

# Динамический эффект близости в гибридной структуре сверхпроводник/ферромагнитный диэлектрик.

Я.В. Туркин<sup>1</sup>, Н. Г. Пугач<sup>1</sup>

<sup>1</sup>НИУ ВШЭ, Московский университет электроники и математики им. А. Н. Тихонова

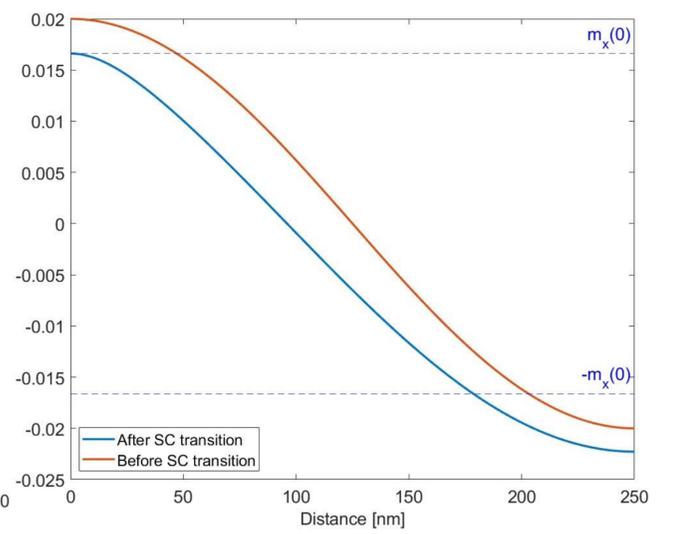
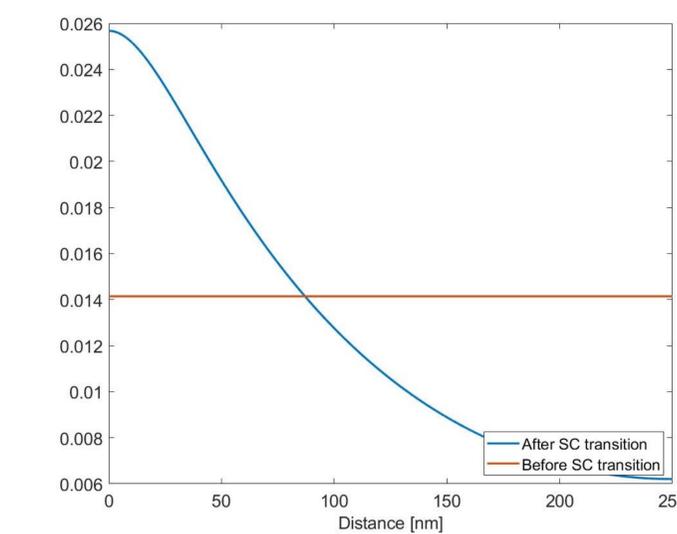
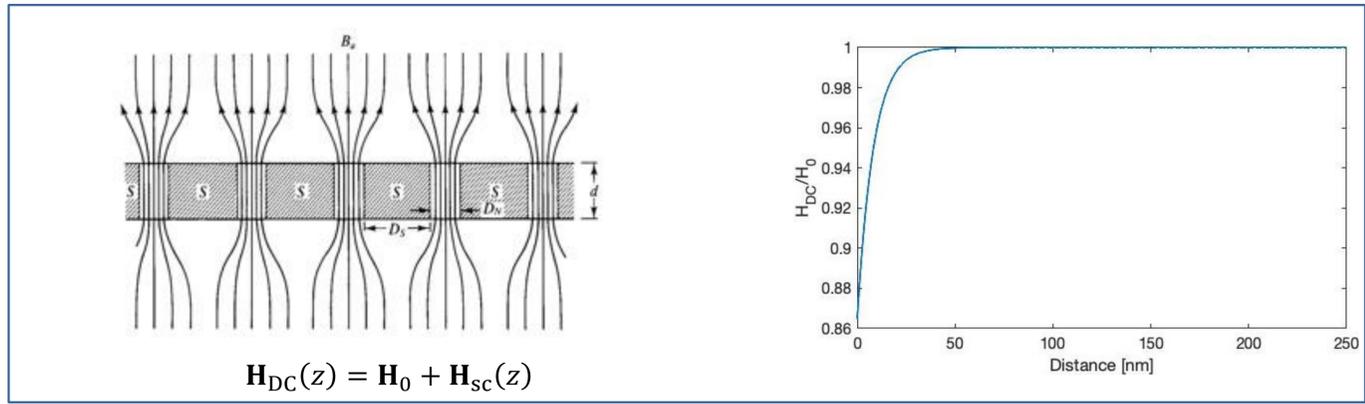
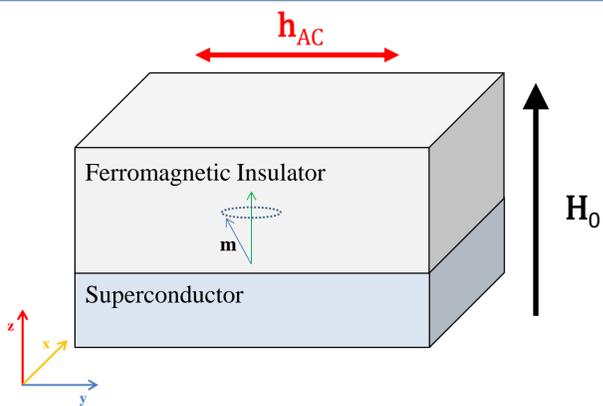


## Мотивация

- Магнонная накачка
- Сверхпроводящая спинтроника
- Связанная динамика намагниченности и триплетных куперовских пар
- Сверхпроводящая магноника
- Отсутствие Джоулевого нагрева

## Исследуемая система

- Двухслойная гибридная структура сверхпроводник / ферромагнитный диэлектрик
- Однородная намагниченность прецессирует в магнетике с постоянной частотой
- Ось прецессии намагниченности перпендикулярна поверхности интерфейса
- В качестве материалов выбраны ниобий и железо-иттриевый гранат (ЖИГ,  $Y_3Fe_5O_{12}$ )

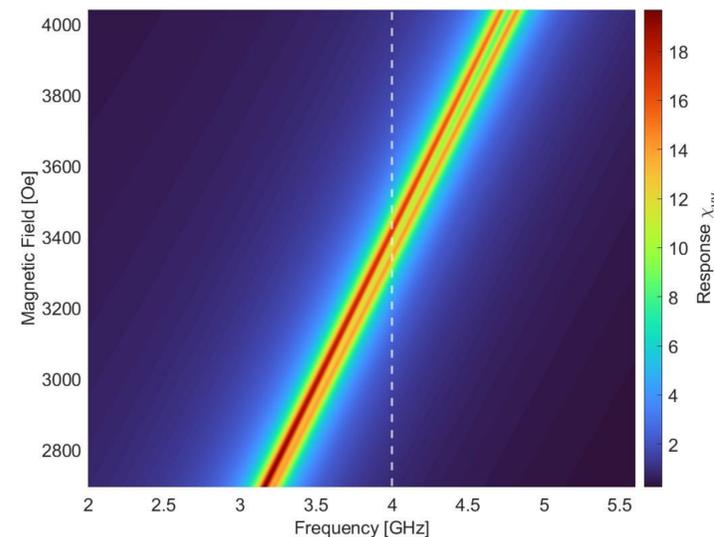
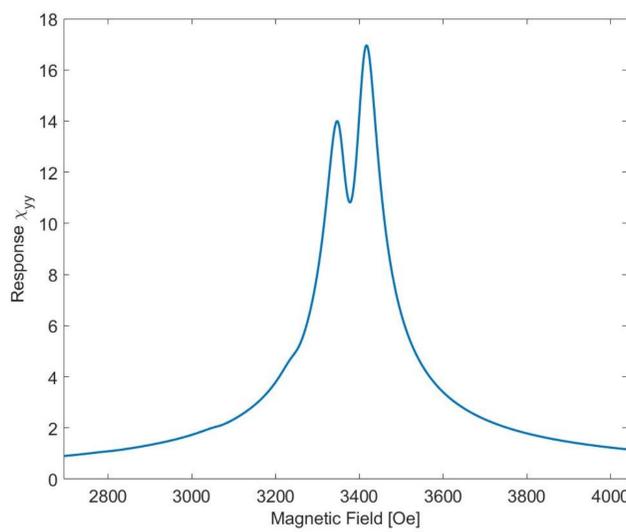


Распределение моды Киттеля в гибридной структуре до (красная линия) и после (синяя линия) сверхпроводящего перехода

Распределение первой моды стоячей спиновой волны в гибридной структуре до (красная линия) и после (синяя линия) сверхпроводящего перехода

## Методы

- Линеаризованное уравнение Ландау-Лифшица-Гильберта описывает магнитную динамику
- Высокочастотная магнитная восприимчивость вычисляется численно методом конечных разностей
- Уравнение Узалея для нестационарных периодических задач
- Эффект близости учитывается как малое возмущение на интерфейсе между сверхпроводником и ферромагнитным диэлектриком
- Линеаризованное уравнение Узалея-Флоке решается численно



Отклик гибридной структуры на частоте 4 ГГц

Зависимость отклика гибридной структуры от частоты внешнего переменного магнитного поля и величины постоянного магнитного поля

Уравнение Узалея-Флоке<sup>1,2</sup>

$$\frac{i\hbar}{2} \{ \check{\rho}_4 n \Omega, \check{g}_n(\omega) \} + i\hbar [ \check{\rho}_4 \omega, \check{g}_n(\omega) ] + \hbar D (\check{g} \circ \partial_z \check{g})_n = -i (\check{A}(t_1) \check{g}(t_1, t_2) - \check{g}(t_1, t_2) \check{A}(t_2))_n$$

Линеаризованное уравнение Узалея-Флоке<sup>2</sup>

$$\frac{i\hbar}{2} \{ \check{\rho}_4 n \Omega \check{g}_n^{(1)}(\omega) \} + i\hbar [ \check{\rho}_4 \omega, \check{g}_n^{(1)}(\omega) ] + i [ \check{A}^{(0)}, \check{g}_n^{(1)}(\omega) ] + \hbar D \check{g}^{(0)} \left( \omega + \frac{n\Omega}{2} \right) \partial_z^2 \check{g}_n^{(1)}(\omega) = 0$$

Адиабатические граничные условия<sup>3</sup>

$$\check{g}^{(0)} \circ \partial_z \check{g}^{(1)} = iK [ \check{m}_n, \check{g}^{(0)} ]_0 - K^2 [ \check{m}_n, [ \check{m}_n, \check{g}^{(0)} ]_0 ]_0 + \dots$$

Наведенная намагниченность внутри СП слоя:

$$\mathbf{M}(z) = \frac{\hbar g \mu_B N_0}{8} \int_{-\infty}^{+\infty} d\omega \text{Tr} [ \hat{\mathbf{k}} \hat{\mathbf{g}}^K(\omega) ],$$

## Выводы

При переходе металла в сверхпроводящее состояние, спектр поперечных стоячих спиновых волн в диэлектрике меняется

- Интерфейсный обмен между электронами проводимости в сверхпроводнике и магнитными моментами в диэлектрике приводит к поверхностному закреплению спинов на границе и асимметрии обменных мод
- При полях больших чем  $H_{c1}$  эффект близости с вихревой решеткой приводит к неоднородному распределению постоянного поля в магнетике и еще большей несимметричности магнонных мод
- При сильной асимметрии обменных мод, становится возможным возбуждение высших гармоник в линейном режиме

Отклик магнитной системы получен из совместного численного решения уравнений Узалея и Ландау-Лифшица-Гильберта методом конечных разностей

## Литература

1. [A. Brinkman, et al., Phys. Rev. B, 68, \(2003\).](#)
2. [Y. Turkin, N. Pugach, Beilstein J. Nanotechnol. 14., \(2023\), 233–239.](#)
3. [M. Eschrig, et al., New J. of Phys. 17, \(2015\).](#)
4. [Turkin, Ya V., et al. Physics of Metals and Metallography 124.1 \(2023\): 39-45.](#)