

Основные достижения в области магнетизма 2025
(по материалам Сессии секции “Магнетизм”
4 и 5 декабря 2025 в ИФП РАН)
Направлено в Отделение Общей Физики РАН

Нарушение пространственно-временной симметрии в антиферромагнетике Cr_2O_3 на экситонах Френкеля в нелинейно-оптическом отклике

В. В. Павлов¹, М. А. Семина¹, J. Mund², П. А. Усачев¹,
Д. Р. Яковлев^{1,2}, Р. В. Писарев¹, М. Bayer²

¹Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

²Технический университет Дортмунда, Дортмунд, Германия

Установлен новый магнитоэлектрический механизм генерации второй оптической гармоники (ГВГ) на узких резонансных линиях – экситонах Френкеля в антиферромагнетике Cr_2O_3 . Это первое экспериментальное наблюдение одновременного нарушения симметрии обращения времени (R) и пространственной инверсии (I), приводящего к появлению нелинейной поляризации вида $\mathbf{P}^{2\omega} = \chi_e^{(3)}(\mathbf{L}) : \mathbf{E}^\omega \mathbf{E}^\omega \mathbf{B}$, где $\chi_e^{(3)}(\mathbf{L})$ – спин-зависимая нелинейная оптическая восприимчивость, \mathbf{L} – антиферромагнитный вектор, \mathbf{E}^ω – электрическое поле волны, \mathbf{B} – внешнее магнитное поле. Экспериментальное исследование ГВГ проводилось при низкой температуре 1.4 К в спектральном диапазоне экситонных резонансов ${}^4A_2 \rightarrow {}^2E$, ${}^4A_2 \rightarrow {}^2T_1$. Изучались спектральные зависимости интенсивности ГВГ при различных значениях внешнего магнитного поля (см. Рис. 1а и 1б), а также поляризационные (см. Рис. 1с) и полевые зависимости ГВГ [1]. Спектральные и поляризационные зависимости выявили существенную нелинейно-оптическую невязимость, т.е. разницу в интенсивностях сигналов ГВГ при изменении направления внешнего магнитного поля. Детальный теоретический анализ показал, что особенности спектров ГВГ, индуцированной магнитным полем, возникают из-за комбинации двух эффектов – давидовского расщепления, обусловленного электростатическим взаимодействием ионов Cr^{3+} , находящихся в разных магнитных подрешетках Cr_2O_3 , и зеемановского расщепления, обусловленного взаимодействием спиновых моментов ионов Cr^{3+} с магнитным полем. Экспериментальные результаты подтверждаются подробным теоретическим анализом, основанным на симметрии однофотонных и двухфотонных процессов во внешнем магнитном поле, что позволяет выявить ключевую роль экситонов и магнитоэлектрического взаимодействия в формировании невязимых нелинейно-оптических эффектов. Полученные экспериментальные и теоретические результаты определяют фундаментальные механизмы нелинейных взаимодействий света и вещества в магнитоэлектрических антиферромагнетиках и открывают путь для создания новых нелинейно-оптических устройств.

Результаты получены в рамках фонда РНФ 24-12-00348. Приоритетное направление научно-технологического развития – 4. Безопасность получения, хранения, передачи и обработки информации. Направление ПФНИ: 1.3.2.12.

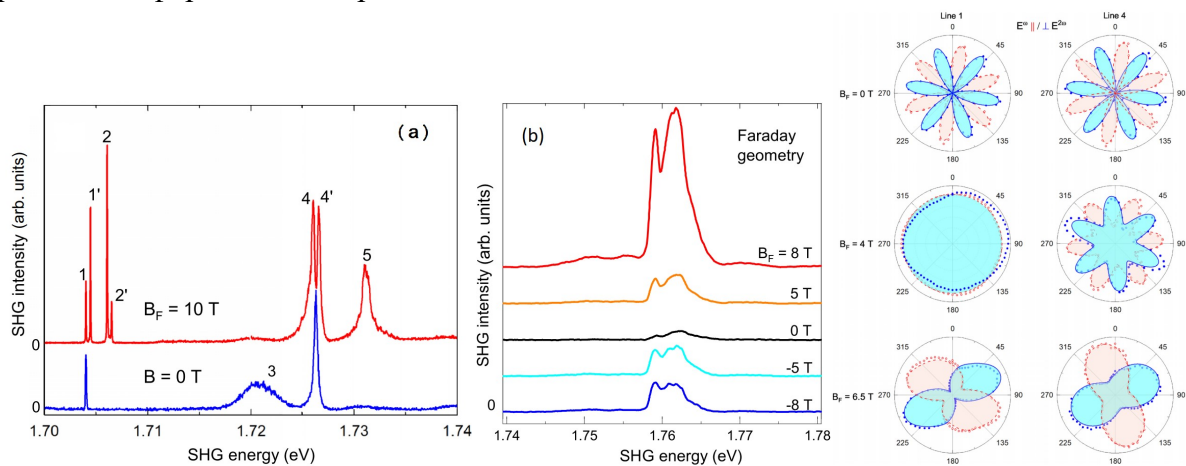


Рис. 1. Спектры ГВГ при $T = 1.4$ К для различных значений внешнего магнитного поля в области экситонов Френкеля ${}^4A_2 \rightarrow {}^2E$ (а) и ${}^4A_2 \rightarrow {}^2T_1$ (б), вращательная анизотропия ГВГ в геометрии Фарадея (экситоны 1 и 4).

- [1] V. V. Pavlov, M. A. Semina, J. Mund, P. A. Usachev, D. R. Yakovlev, R. V. Pisarev, M. Bayer, Time-space symmetry breaking on Frenkel excitons in the antiferromagnet Cr_2O_3 revealed by second harmonic generation, Phys. Rev. B **111**, 174405 (2025). doi:10.1103/PhysRevB.111.174405

Терагерцовое излучение периодическими структурами на основе спинтронных источников

Е. А. Караштин¹, Н. С. Гусев¹, М. В. Сапожников¹, Е. В. Скороходов¹, И. А. Федотов¹,
П. Ю. Авдеев², А. Л. Алферьев², Е. Д. Лебедева², А. В. Горбатова², А. М. Буряков²,
Е. Д. Мишина²

¹Институт Физики Микроструктур РАН, Нижний Новгород, Россия

²МИРЭА – Российский технологический университет, Москва

На основе периодической системы полос, изготовленных из многослойных структур Co(2нм)/Pt(2нм) методами фото- и электронной литографии, получены источники ТГц излучения, амплитудой которых можно эффективно управлять с помощью приложения внешнего магнитного поля. Исследованы структуры с периодом от 520 нм до 1000 нм. Для ширины полос 210 нм (период структуры 520 нм) достигнуто рекордное соотношение амплитуд сигналов при намагничивании вдоль и поперёк полос, равное 40. Показана возможность перестройки максимума спектральной амплитуды излучения таких ТГц эмиттеров в диапазоне 0.5-1.2 ТГц с использованием двух механизмов: частотно-зависимого спада амплитуды сигнала с увеличением угла между нормалью к плоскости эмиттера и направлением распространения излучения, которое наблюдается как для системы полос, так и для сплошной плёнки, и зависящего от длины волны подавления излучения при намагничивании системы вдоль полос (и, соответственно, протекании электрического тока, излучающего волну, поперёк полос).

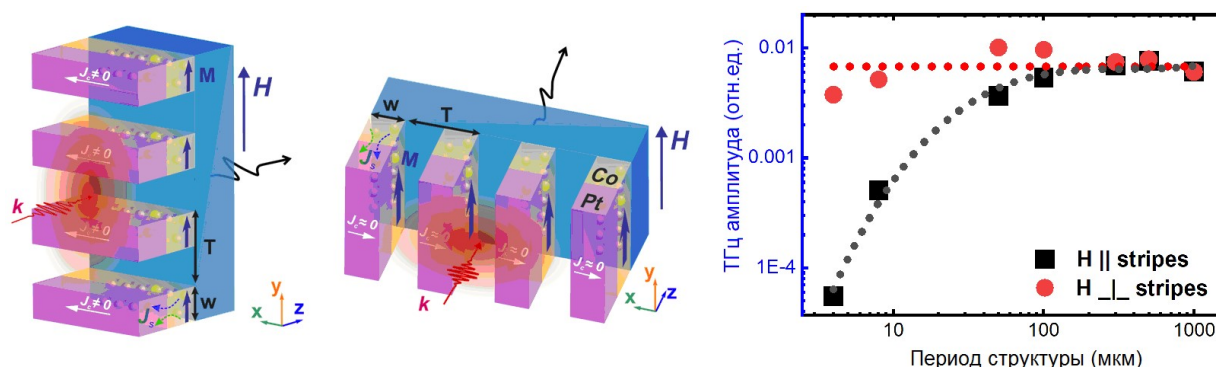


Рис. 1. Эффективное (слева) и подавленное (в центре) излучение ТГц сигнала при намагничивании структуры поперёк и вдоль полос, соответственно. Зависимость амплитуды генерируемого ТГц сигнала от периода структуры для магнитного поля, параллельного (черный) или перпендикулярного (красный) полосам (справа).

Исследования выполнены при поддержке РФФИ (грант 23-22-00295).

E.A. Karashtin, N.S. Gusev, M.V. Sapozhnikov, P.Yu. Avdeev, E.D. Lebedeva, A.V. Gorbatova, A.M. Buryakov, E.D. Mishina, Effective magnetic switching of terahertz signals in planar structured spintronic emitters, Phys. Rev. Applied 22, 054075 (2024).

Е.А. Караштин, Н.С. Гусев, М.В. Сапожников, П.Ю. Авдеев, А.Л. Алферьев, Е.Д. Лебедева, А.М. Буряков, Е.Д. Мишина, Спектральные свойства ТГц излучения латерально структурированных спинтронных источников, Письма в ЖЭТФ 121, 215 (2025).

Классификация магнитных структур соединений со структурой типа ThCr_2Si_2

А.М. Барташевич, Е.Г. Герасимов, П.Б. Терентьев, Н.В. Мушников, М.А. Сёмкин,
А.Н. Пирогов, С.В. Стрельцов, В.С. Гавико, А.Ф. Губкин, Д.С. Незнахин, В.И. Максимов

Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург

С использованием симметричного анализа создана новая классификация соизмеримых магнитных структур в соединениях RM_2X_2 (R – редкоземельный металл, К, Са, Ва и др.; M – $3d$ -, $4d$ -, $5d$ -переходный металл; X – Si, Ge, P, As и др.) с кристаллической структурой типа ThCr_2Si_2 . Показано, что все обнаруженные ранее экспериментально соизмеримые магнитные структуры в RM_2X_2 полностью описываются в рамках предложенной классификации. Предсказано существование новых магнитных структур, пока еще не обнаруженных в эксперименте. На основании магнитных измерений на монокристаллах и порошковой нейтронографии определены магнитные структуры, реализующиеся в твердых растворах замещения $\text{La}_{1-x}\text{Tb}_x\text{Mn}_2\text{Si}_2$, $\text{Dy}_{1-x}\text{Er}_x\text{Mn}_2\text{Si}_2$ со структурой типа ThCr_2Si_2 и построены концентрационные магнитные фазовые диаграммы. Обнаружено, что в соединениях $\text{Dy}_{0.6}\text{Er}_{0.4}\text{Mn}_2\text{Si}_2$ и $\text{Dy}_{0.4}\text{Er}_{0.6}\text{Mn}_2\text{Si}_2$ магнитные подрешетки диспрозия и эрбия упорядочиваются независимо вследствие конкуренции магнитокристаллической анизотропии. Показано, что сильная конкуренция обменных взаимодействий приводит к разупорядочению магнитной подрешетки марганца в $\text{Dy}_{0.2}\text{Er}_{0.8}\text{Mn}_2\text{Si}_2$ при низких температурах и к одновременному сосуществованию ферромагнитной и антиферромагнитной структур в $\text{La}_{0.2}\text{Tb}_{0.8}\text{Mn}_2\text{Si}_2$ и $\text{La}_{0.4}\text{Tb}_{0.6}\text{Mn}_2\text{Si}_2$.

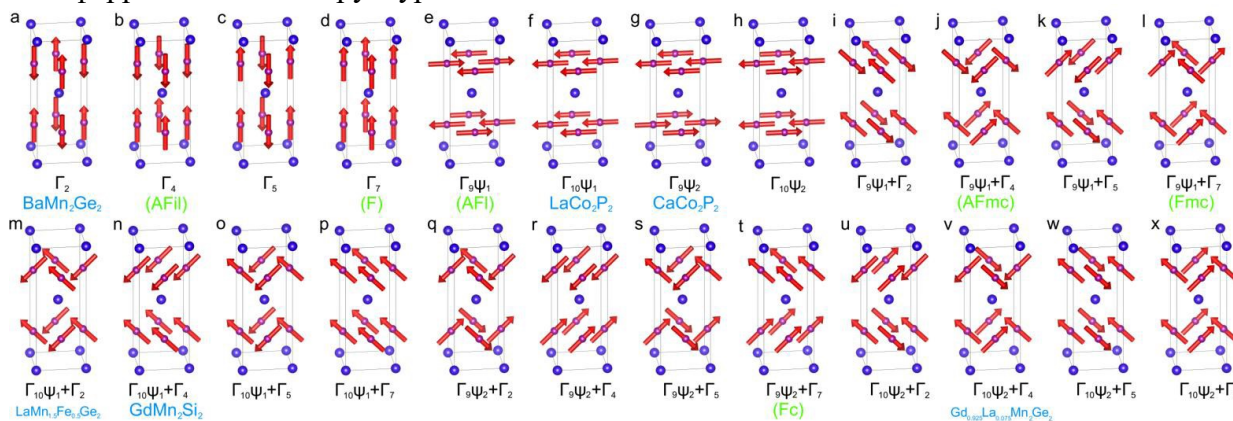


Рисунок 1 – Магнитные структуры подрешетки $3d$ переходного металла соединений со структурой ThCr_2Si_2

Публикации:

1. [Commensurate magnetic structures in \$\text{ThCr}_2\text{Si}_2\$ -type materials: A new symmetry-based classification scheme and prediction of emergent phenomena](#) / А.М. Bartashevich, S.V. Streltsov, E.G. Gerasimov, M.A. Semkin, A.F. Gubkin, A.N. Pirogov, N.V. Mushnikov, P.B. Terentev, M.I. Bartashevich. – Текст: непосредственный // Materials Today Physics — 2025. — V. 59. — 101905.
2. [Magnetic structure and magnetocaloric effect in \$\text{La}_{1-x}\text{Tb}_x\text{Mn}_2\text{Si}_2\$ \(\$x=0.6\$ and \$0.8\$ \)](#) / А.М. Bartashevich, N.V. Mushnikov, E.G. Gerasimov, Haneen M. Alsafi, M.A. Semkin, A.N. Pirogov, V.V. Govorina, P.B. Terentev, V.I. Maksimov. – Текст: непосредственный // Journal of Alloys and Compounds — 2025. — V. 1037. — 182484.
3. [The role of uniaxial and in-plane magnetic anisotropy in magnetocaloric effect and magnetic structure of \$\text{Dy}_{1-x}\text{Er}_x\text{Mn}_2\text{Si}_2\$](#) / А.М. Bartashevich, E.G. Gerasimov, N.V. Mushnikov, P.B. Terentev, M.A. Semkin, A.N. Pirogov, V.S. Gaviko, D.S. Neznakhin, V.V. Govorina. – Текст: непосредственный // Journal of Alloys and Compounds — 2025. — V. 1042. — 183965.

Работа выполнена по теме госзадания шифр «Магнит»
и по проекту РНФ № 23-12-00265.

Высокое гиромагнитное отношение в тулий-содержащих ферритах-гранатах

А.С. Федоров, В.В. Демидов, М.В. Логунов

Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН

Ферримагнетики привлекают значительное внимание как перспективные материалы для спинтроники благодаря огромному разнообразию магнитных свойств. В точке компенсации магнитного момента свойства ферримагнетика приближаются к свойствам антиферромагнетика, а в точке компенсации углового момента T_A гиромагнитное отношение $\gamma \rightarrow \infty$ и резко ускоряются динамические процессы – частота колебаний вектора намагниченности, скорость доменных границ. Использование явления увеличения гиромагнитного отношения в окрестности T_A в прикладных целях затруднено из-за сильной температурной зависимости $\gamma(T)$ и необходимости жесткой термостабилизации ферримагнетика.

В данной работе впервые обнаружена экспериментально и подтверждена теоретически возможность достижения высокого гиромагнитного отношения в ферримагнетиках, не имеющих точек компенсации магнитного и углового моментов. Показано, что гиромагнитное отношение в тулий-содержащих ферритах-гранатах можно значительно, в 3–5 раз повысить при разбавлении ионов железа ионами галлия, причем величина гиромагнитного отношения зависит как от содержания ионов галлия, так и от их распределения между октаэдрической и тетраэдрической подрешетками феррита-граната (рис. 1).

Гиромагнитное отношение – ключевой параметр, определяющий скорость протекания процессов в спиновой системе магнетика, и полученные результаты имеют важное значение для значительного повышения быстродействия термостабильных устройств спинтроники, создаваемых на базе ферримагнетиков.

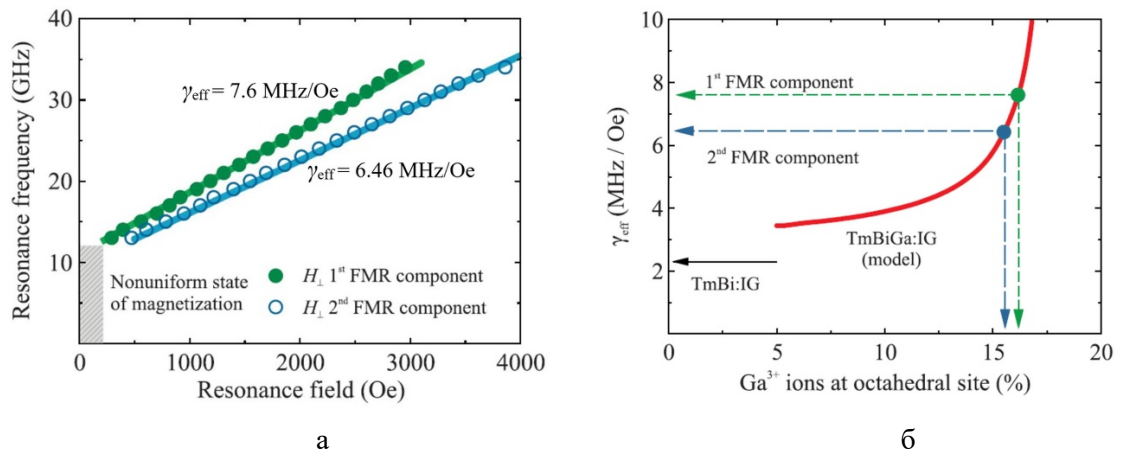


Рис. 1. а) зависимость частоты ферромагнитного резонанса от напряженности магнитного поля и соответствующие эффективные гиромагнитные отношения γ_{eff} феррита-граната состава TmBiGa:IG. б) Красная линия – зависимость γ_{eff} от вхождения ионов галлия в октаэдрическую подрешетку граната. Черной стрелкой показана величина γ_{eff} для феррита-граната TmBi:IG, не содержащего ионы галлия.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН. Код научной темы FFWZ-2025-0003, шифр «Спинтроника-3».

Публикации:

1. А.С. Федоров, В.В. Демидов, М.В. Логунов. Высокое гиромагнитное отношение в тулий-содержащих ферритах-гранатах // Письма в ЖЭТФ. - 2025. - Т. 122. - № 8. С. 507 – 512. (Перевод: A.S. Fedorov, V.V. Demidov, and M.V. Logunov. High Gyromagnetic Ratio in Thulium Iron Garnets // JETP Letters. - 2025. - Vol. 122. - No. 8. - Pp. 528–533).

Низкочастотная динамика LiCu_3O_3 , антиферромагнетика с сильно разбавленной квадратной решёткой

С. К. Готовко^{1,2}, А. Г. Иванова³, П. С. Кудимкина^{1,2}, А. А. Буш⁴, В. И. Козлов^{1,4},
М. Хеммида⁵, Х.-А. Круг фон Нидда⁵, Л. Е. Свистов¹

¹ Институт физических проблем им. П. Л. Капицы РАН

² Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

³ Институт кристаллографии РАН

⁴ Российский технологический университет Московский институт радиотехники, электроники и автоматики

⁵ Институт физики, Университет Аугсбурга

LiCu_3O_3 – квазидвумерный антиферромагнетик ($S=1/2$) с сильно разбавленной квадратной решеткой. Кристаллическая структура содержит два типа квадратных плоскостей с различными степенями замещения магнитных ионов Cu^{2+} немагнитными ионами Li^+ (20% и 40%, Рис. 1). ЯМР, измерения намагниченности и рассеяния нейтронов выявили возникновение антиферромагнитного порядка при $T_{c1} = 123$ К и изменение магнитного состояния при $T_{c2} \approx 30$ К.

Работа посвящена исследованию магнитного состояния LiCu_3O_3 методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР). Измерения интенсивности сигнала ЭПР показали, что при $T_{c1} = 123$ К происходит магнитный фазовый переход только части образца, тогда как остальная часть образца остается парамагнитной. На Рис. 2 приведена температурная зависимость обратной интенсивности магнитного резонанса. Вблизи T_{c1} наблюдается выключение части парамагнитной восприимчивости за счет упорядочения при этой температуре части образца. Магнитный порядок ожидается в магнитных плоскостях с более высокой концентрацией магнитных ионов. Соотношение значений интенсивности ЭПР до и после перехода согласуется с этим предположением.

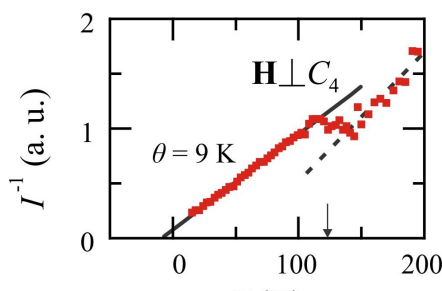


Рис. 2. Зависимость обратной интенсивности магнитного резонанса LiCu_3O_3 от температуры.

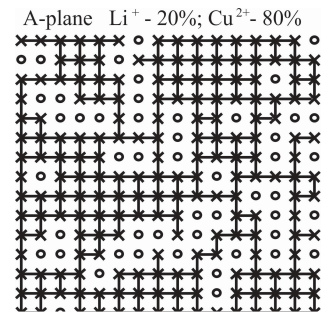


Рис. 1. Схематическое изображение распределения ионов в плоскости с меньшим разбавлением.

В исследованном в экспериментах диапазоне частот и температур (18 – 140 ГГц, 30 – 300 К) наблюдалась только одна ветвь ЭПР. При температурах $T < 30$ К ветвь ЭПР приобретает щель, которая постепенно увеличивается с понижением температуры. Поведение наблюдаемой щели в спектрах магнитного резонанса указывает на то, что эта щель является псевдощелью обменного характера, связанной с размерным эффектом на кластерах магнитных ионов.

Работа опубликована: S.K. Gotovko, A.G. Ivanova, P.S. Kudimkina, A.A. Bush, V.I. Kozlov, M. Hemmida, H.A. Krug von Nidda, L.E. Svistov [Low-frequency dynamics of \$\text{LiCu}_3\text{O}_3\$: An antiferromagnet on a strongly depleted square lattice](#), Phys. Rev. B 111, 064430 (2025)

Работа выполнена в рамках госзадания ИФП им. П. Л. Капицы РАН и при поддержке гранта РНФ 22-12-00259-П.

Направления программы ПФНИ 2021-2030:

1.3.2.3. Физика магнитных явлений, магнитные материалы и структуры, спинтроника

1.3.2.7. Физика низких температур, квантовые кристаллы и жидкости