

# Исследование нутационных колебаний в ферромагнитных пленках

А.А. Мартышкин, А.В. Садовников

Саратовский национальный исследовательский государственный университет им.  
Н.Г. Чернышевского

**Аннотация:** в работе представлены результаты экспериментального исследования высокочастотных нутационных колебаний в структурированных ферромагнитных пленках, выступающих перспективной средой для создания устройств магнонной логики терагерцового диапазона. На основе метода спектроскопии бриллюэновского рассеяния света в работе впервые продемонстрирована возможность возбуждения безщелевой моды спиновых волн — моды Гольдстоуна, возникающей в условиях нарушения симметрии. проведена визуализация пространственно-локализованных пакетов нутационных мод, обусловленных инерционной динамикой магнитного момента вокруг прецессионной траектории. Показано, что использование нутационных степеней свободы позволяет расширить частотный диапазон информационных носителей и задействовать инерционные характеристики спина для кодирования данных. Полученные результаты подтверждают реализуемость высокоскоростных энергоэффективных магнонных схем на базе гибридных магнитоэлектронных платформ.

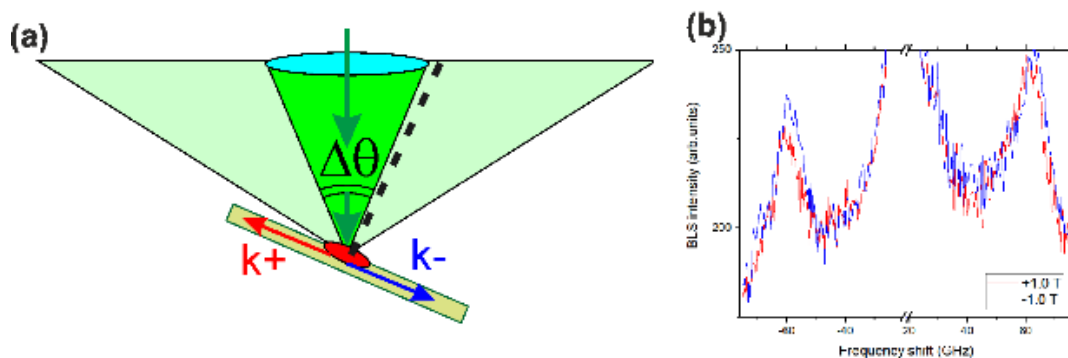
**Ключевые слова:** спиновые волны, нутационные волны магноника, микромагнитное моделирование

## 1. Введение

Магноника представляет собой одно из наиболее динамично развивающихся направлений пост-CMOS электроники, где в качестве носителей информации выступают спиновые волны (СВ) — коллективные возбуждения магнитной подсистемы в упорядоченных средах. Ключевое преимущество данного подхода заключается в экстремально малых длинах волн СВ в гигагерцовом и терагерцовом диапазонах, что позволяет создавать функциональные устройства субмикронных масштабов, совместимые с современными полупроводниковыми технологиями [1,2]. Несмотря на глубокую изученность прецессионной динамики в ферромагнитных пленках, актуальной задачей остается существенное расширение рабочего частотного диапазона магнонных систем. Одним из наиболее многообещающих путей решения этой проблемы является переход к использованию нутационных спиновых волн (НСВ) [3-5]. Эти высокочастотные моды связаны с инерционными эффектами и кратковременными отклонениями магнитного момента от прецессионной траектории, что открывает доступ к новым динамическим степеням свободы и позволяет кодировать информацию через инерционные характеристики спина.

## 2. Экспериментальные методы и исследование динамики магнонов

Объектами исследования выступали микроструктурированные ферромагнитные пленки состава  $\text{CoGd}$ , обладающие выраженными инерционными свойствами магнитной подсистемы. В ходе экспериментов использовалась геометрия касательного подмагничивания, обеспечивающая условия для распространения поверхностных и объемных спиновых волн. С помощью метода бриллюэновской светорассеивающей спектроскопии (BLS) с высоким пространственным и частотным разрешением были получены карты интенсивности неупругого рассеяния света при комнатной температуре.



**Рисунок 1.** (а) Типичная схема исследования магнонов методом бриллюэновской спектроскопии; (б) пример спектров неупругого рассеяния света при комнатной температуре на ферромагнитной пленки CoGd

Ключевым результатом стало экспериментальное обнаружение безщелевой моды спиновых волн — моды Гольдстоуна. Ее возникновение в исследуемых структурах CoGd обусловлено спонтанным нарушением симметрии при фазовом переходе, что характерно для систем с конкурирующими взаимодействиями. Помимо этого, в спектрах были идентифицированы высокочастотные пики, соответствующие нутационной динамике. Авторами была проведена визуализация формирования и распространения пространственно-локализованных пакетов нутационных мод. Установлено, что данные пакеты сохраняют когерентность на субмикронных масштабах, что открывает путь к их использованию в качестве динамических носителей информации в гибридных магнонных устройствах.

### 3. Заключение

Проведенное исследование экспериментально подтверждает принципиальную возможность управления инерционной динамикой спина в ферромагнитных структурах. Обнаружение нутационных мод и моды Гольдстоуна закладывает физическую основу для создания качественно новых высокоскоростных магнонных цепей. Работа демонстрирует, что задействование нутационных степеней свободы позволяет значительно повысить информационную емкость и энергоэффективность гибридных магнитоэлектронных платформ.

Исследование выполнено за счет **гранта Российского научного фонда (проект № 23-79-30027)**.

#### Список литературы

1. Sadovnikov A. V. et al. Exceptional-point phase transition in coupled magnonic waveguides // *Physical Review Applied*. – 2022. – Т. 18. – №. 2. – С. 024073.
2. Martyshkin A. A. et al. Magnonic interconnections: Spin-wave propagation across two-dimensional and three-dimensional junctions between yttrium iron garnet magnonic stripes // *Physical Review Applied*. – 2022. – Т. 18. – №. 6. – С. 064093.
3. Никитов С. А. и др. Диэлектрическая магноника — от гигагерцев к терагерцам // *Успехи физических наук*. – 2020. – Т. 190. – №. 10. – С. 1009-1040.
4. Neeraj K. et al. Inertial spin dynamics in ferromagnets // *Nature Physics*. – 2021. – Т. 17. – №. 2. – С. 245-250.
5. Wegrowe J. E. et al. Magnetization dynamics, gyromagnetic relation, and inertial effects // *American Journal of Physics*. – 2012. – Т. 80. – №. 7. – С. 607-611.