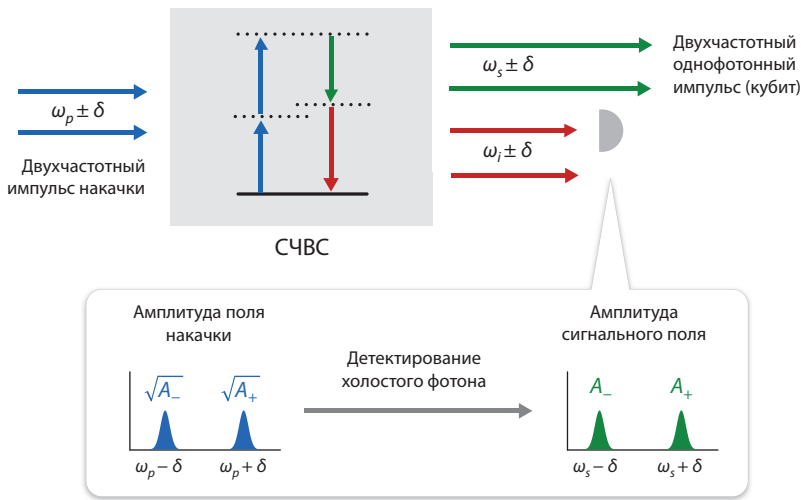


Рис. 1: Схема интегрального однофотонного источника на основе СЧВС в системе кольцевых микрорезонаторов. Центральный резонатор используется для генерации коррелированных пар фотонов, а остальные – для селективного по частоте ввода/вывода излучения.

Одним из направлений исследований, проводимых в КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН, является теоретическая разработка новых перспективных схем однофотонных источников на основе системы связанных кольцевых микрорезонаторов, которую часто называют фотонной молекулой. Пример такой системы, состоящей из четырех кольцевых микрорезонаторов, показан на рис. 1. В процессе СЧВС два фотона поля накачки внутри материала с кубической нелиней-

ностью спонтанно превращаются в пару коррелированных фотонов, называемых обычно сигнальным и холостым. Детектирование одного из фотонов в паре (скажем, холостого) однозначно говорит о наличии второго фотона (сигнального), поэтому такие источники называются источниками с оповещением (heralded single-photon source), а сам метод называется условным приготовлением однофотонного состояния. При этом кольцевые микрорезонаторы являются



**Рис. 2:** Схема условного приготовления однофотонных частотных кубитов. Спектральная амплитуда двухчастотного сигнального поля получается равной квадрату амплитуды двухчастотного поля накачки при условии детектирования только одной частотной компоненты холостого поля. В результате состояние сигнального поля полностью определяется полем накачки, что позволяет генерировать однофотонные кубиты с минимальными потерями на выходе источника.

перспективными структурами для усиления нелинейного взаимодействия и создания эффективных интегральных устройств, совместимых с существующей КМОП-технологией [1]. В перспективе с помощью различных методов мультиплексирования на фотонных чипах можно создать почти детерминированные источники однофотонных состояний.

Для реализации квантовых оптических вычислений важной задачей является генерация чистых однофотонных состояний (спектрально ограниченных однофотонных импульсов). В работе [2] определены оптимальные параметры системы микрорезонаторов (соотношения между константами связи), позволяющие генерировать пары фотонов без частотной корреляции, что соответствует приготовлению чистых однофотонных состояний. На примере резонаторов из нитрида кремния показано, что при стандартном выборе параметров чистота генерируемых однофотонных состояний не превышает 0.94, в то время как предложенная схема однофотонного источника позволяет получить состояния с чистотой 0.9999.

Применение фотонов в качестве квантовых носителей информации требует разработки эффективных

методов управления их основными свойствами, такими как временная форма однофотонного импульса, орбитальный угловой момент и поляризация, которые используются для кодирования. В последнее время растёт интерес к частотным однофотонным кубитам (frequency-bin qubits). В этом случае состояние кубита кодируется в виде суперпозиции двух однофотонных состояний с разными частотами. Подобно временным кубитам (time-bin qubits), где для кодирования используется суперпозиция двух однофотонных волновых пакетов, разделённых во времени, частотные кубиты демонстрируют высокую устойчивость к флуктуациям окружающей среды при передаче по квантовому каналу, но не требуют стабилизации оптических интерферометрических схем для детектирования или быстрой электроники для обработки. Для того, чтобы преобразовать обычный однофотонный импульс в частотный кубит, можно воспользоваться схемой, состоящей из электрооптических фазовых модуляторов и формирователей импульсов. В частности, такой преобразователь можно разместить на выходе однофотонного источника с оповещением. Однако результи-

рующая эффективность оповещения (вероятность генерации фотонного кубита при появлении оповещающего сигнала) оказывается при этом существенно меньше единицы за счёт потерь, вносимых преобразователем.

В работе [3] предложена схема генерации однофотонных частотных кубитов с помощью СЧВС в системе связанных микрорезонаторов, которая позволяет создавать однофотонные кубиты, контролируя спектральную амплитуду поля накачки (рис. 2). В этом случае исчезают дополнительные потери, вносимые внешними модуляторами или формирователями импульсов, и достигается максимально возможная эффективность оповещения. Для приготовления узкополосных кубитов, совместимых с устройствами квантовой памяти на основе резонансных атомных переходов, можно использовать частотное расщепление мод, возникающее в случае сильной связи между микрорезонаторами. Кроме того, поскольку состояние кубита получается не зависящим от частоты моды резонатора, предложенная схема позволяет повысить детерминированность генерации неразличимых однофотонных состояний посредством масштабируемых схем частотного мультиплексирования. При этом важно отметить, что состояния таких частотных кубитов могут обрабатываться в СВЧ-диапазоне без привязки к несущей оптической частоте, так что для некоторых задач квантовой обработки информации высокую скорость генерации кубитов можно получить без оптического преобразования частоты однофотонных состояний.

1. Чуприна И.Н., Ан П.П., Зубкова Е.Г., Ковалюк В.В., Калачёв А.А., Гольцман Г.Н. Оптимизация спонтанного четырёхволнового смешения в кольцевом микрорезонаторе. Квант. электроника 47, 887–891 (2017)
2. Chuprina I.N., Perminov N.S., Tarakanova D.Yu., Kalachev A.A. Generating pure single-photon states via spontaneous four-wave mixing in a system of coupled microresonators. Las. Phys. Lett. 15, 105104(1-6) (2018)
3. Chuprina I.N., Kalachev A.A. Generating frequency-bin qubits via spontaneous four-wave mixing in a photonic molecule. Phys. Rev. A 100, 043843(1-7) (2019)



# Поиск и исследование материалов для реализации квантовой памяти

## Спектроскопические характеристики диэлектрических кристаллов, легированных 3d- и 4f-ионами

Проведены пионерские экспериментальные исследования электронно-ядерных взаимодействий примесных ионов с собственными ядрами и с ионами-лигандами ближайшего окружения методами ЭПР-спектроскопии флюорита  $\text{MeF}_2$  ( $\text{Me} = \text{Cd}, \text{Ca}, \text{Sr}, \text{Pb}$ ), перовскита  $\text{ABF}_3$ , фостерита  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ .

Для создания материальной базы практической реализации квантовой памяти на основе примесных ионов группы железа проведены измерения спектроскопических характеристик изотопически чистых диэлектрических кристаллов  $\text{Y}_2\text{SiO}_5$ ,  $\text{Sc}_2\text{SiO}_5$  и  $\text{YVO}_4$ . Моноизотопный состав примесных ионов позволил достичь высокой оптической плотности резонансной среды. Для примесных ионов  $^{53}\text{Cr}$  в монокристаллах  $\text{Y}_2\text{SiO}_5$  и  $\text{Sc}_2\text{SiO}_5$  установлено, что отношение вероятностей разрешённых резонансных переходов, происходящих с сохранением проекции ядерного спина на ось квантования, и запрещённых переходов, при которых проекция ядерного спина на ось квантования изменяются на  $\pm 1$ , зависит от ориентации внешнего магнитного поля. При определённых ориентациях внешнего магнитного поля вероятность запрещённых переходов сравнима или даже превышает вероятность разрешённых переходов. Это обстоятельство очень важно для практической реализации квантовой памяти микроволнового диапазона с переносом когерентности на ядерные спины. Для примесных ионов  $^{53}\text{Cr}^{3+}$ ,

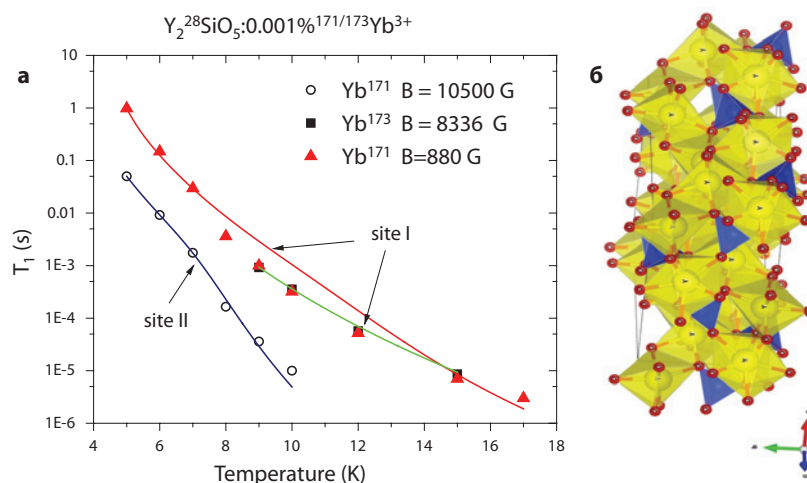


Рис. 1: а) Температурные зависимости времён спин-решёточной релаксации иона  $^{171/173}\text{Yb}^{3+}$ , допированных в позиции Y1 и Y2 монокристалла  $\text{Y}_2\text{SiO}_5$ ; б) кристаллическая структура  $\text{Y}_2\text{SiO}_5$ .

$^{171/173}\text{Yb}^{3+}$  и  $^{143/145}\text{Nd}^{3+}$  в монокристаллах  $\text{Y}_2\text{SiO}_5$ ,  $\text{Sc}_2\text{SiO}_5$  и  $\text{YVO}_4$  измерены температурные зависимости времени фазовой и спин-решёточной релаксаций. Установлено, что в процесс фазовой релаксации заметный вклад вносит спектральная диффузия. Применение многоимпульсной спиновой развязки позволяет увеличить время фазовой релаксации при низких температурах в несколько раз. Измерение температурной зависимости времени спин-решёточной релаксации (рис. 1) показало, что при низкой температуре (5–20 К) время спин-решёточной релаксации иона хрома значительно короче, чем время спин-решёточной релаксации для редкоземельных ионов, например одна секунда при 4.2 К для изотопов

$^{171/173}\text{Yb}^{3+}$  в монокристалле  $\text{Y}_2\text{SiO}_5$ . В то же время при температуре 20 К и выше время спин-решёточной релаксации ионов хрома значительно превышает время спин-решёточной релаксации для редкоземельных ионов.

- Likerov R.F., Tarasov V.F., Sukhanov A.A., Eremina R.M., Konov K.B., Yatsyk I.V., Shestakov A.V., Zavartsev Yu.D., Kutovoi S.A. Investigation of neodymium doped  $\text{YVO}_4$  by EPR method. *Optical Materials* **85**, 414–417 (2018)
- Sukhanov A.A., Likerov R.F., Eremina R.M., Yatsyk I.V., Gavrilova T.P., Tarasov V.F., Zavartsev Y.D., Kutovoi S.A. Crystal environment of impurity  $\text{Nd}^{3+}$  ion in yttrium and scandium orthosilicate crystals. *J. Magn. Reson.* **295**, 12–16 (2018)
- Tarasov V.F., Yatsyk I.V., Likerov R.F., Shestakov A.V., Eremina R.M., Zavartsev Y.D., Kutovoi S.A. EPR spectroscopy of  $^{53}\text{Cr}$  monoisotopic impurity ions in a single crystal of yttrium orthosilicate  $\text{Y}_2\text{SiO}_5$ . *Optical Materials* **105**, 109913 (2020)

# Поиск эффективных и безопасных фотосенсибилизаторов

## Особенности фотоиндуцированных процессов в компактных донорно-акцепторных диадах

Триплетные фотосенсибилизаторы (ФС) применяются для фотокатализа, фотодинамической терапии, в солнечных батареях. Возможности применения ФС определяются эффективностью интеркомбинационных переходов (ИКП), приводящих к образованию триплетных состояний. В плоских ароматических молекулах вероятность образования триплетов мала, и для устранения этой проблемы используют молекулы с присоединёнными тяжёлыми атомами. Для фотодинамической терапии необходимы безопасные ФС, без тяжёлых атомов. В донорно-акцепторных диадах метастабильные триплетные состояния хромофора могут формироваться в отсутствие тяжёлых металлов за счёт ИКП через состояния с переносом заряда. Мы представляем здесь результаты исследований новых донорно-акцепторных диад, в которых два хромофора непосредственно связаны друг с другом (компактные диады), что отличает их от диад, изученных ранее, и за счёт чего ожидается более сильная связь донор-акцептор. Методом времяз разрешённого ЭПР исследовано несколько типов компактных диад, различающихся партнёрами и их взаимной ориентацией.

Исследование показало, что фотоиндуцированные процессы разделения и рекомбинации заряда в компактных диадах дают существенный вклад в формирование триплетных состояний, который может значительно превосходить вклад ИКП мономера.

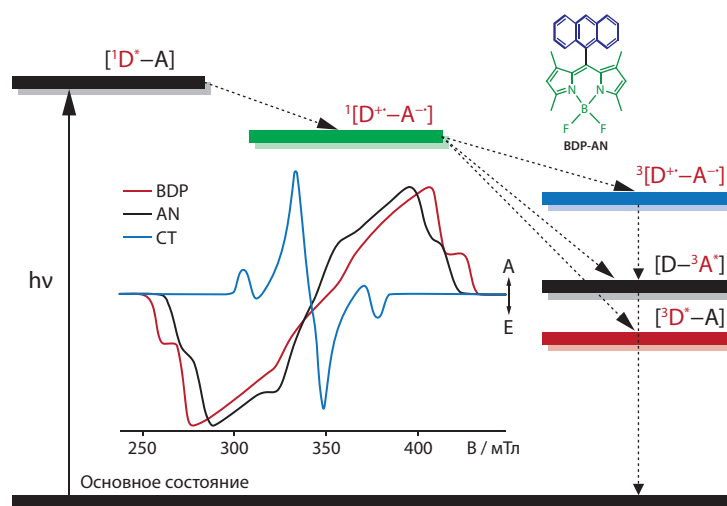


Рис. 1: Диаграмма, демонстрирующая фотофизические процессы в BODIPY-антрацен диаде при фотовозбуждении, и три спектра, на которые раскладывается экспериментальный спектр.

Эффективность механизма поляризации через состояния с переносом заряда зависит не только от взаимной ориентации донора и акцептора, но и от электронной структуры партнёров: замена даже одного атома в молекуле-доноре может существенно изменить картину поляризации электронных спинов триплета.

Впервые показано, что при фотовозбуждении в компактных диадах могут реализоваться несколько метастабильных триплетных состояний. Наиболее ярким примером является диада BODIPY-антрацен, для которой наблюдаются одновременно три триплетных состояния с разными весовыми вкладами (рис. 1).

1. Dong Y., Sukhanov A.A., Zhao J., Elmali A., Li X., Dick B., Karatay A., Voronkova V.K. Spin orbit charge transfer intersystem crossing (SOCT-ISC)

in bodipy-phenoxazine dyads: effect of the chromophore orientation and conformation restriction on the photophysical properties. *J. Phys. Chem. C* **123**, 22793–22811 (2019)

2. Imran M., Sukhanov A.A., Wang Z., Karatay A., Zhao J., Mahmood Z., Elmali A., Voronkova V.K., Hayvali M., Xing Y. H., et al. Electronic coupling and spin-orbit charge-transfer intersystem crossing in phenothiazine-perylen compact electron donor/acceptor dyads. *J. Phys. Chem. C* **123** (12), 7010–7024 (2019)
3. Wang Z., Sukhanov A.A., Toffoletti A., Sadiq F., Zhao J., Barbon A., Voronkova V.K., Dick B. Insights into the efficient intersystem crossing of bodipy-anthracene compact dyads with steady-state and time-resolved optical/magnetic spectroscopies and observation of the delayed fluorescence. *J. Phys. Chem. C* **123** (1), 265–274 (2019)
4. Tang G., Sukhanov A.A., Zhao J., Yang W., Wang Z., Liu Q., Voronkova V.K., et al. Red thermally activated delayed fluorescence and the intersystem crossing mechanisms in compact naphthalimide-phenothiazine electron donor/acceptor dyads. *J. Phys. Chem. C* **123**, 30171–30186 (2019)
5. Xiao X., Pang J., Sukhanov A.A., Hou Y., Zhao J., Li M.-D., Voronkova V.K. The effect of one-atom substitution on the photophysical properties and electron spin polarization. *J. Chem. Phys.* **153**, 184312 (2020)

# Поиск новых наноматериалов с управляемыми свойствами

## Фото и термо переключаемый магнетизм металлокомплексов

Спин-кроссовер (СКР) – это явление изменения спинового состояния иона металла в координационном соединении под действием внешних факторов. Изменения температуры, давления или фотооблучение могут обратимо переводить центры Fe(III) из низкоспинового состояния ( $S = 1/2$ , HS) в высокоспиновое ( $S = 5/2$ , VS). Такие соединения могут быть использованы для записи, хранения и обработки информации на молекулярном уровне.

В фокусе внимания КФТИ находится направленный синтез новых соединений, в том числе обладающих жидкокристаллическими свойствами, а также квазиодномерных цепочечных структур с усиленными коллективными эффектами, и дендримеров. Следует отметить, что практически все исследуемые вещества были синтезированы впервые в мире. Мы изучаем СКР свойства соединений в разных фазовых состояниях – твёрдое тело, жидкий кристалл, жидкие и замороженные растворы. В своих исследованиях мы опираемся на результаты широкого ряда методов детектирования спинового перехода, основанных на изменении магнитных свойств центрального атома (ЭПР, ЯМР, магнитная восприимчивость), расстояний в комплексе (РСА), оптических характеристик (UV-vis спектроскопия) и квантово-химических вычислений (DFT).

Из работ, выполненных для N4O2 координационного окружения Fe(III), которое является выгодным для проявления СКР свойств, отметим некоторые результаты исследований систем на базе тетраденатных оснований Шиффа (SB = vanen, salen, acen и bzacen). Так,

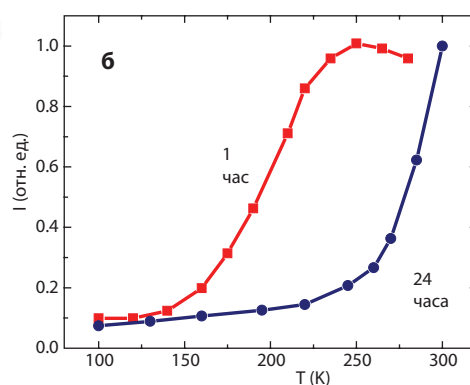
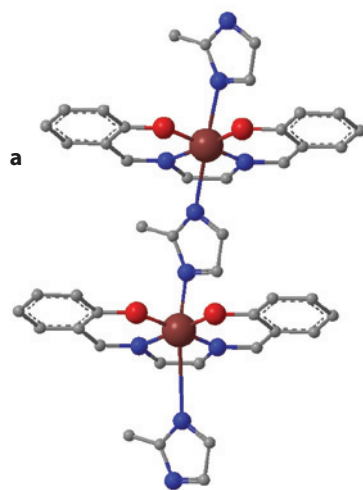


Рис. 1: а) Фрагмент молекулярной цепи  $[\text{Fe}(\text{salen})(2\text{-Me-Him})]_n$ . б) Изменение интегральной интенсивности сигнала ЭПР ВС центров, демонстрирующее различия в температурах СКР для соединений  $[\text{Fe}(\text{bzacen})(\text{tvpr})]\text{BPh}_4 \cdot n\text{CH}_3\text{OH}$  с разным временем кристаллизации из раствора.

в соединении  $[\text{Fe}(\text{salen})(2\text{-Me-Him})]_n$ , где 2-Me-Him = 2-метилимидазолатный мостиковый лиганд (рис. 1а), доказано сосуществование линейных и зигзагообразных антиферромагнитных цепочек, причём магнитная система переходит в состояние спинового стекла при температуре ниже 30 K [1]. Необычные магнитные свойства получены в ряду цепочечных соединений  $[\text{Fe}(\text{SB})(\text{tvpr})]\text{BPh}_4 \cdot n\text{CH}_3\text{OH}$ , где мостиковым лигандом является tvpr [2]. Обнаружено, что параметры спинового перехода и строение комплексов с лигандом bzacen зависят от времени их кристаллизации из раствора (рис. 1б). Показано, что различие свойств этих соединений определяет разница в расщеплении уровней энергии нижнего терма  $T_{2g}$ , а не расстояние между HS и VS электронными термами  ${}^2T_{2g}$  и  ${}^6A_{1g}$  (как традиционно считалось).

С целью создания соединений с магнитными свойствами, управляемыми светом, исследованы комплексы

$[\text{Fe}(\text{SB})(\text{Sp})_2]\text{BPh}_4$ , в состав которых введены фотоизомеризуемые (*транс-цис*) аксиальные лиганды Sp (4-стирилпиридин) [3] или Sp-11 (4-ундецилокси-4'-стирилпиридин). Установлено, что увеличение крутизны СКР перехода наблюдается в серии salen  $\approx$  vanen < bzacen < acen. Эта тенденция сохраняется как в поликристаллических образцах, так и в растворах, то есть определяется в основном экваториальным окружением иона Fe(III). Более удлинённые комплексы с Sp-11 проявляют жидкокристаллические свойства в широком температурном интервале.

1. Иванова Т.А., et al. Особенности магнитных свойств в цепочечной структуре  $[\text{Fe}(\text{salen})(2\text{-Me-Him})]_n$ . Ж. неорг. химии, **64**, 520–526 (2019)
2. Ivanova T.A., et al. Spin crossover properties of Fe(III) complexes in  $[\text{Fe}(\text{bzacen})(\text{tvpr})]\text{BPh}_4 \cdot n\text{Solv}$  chain structures. EPR study. Magn. Res. in Chem. **58**, 949–956 (2020)
3. Turanova O.A., et al. Effect of the chemical structure of an equatorial ligand on the spin crossover properties of the Fe(III) complex with 4-styrylpyridine axial ligands. J. Chem. Phys. **152**, 014306 (2020)



# Наноструктуры на основе короткоцепных олигопептидов

Развиты методы управления самосборкой короткоцепных олигопептидов для получения биосовместимых кристаллических наноструктур

В настоящее время значительный интерес исследователей привлекают короткоцепные пептиды (олигопептиды), поскольку они являются универсальными строительными блоками, позволяющими получать новые наноматериалы. В зависимости от внешних условий олигопептиды в результате самоорганизации образуют разнообразные структуры. Материалы на их основе демонстрируют нелинейные оптические и пьезоэлектрические свойства. Олигопептидные структуры биологически активны и экологичны.

Поиск зависимостей между типом образующихся структур на основе олигопептидов и внешними условиями является актуальной задачей, решение которой позволит продвинуться в создании подходов к управляемой самосборке олигопептидов для получения новых бионаноматериалов.

Методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) было проведено исследование влияния типа подложки и паров органических соединений на процессы самосборки ди- и трипептида на основе глицина [1]. Установлено, что на гидрофобном высокоориентированном пиролитическом графите (ВОПГ) происходит самоорганизация олигопептидов при действии паров протонодонора (рис. 1а) и слабого протоноакцептора, гидрофильная слюда препятствует этим процессам, а гидрофильный кремний способствует самоорганизации (рис. 1б).

Для дипептида  $L$ -лейцил- $L$ -лейцин методом АСМ изучено влияние ор-

ганических растворителей и нагрева на его самоорганизацию. Показано, что в сильных протонодонорах и протоноакцепторах происходит образование крупных кристаллов.

Для ряда дипептидов было обнаружено, что при их нагревании выше критической температуры протекает твёрдофазная химическая реакция с образованием циклических дипептидов. Подобные объекты в настоящее время интенсивно исследуются благодаря их антивирусным и противоопухолевым свойствам. Методом АСМ было показано, что циклические дипептиды формиру-

ют наностержни (рис. 1в) и нано- и микропластинки (рис. 1г).

Полученные результаты могут быть использованы для развития методов управляемой самосборки короткоцепных олигопептидов как на поверхности подложек, так и из растворов для получения биосовместимых наноструктур различной геометрии, а также для развития методов получения циклических дипептидов.

1. Ziganshin M.A., Morozova A.S., Ziganshina S.A., Vorobev V.V., Suwinska K., Bukharaev A.A., Gorbachuk V.V. Additive and antagonistic effects of substrate and vapors on self-assembly of glycyl-glycine in thin films. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* **690**, N1, 67–83 (2019)

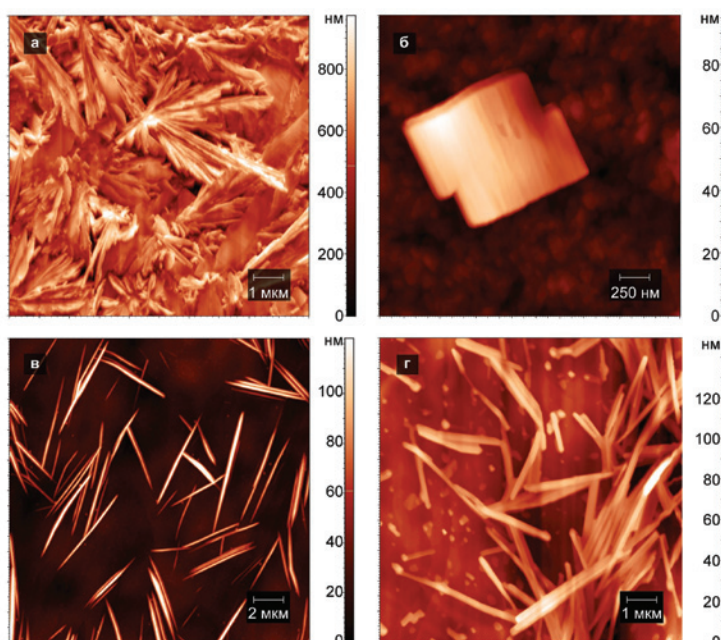


Рис. 1: Изображения плёнок пептидов на поверхностях подложек. Образцы GG на ВОПГ (а) и GGG на гидрофильном кремнии (б) после насыщения парами пиридина. Наностержни циклодифенилаланила (в) и нанопластины цикло(лейцил-лейцина) (г) на поверхности ВОПГ. Изображения получены с помощью атомно-силового микроскопа.



# Уникальные нанопористые структуры

## Технология формирования слоёв нанопористого германия различной морфологии методом ионной имплантации

В настоящее время слои нанопористого германия (PGe) различной морфологии рассматриваются на практике как перспективные уникальные наноматериалы, которые могут найти применение в качестве элементов солнечных батарей, для создания электродов ионно-литиевых аккумуляторов, для использования в качестве каркасных структур для культивирования и выращивания сверхмалых бактерий и биоплёнок в клинических и биомедицинских исследованиях, и др.

В КФТИ разработана и запатентована новая технология получения тонких нанопористых слоёв PGe с различной морфологией при помощи низкоэнергетической высокодозовой ионной имплантации. Новая технология была успешно реализована на ускорителе ИЛУ-3 на конкретных примерах ионной имплантации монокристаллических пластин *c*-Ge при энергии 30–40 кэВ, плотности тока в ионном пучке 2 мкА/см<sup>2</sup> и дозе 5.0·10<sup>16</sup> ион/см<sup>2</sup>. Методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) высокого разрешения (рис. 1) показано, как изменяется морфология поверхностного слоя PGe в зависимости от массы ускоренных внедряемых ионов переходных металлов (<sup>52</sup>Cr<sup>+</sup>, <sup>55</sup>Mn<sup>+</sup>, <sup>56</sup>Fe<sup>+</sup>, <sup>59</sup>Ni<sup>+</sup>, <sup>63</sup>Cu<sup>+</sup>, <sup>108</sup>Ag<sup>+</sup>, <sup>122</sup>Sb<sup>+</sup>). Установлено, что морфология тонких слоёв PGe с ростом массы облучаемого иона меняет свою наноструктуру от лабиринтовой (рис. 1а), дырочной (рис. 1б), мембранной (рис. 1в), трёхмерной сетчатой (рис. 1г, д, е) до губчатой, состоящей из нанонитей Ge (рис. 1ж, з).

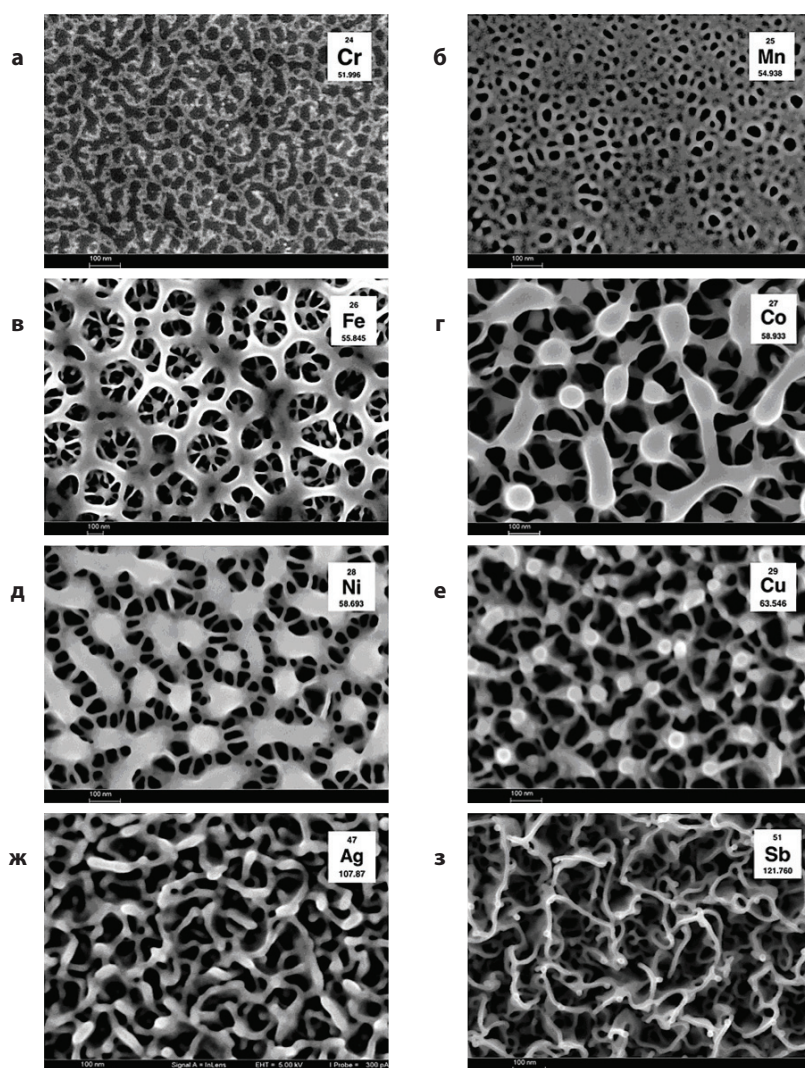


Рис. 1: СЭМ-изображения различных морфологических структур нанопористых слоёв PGe, сформированных имплантацией *c*-Ge ионами различных масс: а) <sup>52</sup>Cr<sup>+</sup>; б) <sup>55</sup>Mn<sup>+</sup>; в) <sup>56</sup>Fe<sup>+</sup>; г) <sup>59</sup>Ni<sup>+</sup>; д) <sup>59</sup>Ni<sup>+</sup>; е) <sup>63</sup>Cu<sup>+</sup>; ж) <sup>108</sup>Ag<sup>+</sup>; з) <sup>122</sup>Sb<sup>+</sup>.

1. Степанов А.Л., Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Рогов А.М. Формирование слоёв пористого кремния и германия с металлическими наночастицами. Изд. ФИЦ КазНЦ РАН, Казань, 2019.
2. Rogov A.M., Nuzhdin V.I., Valeev V.F., Stepanov A.L., Formation of porous germanium layers with various surface morphology in dependence on

mass of implanted ions. Composites Comm. 19, 6–9 (2020)

3. Степанов А.Л., Рогов А.М., Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Способ изготовления подложки монокристаллического германия с тонким поперхностным слоем пористого германия. Патент РФ на изобретение, № 2737692 (2020)

# Электропроводящий полимерный композиционный материал с нанокуглеродным наполнителем

Разработка технологии получения функционализированных углеродных нанотрубок и электропроводящих полимерных композиционных материалов на их основе

Разработка полимерных композиционных материалов (ПКМ), обладающих высоким уровнем функциональных свойств, является одной из приоритетных задач современного материаловедения. Углеродные нанотрубки (УНТ), благодаря уникальным физико-химическим свойствам, а также высокому аспектному соотношению (отношение длины к диаметру), являются перспективными наполнителями в различные среды для создания таких материалов. Добавление УНТ приводит к тому, что исходная диэлектрическая матрица полимера становится электропроводящей с проводимостью, которая может меняться в широких пределах. Широкому применению углеродных наноструктур для создания композиционных материалов на их основе препятствует проблема равномерного распределения УНТ в полимере. Данная проблема может быть решена путём поверхностной функционализации углеродных нанотрубок.

Нами была разработана методика получения функционализированных УНТ, которая позволяет разделять агломерированные углеродные нанотрубки (рис. 1а и 1б) и добиваться их равномерного распределения в полимерной среде. При этом, в зависимости от условий функционализации,

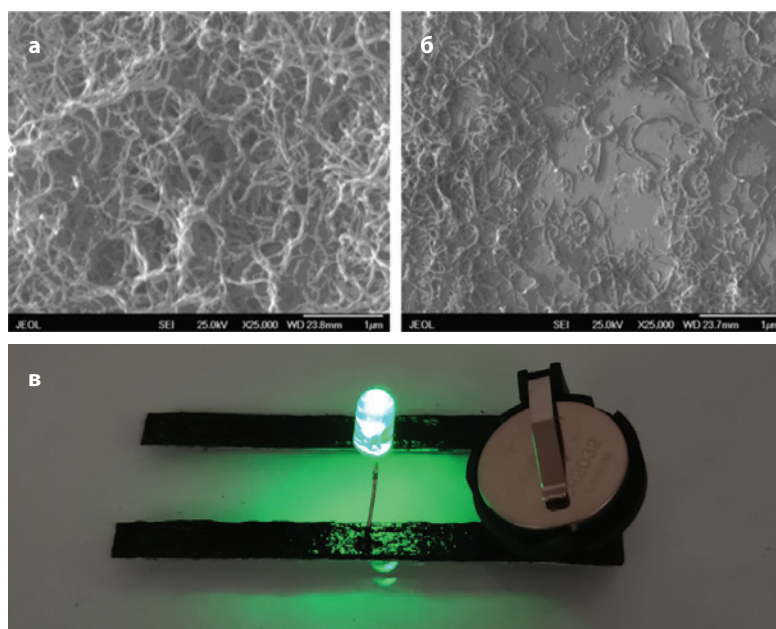


Рис. 1: Углеродные нанотрубки: а) до функционализации (агломераты) и б) после функционализации. в) Пример использования композиционного материала на основе эпоксидной смолы и модифицированных УНТ в качестве токопроводящего покрытия. Чёрные полосы – разработанный материал, нанесённый на стекло.

степень структурных изменений УНТ и электропроводность ПКМ на их основе варьируются в значительной степени. Разработанная методика может применяться для создания материалов с заданными электрофизическими свойствами. На рис. 1в представлен пример использования разработанного материала в качестве токопроводящего покрытия.

1. Garipov R.R., Khantimerov S.M., L'vov S.G., Shustov V.A., Kurbatova N.V., Suleimanov N.M. Effect of thermochemical treatment on the state of SWNT and on the electrical conductivity of epoxy-SWNT composites. Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures. DOI: 10.1080/1536383X.2020.1833191 (2020)
2. Garipov R.R., Khantimerov S.M., Suleimanov N.M. Electrically conductive composite based on functionalized carbon nanotubes/epoxy resin. Int. J. Innovat. Technol. Explor. Engineer. 9, 1401–1404 (2020)

# Магнитоупругий эффект в планарных микрочастицах

## Детектирование одноосных механических напряжений в планарных микрочастицах методами магнитно-силовой микроскопии

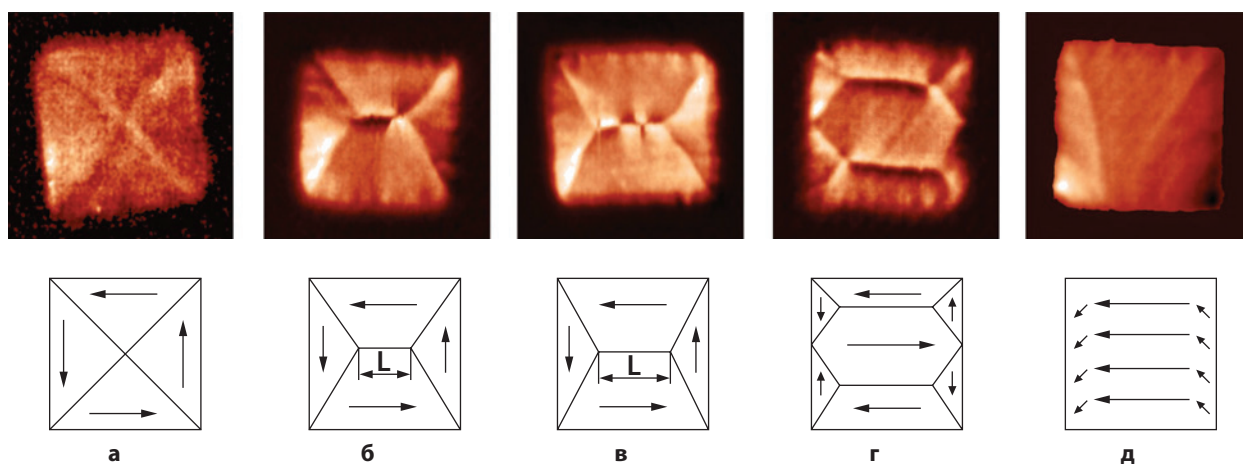


Рис. 1: MCM изображения CoNi частицы размерами 7.5 (вверху) и соответствующие им распределение намагниченности (внизу). На частицу не действуют механические напряжения (а), на частицу действует напряжение 0.1 ГПа (б), напряжение 0.15 ГПа (в), напряжение 0.2 ГПа (г), напряжение 0.3 ГПа (д). Размер поля сканирования 10x10 мкм<sup>2</sup>. Частица растягивается вдоль оси Y.

Одной из актуальных на сегодня задач является использование магнитоупругого эффекта (эффекта Виллари) на микро- и наноуровне для управления намагниченностью планарных ферромагнитных частиц. Ферромагнитные микрочастицы квадратной формы, когда на них не действуют механические напряжения, обычно имеют четырёхдоменную структуру с доменами, равными по размерам (рис. 1а). Направление намагниченности в каждом домене совпадает со стороной квадрата. Под действием одноосного механического напряжения, за счёт магнитоупругого эффекта, происходит увеличение размера одних доменов за счёт уменьшения других. При отрицательной магнитострикции и одноосном растяжении частицы увеличиваются домены, перпенди-

кулярные направлению растяжения, и между этими доменами образуется характерная доменная стенка (перемычка) (рис. 1б). Площадь доменов и, соответственно, длина перемычки (L) увеличиваются при увеличении величины растяжения и, исходя из этих изменений, можно оценить величину механического напряжения, действующего на частицу (рис. 1в). В определённых случаях с увеличением напряжения частица может переходить в семидоменное состояние (рис. 1г) и даже становиться однородно намагниченной (рис. 1д). Для детектирования механических напряжений самым оптимальным является четырёхдоменное состояние частицы, т.к. в этом случае проще определить длину перемычки, и она сильнее зависит от приложенного напряжения.

Для исследования магнитной структуры частиц использовался магнитно-силовой микроскоп, который позволяет изучать распределение локальной намагниченности с разрешением ~30 нм и точно определить длину перемычки между доменами. Исследования проведённые на Co<sub>18</sub>Ni<sub>82</sub> частицах показали, что они позволяют эффективно детектировать одноосные механические напряжения в интервале 0.01–0.2 ГПа с разрешением порядка 10 мкм, что существенно превышает разрешающую способность существующих на сегодняшний день тензодатчиков.

1. Нургазизов Н.И., Бизяев Д.А., Бухараев А.А., Чуکلанов А.П. Управление магнитной структурой CoNi-микрочастиц при помощи механических напряжений. ФТТ 62, №9, 1503–1506 (2020).



# Низкоразмерные магнетики

## Определение анизотропных обменных взаимодействий из анализа спектров ЭПР в низкоразмерных магнетиках

Проявление квантовых эффектов при высоких температурах привлекает внимание научного сообщества к низкоразмерным магнетикам – мультиферроикам, в которых наблюдаются и электрическая поляризация, и ферромагнетизм. Природе взаимодействия между электрическими и магнитными подсистемами, обусловленной анизотропным обменом, уделяется значительное внимание.

Нами развита методика определения параметров анизотропного обменного взаимодействия из комплексного анализа структурных данных, намагниченности, угловой и температурной зависимостям ширины линии ЭПР в трёх кристаллографических плоскостях (рис. 1). Мы исследовали поведение спектров магнитного резонанса в низкоразмерном магнетике типа «спиновая лестница»  $\text{LiCu}_2\text{O}_2$  в парамагнитном режиме. Из анизотропии ширины линии ЭПР, полученной на монокристаллах, мы смогли извлечь величины симметричных анизотропных обменных взаимодействий, возникающих в результате суперобмена  $|J_2^{ZZ}| \sim 1$  К внутри цепочки  $\text{Cu-O-Cu-O}$ , расположенной вдоль оси  $b$ , и суперобмена между соседними ионами меди в пределах перекалин лестниц, образованных соседними цепочками  $|J_1^{YY}| \sim 2$  К.

Кроме того, мы показали, что значительный антисимметричный анизотропный вклад Дзялошинского-Мория (DM)  $|D_a| \approx 5$  К необходим для точного описания наблюдаемой анизотропии ширины линии.

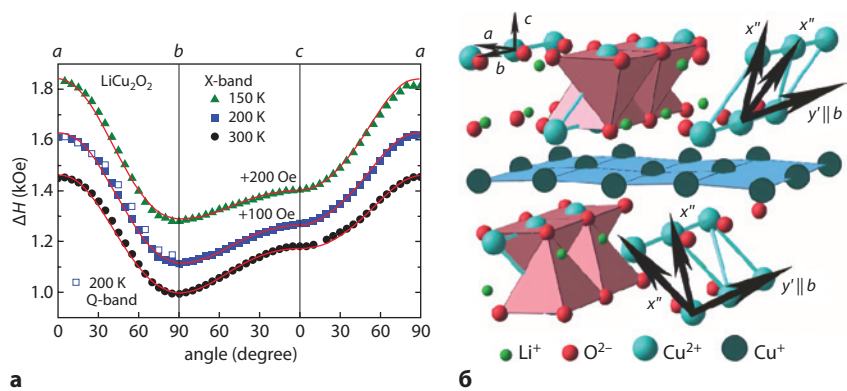


Рис. 1: а) Угловая зависимость ширины линии ЭПР в трёх кристаллографических плоскостях при  $T = 150, 200$  и  $300$  К в монокристалле  $\text{LiCu}_2\text{O}_2$ . б) Орторомбическая кристаллическая структура  $\text{LiCu}_2\text{O}_2$ . Спиновые лестницы расположены вдоль оси  $b$  и образованы соединёнными гранями розовыми пирамидами  $\text{Cu}^{2+}\text{O}_5$ . Светло-голубые плоскости  $\text{Cu}^+$  разделяют структуру на слои, перпендикулярные оси  $c$ . Чёрные стрелки указывают направление кристаллографических осей  $a, b, c$ . Штрихованные обозначения относятся к осям локальных координат внутрицепочечных анизотропных обменных взаимодействий.

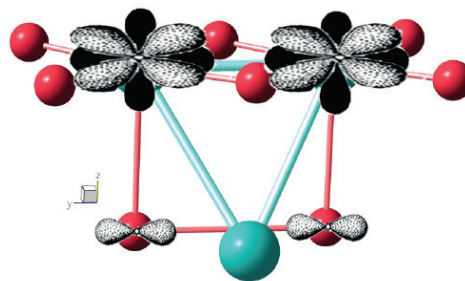


Рис. 2: Возможный путь реализации антисимметричного анизотропного обменного взаимодействия (DM) между соседними ионами меди внутри цепочек, расположенных вдоль оси  $b$  кристалла. Ионы  $\text{Cu}^{2+}$  (большие голубые сферы) с орбиталями  $dx^2-y^2$  (пунктирная) и  $dxz$  (чёрная),  $\text{O}^{2-}$  (маленькие красные сферы) с ру (открытыми, пунктирными) орбиталями.

Анализ наших данных свидетельствует о том, что наиболее сильным является внутрицепочечное антисимметричное анизотропное взаимодействие DM (рис. 2), а вектор  $D_a$  направлен параллельно кристаллографическому направлению  $a$ .

1. Seidov Z., Gavrilova T.P., Eremina R.M., Svistov L.E., Bush A.A., Loidl A., Krug von Nidda H.-A. Anisotropic exchange in  $\text{LiCu}_2\text{O}_2$ . Phys. Rev. B 95, N22, 224411 (2017)



# На пути управления двумерной проводимостью и сверхпроводимостью

Предсказаны и обнаружены квазидвумерные проводимости и сверхпроводимости на интерфейсах гетероструктур сегнетоэлектрик/диэлектрик

Поиск и исследование материалов, на основе которых можно создавать новые многофункциональные устройства для элементной базы современной электроники, и, в том числе, которые позволят осуществить следующий скачок в миниатюризации транзисторов до размеров менее 7 нм, является важной научной задачей, имеющей фундаментальные и прикладные аспекты. Проблема существования квазидвумерного проводящего состояния с металлическим характером проводимости на интерфейсе между двумя непроводящими оксидами металлов сложного состава чрезвычайно актуальна сама по себе. Кроме того, на базе таких объектов может быть построена электронная техника нового поколения с меньшими размерами рабочих элементов.

В нашем институте была высказана идея получать такие квазидвумерные металлические состояния на интерфейсе гетероструктуры сегнетоэлектрик/диэлектрик. Новизна и оригинальность этого подхода в том, что в случае использования сегнетоэлектриков нет необходимости добиваться сверхвысокого качества интерфейсов, потому что направление вектора поляризации не связано с качеством интерфейса. В таких системах высокопроводящее состояние возможно на структуре без абсолютно плоской границы между двумя диэлектриками. А значит, для

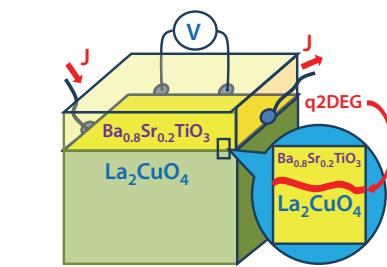
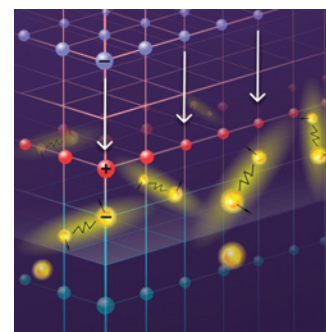


Рис. 1: Схема эксперимента и схематическое изображения явления.

создания гетероструктур можно использовать более простые и дешевые методы напыления, например, метод магнетронного напыления. В качестве диэлектрика использовался  $\text{LaMnO}_3$ , который может переходить в ферромагнитное состояние при увеличении числа носителей, поэтому можно ожидать ферромагнитное состояние на интерфейсе. В этом случае возникают возможности переключения между полупроводниковым состоянием со слабой проводимостью и высокопроводящим состоянием с квазиметаллическим характером проводимости на интерфейсе и между мультифункциональными состояниями с намагниченностью при воздействии электрическим полем на сегнетоэлектрик.

При воплощении этой идеи был осуществлён цикл исследований гетероструктур сегнетоэлектрик/диэлектрик с целью обнаружения высокой металлической проводимости на интерфейсе. Вначале были сделаны



работы по *ab initio* моделированию свойств гетероструктуры  $\text{BaTiO}_3/\text{LaMnO}_3$ , а позже гетероструктуры  $\text{BaTiO}_3/\text{La}_2\text{CuO}_4$  с помощью метода теории функционала плотности [1–3]. Из анализа спектров плотности электронных состояний гетероструктуры  $\text{BaTiO}_3/\text{LaMnO}_3$  показано, что металлическая проводимость на интерфейсе возникает при увеличении числа слоёв сегнетоэлектрика с двух до трёх. При этом происходит не только смещение уровня Ферми в зону проводимости, но и закрытие запрещённой зоны для одной из спиновых компонент. Таким образом было предсказано квазидвумерное металлическое состояние на интерфейсе гетероструктуры типа  $\text{BaTiO}_3/\text{LaMnO}_3$  [1, 2].

Далее, в кооперации с В. М. Мухоматовым из Южного федерального университета, методом магнетронного напыления были созданы гетероструктуры, состоящие из сегнетоэлектрика  $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.3}\text{TiO}_3$  и антиферромагнетика  $\text{LaMnO}_3$ .

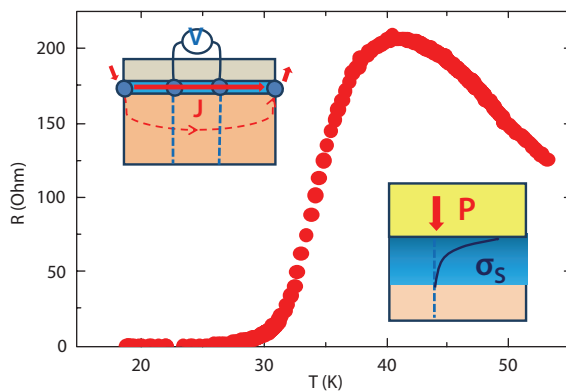


Рис. 2: Наблюдение сверхпроводимости в гетероструктуре  $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3/\text{La}_2\text{CuMnO}_4$ . На вставке схематично показано направление и величина токов (слева вверху) и распределение плотности заряда  $\sigma_s$  при соответствующем направлении поляризации  $P$  (справа внизу).

Исследуя эти гетероструктуры, нам удалось экспериментально показать [1], что квазидвумерное высокопроводящее состояние на интерфейсе гетероструктуры  $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.3}\text{TiO}_3/\text{LaMnO}_3$  возникает тогда, когда вектор сегнетоэлектрической поляризации в плёнке  $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.3}\text{TiO}_3$  направлен перпендикулярно плоскости интерфейса, и металлическое состояние не возникает, когда вектор сегнетоэлектрической поляризации в плёнке направлен параллельно плоскости интерфейса, как и предсказывала теория. Позже мы предсказали путём *ab initio* моделирования свойств гетероструктуры появление металлического состояния на интерфейсе гетероструктуры  $\text{BaTiO}_3/\text{La}_2\text{CuO}_4$  [3].

Основываясь на этих предсказаниях, было экспериментально обнаружено состояние квазидвумерной сверхпроводимости на интерфейсе сегнетоэлектрика  $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.3}\text{TiO}_3$  и антиферромагнетика  $\text{La}_2\text{CuO}_4$  [4].

Также были проведены исследования процессов переключения высокопроводящей области на интерфейсах сегнетоэлектрика и диэлектрика  $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3/\text{LaMnO}_3$  путём воздействия ультрафиолетовым и зелёным светом и неоднородным электрическим полем на сегнетоэлектрик. Когда мы одновременно воздействовали на систему ультрафиолетовым светом и неоднородным электрическим полем на сегнетоэлектрическую плёнку, удалось полностью выключить высокопроводящее состояние. Воздействие зелёным

светом приводило к значительному увеличению сопротивления в широком температурном диапазоне 80–200 К, таким образом, наблюдался отрицательный эффект фотопроводимости при освещении зелёным светом. Исследования показали, что во всех трёх случаях наблюдается увеличение сопротивления при освещении. Величина изменения сопротивления при освещении составляет 2–15%. Обнаружено, что результат от воздействия зелёного света на проводящие свойства интерфейса гетероструктур  $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3/\text{LaMnO}_3$  намного больше, чем в других случаях. Показано, что можно периодически переключать проводимость гетероструктуры  $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3/\text{LaMnO}_3$  из более проводящего состояния в более высокоомное состояние и обратно. Определены характерные времена изменения сопротивления при этих процессах переключения состояний светом, которые составляют 4–12 с. Были сделаны оценки по нагреву области интерфейса при освещении светом различного спектрального состава и сделан вывод, что нагрев практически не происходит, потому что освещение осуществлялось расфокусированным лазерным пучком с диаметром пучка 4 мм при мощности около 20 мкДж, и основное поглощение происходит в плёнке, а не на интерфейсе. Сделано предположение, что наблюдаемый эффект связан с частичным внутренним экранированием поляризации в сегнетоэлектрической плёнке, так как возбуждение свободных носителей

происходит наиболее эффективно при освещении сегнетоэлектрика именно зелёным светом, и эффект наибольший при таком освещении.

Была исследована возможность возникновения сверхпроводимости на границе сегнетоэлектрика и диэлектрика на примере гетероструктуры  $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3/\text{La}_2\text{CuMnO}_4$  (рис. 1). Было показано, что при понижении температуры гетероструктура  $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3/\text{La}_2\text{CuMnO}_4$  переходит в сверхпроводящее состояние при  $T = 30$  К (рис. 2). Сверхпроводимость подтверждается наблюдением диамагнитного отклика в этой области температур. Величина диамагнитной восприимчивости порядка  $10^{-7}$  едм свидетельствует о том, что сверхпроводимость существует в малом объёме образца. Для толщины сверхпроводящей области мы получили очень грубую оценку в пределах величин 3–10 нм. Также была измерена температурная зависимость проводимости в малых магнитных полях. Сверхпроводимость перестаёт наблюдаться уже в очень маленьких полях. Всё это свидетельствует об очень тонком слое сверхпроводящей фазы и о квазидвумерном поведении.

Таким образом, в нашем институте было предсказано и обнаружено квазидвумерная проводимость на интерфейсе гетероструктуры и квазидвумерная сверхпроводимость на интерфейсе гетероструктуры  $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.3}\text{TiO}_3/\text{La}_2\text{CuO}_4$ . Эти исследования являются первыми экспериментальными исследованиями [1, 4] в системах с интерфейсами сегнетоэлектрик/диэлектрик.

1. Павлов Д.П., Пианзина И.И., Мухортов В.М., Балбашов А.М., Таюрский Д.А., Гарифуллин И.А., Мамин Р.Ф. Двумерный электронный газ на границе сегнетоэлектрика  $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3$  и антиферромагнетика  $\text{LaMnO}_3$ . Письма в ЖЭТФ, **106**, вып. 7, 440–444 (2017)
2. Kabanov V.V., Piyanzina I.I., Lysogorskiy Yu.V., Tayurskii D.A., Mamin R.F. Ab initio investigation of electronic and magnetic properties of antiferromagnetic/ferroelectric  $\text{LaMnO}_3/\text{BaTiO}_3$  interface. Materials Research Express **7**, 055020 (2020)
3. Kabanov V.V., Piyanzina I.I., Tayurskii D.A., Mamin R.F. Towards high-temperature quasi-two-dimensional superconductivity. Phys. Rev. B **98**, 094522 (2018)
4. Pavlov D.P., Zagidullin R.R., Mukhortov V.M., Kabanov V.V., Adachi T., Kawamata T., Koike Y., Mamin R.F. Fabrication of high-temperature quasi-two-dimensional superconductors at the interface of a ferroelectric  $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3$  film and an insulating parent compound of  $\text{La}_2\text{CuO}_4$ . Phys. Rev. Lett. **122**, 237001 (2019)

# Литий-ионные аккумуляторы как перспективные системы накопления и хранения энергии

## Исследование и разработка новых электродных материалов

В 2019 году Нобелевская премия по химии была присуждена за разработку и создание литий-ионных аккумуляторов (ЛИА), основанных на фундаментально новом подходе к энерго-аккумулирующим системам, а именно интеркаляционному механизму переноса и хранения электрического заряда (рис. 1). Как было объявлено при присуждении, лауреаты премии: профессора Джон Гудинаф, Акира Ёсино и Стенли Уиттенгем создали перезаряжаемый мир. Действительно, эти лёгкие, перезаряжаемые и мощные источники электроэнергии в настоящее время используются повсюду, начиная от мобильных телефонов и ноутбуков, и заканчивая электромобилями. Следует заметить, что развитие Li-ионных аккумуляторов на основе традиционно используемых материалов электродов постепенно достигает своего предела. Это связано с рядом причин. С одной стороны, ограниченная энергетическая емкость графита обуславливает необходимость разработки новых более эффективных материалов анода. С другой стороны, для материалов катода для литий-ионных аккумуляторов требуются более высокие характеристики как для электронного, так и ионного транспорта. Поэтому дальнейшее развитие технологии литий-ионных аккумуляторов требует поиска новых материалов, в т.ч. наноструктурированных, с целью повышения их удельных энергетических характеристик, скорости заряда/разряда, времени жизни.

Как правило, в литий-ионных ячейках в качестве катода используются

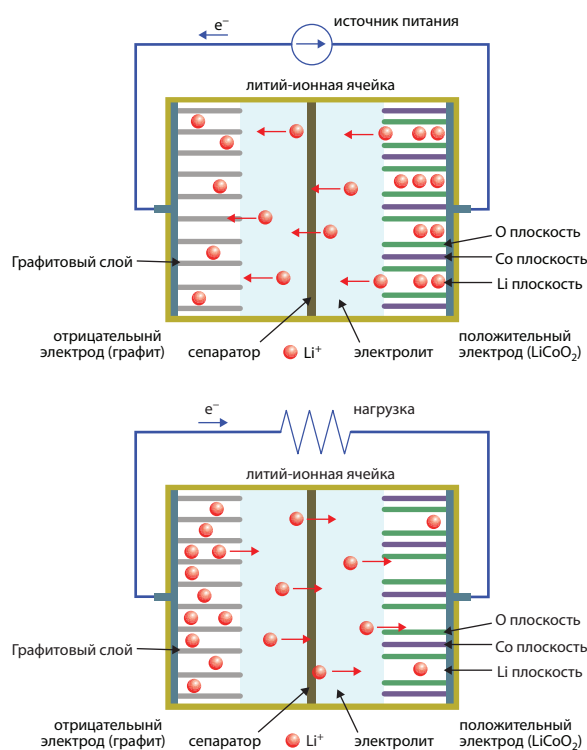


Рис. 1: Принцип работы литий ионного аккумулятора.

литиевые оксиды кобальта, никеля, марганца. Открытая трёхмерная кристаллическая структура этих соединений способствует лёгкой диффузии ионов  $\text{Li}^+$ . Наряду с подходящей кристаллической структурой, электронная структура электродных материалов оказывает важное влияние на процессы интеркаляции/деинтеркаляции ионов лития. Для достижения высоких показателей эффективности ЛИА необходимо обеспечить хороший ионный и электронный транспорт в системе. В своей работе в качестве

катодного материала мы использовали соединение  $\alpha\text{-Li}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3/\text{C}$ . Интерес к этим соединениям обусловлен тем, что кристаллическая структура данного типа стабильна по отношению к изменению валентности катионов переходных элементов, вызываемой процессами интеркаляции/деинтеркаляции щелочного элемента при заряде/разряде аккумуляторной ячейки, и они обладают высокой ионной проводимостью. С использованием метода ЭПР были изучены электронные и магнитные

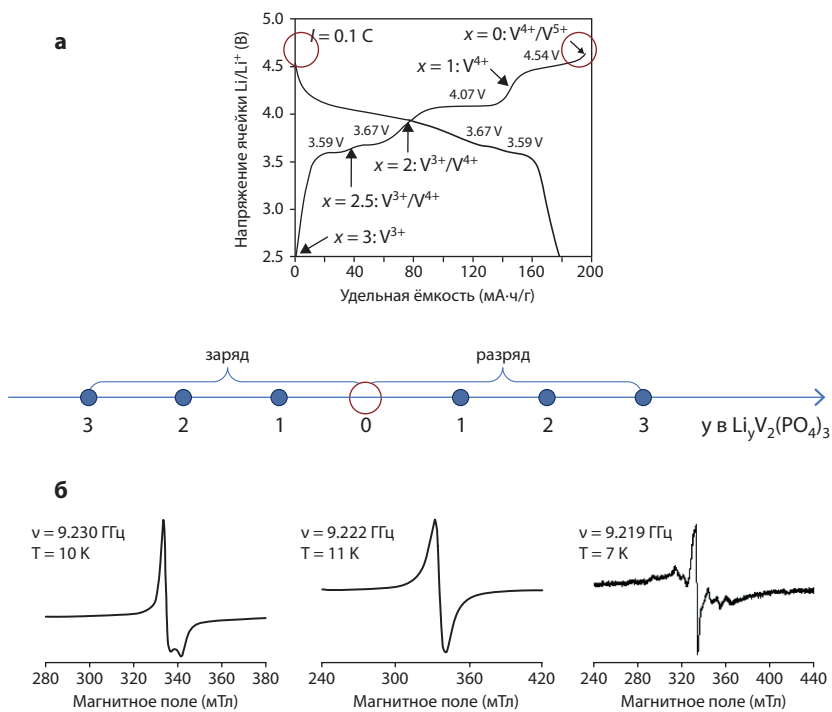


Рис. 2: а) Зарядно/разрядная характеристика литий-ионной ячейки, использующей  $\text{Li}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$  в качестве катодного материала. б) Спектры ЭПР  $\text{Li}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$ .

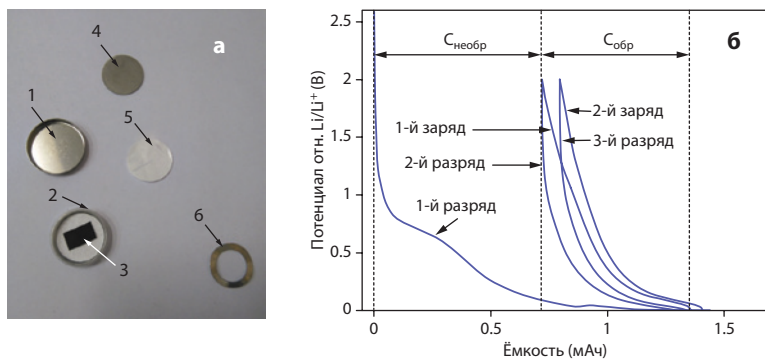


Рис. 3: Схема лабораторного макета ячейки ЛИА с анодом на основе конических углеродных нанотрубок (а), где 1 – крышка, 2 – основание, 3 – конические углеродные нанотрубки на никелевой подложке, 4 – литиевая фольга, 5 – сепаратор с электролитом, 6 – пружина, и её зарядно-разрядные характеристики (б).

свойства катодного материала данного соединения. Были исследованы три фазы  $\alpha\text{-Li}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3/\text{C}$ : исходное соединение  $\alpha\text{-Li}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3/\text{C}$ , делитированный и литированный образцы (рис. 2). Проведённые исследования позволили изучить валентное состояние ванадия в ходе процесса заряда/разряда электрохимической ячейки. Было обнаружено полное восстановление ионов ванадия до исходного валентного состояния

$\text{V}^{3+}$  после первого цикла заряда/разряда, что указывает на обратимое интеркалирование всех ионов лития в структуру во время первого цикла делитирования/литирования в исследуемом  $\alpha\text{-Li}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3/\text{C}$  соединении и хорошую кинетику переноса лития в материале, что имеет важное значение для скорости заряда аккумулятора.

Несмотря на то, что исследованию катодных материалов уделяется большое внимание, трудно ожидать про-

рыва в этой области без комплексного подхода, основанного на разработке новых материалов и для анода литиевых аккумуляторов, т.к. определяющую роль в рабочих параметрах реальной электрохимической ячейки играет согласованная эффективная работа обоих электродов. Традиционно графит широко используется в качестве анодного материала для литий-ионных аккумуляторов. В последние годы большое внимание уделяется углеродным нанотрубкам, которые рассматриваются как альтернатива графиту вследствие их высокой эффективной поверхности. Мы в своей работе в качестве анодного материала исследовали конические углеродные нанотрубки (кУНТ). Характерной особенностью кУНТ является то, что их стенки состоят из одиночных графитовых плоскостей, образующих массив конических сегментов с открытыми концами и длиной порядка 100 нм. Таким образом, существует возможность адсорбции лёгких элементов поверхностью углеродных нанотрубок, а также возможность их интеркаляции в межплоскостное пространство. С помощью гальваностатического метода было исследовано взаимодействие конических углеродных нанотрубок с литием (рис. 3). Полученные результаты показывают, что кривая разряда/заряда (интеркаляция/деинтеркаляция ионов лития) конических углеродных нанотрубок обратима. В то же время приложенный потенциал недостаточен для полной деинтеркаляции ионов  $\text{Li}$ , что указывает на наличие обратимых и необратимых реакций при введении лития в конические углеродные нанотрубки.

1. Suleimanov N.M., Khantimerov S.M., Kierzek K., Shustov V.A., Garipov R.R., Fatykhov R.R., Matukhin V.L. Structural and electrochemical properties of lithiated conical carbon nanotubes as anode materials for lithium-ion accumulating systems. *Int. J. Mater. Res.* **110**, 1–5 (2019)
2. Gavrilova T.P., Khantimerov S.M., Fatykhov R.R., Yatsyk I.V., Cherosov M.A., Lee H.S., Vishwanathan R., Saravanan K., Suleimanov N.M. Magnetic properties and vanadium oxidation state in  $\alpha\text{-Li}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3/\text{C}$  composite: Magnetization and ESR measurements. *Solid State Commun.* **323**, 114108 (2021)
3. Khantimerov S.M., Fatykhov R.R., Suleimanov N.M. Prospectives for the use of Li-ion batteries in hybrid stand-alone power sources. *Int. J. Emerg. Electr. Power Syst.* **20**, 1–11 (2019)



# Необычные наноструктурированные ферромагнитные плёнки

## Формирование ферромагнитных плёнок с перпендикулярной магнитной анизотропией методом ионно-стимулированного осаждения

Впервые методом ионно-стимулированного осаждения получены тонкие плёнки нанокристаллического железа, проявляющие перпендикулярную к поверхности одноосную магнитную анизотропию и полосовую доменную структуру. Обнаружено, что тонкие (~100 нм) плёнки железа, полученные методом ионно-стимулированного осаждения в определённых режимах, проявляют ряд особенностей в структуре и магнитных характеристиках. Плёнки представляют собой наноструктурированный и нанокompозитный материал, состоящий из наноразмерных (~10 нм) кристаллитов  $\alpha$ -Fe и немагнитного оксида FeO. Плёнки характеризуются микронапряжениями растяжения, величина которых более чем на порядок превышает предел пластической деформации массивного железа. Это означает, что путём растяжения образца из массивного железа расстояние между атомами можно увеличить максимум на 0.1%, а у полученных наноструктурированных плёнок это расстояние увеличено на 3%.

Кривые намагничивания плёнок (рис. 1, слева), регистрируемые при комнатной температуре как в плоскости, так и перпендикулярно к плоскости плёнки, свидетельствуют о наличии перпендикулярной к поверхности плёнки одноосной магнитной анизотропии. То есть, если у «обычных» ферромагнитных плёнок намагниченность лежит в плоскости плёнки, то у

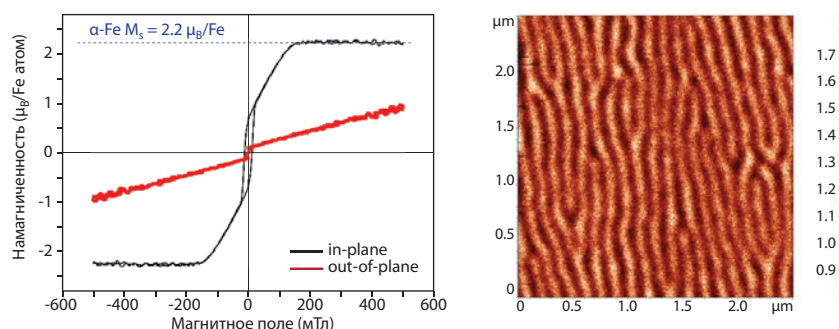


Рис. 1: Кривые намагничивания (слева) тонкой плёнки  $^{57}\text{Fe}$ , регистрируемые при комнатной температуре, как в плоскости (in plane), так и перпендикулярно к плоскости (out of plane) плёнки, а также её полосовая доменная структура, полученная с использованием магнитно-силовой сканирующей микроскопии.

полученных в работе плёнок имеется перпендикулярная к поверхности компонента намагниченности. Доменная структура плёнок, т.е. области спонтанной намагниченности, также существенно отличается от обычной и имеет полосовый характер (рис. 1, справа): перпендикулярная компонента намагниченности (светлые и темные полосы на рисунке) направлены в противоположные стороны. Термический отжиг в вакууме ведёт к кристаллизации плёнки, снятию микронапряжений, и отожжённые образцы проявляют типичное для кристаллических плёнок железа магнитное поведение.

Тонкие ферромагнитные плёнки с перпендикулярной магнитной анизотропией могут представлять интерес в индустрии записи и хранения

информации, а также в магнитосенсорной электронике.

1. Lyadov N.M., Bazarov V.V., Vagizov F.G., Vakhitov I.R., Dulov E.N., Kashapov R.N., Noskov A.I., Khaibullin R.I., Shustov V.A., Faizrahmanov I.A. Structural and magnetic studies of thin  $^{57}\text{Fe}$  films formed by ion beam assisted deposition. *Appl. Surf. Sci.* **378**, 114–119 (2016)
2. Lyadov N.M., Vagizov F.G., Vakhitov I.R., Gumarov A.I., Ibragimov S.Z., Kuzina D.M., Faizrahmanov I.A., Khaibullin R.I., Shustov V.A. Deposition rate effect on microstructure and perpendicular magnetic anisotropy of iron films prepared by ion-beam-assisted deposition. *Vacuum*, N168, 108860(1–8) (2019)
3. Zinnatullin A.L., Lyadov N.M., Faizrahmanov I.A., Vagizov F.G. Mossbauer effect studies of thin iron films synthesized by ion beam assisted deposition technique. *J. Phys.: Conf. Series* **1058**, 012015 (2018)

# Оптические нановолокна

## Однофотонные источники и оптические сенсоры на основе суженных оптических волокон

Суженные оптические волокна, имеющие диаметр меньше длины волны распространяющегося в них излучения, имеют ряд уникальных свойств, обусловленных малым поперечным сечением мода, значительной величиной ближнего поля, а также малым весом. Их можно использовать, например, для высокоточного зондирования, наблюдения нелинейных оптических эффектов при малых мощностях излучения (меньше нВт), манипулирования одиночными атомами, а также высокоэффективного связывания излучения с одиночными оптическими центрами. С технологической точки зрения, субмикронный диаметр волокон позволяет создавать миниатюрные оптические схемы, для которых характерны малые потери и малое энергопотребление, а возможность эффективного связывания обычного и нановолокна позволяет делать эти схемы совместимыми с волоконно-оптическими линиями связи. Наконец, оптические нановолокна позволяют очень простым способом изготовить миниатюрные высокодобротные резонаторы, имеющие широкий спектр применения в квантовой оптике.

Одним из актуальных направлений исследований в КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН является разработка однофотонных источников и оптических сенсоров на основе суженных волокон. При этом основное внимание уделяется эффекту спонтанного четырёхволнового смешения (СЧВС) (рис. 1). В частности, недавно был предложен метод определения показателя преломления сред, основанный на СЧВС

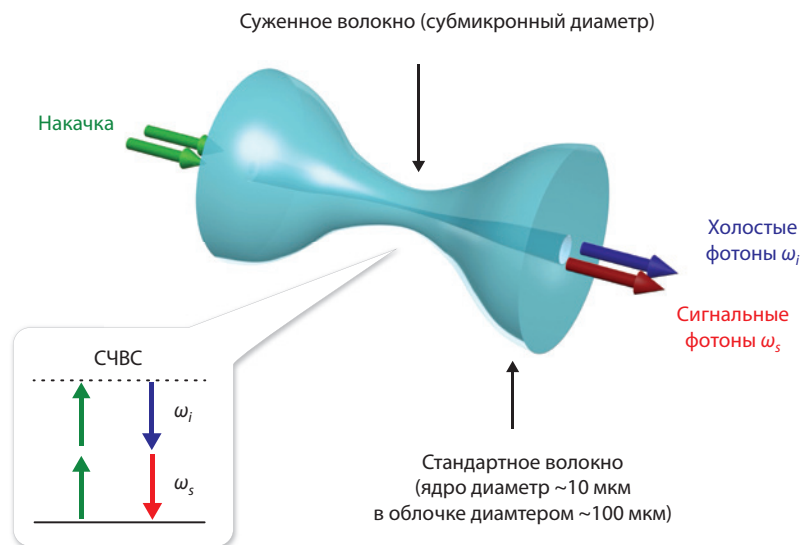


Рис. 1: Эффект СЧВС в суженном оптическом волокне: два фотона поля накачки внутри материала с кубической нелинейностью спонтанно превращаются в пару коррелированных фотонов, называемых обычно сигнальным и холостым.

в оптическом нановолокне, который позволяет исследовать вещества в ИК области спектра, регистрируя фотоны в видимой области спектра [1]. Данный метод обладает высокой чувствительностью и позволяет избавиться от низкоэффективной и дорогостоящей аппаратуры для измерения спектров в ИК области. В работе [2], выполненной совместно с японскими коллегами, была создана и охарактеризована серия идентичных оптических нановолокон, которую можно использовать для создания однофотонных источников с пространственным мультиплексированием. При этом впервые была измерена двухфотонная интенсивность поля СЧВС и автокорреляционная функция поля СЧВС, которая описывает частотную корреляцию между сигнальными и холостыми фотонами, а

также измерена автокорреляционная функция одного из полей, которая характеризует исследуемую систему как однофотонный источник. Наконец, в работе [3] была высказана идея и проведены первые эксперименты по реализации оптоакустического сенсора или оптического микрофона, который можно использовать для высокоэффективного удаленного детектирования акустических колебаний.

1. Калачёв А.А., Шухин А.А. Способ определения показателя преломления среды. Патент на изобретение RU 2685754 C1, 23.04.2019
2. Shukhin A.A., Keloth J., Hakuta K., Kalachev A.A. Heralded single-photon and correlated-photon-pair generation via spontaneous four-wave mixing in tapered optical fibers. *Phys. Rev. A* **101**, 053822(1-7) (2020)
3. Андрианов С.Н., Калачёв А.А., Кочнева Ю.Ю., Шиндяев О.П., Шкаликов А.В. Оптический микрофон на основе суженного волокна. *Известия РАН, сер. физ.* **84**, 1735–1738 (2020)

# Поиск новых материалов и физических принципов для гетерогенных вычислительных систем

Гетероструктура сверхпроводник-ферромагнетик-сверхпроводник, переключаемая между сверхпроводящим и нормальным состояниями при её перемагничивании магнитным полем

Подавляющее большинство современных электронных устройств, включая настольные, мобильные компьютеры и смартфоны, производятся с использованием КМОП (комплиментарная металл-оксид-полупроводник структура) технологии. Минимальный размер элементов микросхем, выпускаемых серийно, достиг 5 нм, что составляет немногим более десятка межатомных расстояний. Ясно, что размеры элементов микросхем и плотность их упаковки приближаются к физическому пределу. Для дальнейшего роста производительности вычислительных и коммуникационных систем необходимо найти альтернативу современным технологиям, что, впрочем, совсем не означает отказ от КМОП. С учётом того, что внедрение новых материалов или структур от НИР до массового производства занимает от 10 до 20 лет, на ближайшее десятилетие планируется поиск новых физических принципов функционирования активных элементов (сверхпроводящие гетероструктуры, оптические вентили и каналы передачи данных, ячейки памяти и узлы нейроморфных сетей на резисторах с памятью – мемрезисторах,

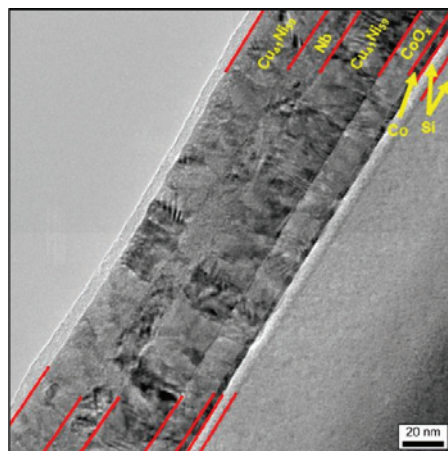


Рис. 1: Сечение гетероструктуры, полученное с использованием просвечивающей электронной микроскопии.

магниторезистивные ячейки памяти, элементы на спиновом эффекте Холла и др.), возможно не универсальных, но значительно превосходящих КМОП в области применения. И совсем не обязательно, чтобы была единая алгоритмическая основа работы всех этих модулей (ядер), например, общепринятая двоичная. Вычислительная система становится гетерогенной как в части «железа» (hardware), так и в части программирования всех уровней – «софта» (software). Тогда встаёт также непростая технологическая и

алгоритмическая задача объединения (упаковки) разнородных во всех отношениях ядер в единый функционал, значительно (на порядок и более) превышающий таковой, основанный на КМОП технологиях, и экономически целесообразный.

Для суперкомпьютерных вычислений масштаба эксафлоп/с (1018 оп/с) предложена сверхпроводящая элементная база, превосходящая КМОП элементную базу на один-два порядка по рабочей частоте и на 5–6 порядков по энергопотреблению на

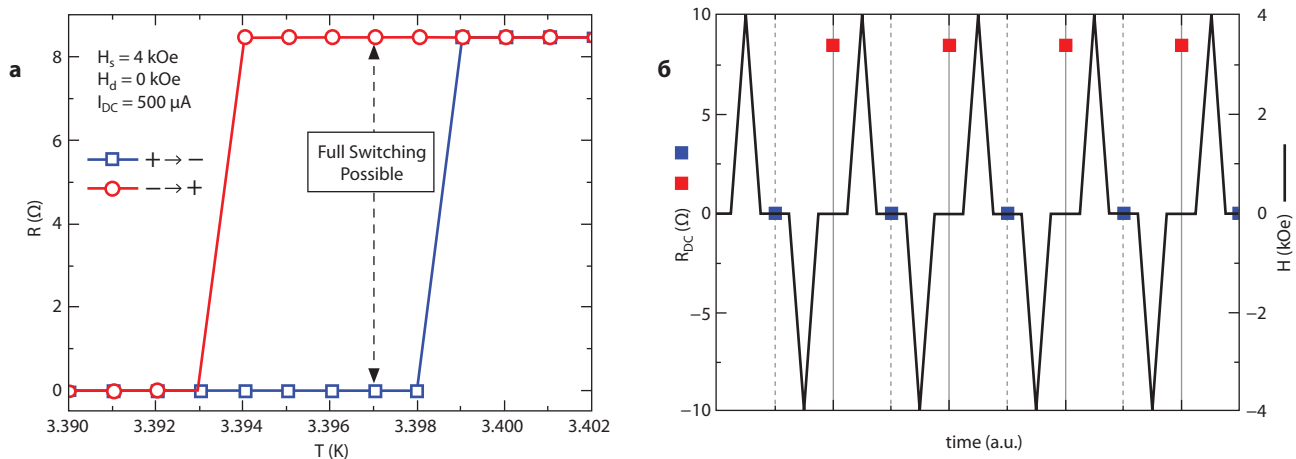


Рис. 2: а) Кривые сверхпроводящего перехода  $R(T)$ , измеренные в нулевом магнитном поле при уменьшении и увеличении магнитного поля (синие и красные линии, соответственно). Как указано, возможно полное переключение из сверхпроводящего состояния в нормальное. б) Демонстрация переключения между сверхпроводящим (красные символы) и нормальным (синие символы) состояниями при  $T = 3.397$  К, другие параметры – как указано на (а). Сплошные чёрные линии – циклограмма магнитного поля, прикладываемого для переключения.

операцию с одним битом [см., например, обзорные статьи: I. I. Soloviev и др. Beyond Moore's technologies: operation principles of a superconductor alternative. Beilstein J. Nanotechnol. 8, 2689–2710 (2017); V. V. Ryazanov et al. Magnetic Josephson junction technology for digital and memory applications. Phys. Procedia 36, 35–41 (2012)]. Тонкоплёночные гетероструктуры сверхпроводник/ферромагнетик (С/Ф) оказываются перспективными для применения как в цепях сверхпроводящей логики в качестве пассивных (бездиссипативных) и активных элементов, так и в составе ячеек памяти. Во многих случаях, для управления сверхпроводимостью в С/Ф гетероструктурах применяются спиновые клапаны – тонкоплёночные структуры, физические свойства которых зависят от взаимной ориентации магнитных моментов входящих в них ферромагнитных слоёв. Принцип работы спиновых клапанов основывается на идее контролировать эффекты фазовых состояний куперовских пар, ответственных за сверхпроводимость, и, таким образом, величину критического джозефсоновского тока, направление течения этого тока или температуру сверхпроводящего перехода  $T_c$ , манипулируя магнитными конфигурациями в клапане импульсами локального магнитного поля или электрического тока.

Полное переключение С/Ф/Ф гетероструктуры между сверхпроводящим и нормальным металлическим состояниями слабым магнитным полем было получено в группе Гарифуллина И.А., КФТИ КазНЦ РАН [Р. V. Leksin et al. Appl. Phys. Lett. 97, 102505 (2010); А. А. Kamashev et al. Phys. Rev. B 100, 134511 (2019) и ссылки в последней]. Экспериментальное переключение между сверхпроводящим и нормальным состояниями в гетероструктуре Ф/С/Ф было получено в работе [1].

Гетероструктура Ф/С/Ф была синтезирована последовательным нанесением слоёв в высоком вакууме магнетронным распылением (см. рис. 1 и его разметку). Очень тонкий слой металлического кобальта (толщиной около 4 нм) сразу после технологического слоя аморфного кремния на подложке из монокристаллического кремния необходим для наведения нескомпенсированной намагниченности в прилегающем к нему слое антиферромагнитного оксида кобальта ( $\text{CoO}_2$ ). Только применением такого вспомогательного слоя сильного ферромагнетика удастся получить обменное смещение на следующем за  $\text{CoO}_2$  слое ферромагнитного сплава  $\text{Cu}_{0.41}\text{Ni}_{0.59}$  [2]. Измерения зависимости сопротивления от температуры (рис. 2а) показали, что температура сверхпроводящего перехода зависит от предыстории намагничивания

образца. После намагничивания в положительном направлении (совпадающим с направлением внешнего магнитного поля при замораживании образца)  $T_c$  оказывается ниже (красная линия), чем после намагничивания в отрицательном направлении поля. Причём достигнутое перемагничиванием состояние сохраняется после возвращения величины магнитного поля к нулю. Таким образом, импульсами магнитного поля разной полярности (как показано на рис. 2б) можно переводить образец из сверхпроводящего состояния в нормальное и обратно, и каждое из этих двух состояний сохраняется сколь угодно долго в нулевом магнитном поле [1]. Синтезированная гетероструктура может использоваться для программируемого задания тока смещения в сверхпроводящих цепях.

1. Lenk D., Morari R., Zdravkov V.I., Ullrich A., Khaydukov Yu., Obermeier G., Müller C., Sidorenko A.S., Krug von Nidda H.-A., Horn S., Tagirov L.R., Tiedeck R. Full switching FSF-type Superconducting spin-triplet MRAM-element. Phys. Rev. B 96, 184521(18) (2017)
2. Sidorenko A.S., Lenk D., Zdravkov V.I., Morari R., Ullrich A., Müller C., Krug von Nidda H.-A., Horn S., Tagirov L.R., Tiedeck R. Cobalt/cobaltoxide exchange bias system for diluted ferromagnetic alloy films in superconducting spin-valves. / in "Nanostructures and thin films for multifunctional applications. Technology, properties and devices" Springer Series in NanoScience and Technology (Tiginyanu I., Topala P., Ursaki V., eds.) ch.9, p.301–313, 2016.



# Импульсная ионная обработка формирует новые свойства слоёв германия

## Импульсно-ионная модификация слоёв германия для микро- и оптоэлектроники

Сильно легированные слои германия могут быть использованы для создания быстродействующих полевых КМОП транзисторов, инфракрасных фотоприёмников, светодиодов, лазеров, а также сенсоров химических веществ. Нами впервые созданы монокристаллические сильно легированные слои германия с использованием непрерывной ионной имплантации и последующей импульсной ионной обработки мощными ионными пучками (протоны, углерод) наносекундной длительности. Ионная имплантация позволяет вводить

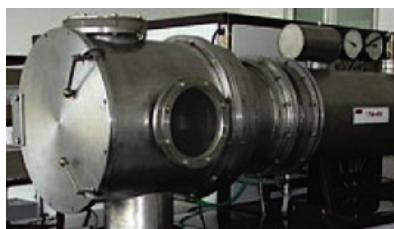


Рис. 1: Импульсный ионный ускоритель ТЕМП.

высокое содержание примеси, однако приводит к аморфизации имплантированных слоёв. Поэтому для их кристаллизации была использована последующая обработка мощными ионными пучками на импульсном ионном ускорителе ТЕМП (рис. 1).

За счёт равномерного по глубине выделения энергии мощных ионных пучков происходит глубокое плавление и быстрая ориентированная кристаллизация от монокристаллической подложки. Показано,

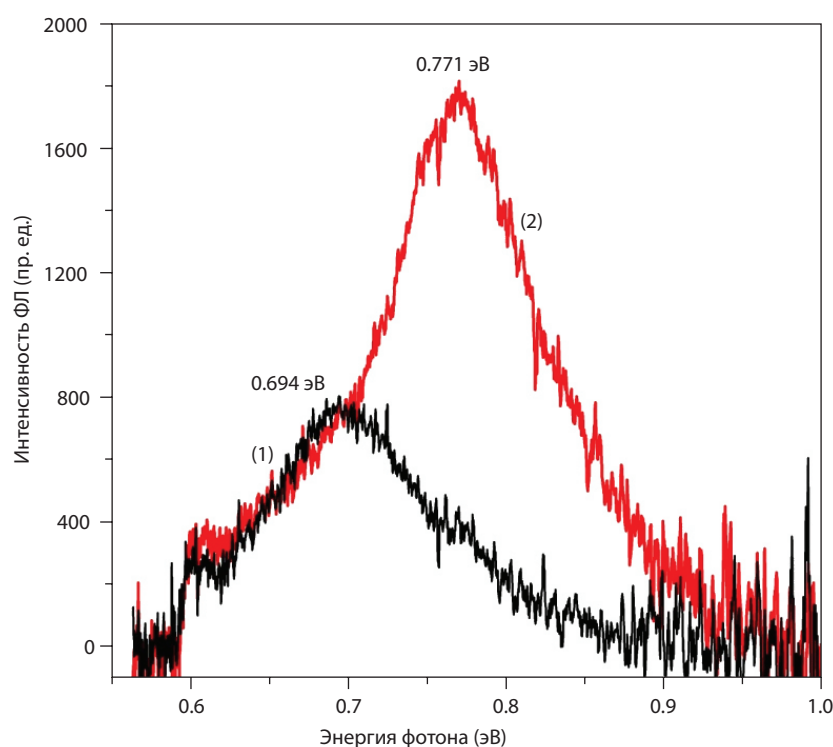


Рис. 2: Спектры фотолюминесценции ( $T = 300$  К) германия после имплантации ионами сурьмы ( $E = 80$  кэВ,  $\Phi = 10^{16}$  см $^{-2}$ ) (кривая 1) и последующего импульсного ионного отжига ( $C^+$ ,  $H^+$ ,  $E = 300$  кэВ,  $W = 0.5$  Дж/см $^2$ ) (кривая 2).

что импульсная ионная обработка германия, имплантированного донорной примесью (сурьма), приводит к созданию глубоких (до 0.4 мкм) сильно легированных слоёв германия с высокой электропроводностью и концентрацией электронов проводимости до  $3 \cdot 10^{20}$  см $^{-3}$ , что более чем на порядок величины превышает равновесный предел растворимости сурьмы в германии.

Исследование излучательных свойств сильно легированных слоёв

германия при комнатной температуре показало (рис. 2) возникновение прямозонной люминесценции с максимумом при 0.77 эВ (1.6 мкм). Данная длина волны соответствует «окну прозрачности» элементов микроэлектроники и оптоволоконных линий связи.

1. Баталов Р.И., Баязитов Р.М., Новиков Г.А., Шустов В.А., Лядов Н.М., Новиков А.В., Бушуйкин П.А., Байдакова Н.А., Дроздов М.Н., Юнин П.А. Импульсный ионный отжиг германия, имплантированного ионами сурьмы. *Автометрия* 55, №5, 5–13 (2019)

# Измерение субангстремных смещений

## Метод измерения субангстремных смещений тонких плёнок с помощью гамма-излучения

Для измерения малых смещений небольших объектов обычно используется излучение оптического диапазона частот. Дифракционный предел ограничивает точность измерения смещений вдоль направления распространения излучения половиной его длины волны  $\lambda/2$ . В атомно-силовой микроскопии, благодаря скользящей геометрии отражения лазерного луча от площадки консоли со сканирующей иглой, пространственное разрешение увеличивается в 1000 раз, что позволяет измерять смещения порядка нескольких сотен пикометров. Между тем, если использовать гамма-излучение, например, 14.4 кэВ фотоны, которые излучают радиоактивные ядра  $^{57}\text{Co}$ , то даже при нормальном падении луча точность пространственного разрешения можно довести до  $\lambda/2 = 43$  пм. Нами предложен метод, который позволяет измерять смещения в продольном направлении с точностью, в 20 раз превышающей дифракционный предел  $\lambda/2$ .

В основе метода лежат особые закономерности спектра излучения, прошедшего через колеблющийся образец, которые позволяют достаточно точно определять амплитуду смещения из соотношения компонент мёссбауэровского спектра.

Мы провели комплекс исследований с использованием свинцовой маски с отверстием диаметром 0.6 мм. Был сконструирован специальный держатель с микрометрическим винтом, который позволял изменять положение отверстия вдоль поверх-

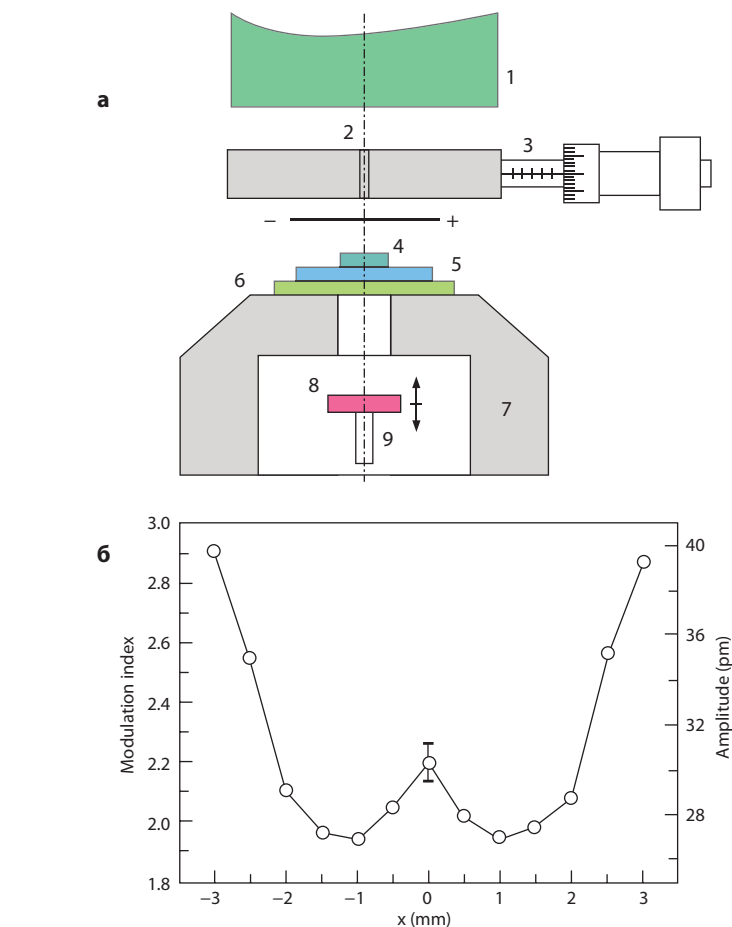


Рис. 1: а) Схема конструкции узла смещений. 1 – детектор; 2 – диафрагма в свинцовой пластине; 3 – микрометрический узел; 4 – образец; 5 – пьезопреобразователь; 6 – держатель из оргстекла; 7 – свинцовый коллиматор; 8 – мёссбауэровский источник; 9 – шток мёссбауэровского модулятора. б) Зависимость значения индекса модуляции  $m_c = 2r_c/\lambda$  от положения отверстия свинцовой маски, которая перемещалась вдоль поверхности нержавеющей фольги. Значение  $x = 0$  соответствует её центру. На правой оси указаны значения смещений соответствующего участка фольги в пикометрах.

ности поглотителя с шагом порядка 10 мкм (рис. 1а). Сканирование поверхности поглотителя позволило построить карту смещений участков нержавеющей фольги, которая испытывала колебания с частотой 10.2

МГц (рис. 1б). Точность измерений составляет сотые доли ангстрема.

1. Шахмуратов Р.Н., Вагизов Ф.Г. Мёссбауэровский метод измерения субангстремных смещений тонких плёнок. Письма в ЖЭТФ **108**, 785–789 (2018)

# Многофункциональные люминесцентные материалы с управляемыми фотофизическими свойствами

Создание оптически-прозрачных плёночных люминесцентных материалов молекулярной фотоники, способных выполнять одновременно несколько функций

Явление люминесценции широко используется в современной технике: от ламп для освещения помещений до дозиметров УФ-излучения. Но потенциал развития ещё далеко не исчерпан, и создание новых люминесцентных материалов находится в центре внимания множества исследовательских групп. Одним из бурно развивающихся направлений современной молекулярной фотоники является создание прозрачных люминесцентных материалов, способных одновременно выполнять несколько функций, например, служить молекулярным фильтром УФ-излучения, эффективным преобразователем световой энергии, рабочим элементом монохроматических источников света, люминесцентных термометров, сенсоров кислорода и дозиметров УФ-излучения.

Среди наиболее перспективных кандидатов для создания подобных материалов выступают бета-дикетонатные комплексы лантаноидов(III). Они характеризуются яркой монохроматической люминесценцией (в ряде случаев чувствительной к температуре и кислороду) со временем затухания от десятков до сотен микросекунд, довольно просто синтезируются, хорошо растворяются в органических растворителях и могут допироваться

в различные твёрдые матрицы. Однако их широкому коммерческому распространению мешает низкая устойчивость к УФ-излучению (особенно в присутствии атмосферного кислорода), слабая поглощательная способность в видимой области (вынуждающая возбуждать люминесценцию дорогими источниками УФ-света) и склонность к кристаллизации (затрудняющей создание материалов высокого оптического качества). Имеющиеся в литературе подходы для решения отмеченных недостатков по целому ряду причин сопряжены с различными технологическими трудностями и поэтому

не привели к существенному улучшению ситуации с точки зрения производства оптически-прозрачных плёночных материалов, сочетающих интенсивную люминесценцию, высокую фотостабильность и высокую поглощательную способность в видимой области.

Нами разработан простой в реализации подход к решению указанной проблемы бета-дикетонатных комплексов лантаноидов(III). Он основан на синтезе комплексов с анизометричной геометрией, характерная особенность которых состоит в наличии помимо традиционно используемых ароматических колец

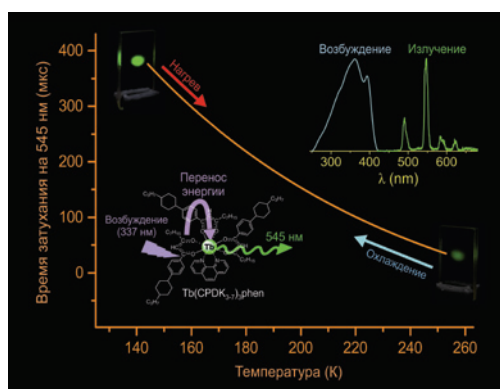


Рис. 1: Многоцветный высокоэффективный люминесцентный датчик температуры на основе застеклованной плёнки бета-дикетонатного комплекса тербия(III) для продолжительного мониторинга в области 143–253 К.

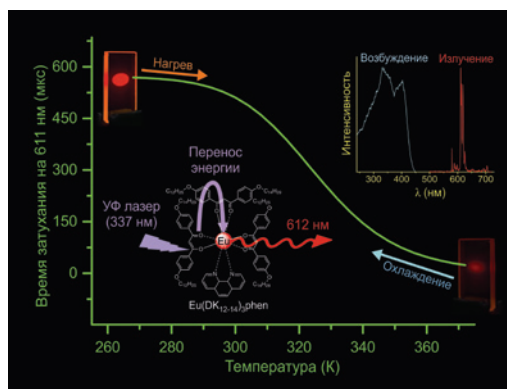


Рис. 2: Застеклованная плёнка бета-дикетонатного комплекса европия(III) как многоразовый и высокочувствительный люминесцентный датчик температуры для продолжительного мониторинга в области 270–370 К.

также циклогексановых колец и длинных углеводородных цепочек. Отдельные представители этого класса соединений обладают жидкокристаллическими свойствами. Высокие фото- и термостабильность, неподверженность кристаллизации и низкие температуры размягчения порошков анизометричных комплексов позволяют создавать из их расплавов люминесцентные материалы в виде застеклованных плёнок, закреплённых между различными подложками (например, кварцевыми пластинами), которые служат надёжной защитой от атмосферного кислорода. Плёнки сочетают интенсивную монохроматическую люминесценцию с высоким оптическим качеством и полную устойчивость к УФ-излучению. Одной из ярких особенностей плёнок является способность изменять в зависимости от локальной структуры при приготовления (путём варьирования толщины и скорости охлаждения расплавов порошков комплексов), можно создавать образцы, эффективно поглощающие свет в области 280–425 нм. Другая отличительная особенность плёнок (с заданной локальной структурой) – способность изменять интенсивность люминесценции под действием интенсивного УФ-лазера и определённого режима термической обработки. Данные свойства плёнок

открывают многообещающие перспективы по созданию принципиально новых фотостабильных люминесцентных материалов и устройств молекулярной фотоники с заданными полифункциональными свойствами, которыми можно управлять в процессе эксплуатации.

На основе данных плёнок нами создан ряд люминесцентных материалов для выполнения нескольких функций. Например, из порошка анизометричного бета-дикетонатного комплекса тербия(III) получен термочувствительный люминесцентный материал в виде плёнки толщиной 20 мкм, закреплённой между двумя кварцевыми пластинами. Материал эффективно поглощает световую энергию в диапазоне 280–405 нм и конвертирует её в монохроматическую зелёную люминесценцию ионов Tb<sup>3+</sup> с максимумом на 545 нм (рис. 1). Наряду с этим, материал обратимо изменяет время затухания люминесценции ионов Tb(III) в диапазоне температур 143–253 К, характеризуется высокой температурной чувствительностью -3.3 мкс/К, полной устойчивостью к УФ-излучению, высоким оптическим качеством и на сегодняшний день не имеет ближайших аналогов.

Создан материал с термочувствительной люминесценцией ионов Eu(III) с максимумом на 611 нм, эффективно возбуждаемой светом в области 280–425 нм. Он также представляет собой застеклованную между кварцевыми пластинами плёнку толщиной

20 мкм, приготовленную из расплава аморфного порошка анизометричного бета-дикетонатного комплекса европия(III). Плёнка не разрушается под действием УФ-излучения, не чувствительна к кислороду, характеризуется яркой люминесценцией ионов Eu<sup>3+</sup> (внутренняя квантовая эффективность 42% при 299 К), характеризуется высоким оптическим качеством, способна обратимо изменять время затухания люминесценции ионов Eu(III) в диапазоне температур 270–370 К и обладает рекордной (среди ближайших плёночных аналогов, эффективно поглощающих свет в фиолетовом диапазоне видимого спектра) температурной чувствительностью времени затухания люминесценции -5.4 мкс/К (рис. 2). Данные свойства плёнки позволяют создавать на её основе фотостабильные материалы молекулярной фотоники, которые могут одновременно выполнять несколько функций: (i) служить эффективными светотрансформирующими материалами для преобразования световой энергии в диапазоне 280–425 нм в интенсивную монохроматическую люминесценцию ионов Eu<sup>3+</sup>, (ii) работать как широкополосные молекулярные УФ-фильтры в области 200–405 нм, (iii) выступать в качестве многоразовых рабочих элементов высокочувствительных люминесцентных термометров для продолжительной работы в области температур 270–370 К.

1. Lapaev D.V., Nikiforov V.G., Lobkov V.S., Knyazev A.A., Galyametdinov Yu.G. A photostable vitrified film based on a terbium(III)  $\beta$ -diketonate complex as a sensing element for reusable luminescent thermometers. *J. Mater. Chem. C* **6**, 9475–9481 (2018)
2. Lapaev D.V., Nikiforov V.G., Lobkov V.S., Knyazev A.A., Galyametdinov Yu.G. Reusable temperature-sensitive luminescent material based on vitrified film of europium(III)  $\beta$ -diketonate complex. *Opt. Mater.* **75**, 787–795 (2018)
3. Lapaev D.V., Nikiforov V.G., Lobkov V.S., Knyazev A.A., Galyametdinov Yu.G. A new strategy to design photostable luminescent materials based on lanthanide(III)  $\beta$ -diketonate complexes for advanced photonic applications. *Opt. Spectrosc.* **126**, 34–40 (2019)
4. Lapaev D.V., Nikiforov V.G., Lobkov V.S., Knyazev A.A., Ziyatdinova R.M., Galyametdinov Yu.G. A vitrified film of an anisometric europium(III)  $\beta$ -diketonate complex with a low melting point as a reusable luminescent temperature probe with excellent sensitivity in the range of 270–370 K. *J. Mater. Chem. C* **6**, 6273–6280 (2020)



# Медицинские магнитно-резонансные томографы

## Специализированный томограф с индукцией магнитного поля 0.4 Тл – успешная разработка и первые применения

Важнейшей задачей современного здравоохранения является ранняя диагностика различных заболеваний. При решении этой проблемы особое место отводится лучевым методам диагностики. Нами поставлена задача создать опытный образец специализированного томографа, не имеющего аналогов в мире, серийное производство которого в последующем позволит в значительной степени удовлетворить потребности страны в этой современной, информативной и безопасной диагностической технике.

Важную роль играют специализированные томографы для исследования суставов. Сегодня диагностика травматических повреждений коленного сустава часто ограничивается планарной рентгенографией, способной выявить лишь часть костных нарушений, встречающихся в 6–8% случаев. Большинство же повреждений внутренних структур сустава остается нераспознанным, что приводит к неадекватному лечению. Магнитно-резонансная томография признана «Золотым стандартом» для диагностики травматических повреждений коленного сустава и является наиболее эффективным методом их визуализации. Чувствительность и специфичность метода превышают 90–95%.

В настоящее время совместными усилиями ООО «Градиент МРТ» и КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН разработан специализированный магнитно-резонансный томограф для диагностики заболеваний и повреждений

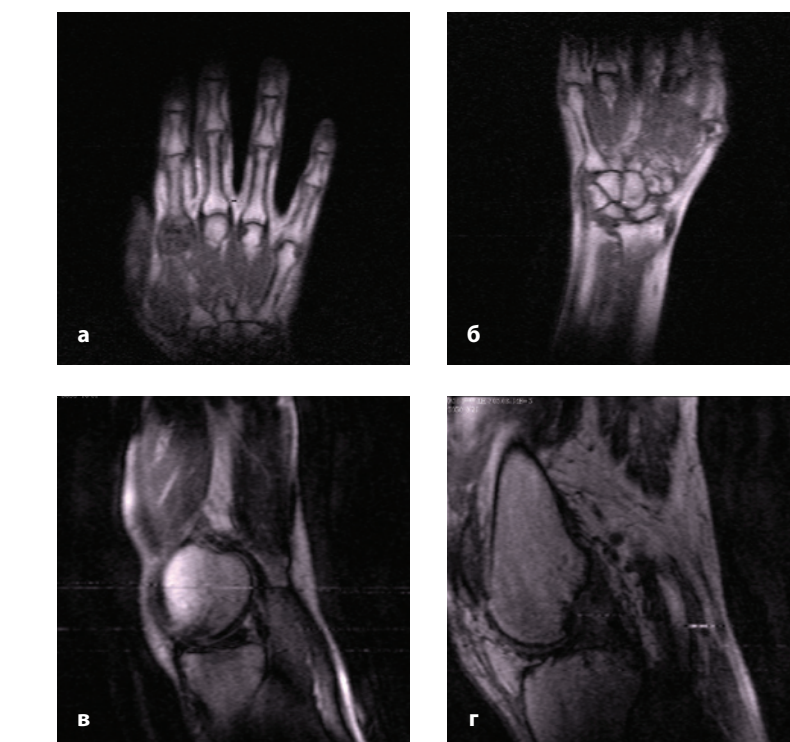


Рис. 1: T1-взвешенные изображения кисти (а), запястья (б), колена (в) пациента и изображение колена, полученное с помощью программы протонной плотности с подавлением сигнала жира (г).

суставов. Сейчас идёт доработка отдельных блоков и программного обеспечения.

Магнитная система выполнена на постоянном магните с индукцией магнитного поля 0,4 Тл и зазором около 200 мм.

Для проверки диагностических возможностей прибора совместно с коллективом врачей КГМА и КГМУ были проведены тестовые измерения коленного сустава и суставов кисти. На рисунке показаны пробные T1-взвешенные изображения конечностей

пациента, полученные с помощью нашего аппарата.

1. Баязитов А.А., Фаттахов Я.В., Фахрутдинов А.Р., Шагалов В.А. Приёмный датчик для специализированного малогабаритного магнитно-резонансного томографа. ПТЭ, №6, 89–94 (2020)
2. Хабилов Р.Ш. Разработка облачной базы данных для хранения и обработки медицинских изображений. Медицинская техника №2, 41–44 (2020)
3. Баязитов А.А., Хундиряков В.Е., Абдулганиева Д.И., Фаттахов Я.В., Фахрутдинов А.Р., Шагалов В.А. Приёмный датчик для магнитно-резонансной томографии кисти руки. Патент RU 2 738 132 С1. Заявка: 2020110733 от 12.03.2020. Опубликовано: 08.12.2020, Бюл. №34. Патентообладатели: ФГБУН ФИЦ КазНЦ РАН и ФГБОУВО КГМУ МЗ РФ.

# Содержание

- 1 Предисловие

## **Электронный парамагнитный резонанс**

- 2 Принципы спинового обмена
- 4 Квантовые биения и относительность времени в динамике открытых квантовых систем

## **Элементная база будущего**

- 5 Шаг к созданию сверхпроводящего ключа для компьютеров будущего
- 7 Поиск систем для квантовых спиновых технологий
- 9 Наноструктурированные композиты для магнитной записи информации
- 10 Стрейнтронные ячейки памяти

## **Квантовая память**

- 11 Квантовая интерференция в моноизотопных примесных кристаллах
- 13 Источники квантовых состояний света на основе фотонных молекул
- 15 Поиск и исследование материалов для реализации квантовой памяти

## **Функциональные молекулярные системы**

- 16 Поиск эффективных и безопасных фотосенсибилизаторов
- 17 Поиск новых наноматериалов с управляемыми свойствами
- 18 Наноструктуры на основе короткоцепных олигопептидов

## **Новые материалы**

- 19 Уникальные нанопористые структуры
- 20 Электропроводящий полимерный композиционный материал с наноглеродным наполнителем
- 21 Магнитоупругий эффект в планарных микрочастицах
- 22 Низкоразмерные магнетики
- 23 На пути управления двумерной проводимостью и сверхпроводимостью
- 25 Литий-ионные аккумуляторы как перспективные системы накопления и хранения энергии
- 27 Необычные наноструктурированные ферромагнитные плёнки
- 28 Оптические нановолокна
- 29 Поиск новых материалов и физических принципов для гетерогенных вычислительных систем
- 31 Импульсная ионная обработка формирует новые свойства слоёв германия

## **Новые методы и устройства**

- 32 Измерение субангстремных смещений
- 33 Многофункциональные люминесцентные материалы с управляемыми фотофизическими свойствами

## **Наука практике**

- 35 Медицинские магнитно-резонансные томографы

© Казанский физико-технический институт им. Е. К. Завойского ФИЦ КазНЦ РАН, 2021

---

Под общей редакцией К. М. Салихова. Составитель В. К. Воронкова.  
Ответственный редактор С. М. Ахмин, научный редактор Л. В. Мосина, технический редактор А. П. Чукланов.  
Издательство ФИЦ КазНЦ РАН. Отпечатано с оригиналов заказчика в типографии «Линк».

Казанский физико-технический институт им. Е. К. Завойского – обособленное структурное подразделение  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр  
«Казанский научный центр Российской академии наук»

420029, Россия, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Сибирский тракт, 10/7  
тел.: +7 (843) 272-05-03, факс: +7 (843) 272-50-75, 273-22 53, e-mail: [phys-tech@kfti.knc.ru](mailto:phys-tech@kfti.knc.ru)

[www.kfti.knc.ru](http://www.kfti.knc.ru)