

# Важнейшие результаты КФТИ за 2024 г.

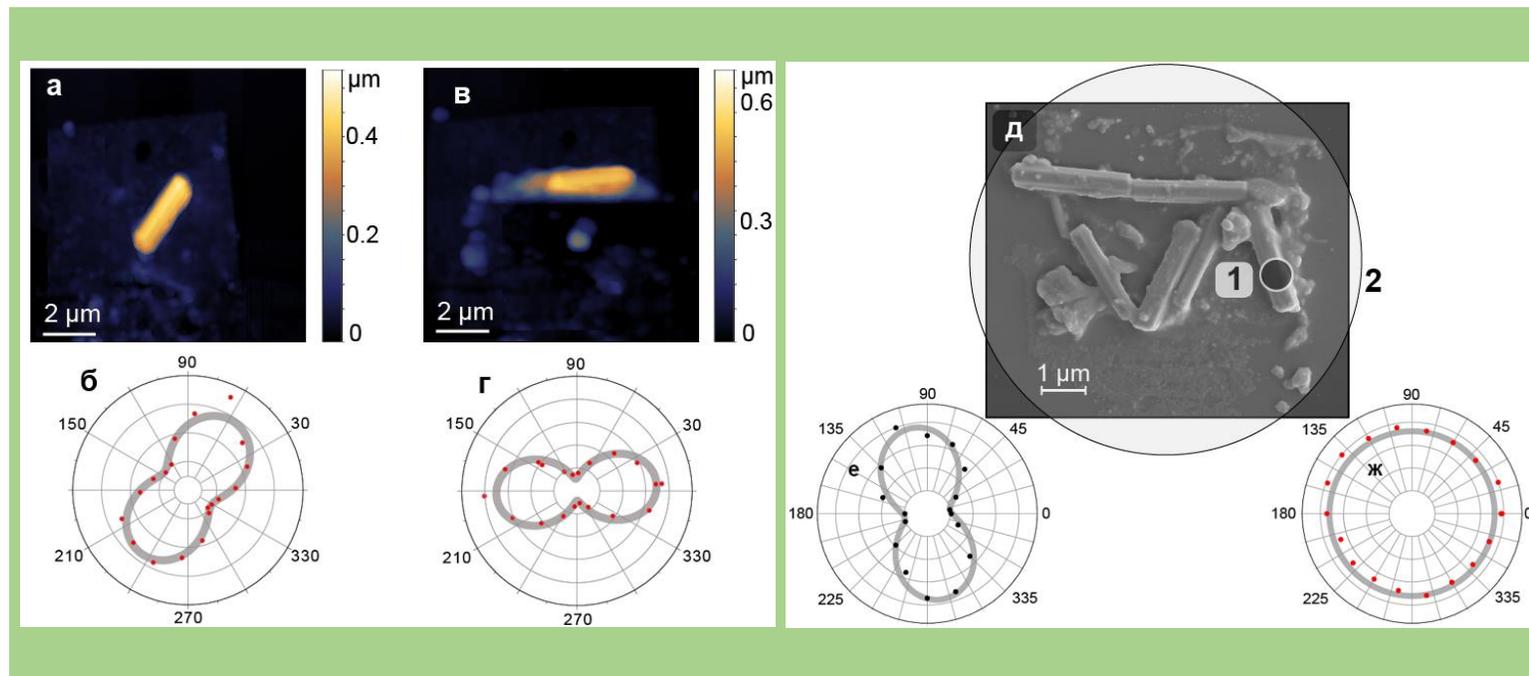
1. Экспериментальная регистрация поляризации апконверсионного люминесцентного излучения одиночной  $\text{NaYbF}_4:\text{Er}$  микрочастицы.
2. Экспериментальное подтверждение новой парадигмы спинового обмена в разбавленных растворах парамагнитных частиц.
3. Необычное ферромагнитное поведение эпитаксиальных пленок  $\text{SnO}_2$  с имплантированной примесью кобальта
4. Технология повышения эффективности сверхпроводящего спинового клапана.

Казань, 12.11.2024 г.

# Экспериментально зарегистрирована поляризация апконверсионного люминесцентного излучения одиночной $\text{NaYbF}_4:\text{Er}$ микрочастицы

А. В. Леонтьев, Л. А. Нуртдинова, Е. О. Митюшкин, А. Г. Шмелев, Д. К. Жарков, Н. М. Лядов, А.С. Морозова, А. П. Чукланов, Н. И. Нургазизов, В. Г. Никифоров

Методом гидротермального синтеза синтезированы микрочастицы  $\text{NaYbF}_4:\text{Er}$ . Одиночные микрочастицы были изолированы на поверхности стеклянной подложки методами сканирующей зондовой микроскопии, что позволило регистрировать апконверсионный люминесцентный отклик от одной  $\text{NaYbF}_4:\text{Er}$  микрочастицы с помощью конфокального оптического микроскопа. Установлено, что эмиссия ионов  $\text{Er}^{3+}$  в спектральной области 655–667 нм обладает заметной поляризацией, обусловленной пространственной анизотропией микрочастицы. Высокая температурная чувствительность спектров люминесценции микрочастицы позволяет использовать ее в качестве температурного сенсора с высоким пространственным разрешением. Наблюдаемая поляризация может использоваться для идентификации одиночной микрочастицы в ансамбле.



АСМ изображения  $\text{NaYbF}_4:\text{Er}$  микрочастицы: до (а) и после поворота на  $52^\circ$  (б), и соответствующие им зависимости соотношений интенсивности люминесценции на волнах 655 и 667 нм ( $R = I_{655}/I_{667}$ ) от угла анализатора (б, г). СЭМ изображение ансамбля  $\text{NaYbF}_4:\text{Er}$  микрочастиц (д) и угловые зависимости  $R$  при возбуждении лазером, области 1 (е) диаметром 0.7 мкм (1 частица) и области 2 (ж) диаметром 9.3 мкм (все частицы).

A.V. Leontyev, L.A. Nurtdinova, E.O. Mityushkin, et.al. / Polarized luminescence in single upconversion  $\text{NaYbF}_4:\text{Er}$  rods // *New J. Chem.*, 48, 14029 (2024) (WoS Q2).

A.P. Chuklanov, A.S. Morozova, N.I. Nurgazizov, et.al. / The Precision Movement of Upconversion Nanoparticles on a Surface by Using Scanning Probe Microscopy // *Technical Physics*, 69, 1164 (2024) (WoS Q4).

# Экспериментальное подтверждение новой парадигмы спинового обмена в разбавленных растворах парамагнитных частиц

М.М. Бакиров, Р.Б. Зарипов, И.Т. Хайрутдинов, К.М. Салихов

Результаты наших экспериментальных исследований зависимости формы спектров ЭПР растворов нитроксильных радикалов от концентрации радикалов, температуры и мощности микроволнового поля подтвердили принципиальные теоретические предсказания новой парадигмы спинового обмена, предложенной недавно К.М. Салиховым:

Для радикалов 14N Tempol в условиях обменного сужения спектра, интегральная интенсивность спектра сосредоточена в узкой центральной ( $m=0$ ) СТС азотной компоненте (рис.1). А две боковые ( $m=\pm 1$ ) СТС компоненты имеют малую интегральную интенсивность, и фаза этих сигналов соответствует излучению!

Для радикалов 15N Tempol в условиях сравнительно медленного спинового обмена продемонстрирован эффект отрицательной интерференции вкладов изотропного обменного взаимодействия при случайных бимолекулярных столкновениях радикалов и анизотропного диполь-дипольного спин-спинового взаимодействий в перенос спиновой когерентности спину выделенного радикала от партнера по взаимодействию. При заданной концентрации радикалов суммарный вклад этих взаимодействий в перенос спиновой когерентности обращается в нуль, как показано на рис.2.

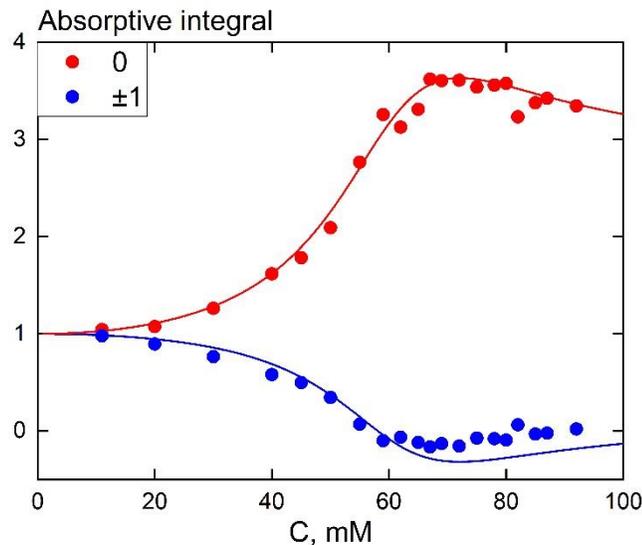


Рис.1. Рассчитанные (сплошные) и измеренные (кружки) интегральные (дважды интегрированные) интенсивности азотных СТС компонент спектра ЭПР:  $m=0$  (красный цвет),  $m=\pm 1$  (синий цвет)

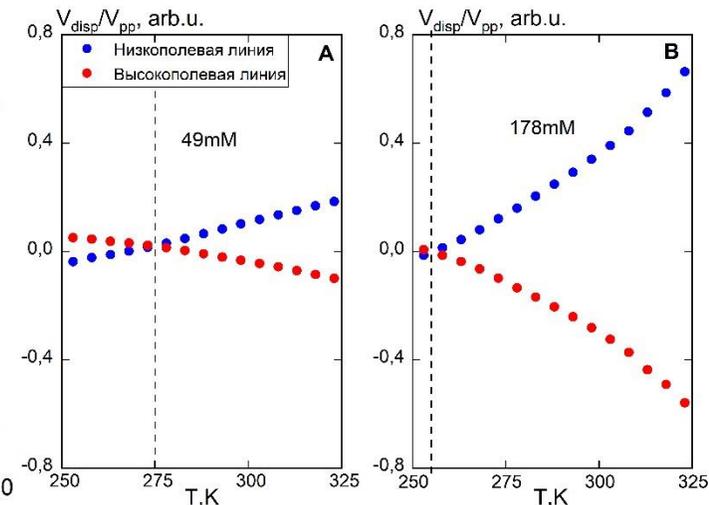


Рис.2. Экспериментальное подтверждение того, что при заданной концентрации радикалов 15N Tempol при некоторой температуре раствора перенос спиновой когерентности обращается в нуль

# Необычное ферромагнитное поведение эпитаксиальных пленок SnO<sub>2</sub> с имплантированной примесью кобальта

Р.И. Хайбуллин, В.В. Базаров, Е.М. Бегишев, В.Ф. Валеев, И.Р. Вахитов, А.И. Гумаров, А.Л. Зиннатулин, В.И. Нуждин, А.Г. Киямов, Н.М. Лядов, А.А. Суханов, И.А. Файзрахманов

С целью получения магнитного полупроводника на основе диоксида олова (SnO<sub>2</sub>) для спинтроники впервые проведены эксперименты по имплантации ионов Co<sup>+</sup> с высокими дозами в тонкие эпитаксиальные пленки SnO<sub>2</sub>, выращенные на корундовой подложке (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Высокодозная имплантация кобальта вызывает значительные изменения в микроструктуре пленок SnO<sub>2</sub> (формированию наночастиц и твердого раствора примеси кобальта, *рис. 1 a,b*) и приводит к явлению ферромагнетизма с температурой Кюри выше комнатной.

Наблюдаемый ферромагнетизм проявляет ряд особенностей:

1) необычно высокие для системы SnO<sub>2</sub>:Co значения коэрцитивного поля; 2) очень слабую магнитную анизотропию формы не типичную для тонких магнитных пленок; 3) сильное химическое воздействие этанола на величину магнетизма; 4) спад намагниченности и интенсивности сигналов ферромагнитного резонанса (ФМР) с понижением температуры измерения (*рис. 1 c,d*), что необычно для явления ферромагнетизма в целом.

*Microstructure and Unusual Ferromagnetism of Epitaxial SnO<sub>2</sub> Films Heavily Implanted with Co Ions / R.I. Khaibullin, A.I. Gumarov, I.R. Vakhitov, A.A. Sukhanov, N.M. Lyadov, A.G. Kiyamov, D.M. Kuzina, V.V. Bazarov, A.L. Zinnatullin // Condensed Matter. – 2024. – Vol. 9, Iss. 2. – Art. 27 (15 pages). (WoS Q3)*

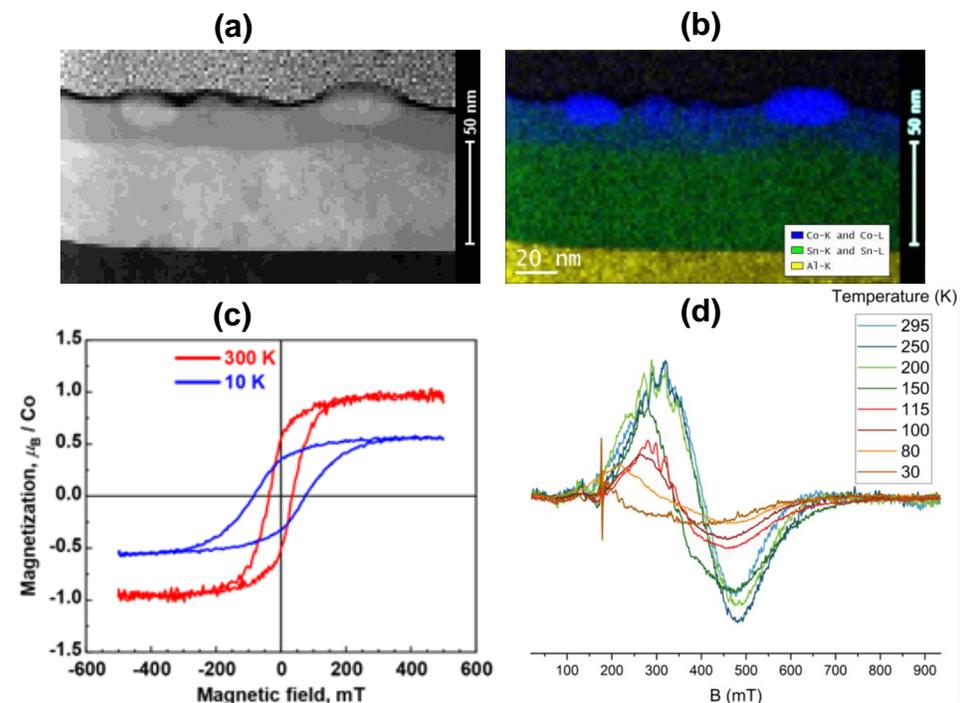


Рисунок 1. Микроструктура и магнитные свойства пленок SnO<sub>2</sub> с имплантированной примесью кобальта: (a) - микроскопия поперечного среза; (b) - распределение химических элементов; (c) - спад намагниченности и (d) - интенсивности сигнала ФМР с понижением температуры измерения.

# Технология повышения эффективности сверхпроводящего спинового клапана

А. А. Камашев, Н. Н. Гарифьянов, А. А. Валидов, В. Е. Катаев, А. С. Осин, Я. В. Фоминов, И. А. Гарифуллин

Авторами предложена новая конструкция структуры сверхпроводящего спинового клапана (ССК)  $\Phi 1/\Phi 2/C$ , показывающая рекордную эффективность ССК на сегодняшний день. В качестве сверхпроводящего слоя в структурах ССК использовался свинец, а в качестве материала для ферромагнитных слоёв использовался сплав Гейслера (НА)  $\text{Co}_2\text{Cr}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Al}_y$ .

Магнитные свойства данного материала зависят от температуры подложки, на которую он наносится. В исследованных структурах ССК сплав Гейслера использовался как в качестве материала для  $\Phi 1$ -слоя ( $\text{НА}^{\text{hot}}$ ), так и в качестве материала для  $\Phi 2$ -слоя ( $\text{НА}^{\text{RT}}$ ).

В приготовленных структурах ССК удалось пронаблюдать гигантскую величину триплетного эффекта ССК более чем 1 К с рекордной шириной рабочей температурной зоны 0.6 К (**рекордная эффективность**).

A.A. Kamashev, N.N. Garif'yanov, A.A. Validov, V. Kataev, A.S. Osin, Ya.V. Fominov, I.A. Garifullin, *Expanding the operational temperature window of a superconducting spin valve*, *Physical Review B* 109, 144517, 2024, DOI: 10.1103/PhysRevB.109.144517. (WoS Q2)

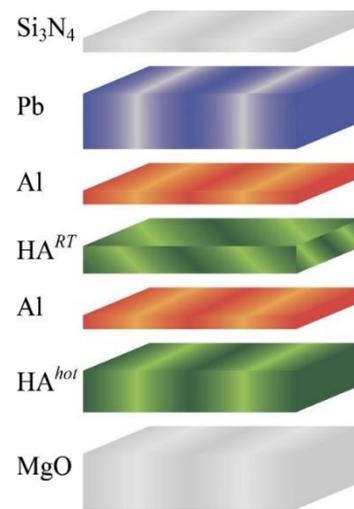


Рис. 1. Структура приготовленных образцов серии  $\text{НА}^{\text{hot}}(20 \text{ нм})/\text{Al}(4 \text{ нм})/\text{НА}^{\text{RT}}(d_{\text{HA}})/\text{Al}(1.2 \text{ нм})/\text{Pb}(60 \text{ нм})/\text{Si}_3\text{N}_4(85 \text{ нм})$  с варьируемой толщиной  $\text{НА}^{\text{RT}}$ -слоя в пределах от 1 до 5 нм.

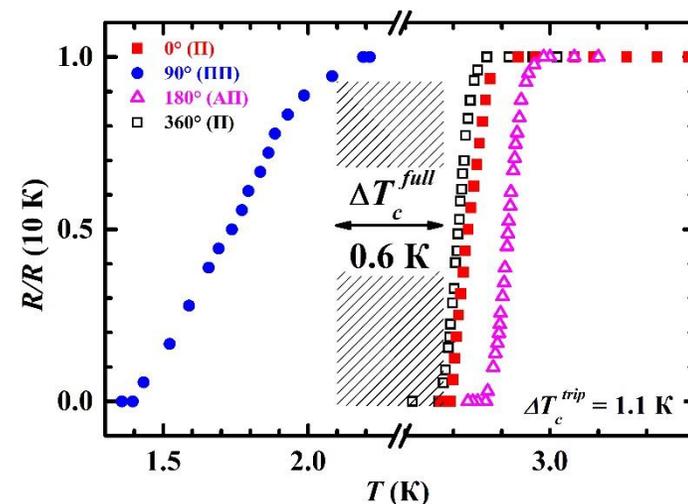


Рис. 2. Кривые сверхпроводящих переходов для П- ( $\alpha = 0^\circ, 360^\circ$ ), ПП- ( $\alpha = 90^\circ$ ) и АП-ориентации ( $\alpha = 180^\circ$ ) намагниченностей  $\Phi$ -слоев образца  $\text{НА}^{\text{hot}}(20 \text{ нм})/\text{Al}(4 \text{ нм})/\text{НА}^{\text{RT}}(5 \text{ нм})/\text{Al}(1.2 \text{ нм})/\text{Pb}(60 \text{ нм})$ . Заштрихованная область — рабочая температурная зона  $\Delta T_c^{\text{full}}$ .