



АКУСТОЭЛЕКТРОННО- СПИНТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА ГЕНЕРАЦИИ И ПРИЕМА ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

^{1,2}П.А. Попов, ^{1,3}А.Р. Сафин, ^{1,2}С.А. Никитов,

¹Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

²Московский физико-технический институт (государственный университет)

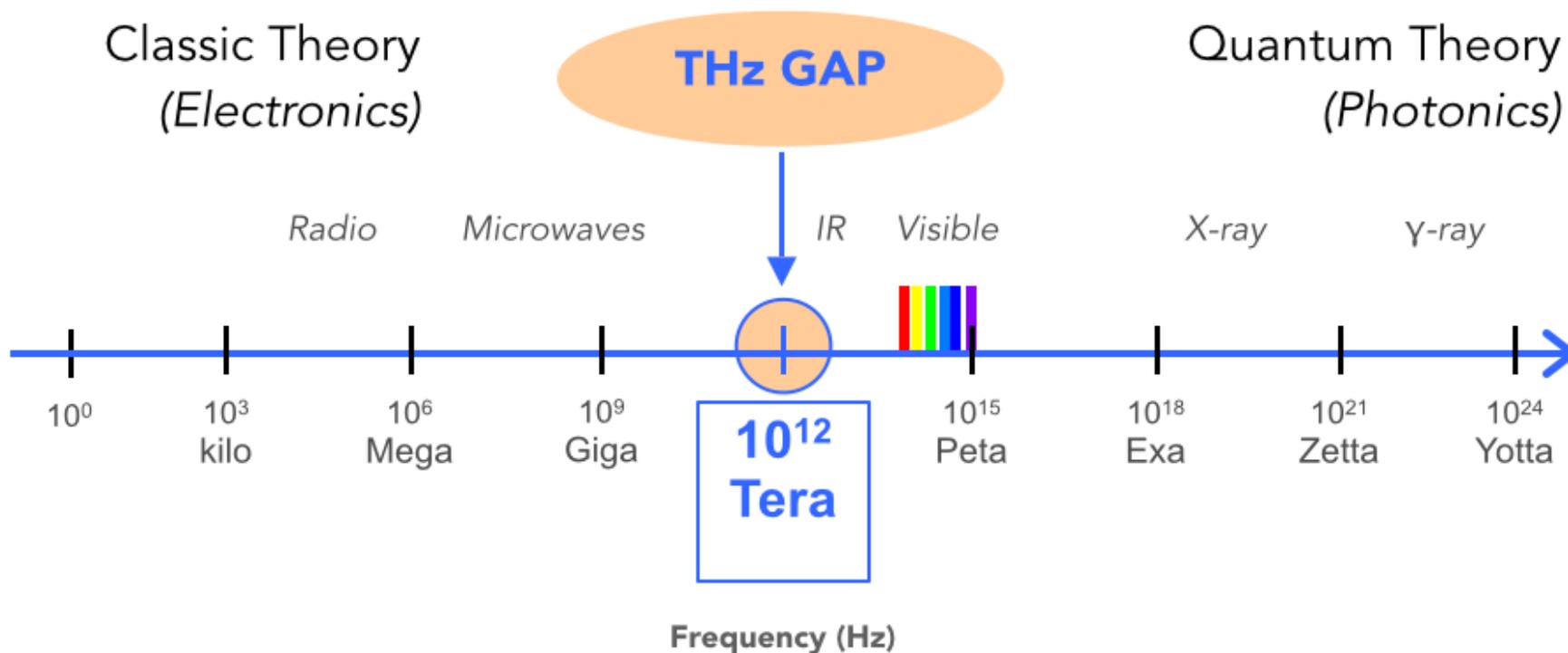
³Национальный исследовательский университет «МЭИ»

СОДЕРЖАНИЕ

- **МОТИВАЦИЯ**
- **ОСНОВЫ СПИНТРОНИКИ И СТРЕЙНТРОНИКИ**
 - **Эффекты GMR, TMR, STT, SOT, Spin-Pumping**
 - **Магнитоэлектрические эффекты**
 - **Магнонная стрейнтроника**
- **АНТИФЕРРОМАГНИТНЫЕ ОСЦИЛЛЯТОРЫ, ДЕТЕКТОРЫ И ТЕРАГЕРЦОВАЯ СПИНТРОНИКА**
 - **Материалы для АФМ-спинтроники**
 - **Автогенераторы. Осцилляторы с внешним возбуждением**
 - **Детекторы терагерцовых волн на АФМ**
 - **Использование упругих напряжений для изменения пороговых токов и частоты колебаний АФМ устройств**
- **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

МОТИВАЦИЯ

- Нехватка методов и устройств для приёма и генерации терагерцового излучения (THz gap problem)



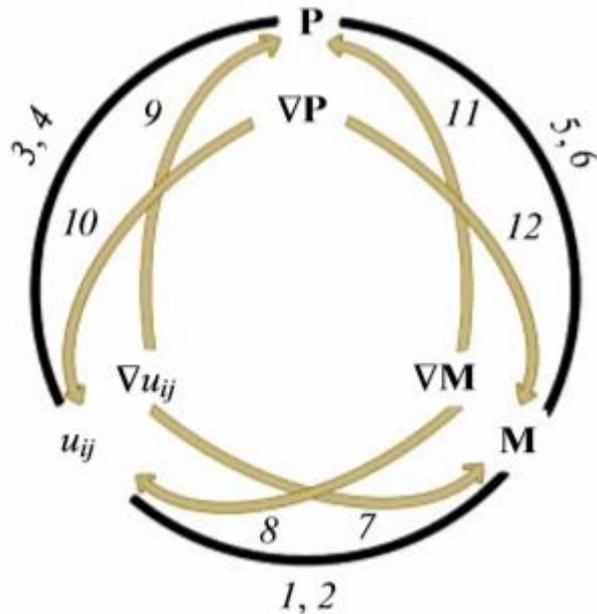
$$1 \text{ THz} \sim 33 \text{ cm}^{-1} \sim 1 \text{ ps} \sim 300 \text{ um} \sim 4 \text{ meV} \sim 47 \text{ K}$$

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

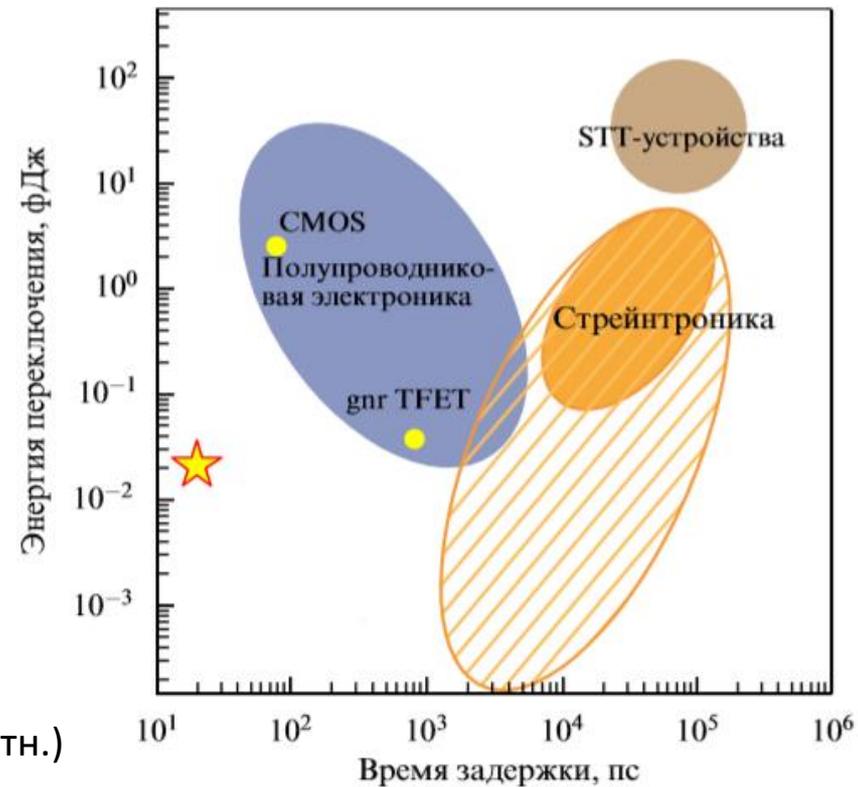
4

Название	Среда передачи	Носители	Характерная длина волны	Частоты	Недостатки
Электроника	Металл, полупроводник	Электроны, дырки	$2,42 \cdot 10^{-6}$ мкм	ГГц, ТГц	Омические потери, топология межсоединений
Фотоника	диэлектрик	Фотоны, ЭМВ	0.5-10 мкм	40-700 ТГц	Управляемость, масштабируемость
Плазмоника	Диэлектрик-металл	Плазмоны	0.1-1 мкм	ТГц	Затухание, скин-эффект
Спинтроника	Магнетик-металл-диэлектрик	Электроны, спиновые волны	$2,42 \cdot 10^{-6}$ мкм 0.1- ∞ мкм	ГГц	Повторяемость
Магноника	Ферромагнетики, Антиферромагнетики, слоистые магнитные структуры	Магноны	0.1- ∞ мкм	до 100 ГГц, ТГц	Необходимо внешнее магнитное поле для ФМ, повторяемость
Акустоэлектроника	Пьезоэлектрики, пьезополупроводники и др.	Фононы	мм	МГц, единицы ГГц	Диапазон частот, высокие потери при распространении

ФИЗИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ СТРЕЙНТРОНИКИ



- 1,2 – пьезомагнитный эф-т и магнитострикция
- 3,4 – пьезоэлектрический эф-т и электрострикция
- 5,6 – магнитоэлектрический (лин и нелин по M)
- 7,8 – флексомагнитные эф-ты (прямой и обратный)
- 9,10 – флексоэлектрич. эф-ты (прямой и обратный)
- 11,12 – флексомагнитоэлектрич. эф-ты (прям. и обратн.)



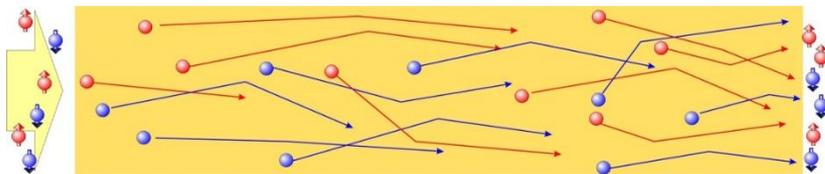
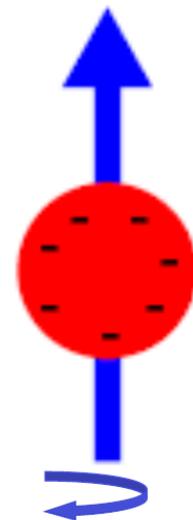
ЭЛЕКТРОНИКА и СПИНТРОНИКА

Электроника → *Заряд*

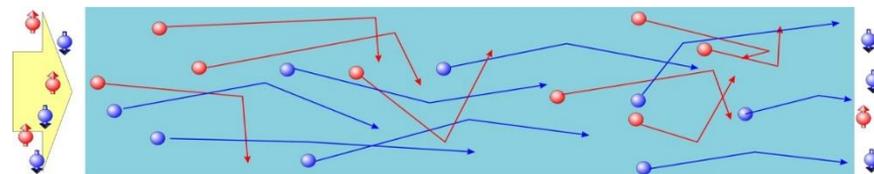
Основана на переносе заряда носителей электрического тока.

Спинтроника → *Спин*

Основана на переносе собственного магнитного момента - спина носителей электрического тока.



VS

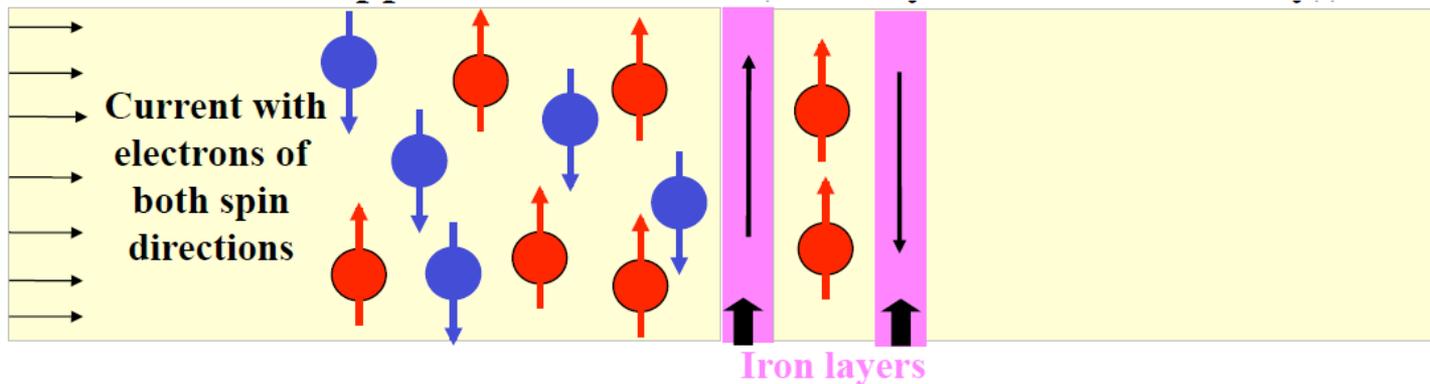


В немагнитном проводнике электроны рассеиваются независимо от направления спина. От среднего количества рассеяния электронов зависит электрическое сопротивление проводника.

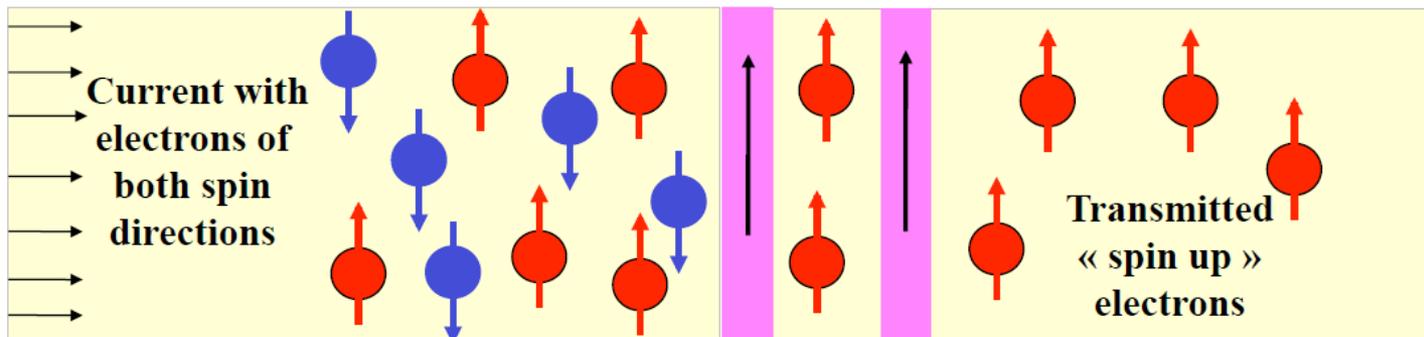
В ферромагнитном проводнике электроны рассеиваются по-разному в зависимости от направления спина электронов. Например, электроны со спином вверх рассеиваются сильнее, чем со спином вниз.

ГИГАНТСКОЕ МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЕ

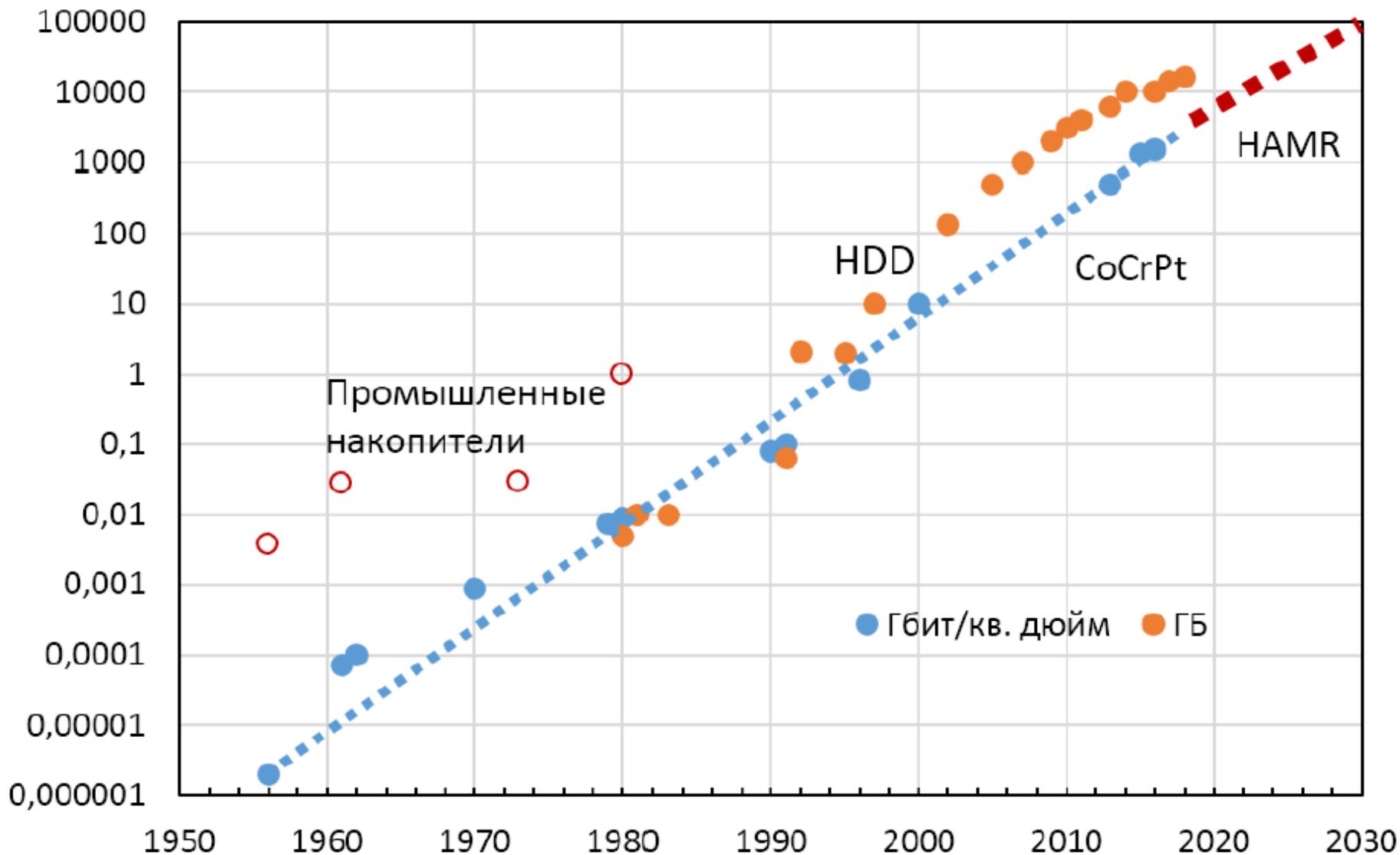
- Ферромагнитные слои с противоположными направлениями намагниченностей слоев останавливают электроны обоих направлений спина.



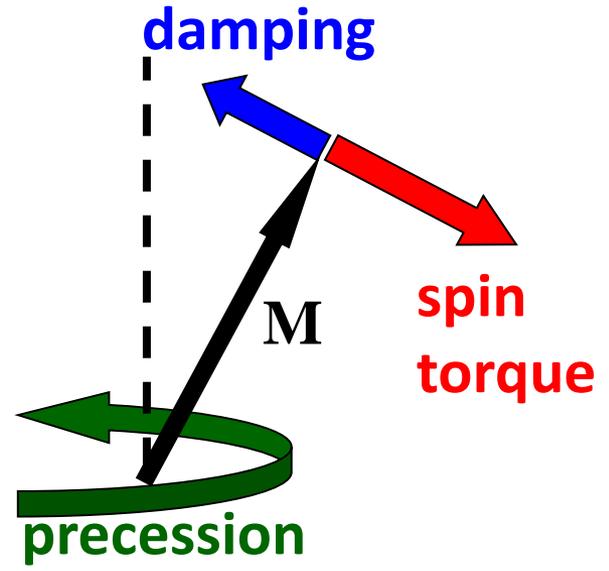
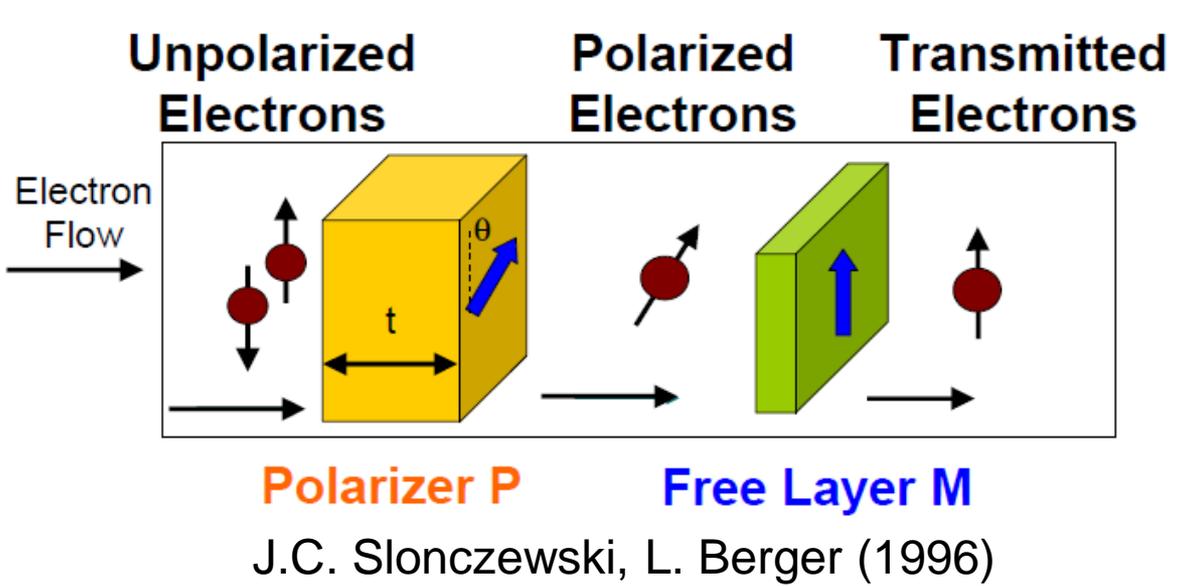
- Ферромагнитные слои с коллинеарными направлениями намагниченностей слоев «пропускают» электроны со спином-вверх.



ПЛОТНОСТЬ ЗАПИСИ ИНФОРМАЦИИ



ЭФФЕКТ ПЕРЕНОСА СПИНА



Уравнение Ландау-Лифшица-Гильберта (для намагниченности свободного слоя)

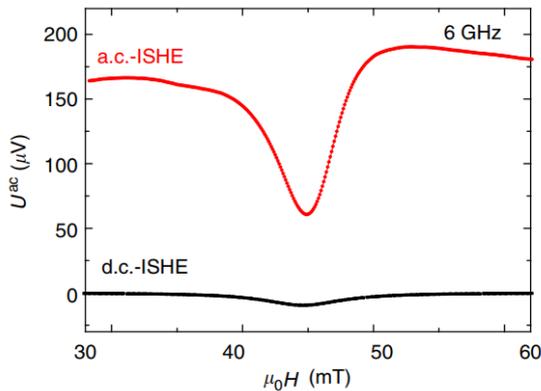
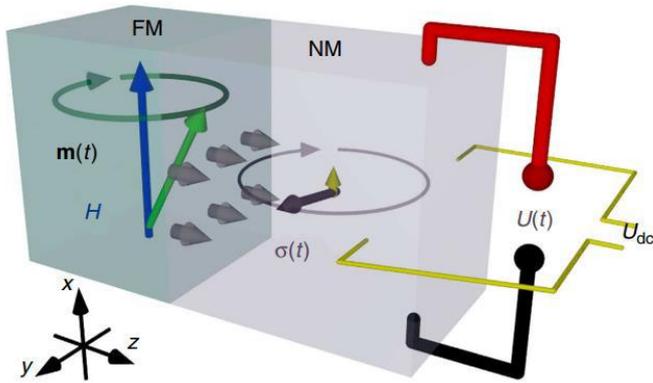
$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} = \gamma \left[\mathbf{H}_{eff} \times \mathbf{M} \right] + \frac{\alpha}{M_0} \left[\mathbf{M} \times \frac{d\mathbf{M}}{dt} \right] + \frac{a_I}{M_0} \left[\mathbf{M} \times [\mathbf{M} \times \mathbf{p}] \right]$$

прецессия

затухание

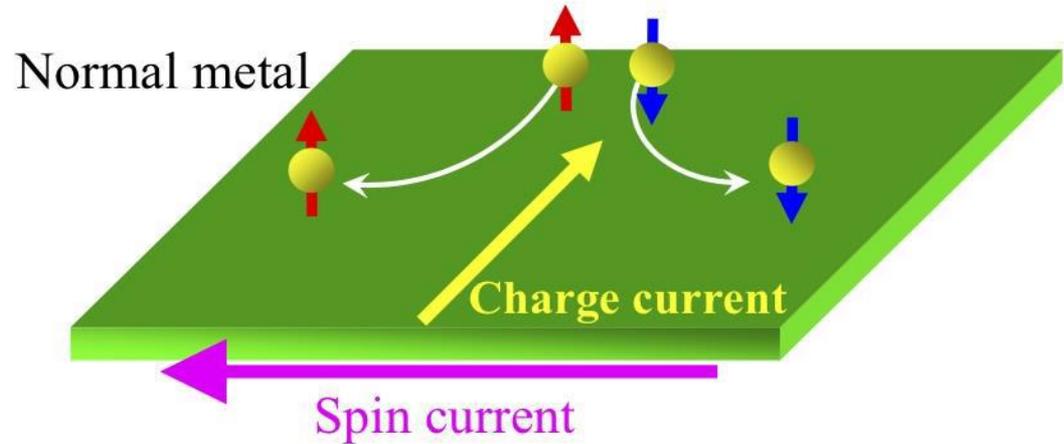
перенос крутильного момента (spin torque)

СПИНОВЫЙ ЭФФЕКТ ХОЛЛА И СПИНОВАЯ НАКАЧКА



АС и DC сигналы за счет
обратного спинового эффекта
Холла

Wei, D., et al., 2014, Nat. Commun.
5, 3768.



Эффект возникает из-за анизотропии рассеяния электронов с разными направлениями спинов на примесях немагнитного металла вследствие спин-орбитального взаимодействия.

Обратный спиновый эффект Холла. При пропускании спин-поляризованного тока регистрируют напряжение ~ 10 нВ.

Дьяконов М.И., Перель В.И. 1971. Письма в ЖЭТФ.
13(11). С. 657-660.

ОСЦИЛЛЯТОРЫ НА ОСНОВЕ СПИНОВОГО ЭФФЕКТА ХОЛЛА

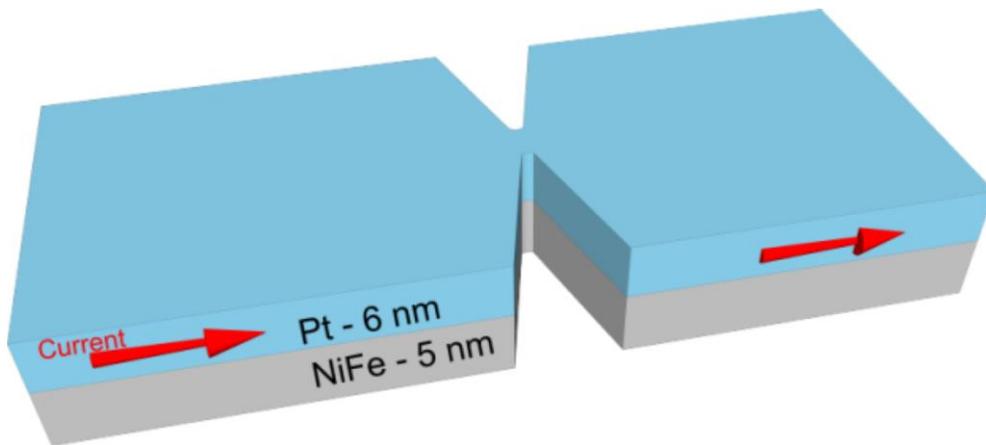


Рис.1. Конструкция СХНО, управляемого током

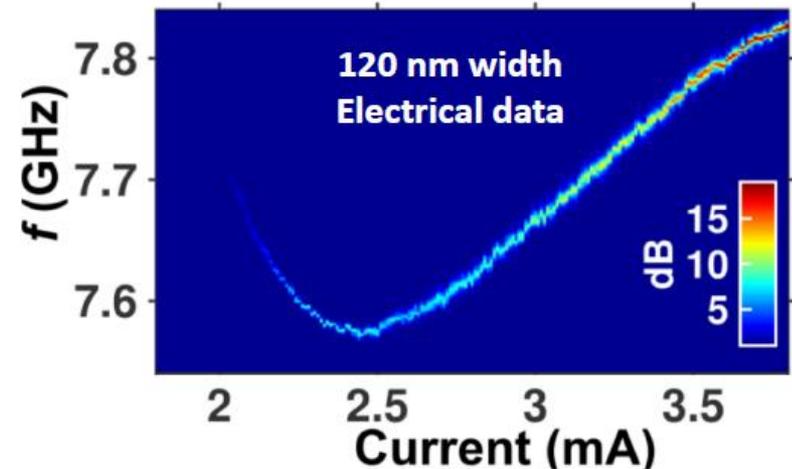
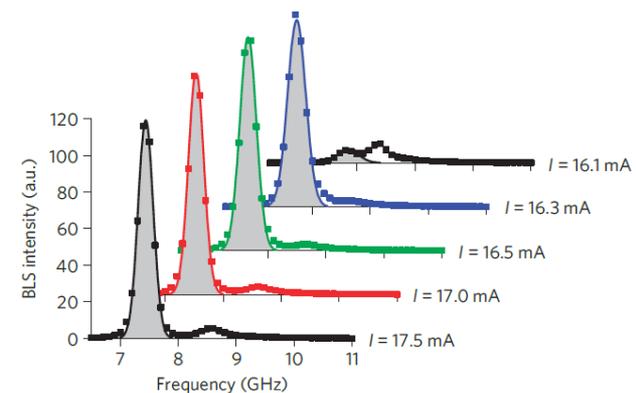
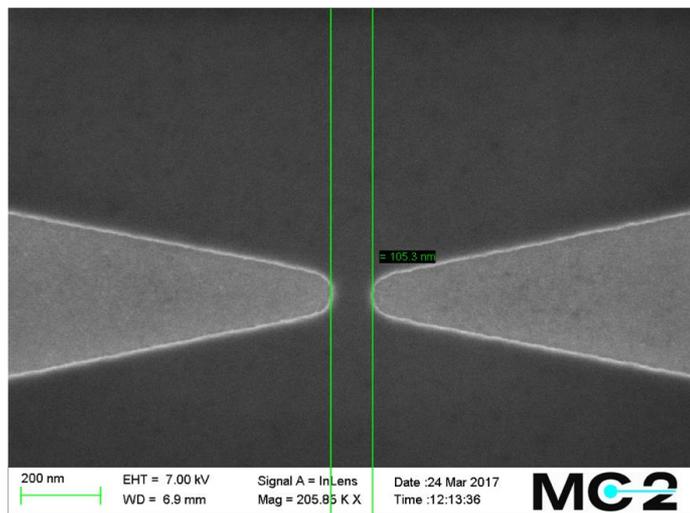


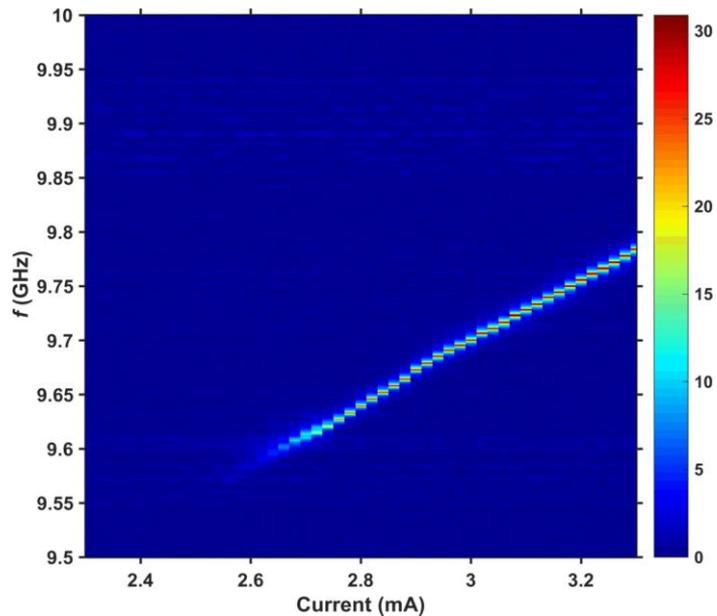
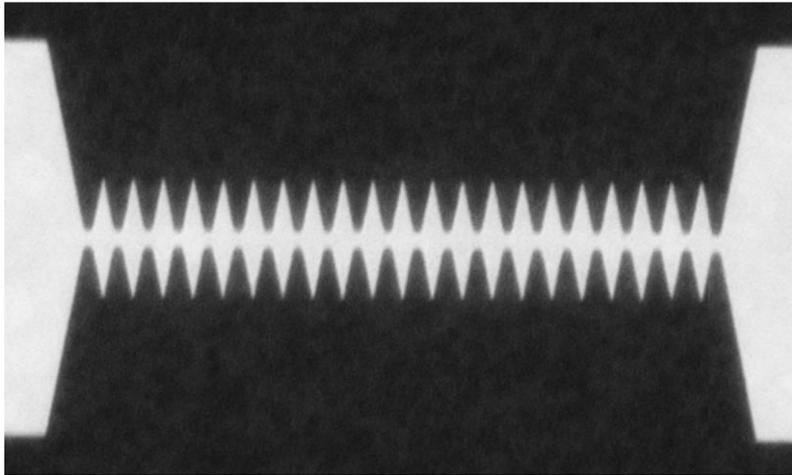
Рис.2. Зависимость частоты колебаний от постоянного тока



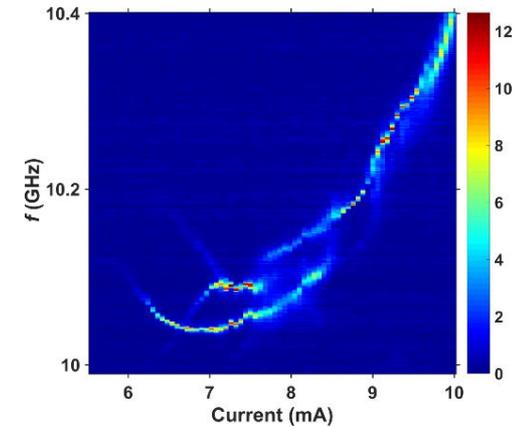
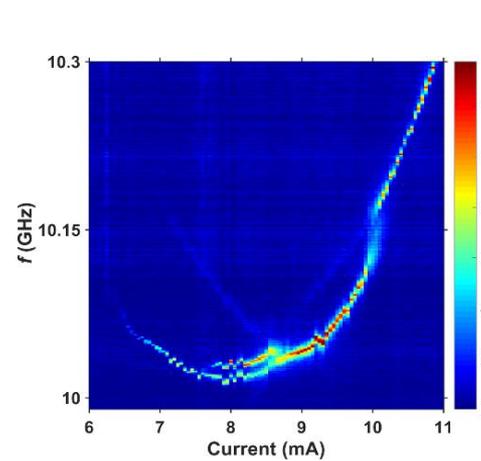
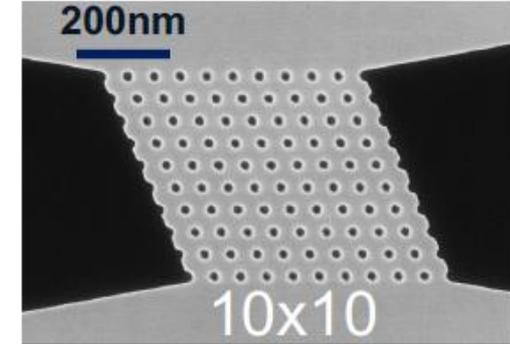
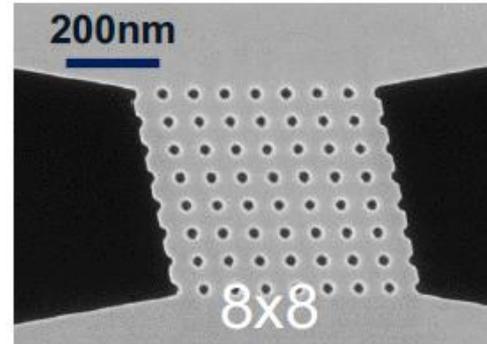
M. Dvornik, A. A. Awad, and J. Åkerman
Phys. Rev. Appl. **9**, 014017 (2018)

ЛОКАЛЬНАЯ СВЯЗЬ БОЛЬШИХ МАССИВОВ СХНО

Линейка из 21 осциллятора

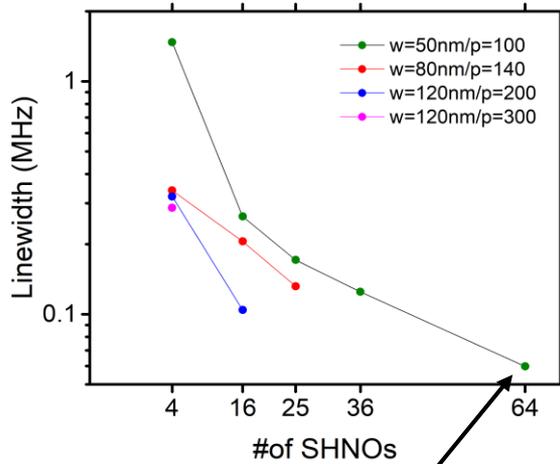


Решетка из 64 и 100 осцилляторов

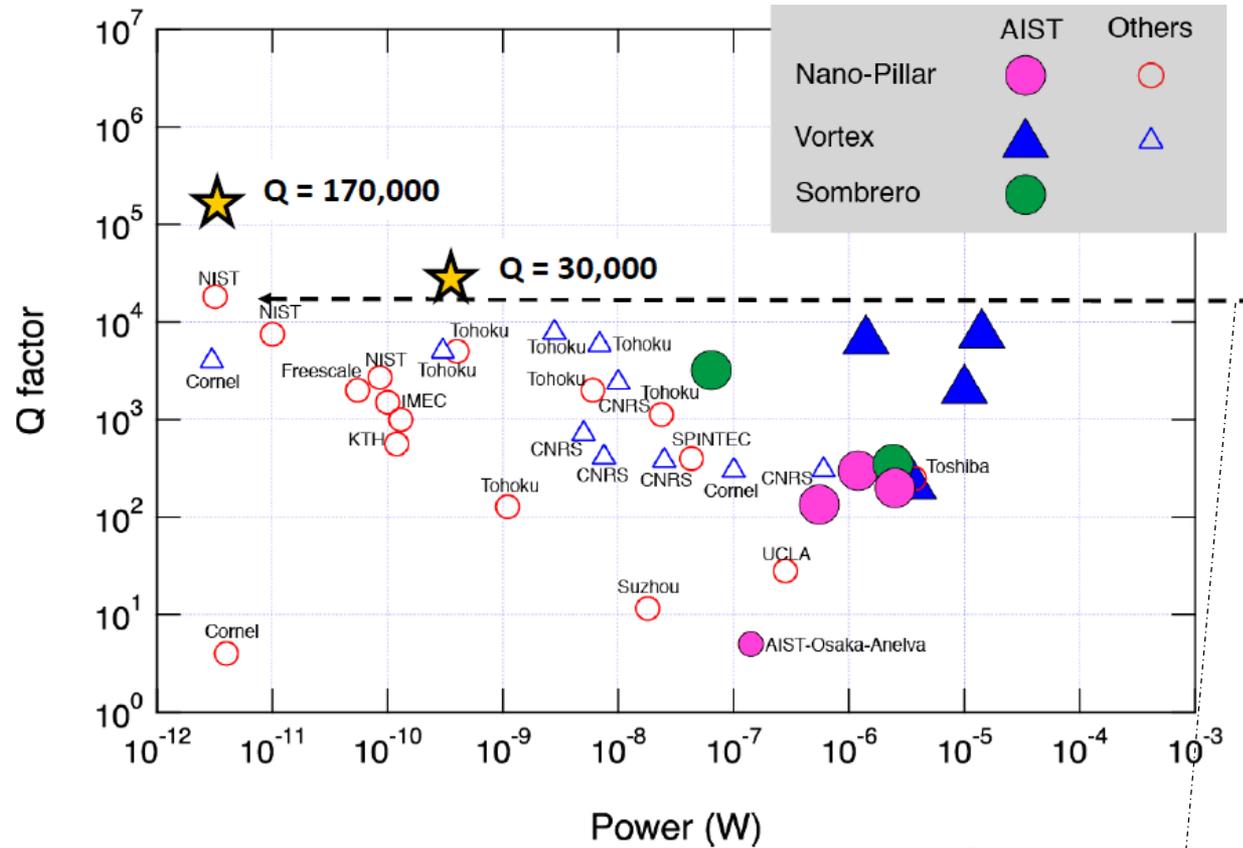


M. Zahedinejad, et al. ArXiv:1812.09630v1.

ЛУЧШИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПО МОЩНОСТИ И ШИРИНЕ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЛИНИИ ДЛЯ ОСЦИЛЛЯТОРОВ



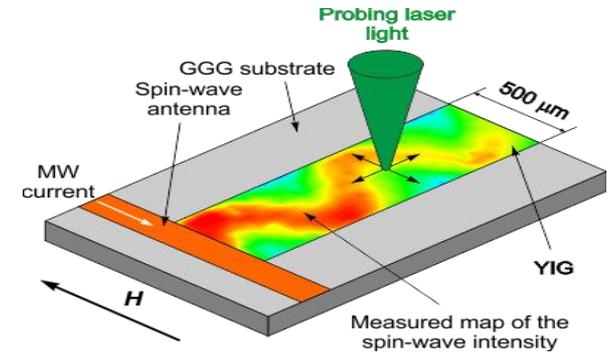
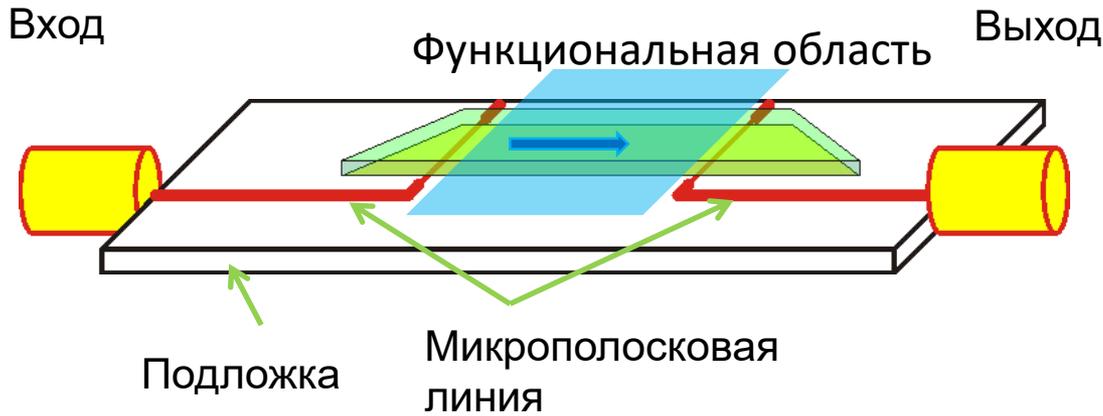
$\Delta f = 60 \text{ kHz}$
 $Q = 170,000$



$Q = 18,000$
 NIST (2004)

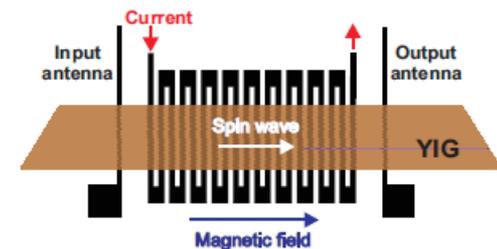
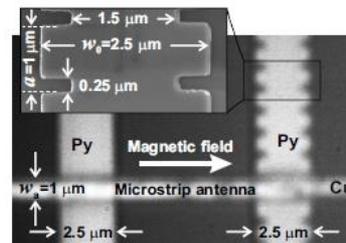
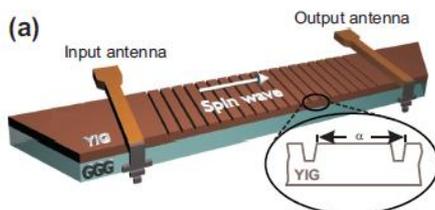
МАГНОНИКА

Схема базового спин-волнового устройства на основе регулярного волновода



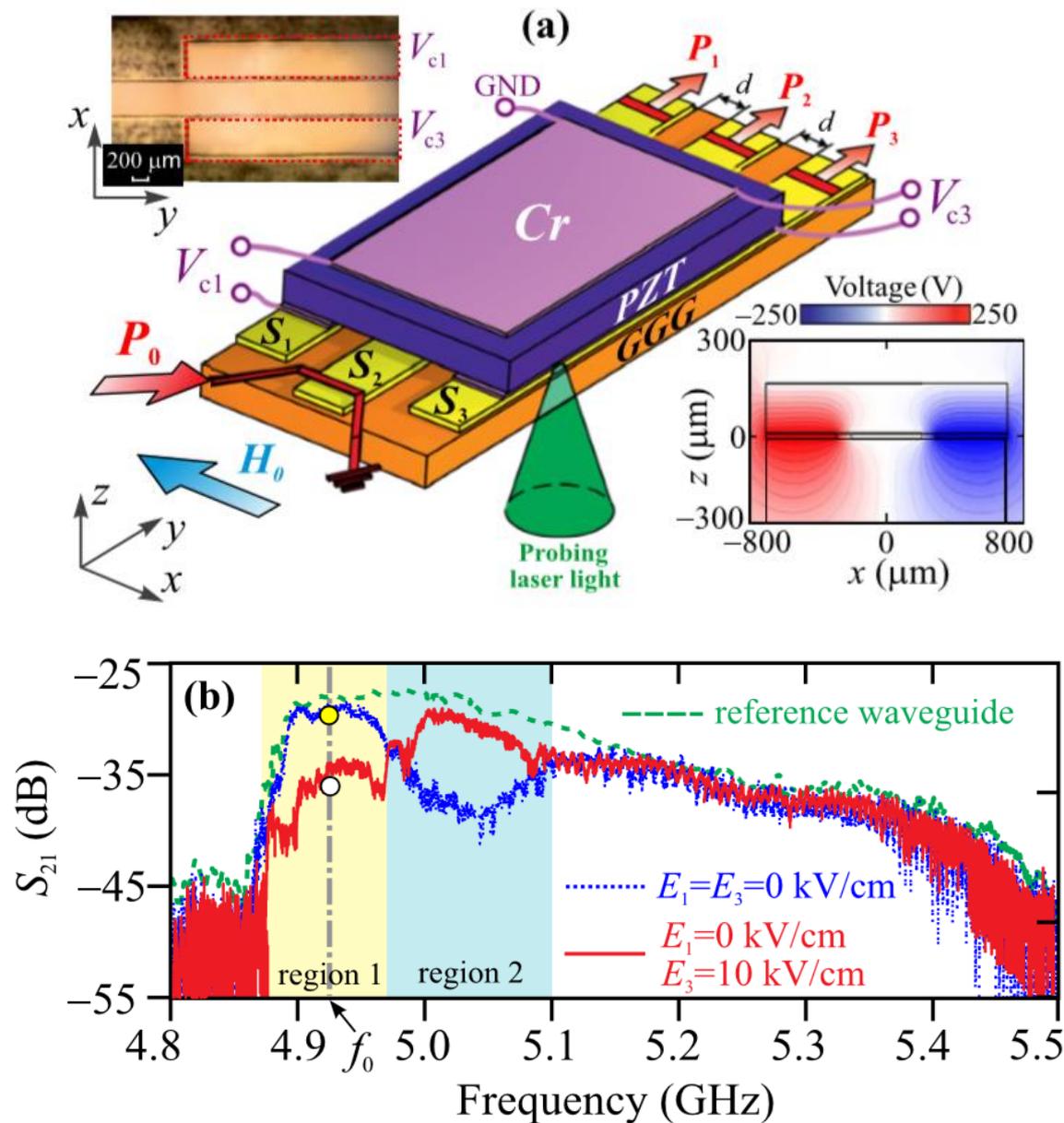
- Линии задержки
- Фазовращатели
- Частотные фильтры
- Резонаторы

Примеры реализации 1D-магنونных кристаллов

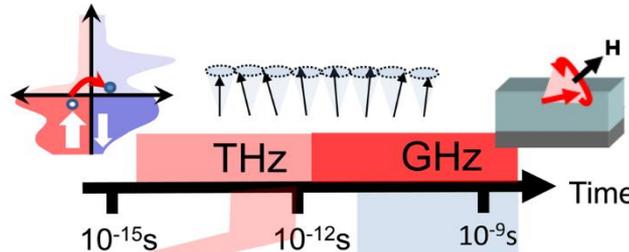
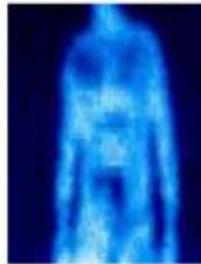


МАГНОННАЯ СТРЕЙНТРОНИКА

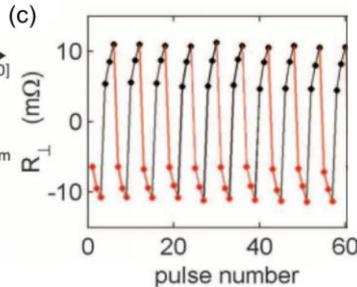
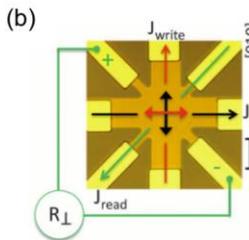
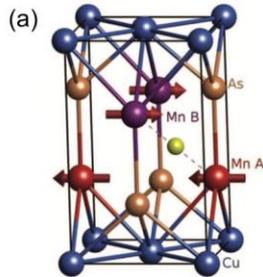
Sadovnikov,
et al. PRL.
2018



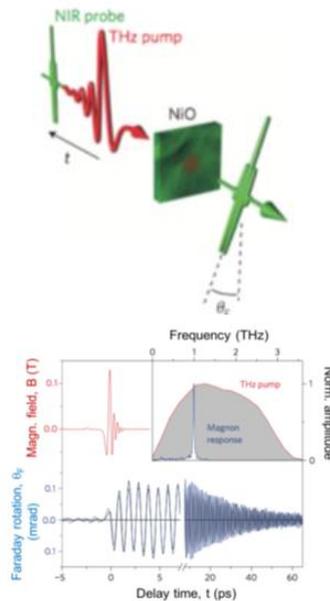
АФМ & ТГц спинтроника



Applications: security, bio scanner, pharmaceuticals and food control, mobile phone, inter-chip wireless, data bit addressing and transfer

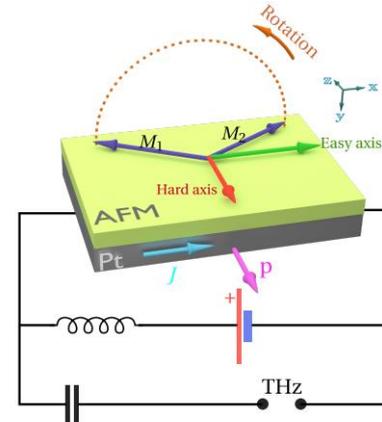


Электрическое переключение АФМ полупроводников
P. Wadley, et al. Science 2016

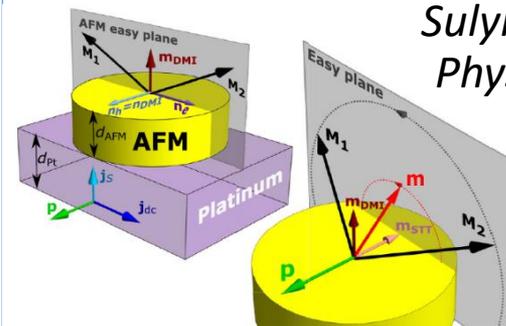


Сверхбыстрый ТГц спиновый резонанс
T. Kampfrath, et al. Nat.Phot. 2011

ТГц АФМ осцилляторы

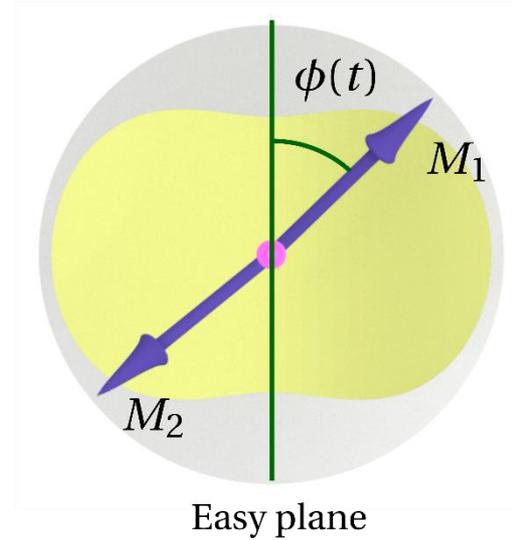
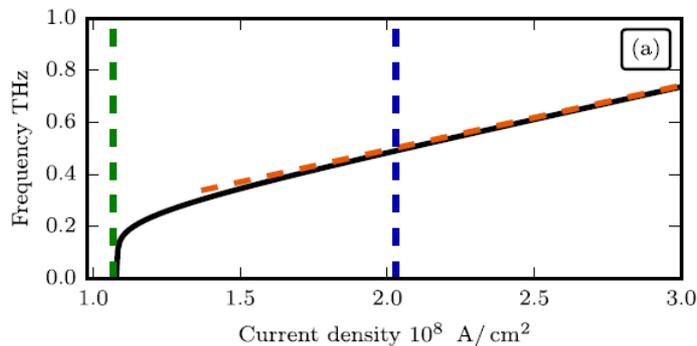
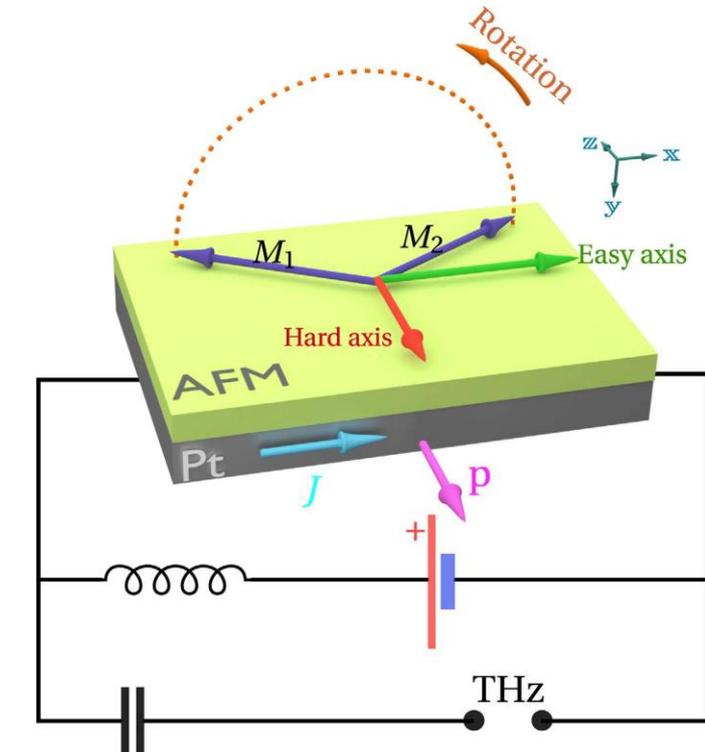


Khymyn et al. Sci. Rep. 2017



Sulymenko et al. Phys.Rev. Appl. 2017

АФМ Спин-Холл Наноосциллятор



Вектор Нееля

$$\mathbf{l} = \frac{\mathbf{M}_1 - \mathbf{M}_2}{2M_s} = \mathbf{x} \cos \phi + \mathbf{y} \sin \phi$$

Математическая модель

$$\frac{1}{\gamma H_{ex}} \ddot{\phi} + \alpha_{eff} \dot{\phi} + \frac{\gamma H_{EP}}{2} \sin 2\phi = j_s$$

R. Khymyn, et al. Sci. Rep. 2017.

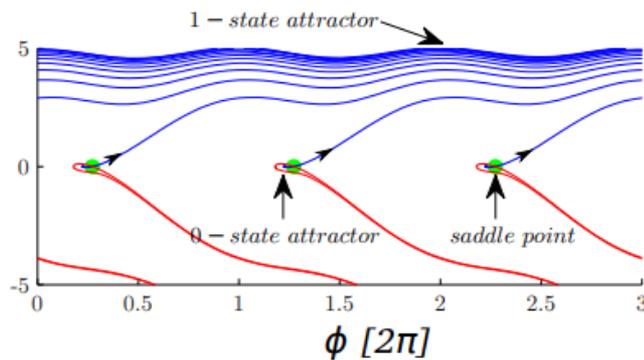
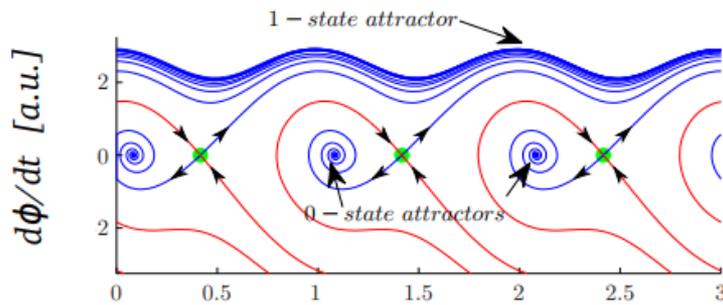
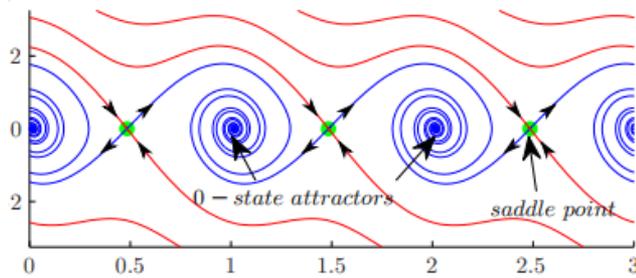
Масса

Затухание

Потенциал

Момент

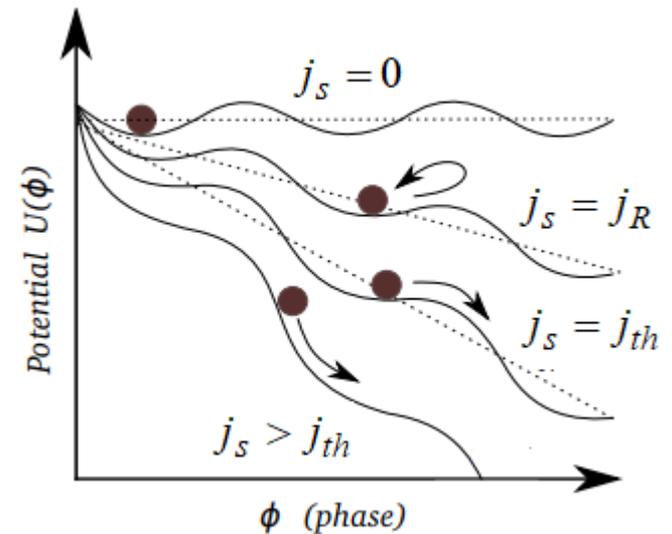
АФМ ДИНАМИКА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ТОКА



Критические токи:

$$j_R = \frac{2\alpha_{\text{eff}}}{\pi\sigma} \omega_{\text{AFMR}}$$

$$j_{th} = \frac{\omega_e}{2\sigma}$$



ВНЕШНЯЯ СИНХРОНИЗАЦИЯ

Field-like Neel spin-orbit torque (NSOT):

$$\tau_{NSOT} \sim \mathbf{l} \times \mathbf{n} \times \mathbf{j}$$

Was discovered in metallic AFMs with broken inversion symmetry

Narrow-band tunable THz detector in antiferromagnets via Néel spin-orbit torque and spin-transfer torque

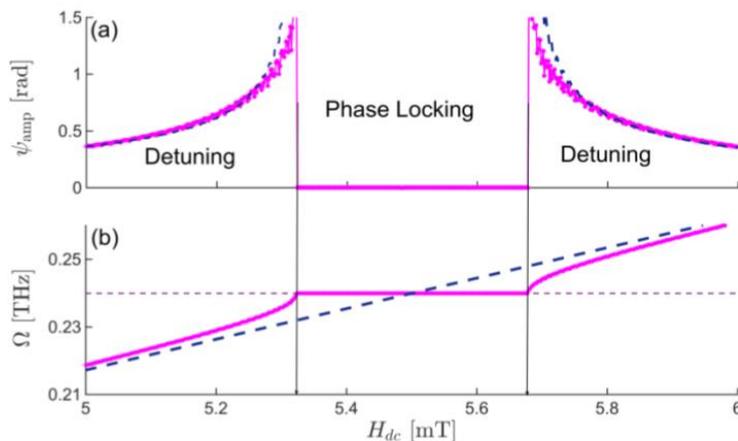
O. Gomonay,^{1,2} T. Jungwirth,^{3,4} and J. Sinova^{1,3}

¹Institut für Physik, Johannes Gutenberg Universität Mainz, D-55099 Mainz, Germany

²National Technical University of Ukraine "KPI", 03056, Kyiv, Ukraine

³Institute of Physics ASCR, v.v.i., Cukrovarnicka 10, 162 53 Praha 6 Czech Republic

⁴School of Physics and Astronomy, University of Nottingham, Nottingham NG7 2RD, United Kingdom



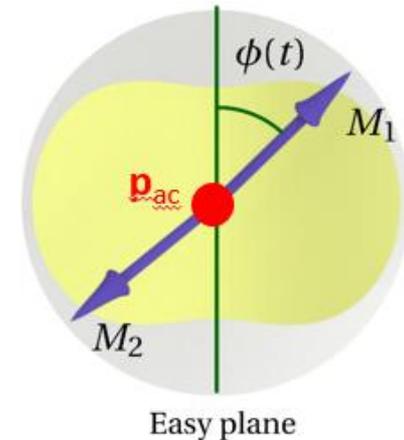
O. Gomonay, et al. PRB. 2018.

Anti-damping-like torque:

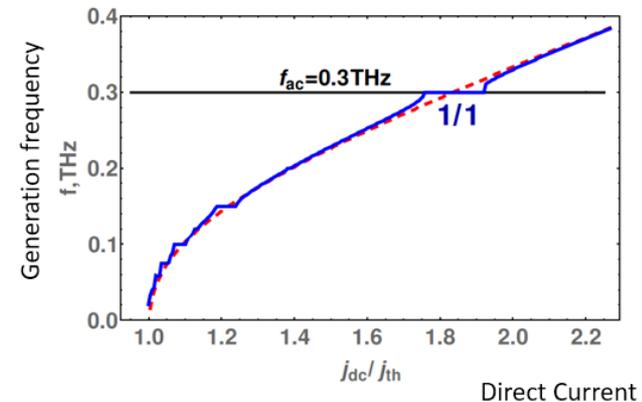
$$\tau_{STT} \sim j(\mathbf{l} \times \mathbf{p} \times \mathbf{l})$$

\mathbf{p}_{ac} along Hard-axis

$\mathbf{p}_{ac} \parallel \mathbf{p}_{dc} \parallel \mathbf{H}_{HA}$

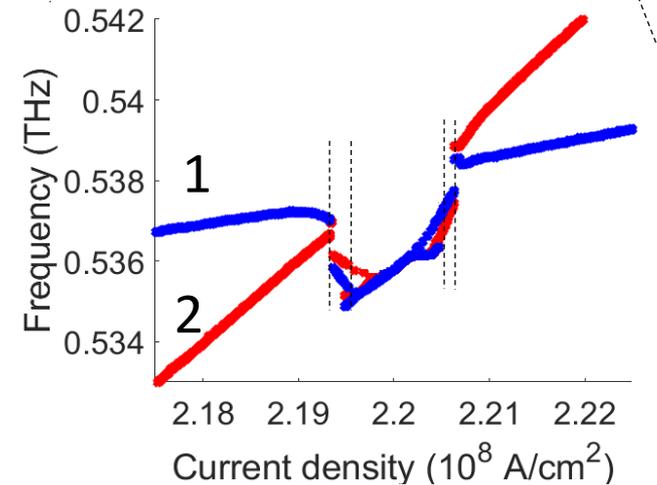
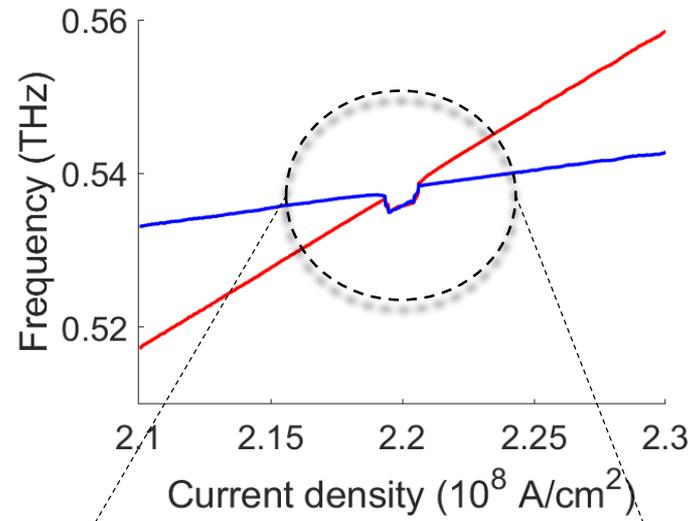
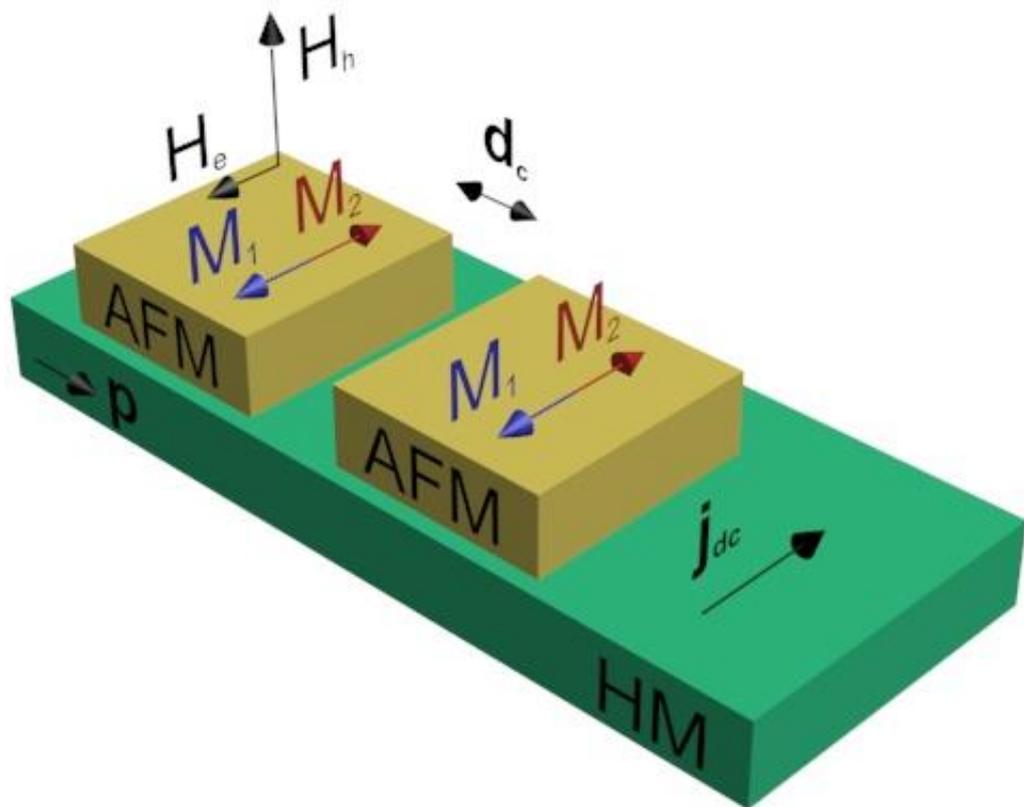


Efficient injection-locking via parallel pumping



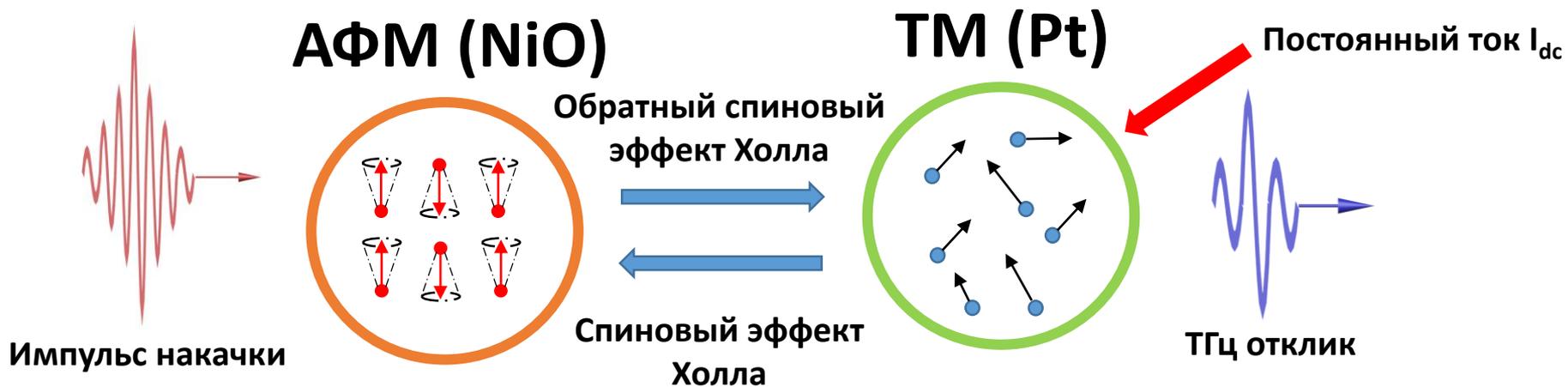
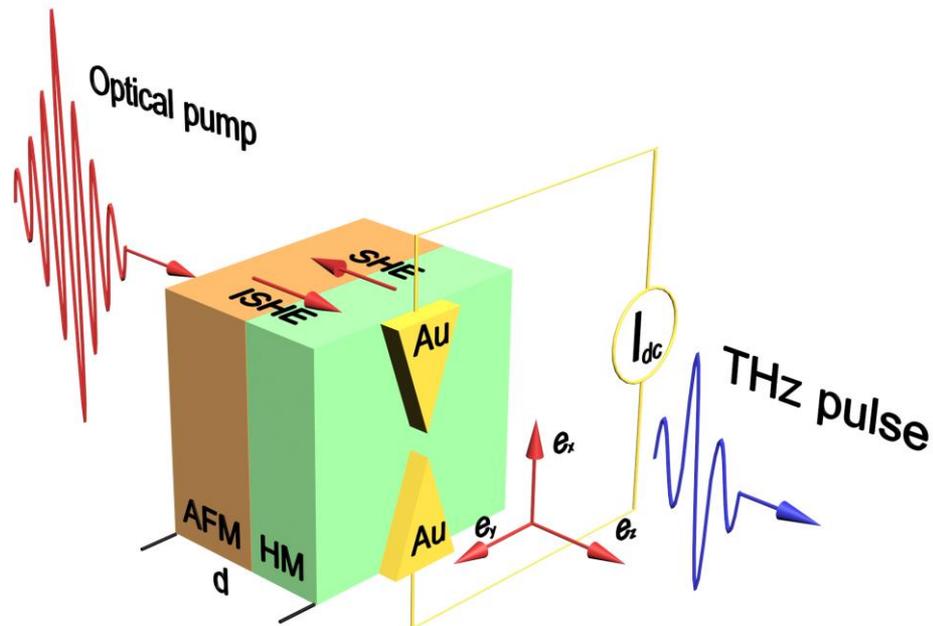
R. Khymyn, et al. INTERMAG. 2017.

Взаимная синхронизация АФМО

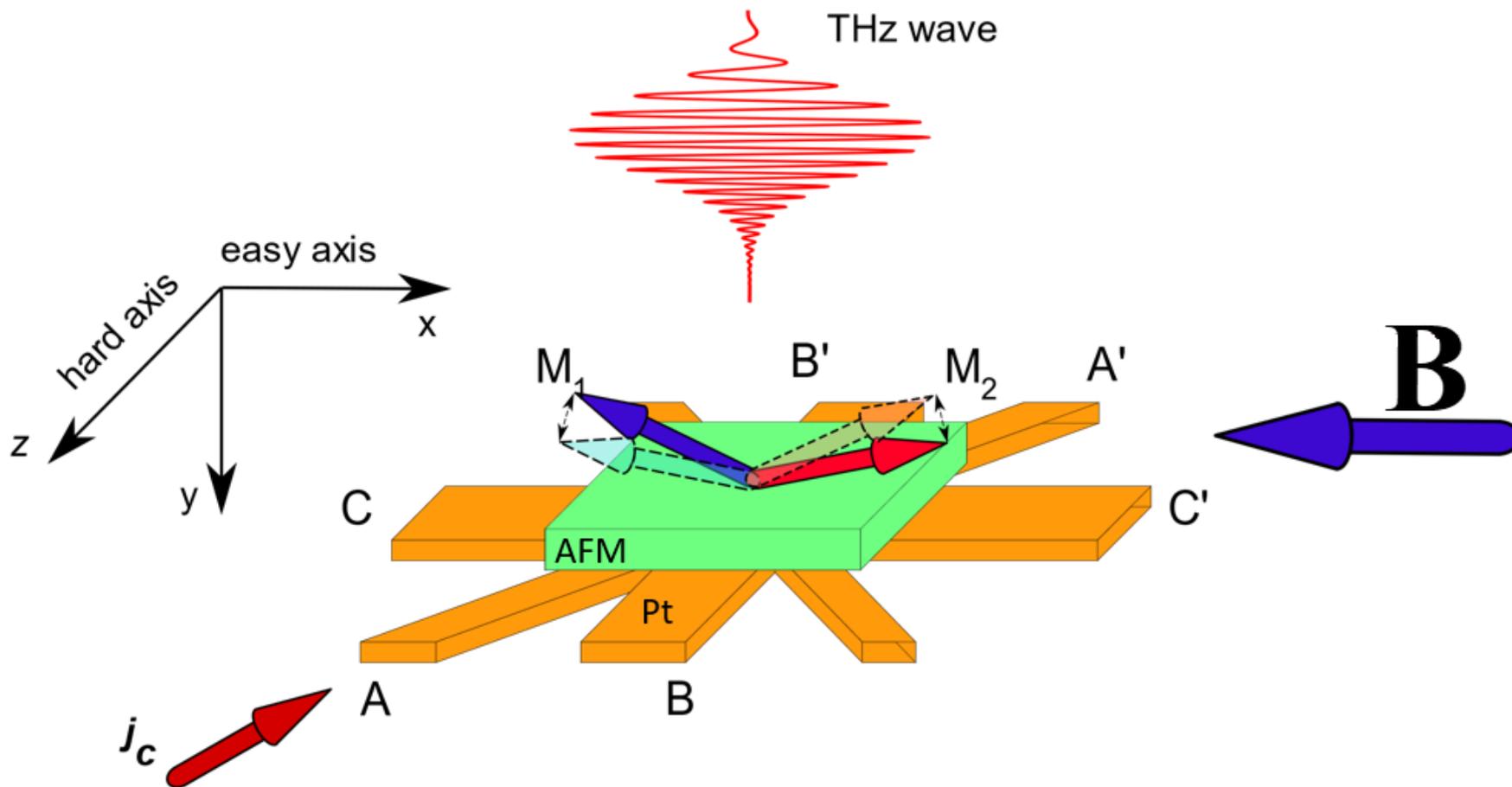


A. Safin, et al. INTERMAG. 2019.

ГЕНЕРАТОРЫ С ВНЕШНИМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ



СТРУКТУРА ДЕТЕКТОРА



ЦЕЛЬ:

Построение наноразмерного, резонансного, перестраиваемого током детектора ТГц электромагнитных волн.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Инерция

Влияние внешнего
магнитного поля

Затухание
Гильберта

Анизотропия

Перенос спина

$$\mathbf{l} \times \left[\ddot{\mathbf{l}} + \gamma^2 (\mathbf{l} \cdot \mathbf{B}_0) \mathbf{B}_0 - 2\gamma (\mathbf{l} \cdot \mathbf{B}_0) \mathbf{l} \times \dot{\mathbf{l}} + \alpha_G \omega_{ex} \dot{\mathbf{l}} + \hat{\mathbf{\Omega}} \circ \mathbf{l} + \tau \mathbf{p} \times \mathbf{l} \right] =$$

$$= \gamma \mathbf{l} \times \left[\dot{\mathbf{B}}_{em} \times \mathbf{l} + \varepsilon \mathbf{E}_{em} \times \mathbf{y} \right]$$

Детектируемый ЭМ сигнал

Уравнения движения в сферической
системе координат

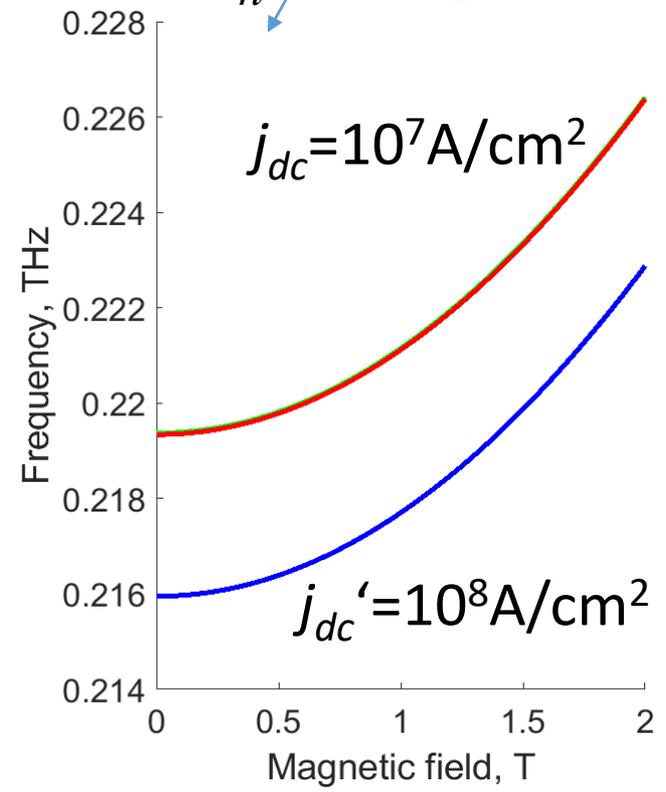
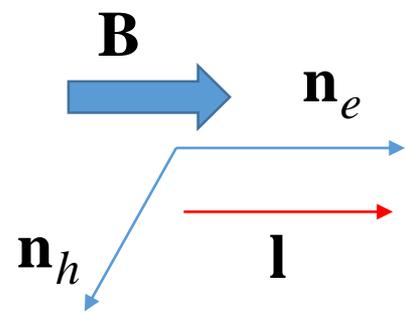
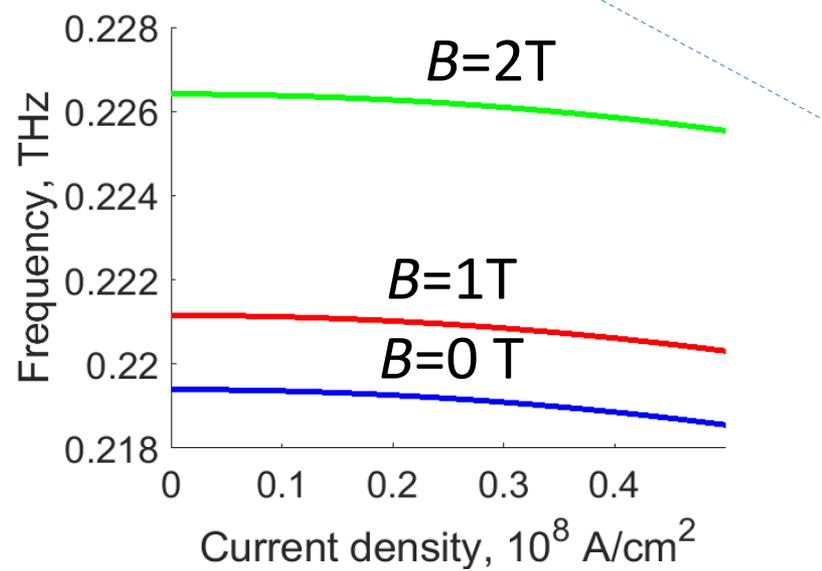
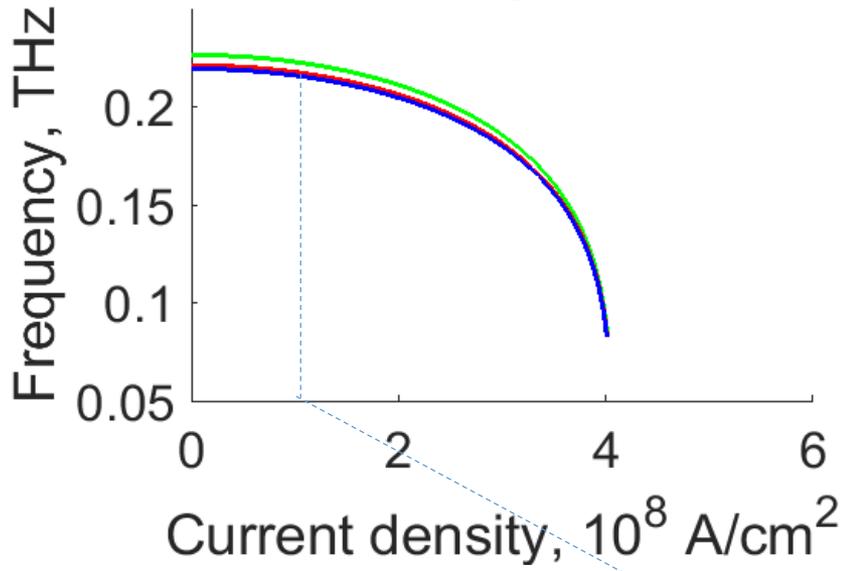
$$\frac{\ddot{\theta}}{\omega_{ex}} + \alpha \dot{\theta} - \frac{\sin 2\theta}{2} \left[\frac{\dot{\varphi}^2}{\omega_{ex}} + \omega_h + \omega_e \cos^2 \varphi \right] = \tau_{dc} p_x \sin \varphi - \frac{1}{\omega_{ex}} \left[\gamma \dot{B}_{em} \sin \varphi - \gamma \varepsilon E_{em} \cos \varphi \cos \theta \right] + f_{B1}(\theta, \varphi)$$

$$\sin^2 \theta \left[\frac{\ddot{\varphi}}{\omega_{ex}} + \alpha \dot{\varphi} + \frac{\omega_e}{2} \sin 2\varphi - \tau p_z \right] + \frac{\sin 2\theta}{2} \left[\frac{2\dot{\varphi}\dot{\theta}}{\omega_{ex}} - \tau p_x \cos \varphi \right] = -\frac{1}{\omega_{ex}} \left[\gamma \dot{B}_{em} \cos \varphi \frac{\sin 2\theta}{2} + \gamma \varepsilon E_{em} \sin \varphi \sin \theta \right] + f_{B2}(\theta, \varphi)$$

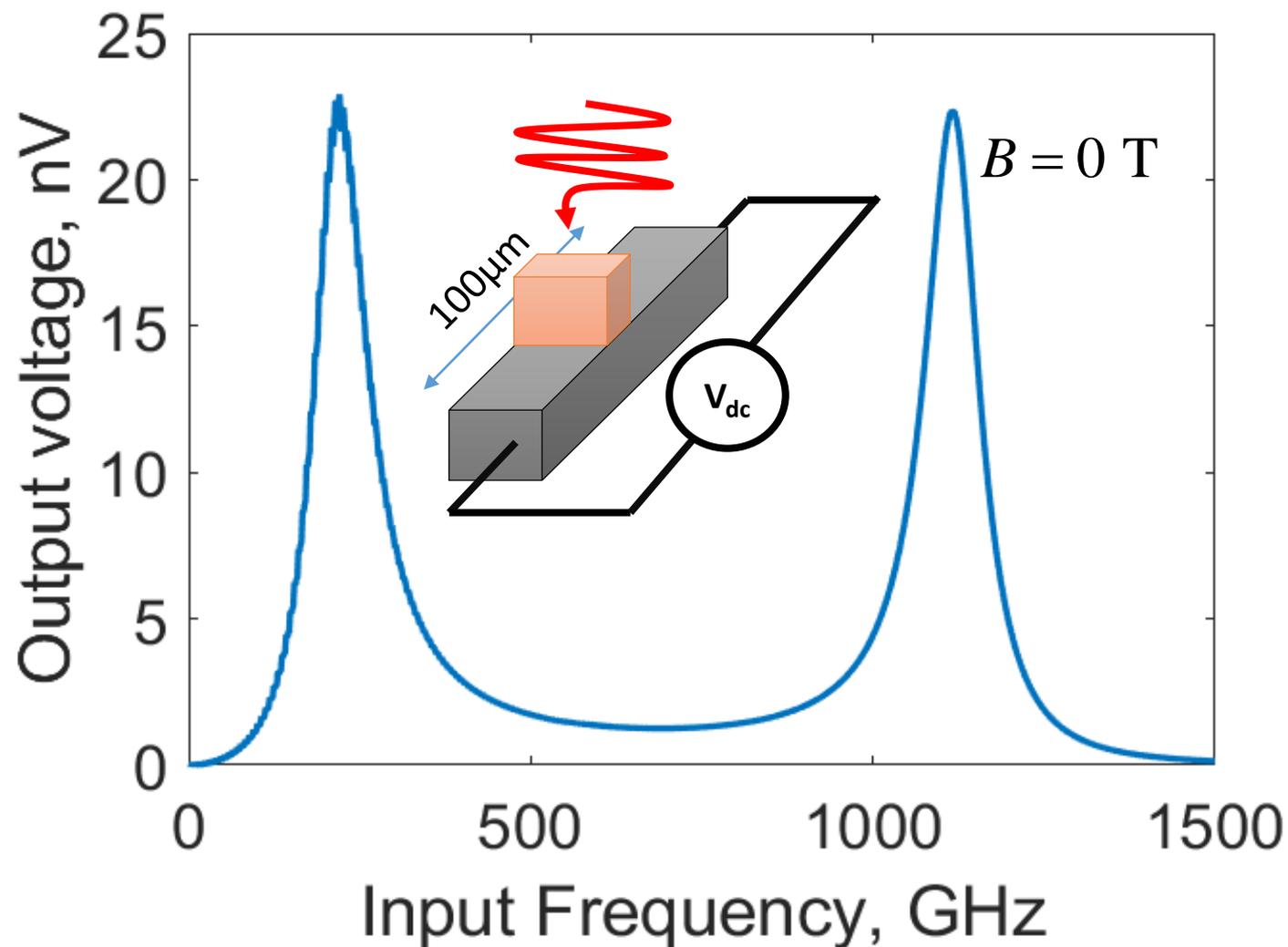
$$f_{B1}(\theta, \varphi) = \frac{\gamma^2}{\omega_{ex}} \left[B_z \cos \theta + (B_x \cos \varphi + B_y \sin \varphi) \sin \theta \right] \left[B_z \sin \theta - (B_x \cos \varphi + B_y \sin \varphi) \cos \theta \right] - \frac{2\gamma}{\omega_{ex}} (\mathbf{l} \cdot \mathbf{B}) \sin \theta \cdot \dot{\varphi}$$

$$f_{B2}(\theta, \varphi) = \frac{\gamma^2}{\omega_{ex}} \sin \theta \left[B_x \sin \varphi - B_y \cos \varphi \right] \left[B_z \cos \theta + (B_x \cos \varphi + B_y \sin \varphi) \sin \theta \right] + \frac{2\gamma}{\omega_{ex}} (\mathbf{l} \cdot \mathbf{B}) \sin \theta \cdot \dot{\theta}$$

НОРМАЛЬНЫЕ ЧАСТОТЫ АФМ КВАЗИ-ФМР РЕЗОНАНС

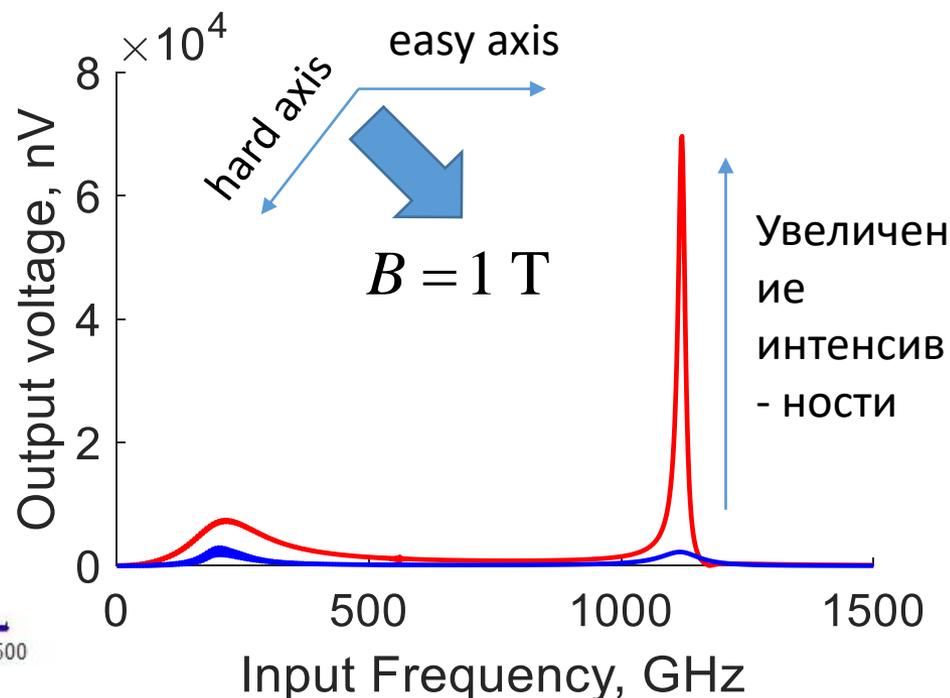
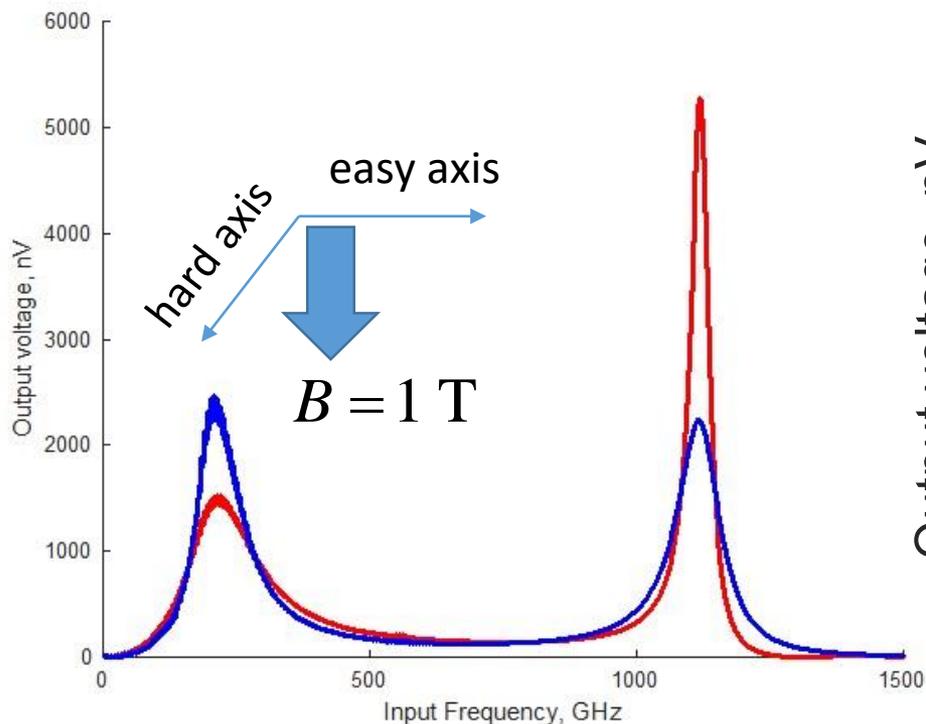


ВЫПРЯМЛЕННОЕ НАПРЯЖЕНИЕ



ВЫПРЯМЛЕННОЕ НАПРЯЖЕНИЕ

Изменение угла внешнего магнитного поля позволяет добиваться увеличения интенсивности мод



МОЖНО добиваться увеличения мощности в резонансе путем подбора величины и направления поля подмагничивания!

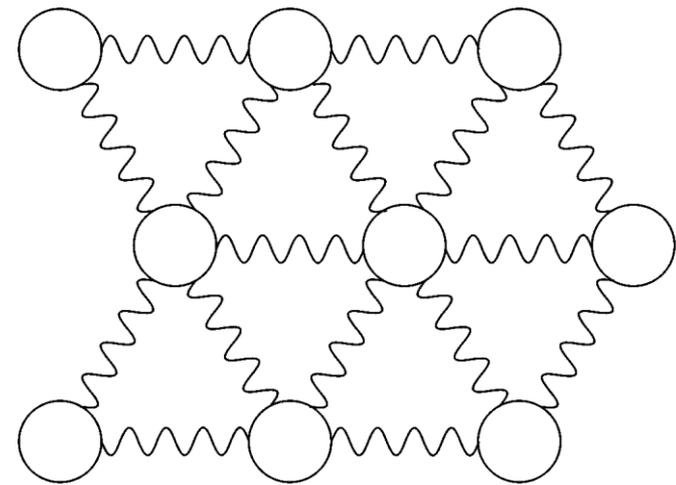
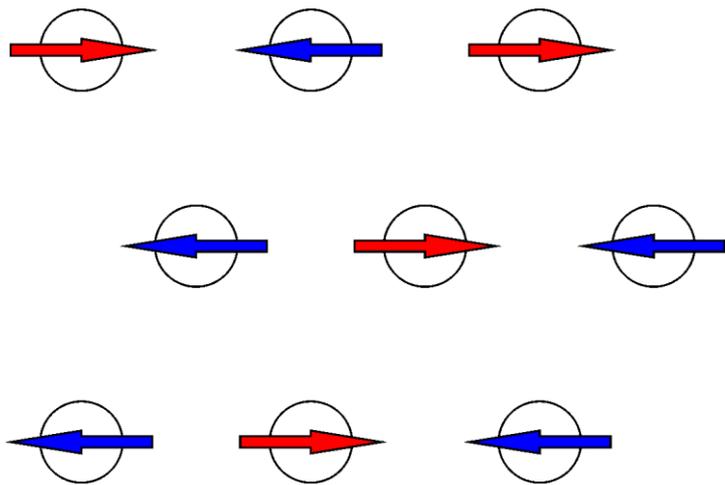
МАГНИТОУПРУГОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

Магнитоупругая связь



Магнитная подсистема

Упругая подсистема



Магнитоупругая энергия

$$E^{ME} = R_{ijkl} M_i M_j e_{kl}$$

Тензор деформаций

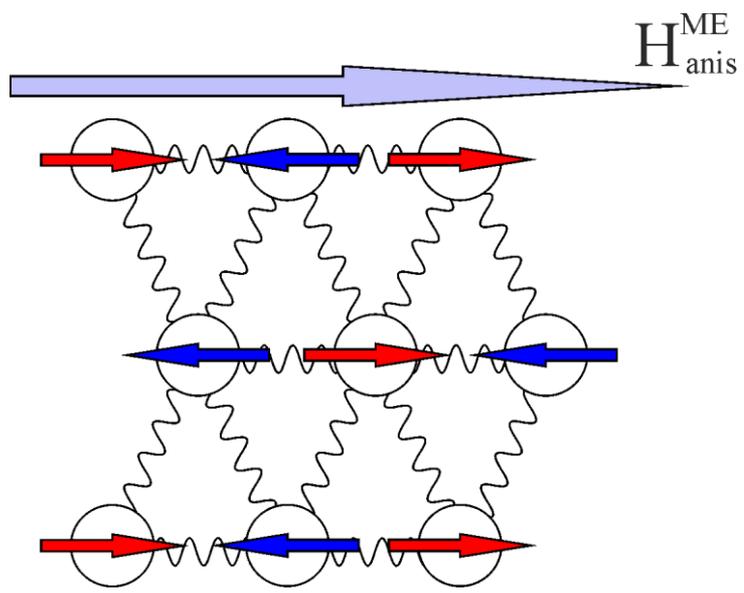
Тензор коэффициентов

Вектор намагниченности

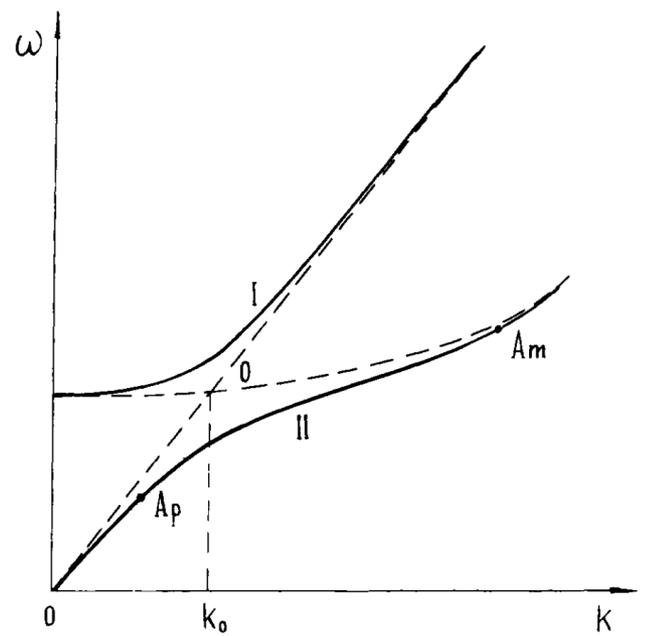
МАГНИТОУПРУГОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

Вызванные явления:

1. Пьезомагнитные эффекты



2. Магнитоупругие волны

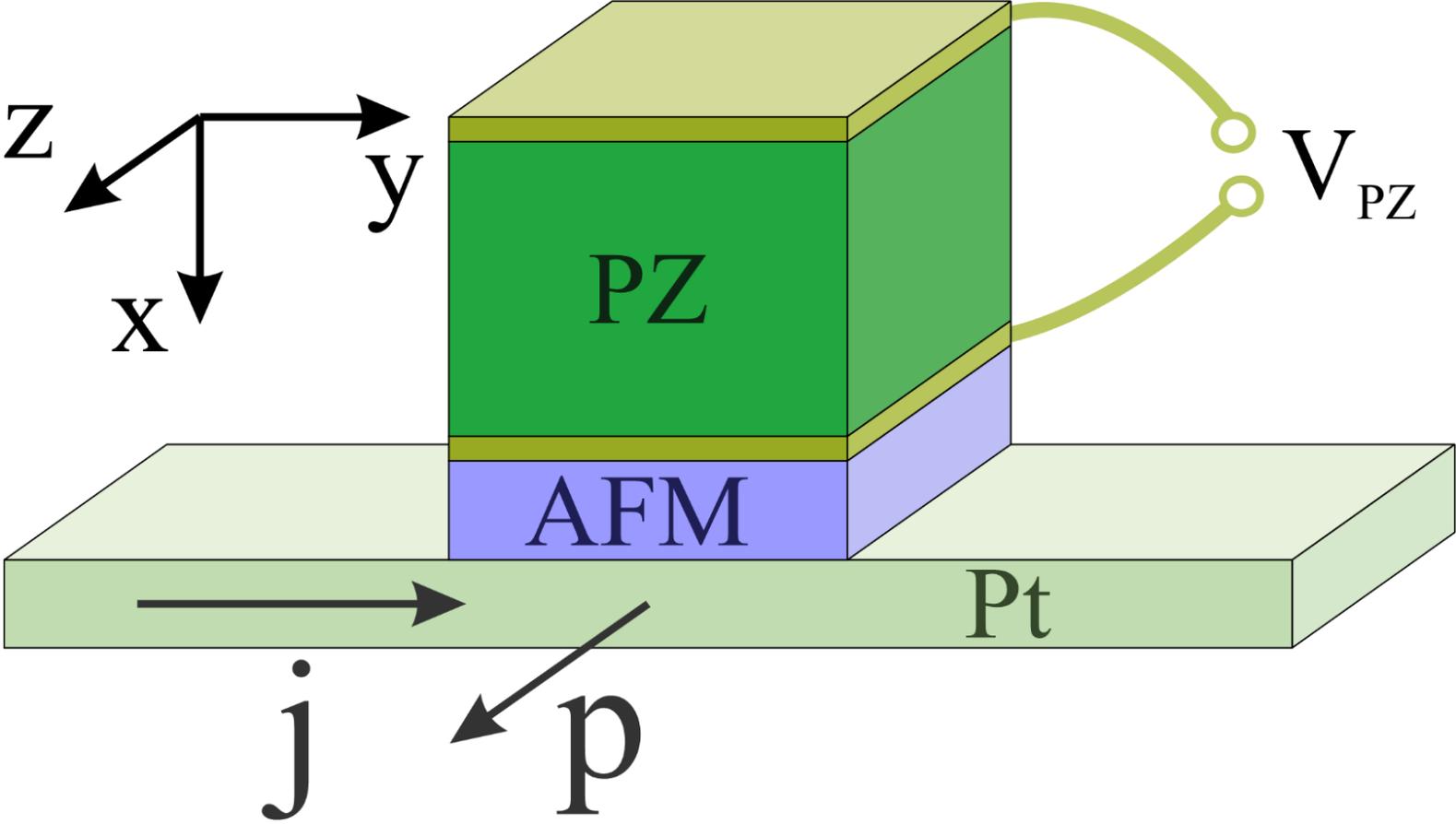


Дисперсии связанных магнонов и фононов

Магнитоупругая энергия $\rightarrow E^{ME} = R_{ijkl} M_i M_j e_{kl} \leftarrow$ Тензор деформаций

Тензор коэффициентов \rightarrow R_{ijkl} \leftarrow Вектор намагниченности $M_i M_j$

ИССЛЕДУЕМАЯ СТРУКТУРА



МАГНИТНАЯ ДИНАМИКА

Уравнение динамики для исследуемой системы

$$\frac{\ddot{\phi}}{\omega_{ex}} + \alpha \dot{\phi} + \omega_e \frac{\sin 2\phi}{2} - \sigma j = 0$$

ϕ - азимутальный угол намагниченности

ω_{ex} = гиромагнитное отношение \times обменное поле

α - параметр затухания

ω_e = гиромагнитное отношение \times поле анизотропии

σ - коэффициент вклада в динамику от тока

j - плотность тока в платине

Магнитоупругое взаимодействие позволяет управлять величиной ω_e

РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛЕНИЙ

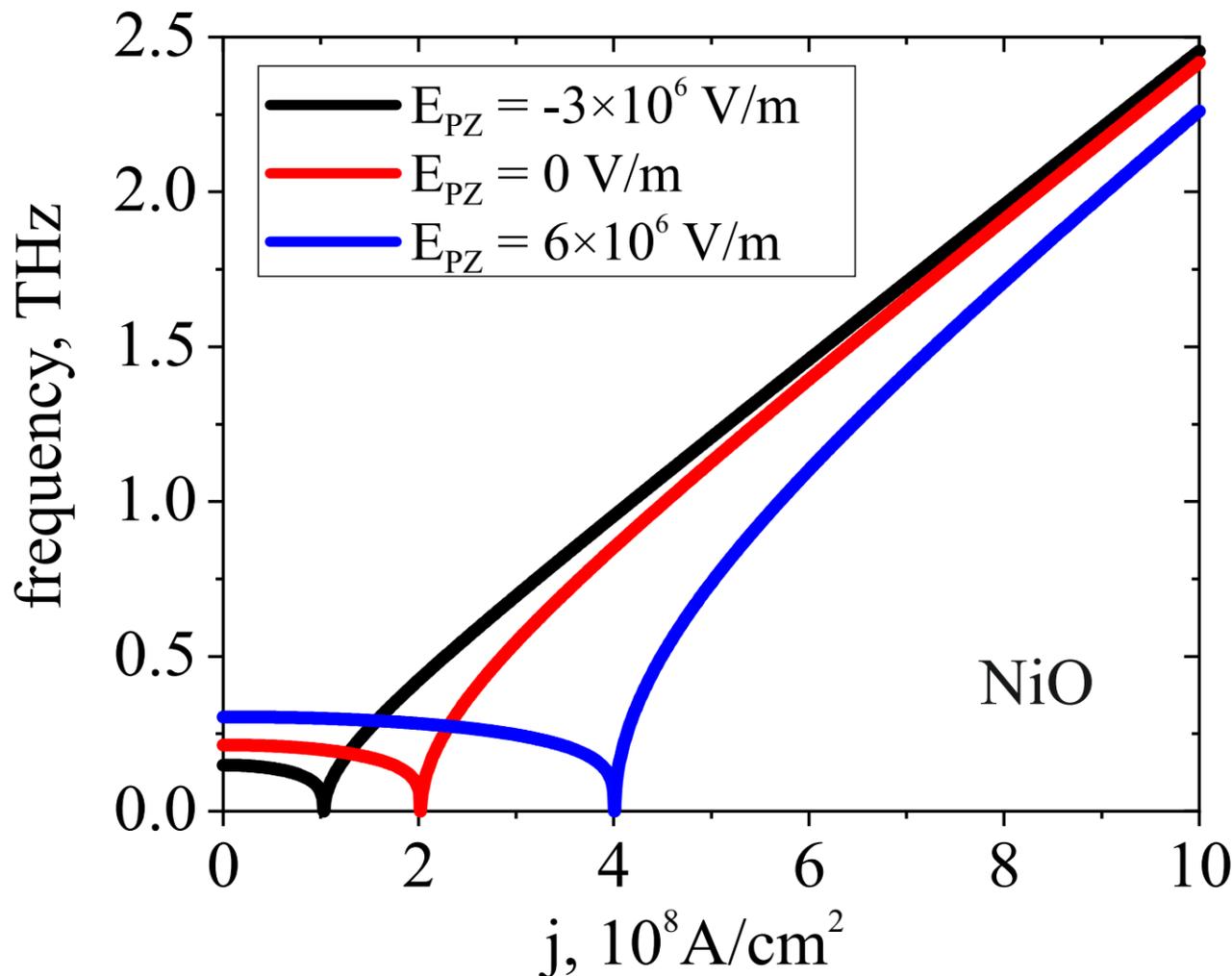


График зависимости частоты колебаний от движущего тока при разных значениях поля E_{PZ}

РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛЕНИЙ

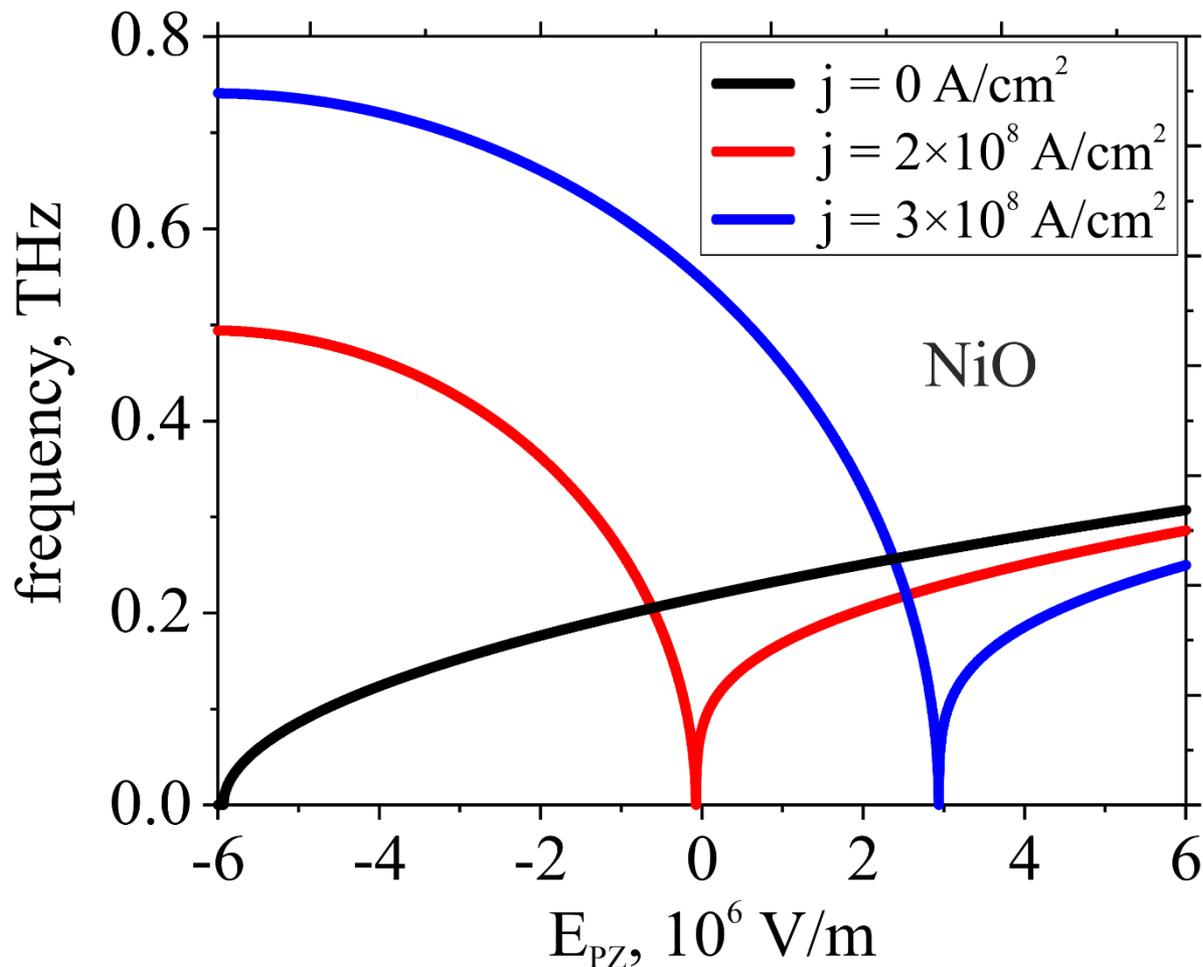
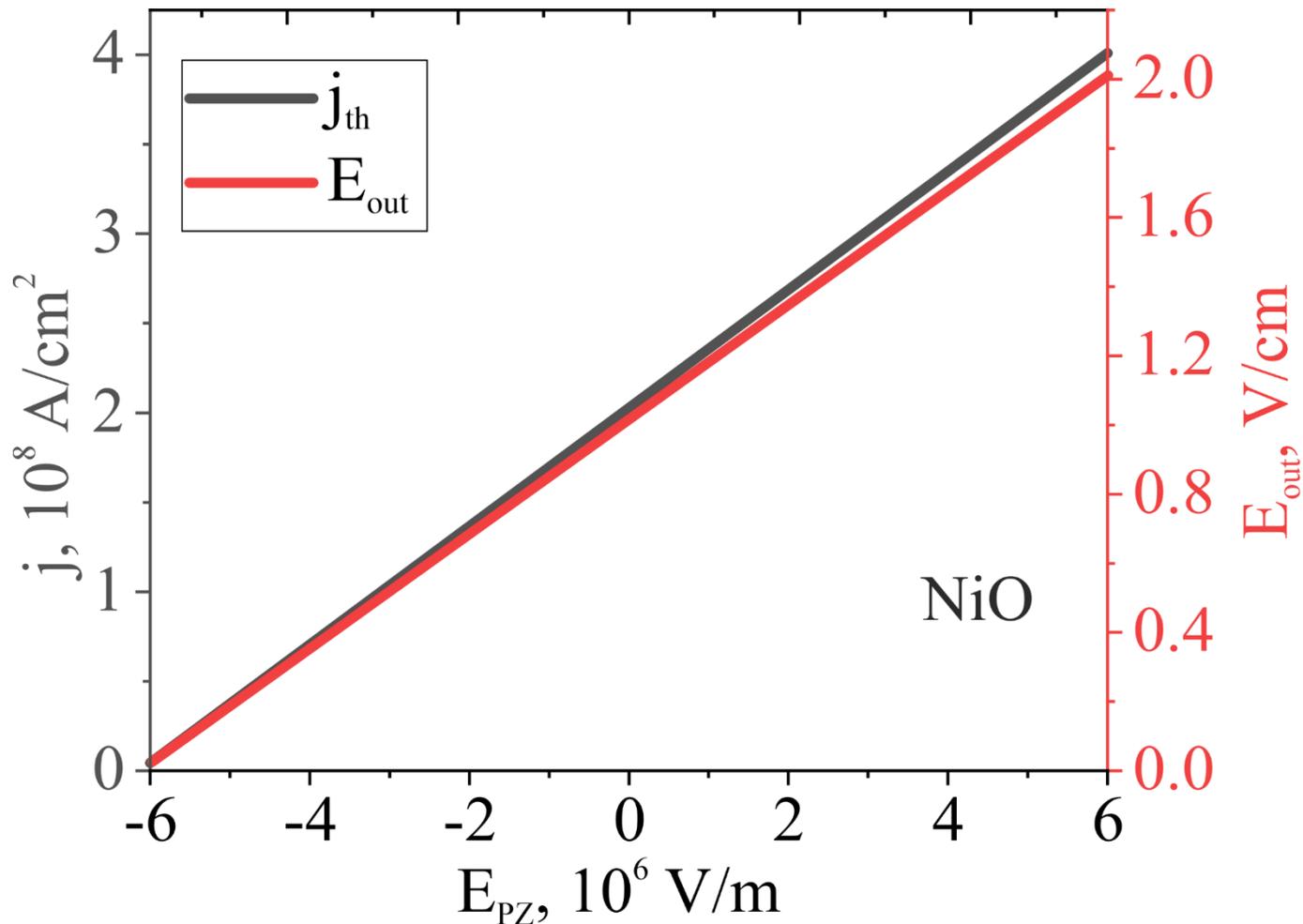


График зависимости частоты колебаний от поля E_{PZ} при разных токах

РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛЕНИЙ



Зависимость порогового тока (левая ось) и амплитуды генерации (правая ось) от поля E_{pZ} на пьезоэлектрике

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- **Использование упругих деформаций позволяет менять эффективное поле анизотропии антиферромагнетика, приводя к контролю частоты колебаний АФМ осцилляторов и детекторов терагерцового диапазона частот.**
- **Подстройка частоты колебаний детектора терагерцовых колебаний может осуществляться изменением подведенного напряжения на пьезоэлектрик (без использования постоянного спин-поляризованного тока высокой плотности).**

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ

2. Связь поля и анизотропии

1. Пьезоэлектрический эффект $e_{ij}^{PZ} = d_{kij} E_k$

2. Идеальный акустический контакт на границе PZ-AFM,
Свободная граница Pt-AFM и закон Гука :

$$e_{ij}^{IF} = P_{ik} e_{kl}^{PZ} P_{lj} = P_{ik} e_{kl} P_{lj},$$

$$\sigma_{ij} n_i = 0,$$

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} e_{kl}.$$

P_{ij} – проектор на границу PZ-AFM

→ $e_{ij} = G_{ijkl} d_{mkl} E_m$ - уравнение деформации в антиферромагнетике

G_{ijkl} зависит от взаимной ориентации пьезоэлектрика и антиферромагнетика и от их материальных констант.

2. Связь поля и анизотропии

Индукцированное магнитоупругое поле:

Из выражения для магнитоупругой энергии

$$E^{ME} = R_{ijkl} M_i M_j e_{kl}$$

Магнитоупругое поле можно найти как

$$\begin{aligned} B_i^{ME} &= -\frac{\partial E^{ME}}{\partial M_i} = -2R_{ijkl} M_j e_{kl} \\ &= -2R_{ijkl} M_j G_{klmn} d_{smn} E_s = K_{ijs} M_j E_s. \end{aligned}$$

Вид собственного поля анизотропии:

$$B_i^e = -\frac{B^e}{M_s} n_i^e n_j^e M_j$$

Возможно так подобрать K_{ijs} ,
 что B_i^{ME} будет сонаправлен с B_i^e .