



# Антиферромагнитная спинтроника: от модели маятника до нейроморфной динамики и детектирования ТГц

**<sup>1,2</sup>Ансар Ризаевич Сафин**

кандидат технических наук, доцент

<sup>1</sup>Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

<sup>2</sup>Национальный исследовательский университет «МЭИ»

*arsafin@gmail.com*



# ЛАБОРАТОРИЯ СПИН-ФОТОНИКИ



А.И. Кириллюк



С.А. НИКИТОВ



Институт радиотехники и  
электроники им. В.А.  
Котельникова РАН  
*Москва, Россия*



Лаборатории FELIX  
университета Неймегена  
*Неймеген, Нидерланды*

# СОДЕРЖАНИЕ

- **Основы спинтроники (на примере спинтронных осцилляторов)**
  - **Эффекты ГМС/ТМС, эффекты переноса спина, спиновый эффект Холла**
  - **СТНО и СХНО СВЧ диапазона: мощность и ширина спектра**
  - **Перспективы спинтронных осцилляторов и детекторов**
- **Антиферромагнитная спинтоника**
  - **Перспективы применения АФМ для ТГц электроники**
  - **Спинтронные АФМ осцилляторы и детекторы**
  - **Внешняя синхронизация АФМ СО**
  - **Взаимная синхронизация АФМ СО**
  - **Нейроморфные сети СО**

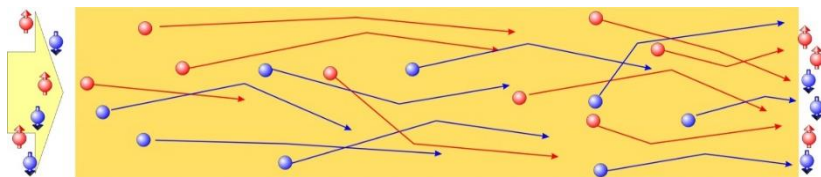
# ЭЛЕКТРОНИКА vs СПИНТРОНИКА

*Электроника* → *Заряд*

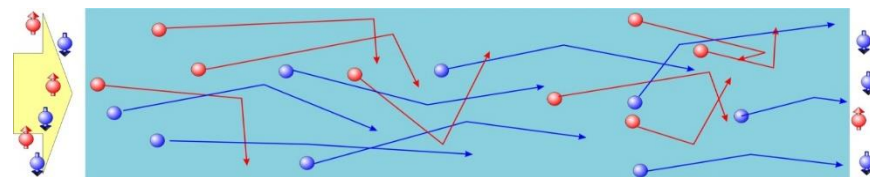
*Основана на переносе заряда носителей электрического тока.*

*Спинтроника* → *Спин*

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



**VS**

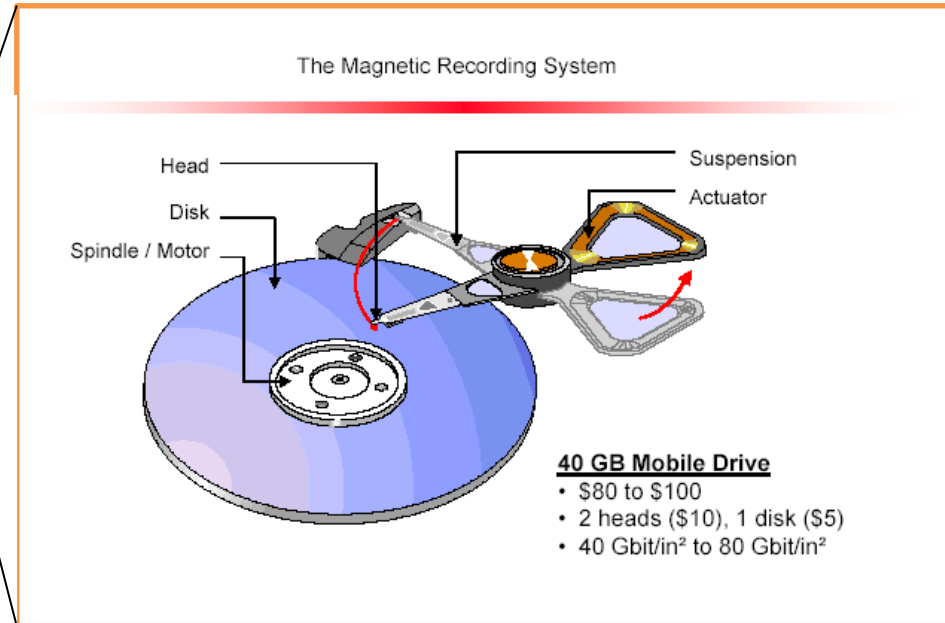
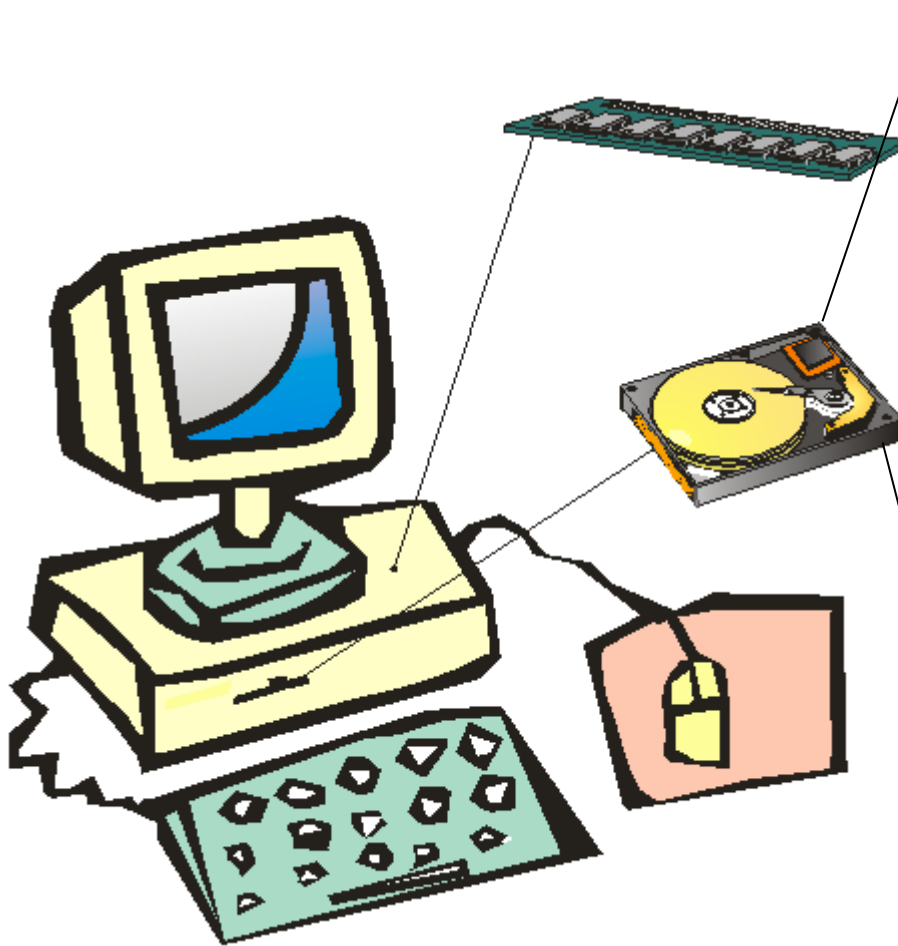


В немагнитном проводнике электроны рассеиваются независимо от направления спина. От среднего количества рассеяния электронов зависит электрическое сопротивление проводника.

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

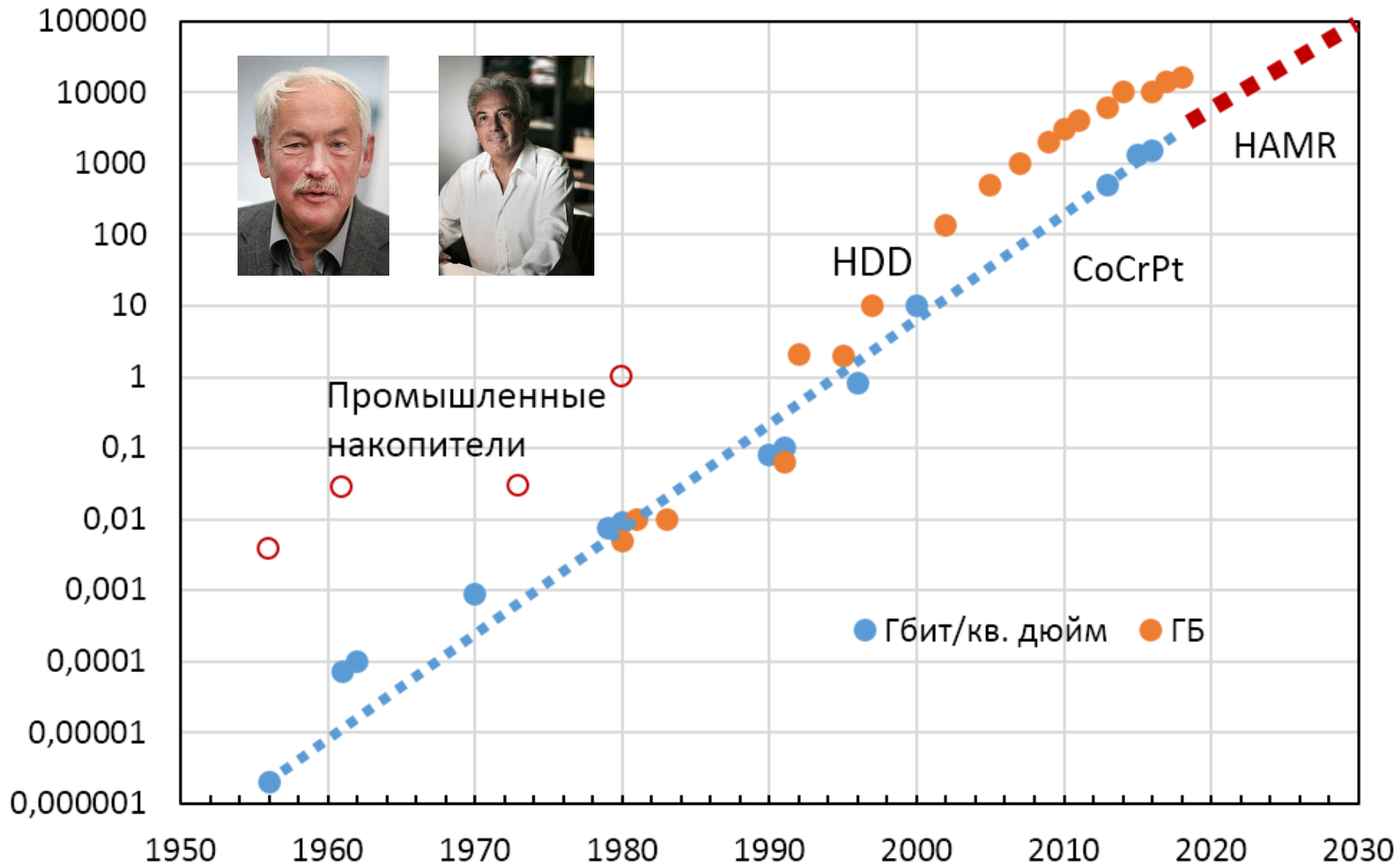
# ГДЕ МЫ ВСТРЕЧАЕМ СПИНТРОНИКУ?

*Во всех персональных компьютерах!*



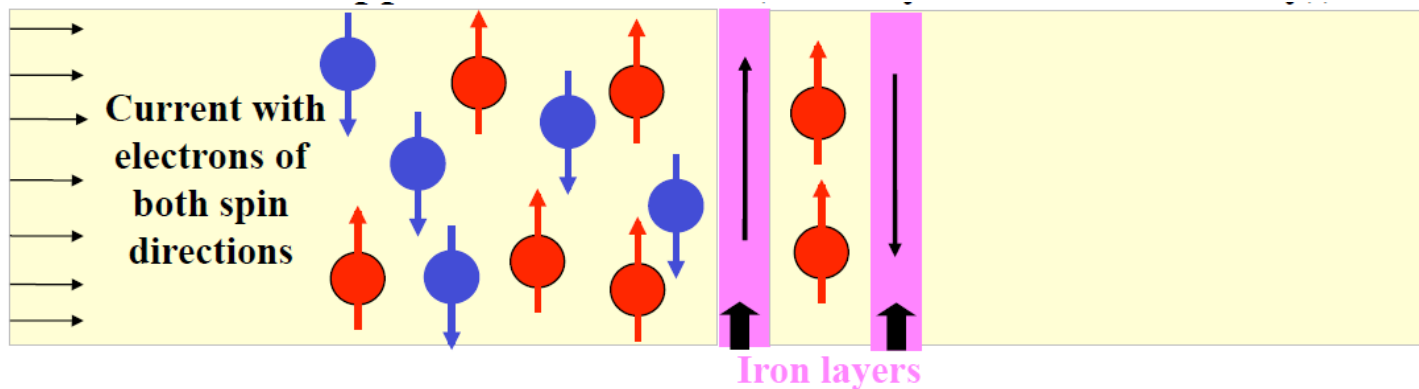
- *Гигантское магнетосопротивление (ГМС - GMR)*
- *Эффект переноса спина (spin transfer torque)*

# ПЛОТНОСТЬ ЗАПИСИ ИНФОРМАЦИИ

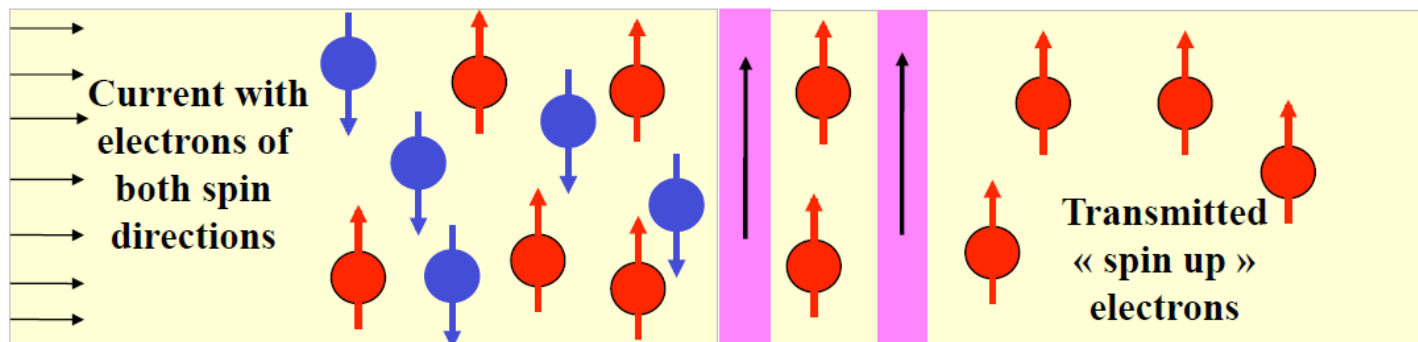


# ГИГАНТСКОЕ МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЕ

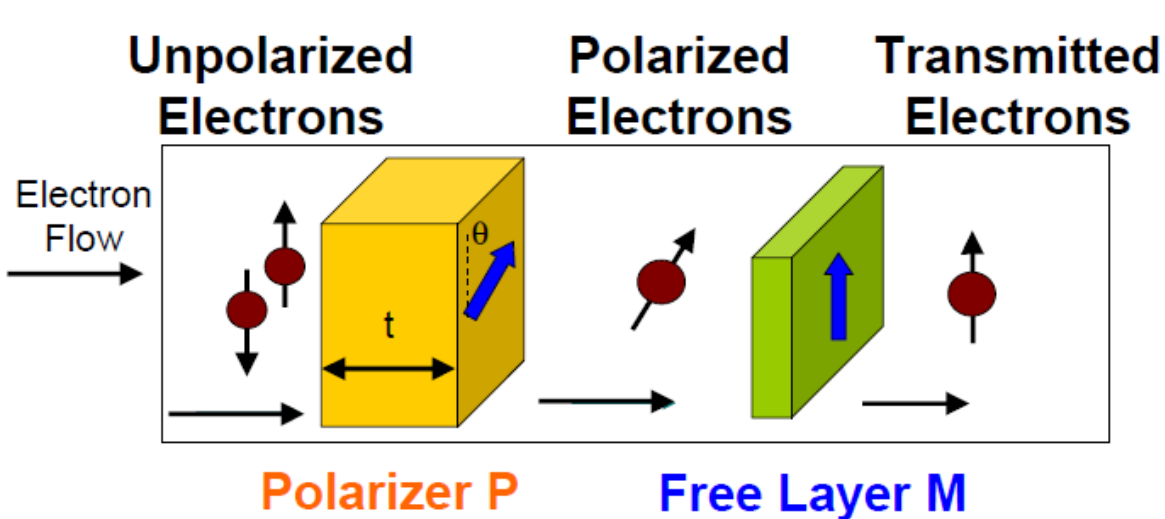
- Ферромагнитные слои с противоположными направлениями намагниченностей слоев останавливают электроны обоих направлений спина.



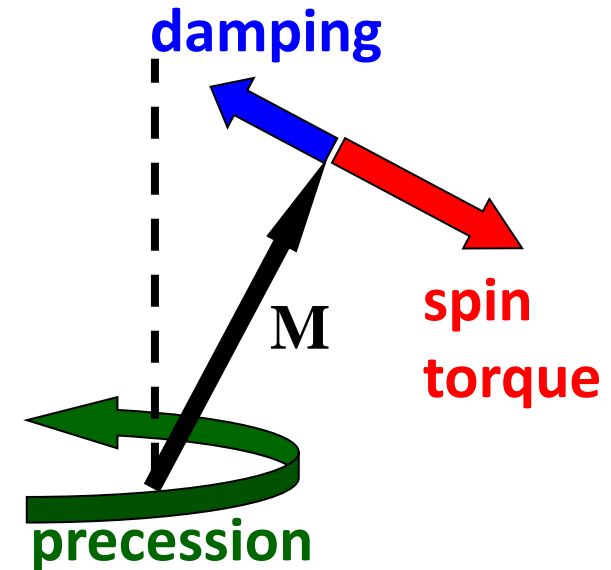
- Ферромагнитные слои с коллинеарными направлениями намагниченностей слоев «пропускают» электроны со спином-вверх.



# ЭФФЕКТ ПЕРЕНОСА СПИНА



J.C. Slonczewski, L. Berger (1996)



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

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

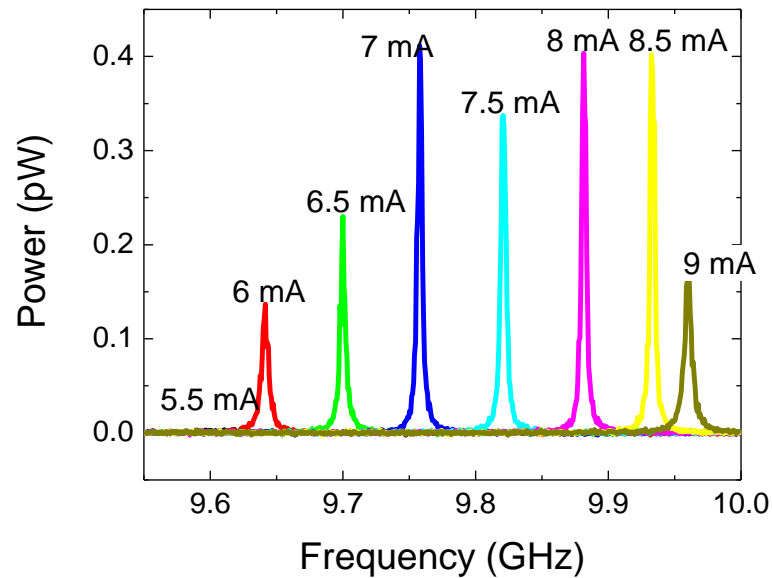
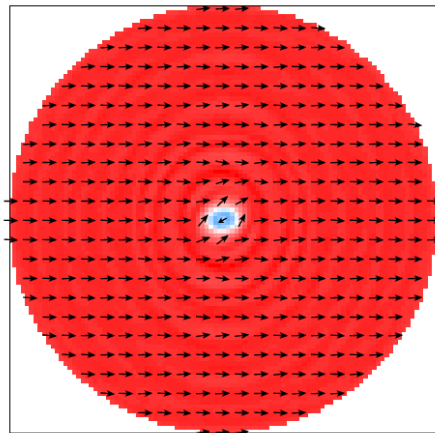
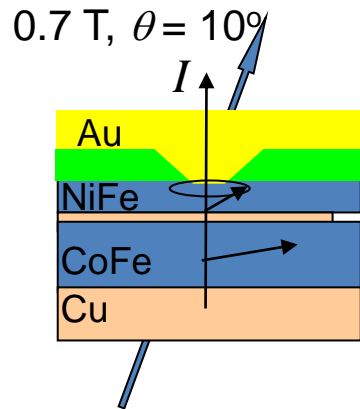
прецессия

затухание

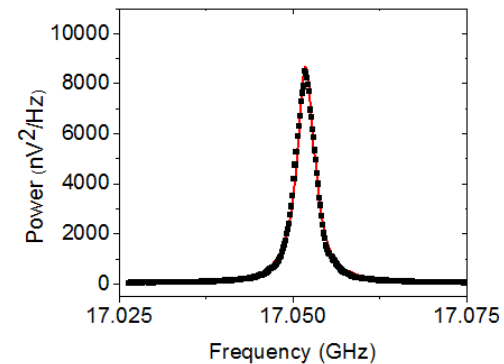
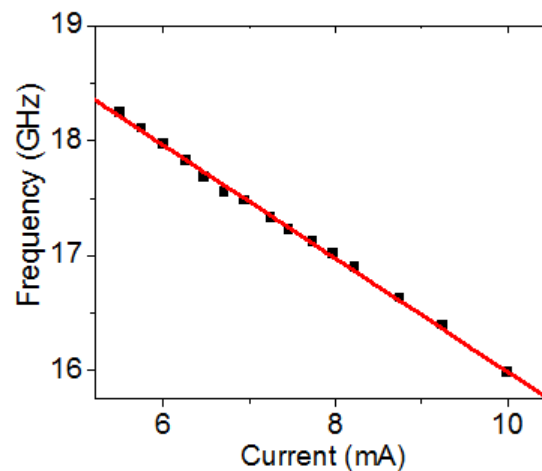
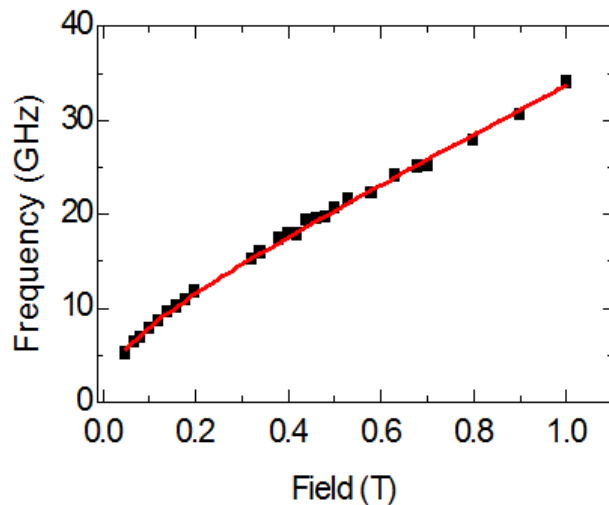
Перенос крутильного момента (spin torque)



# СПИН-ТРАНСФЕРНЫЕ НАНООСЦИЛЛЯТОРЫ



Tunable  
High Q  
oscillator  
(2 GHz –  
100 GHz)



# КОНСТРУКЦИИ СТНО

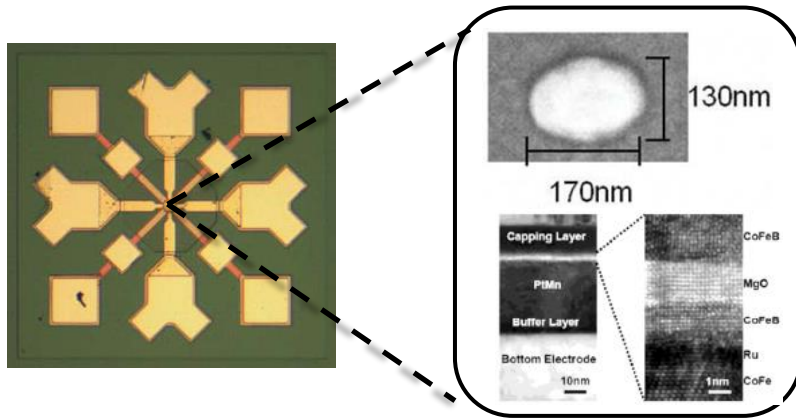


Рис.1. Микрофотография СТНО

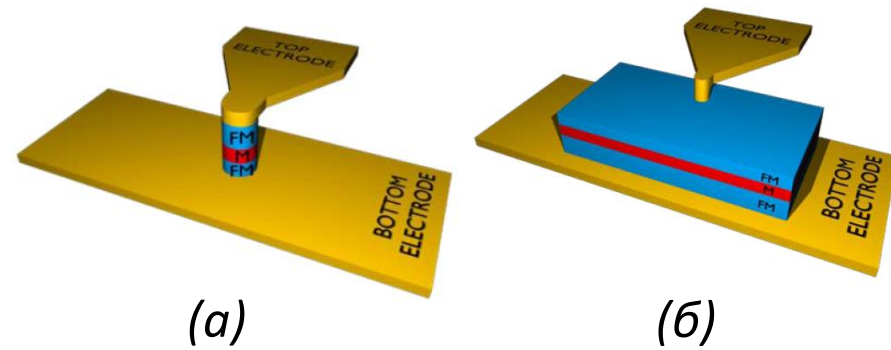


Рис.2. Конструкция СТНО: наностолб (а) и наноконтакт (б)

**Важная особенность СТНО: колебательная система, активный элемент и управитель частоты находятся в одном блоке!**

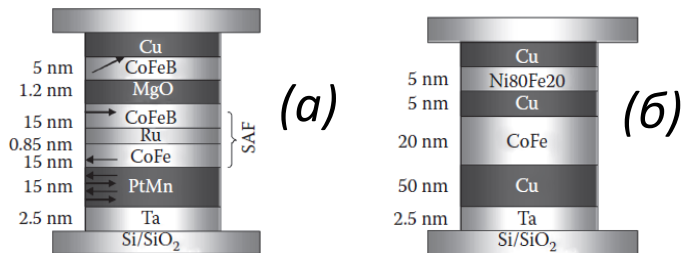


Рис.3. Структура слоев СТНО

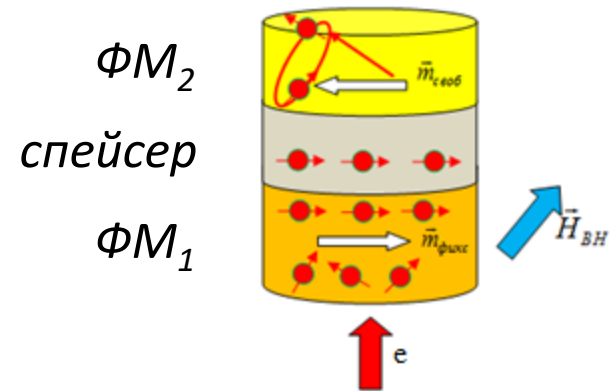
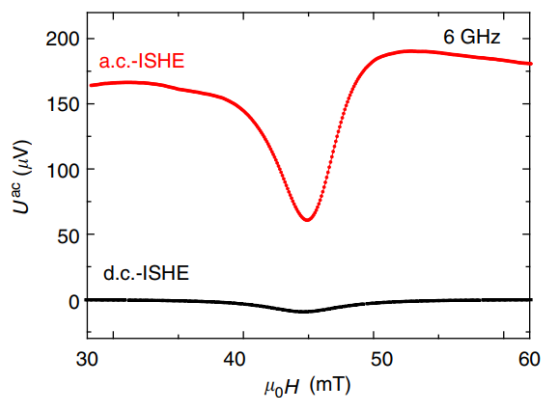
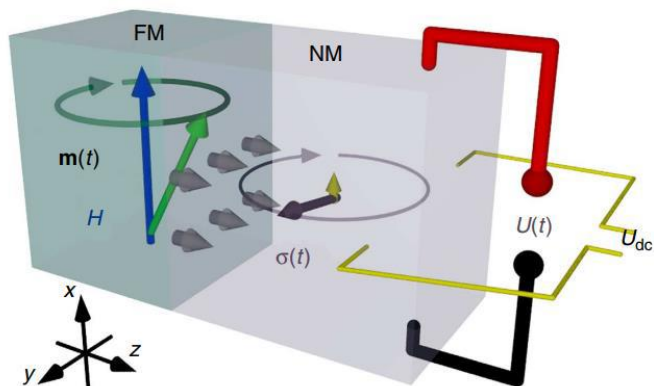


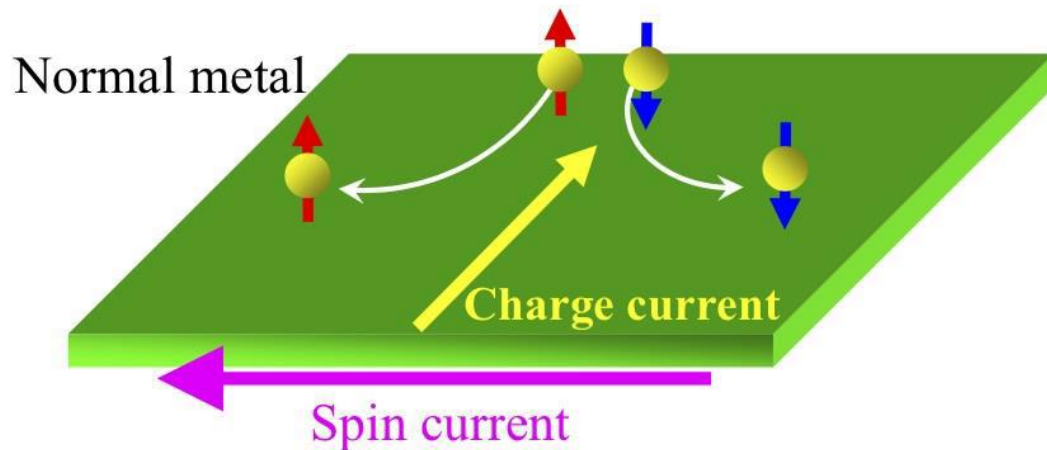
Рис.4. Типовая структура слоев простейших СТНО

# 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  $\sim 10$  нВ.

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

# ОСЦИЛЛЯТОРЫ НА ОСНОВЕ СПИНОВОГО ЭФФЕКТА ХОЛЛА

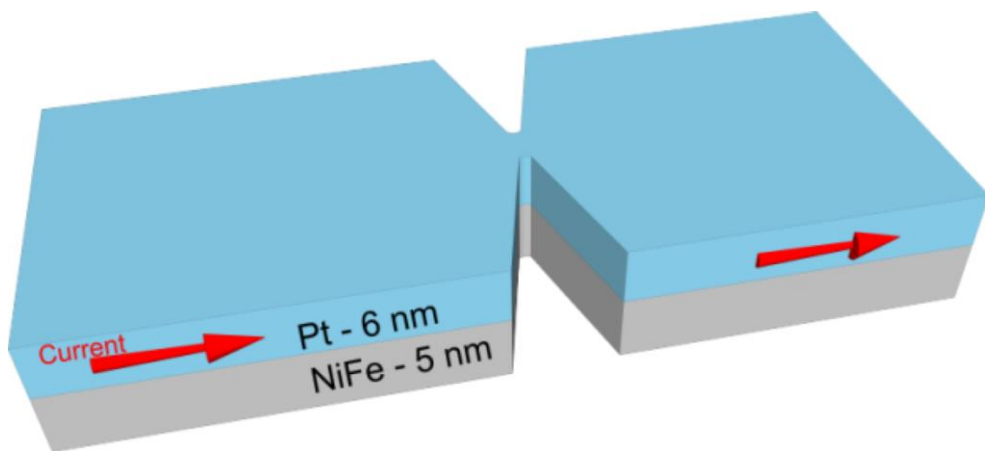


Рис.1. Конструкция СХНО, управляемого током

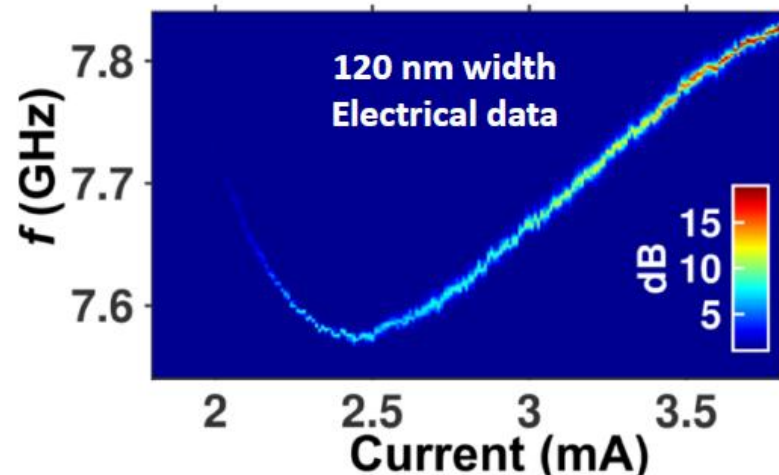
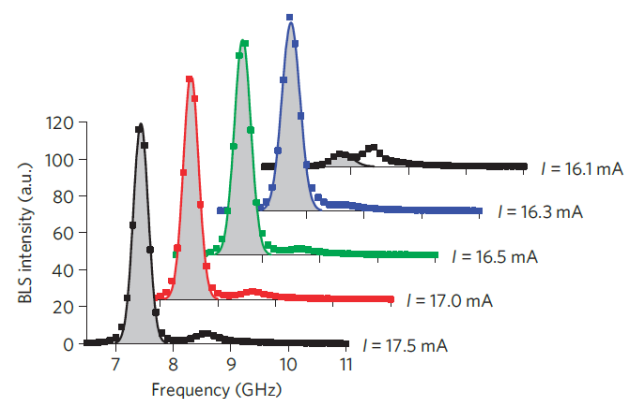
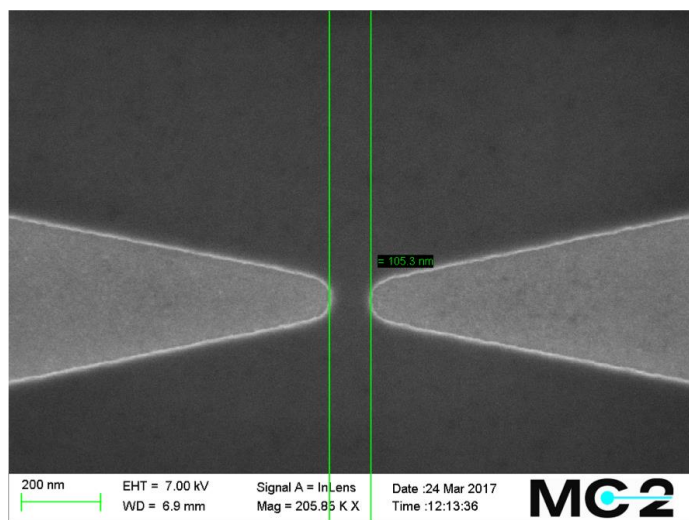


Рис.2. Зависимость частоты колебаний от постоянного тока



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

# МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СТНО

$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} = \gamma [\mathbf{B} \times \mathbf{M}] + \frac{\alpha\gamma}{M_0} [\mathbf{M} \times [\mathbf{B} \times \mathbf{M}]] + \frac{\sigma_0 I}{M_0} [\mathbf{M} \times [\mathbf{M} \times \mathbf{e}_z]]$$

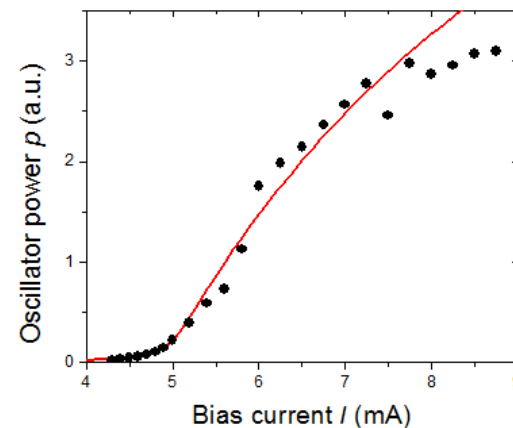
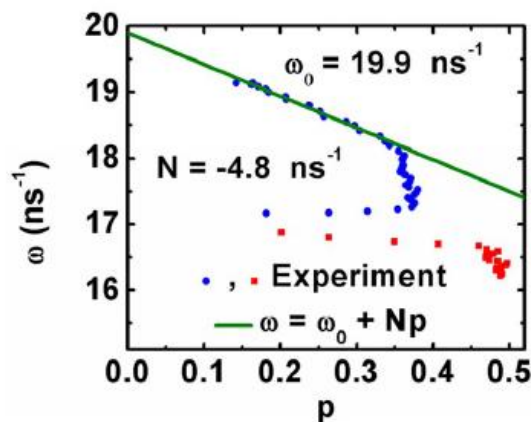
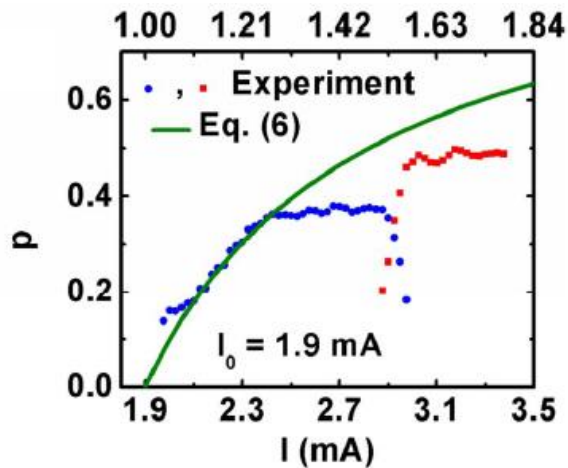
УРАВНЕНИЕ МАГНИТНОЙ ДИНАМИКИ  
(ЛАНДАУ-ЛИФШИЦА-ГИЛЬБЕРТА)



$$\frac{d\dot{c}}{dt} + j(\omega_0 + N|\dot{c}|^2)\dot{c} + \Gamma_G(1 + Q|\dot{c}|^2) - \sigma I(1 - |\dot{c}|^2) = 0$$

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{\text{вых}} \sim |\dot{c}|^2, \\ \omega_{\text{вых}} \sim \frac{d\varphi}{dt}, \varphi = \text{Arg}(\dot{c}) \end{array} \right.$$

МОДЕЛЬ СЛАВИНА-ТИБЕРКЕВИЧА ДЛЯ АМПЛИТУДЫ СПИНОВОЙ ВОЛНЫ [1] И ЕЕ  
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА [2]



[1]. A. Slavin, V. Tiberkevich. Nonlinear auto-oscillator theory of microwave generation by spin-polarized current. IEEE Trans. on Magnetism. Vol. 45, No.4, April 2009.

[2]. C. Boone, et al. Experimental test of analytical theory of spin-torque-oscillator dynamics. Phys. Rev. B 79, 140404, 2009.<sup>13</sup>

# Математическая модель парциального СО и его динамические характеристики

## Укороченные уравнения

$$(1) \quad \frac{dU}{dt} = \nu \cdot U \cdot (a - U^2).$$

$$(2) \quad \frac{d\varphi}{dt} = \omega_0 + N \cdot U^2.$$

## Параметры модели

- $\nu$  - физическая константа
- $a$  - фактор самовозбуждения (аналог  $SRU$ ),
- $\omega_0$  - собственная частота СТНО (частота ФМР),
- $N$  - параметр неизохронности.

$$\frac{dU}{dt} = \nu \cdot U \cdot (a - U^2) \quad \text{уравнение для амплитуды автогенератора Ван-дер-Поля}$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = \omega_0 + N \cdot U^2 \quad \text{уравнение для фазы автогенератора Ван-дер-Поля-Дуффинга}$$

## Стационарные амплитуда и фаза

$$\bar{U}^2 = \frac{I - I_{KP}}{I + I_{KP}Q}, \quad \begin{array}{l} I - \text{ток, пропуск. через образец,} \\ I_{KP} - \text{критический ток, при} \\ \text{котором стартуют колебания,} \\ Q - \text{физический параметр} \end{array}$$

$$\bar{\omega} = \omega_0 + N \frac{I - I_{KP}}{I + I_{KP}Q}$$

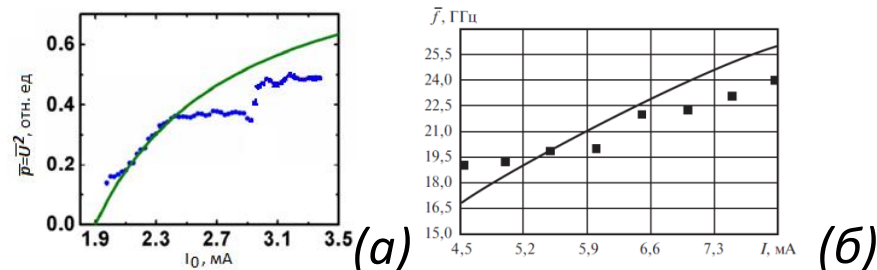


Рис.2. Зависимости стационарной мощности (а) и частоты (б) от пропускаемого тока.

$$P_{\text{вых}} \approx \frac{I_0^2}{2} \frac{\Delta R^2 R_H}{(R_{AV} + R_H)^2} \frac{\zeta \cdot Q_s' - 1}{\zeta \cdot Q_s'' + Q}$$

$\Delta R, R_0$  – характеристические сопротивления СТНО,  
 $Q_s', Q_s''$  – нормировочные коэффициенты

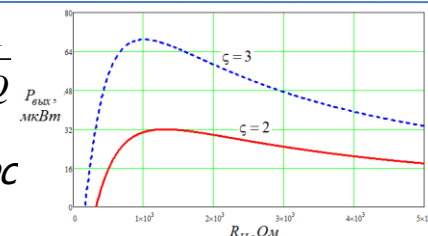


Рис.3. Зависимость выходной мощности от сопротивления нагрузки.

# Актуальность

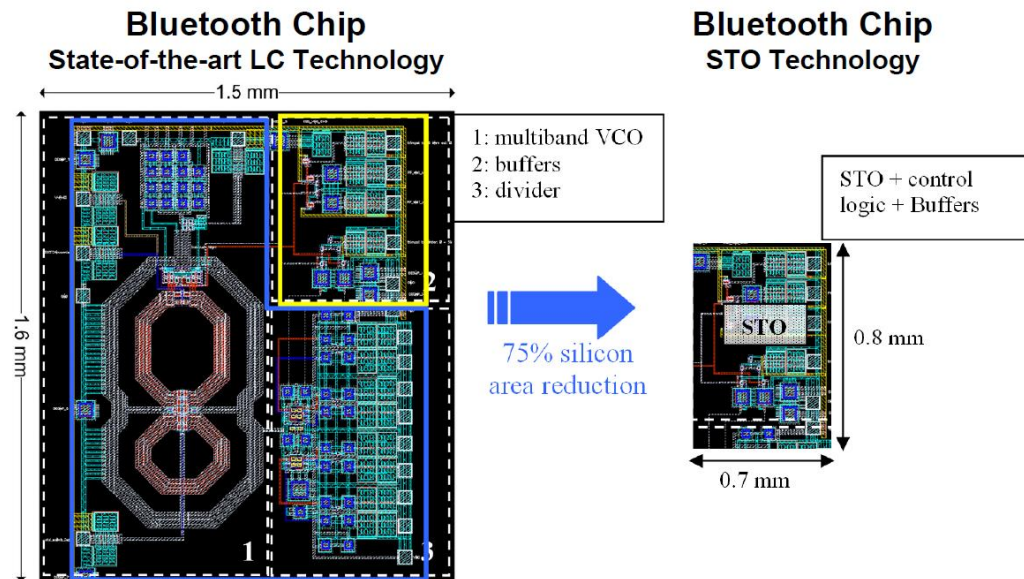
Необходимость в мощном, высокостабильном, миниатюрном и широко перестраиваемом источнике СВЧ-колебаний

**Спин-трансферные наноосцилляторы**  
(колебательная система, управитель частоты и активный элемент)

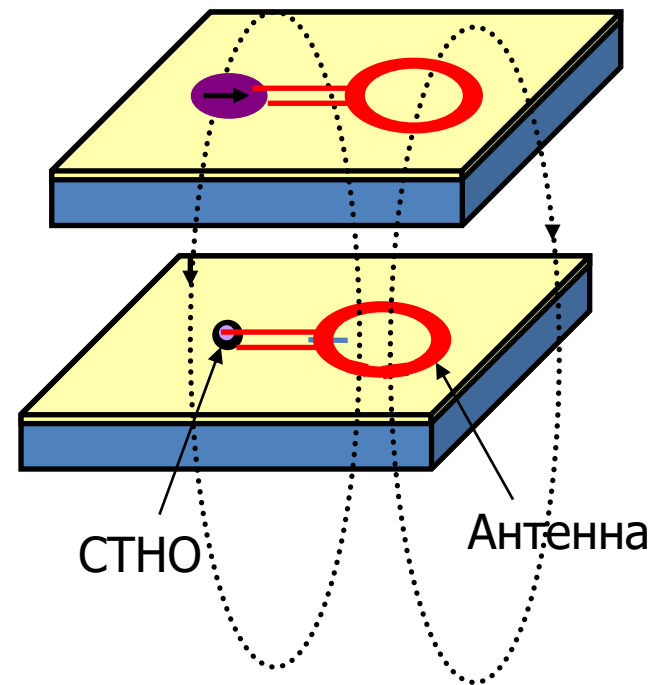
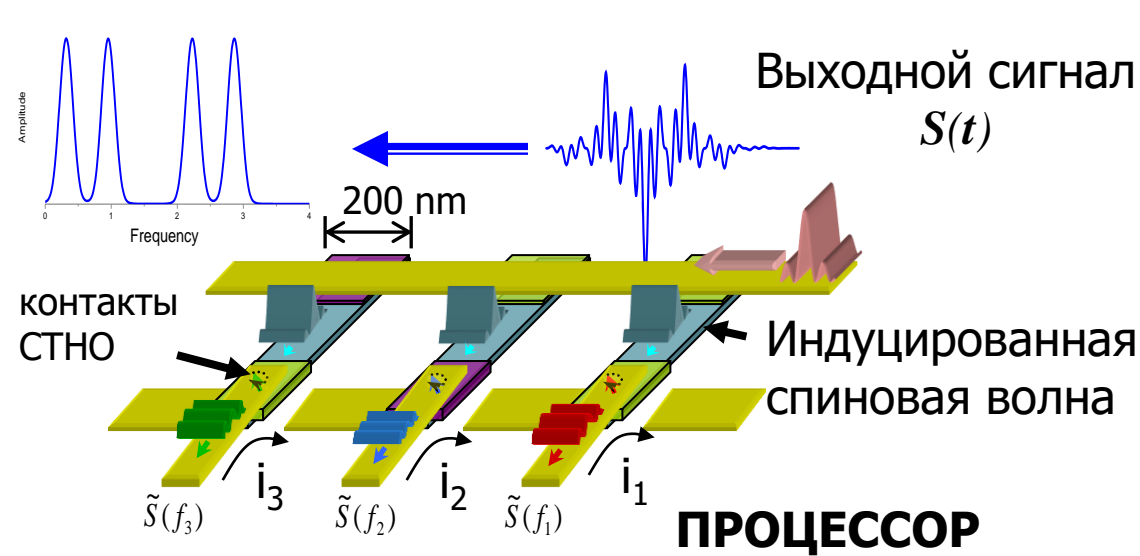
## Достоинства СТНО

- Широкий диапазон перестройки частот – от 500 МГц до 50 ГГц.
- Миниатюрные размеры – 20-200 нм.
- Возможность перестройки частоты колебаний генератора от приложенного тока.
- Совместимость с технологическим циклом производства КМОП.

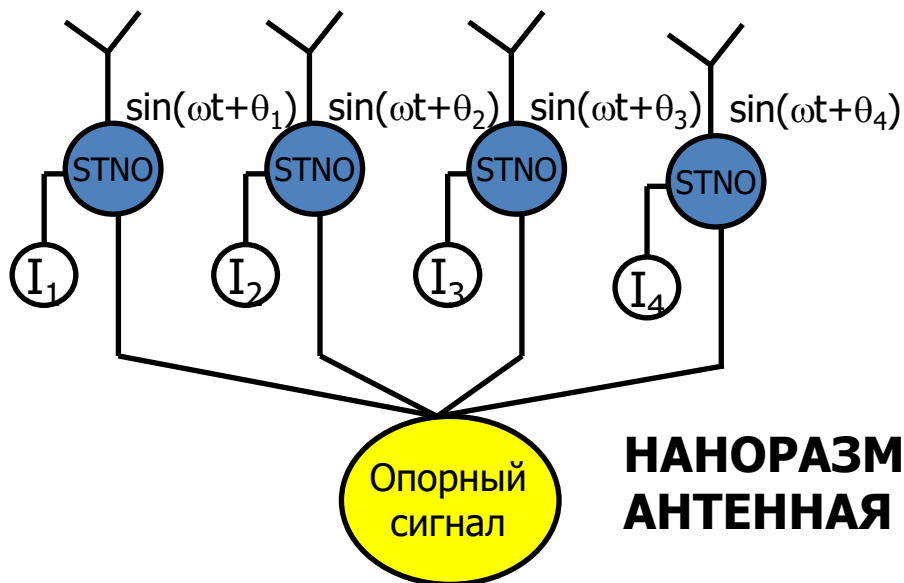
**ГЛАВНЫЙ НЕДОСТАТОК:** низкая выходная мощность парциального СТНО – от 10 нВт до 1 мкВт.



# ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ



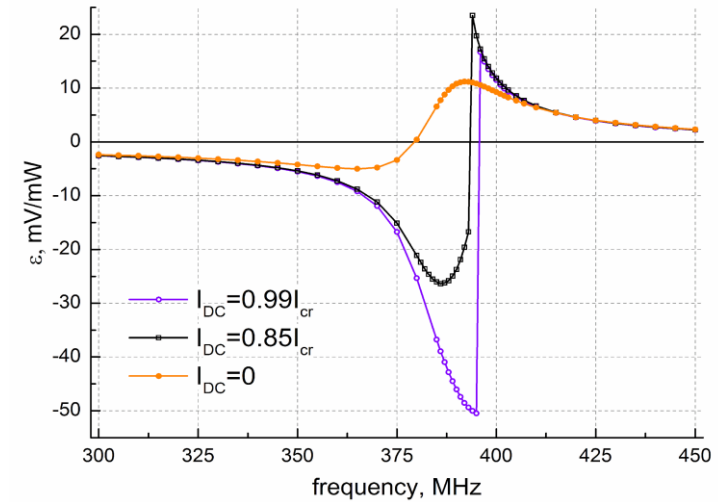
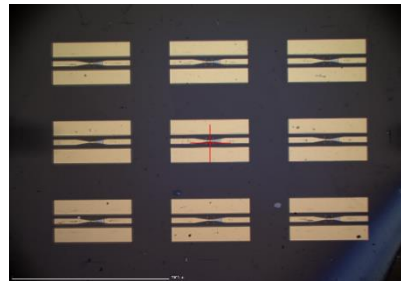
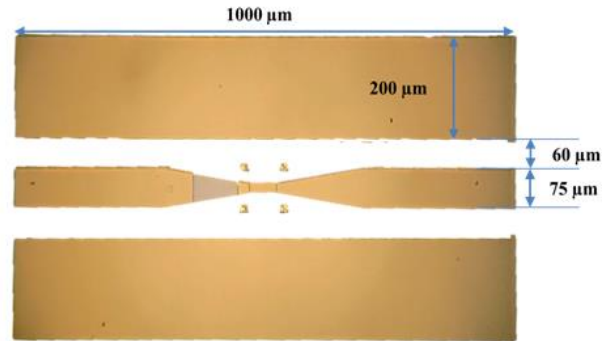
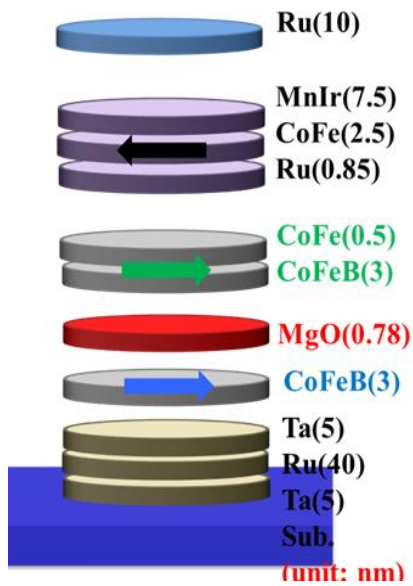
**Chip-to-chip microwireless**  
(Телекоммуникация чип-чип)



**НАНОРАЗМЕРНАЯ СВЧ ЭЛЕКТРОНИКА**



# СПИНОВЫЕ ДИОДЫ

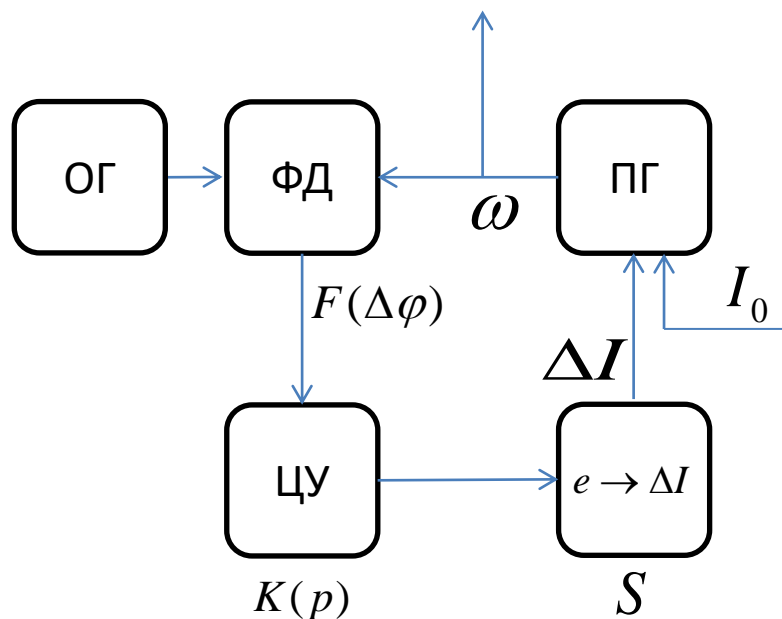


	Чувствительность без тока смещения	Чувствительность с током смещения	Шумовая эквивалентная мощность	Характерные планарные размеры	Пороговая мощность выпрямления
диод Шоттки	до <b>500 mV/mW</b>	до <b>3,700 mV/mW</b>	<b>1.5-40 pW/Hz<sup>0.5</sup></b>	порядка <b>1 мкм</b>	<b>15 <math>\mu\text{W}</math></b>
Спиновый диод	<b>630 mV/mW</b>	<b>75,000 mV/mW</b>	менее <b>0.1 pW/Hz<sup>0.5</sup></b>	менее <b>100 нм</b>	менее <b>20 nW</b>

S. Miwa et al., *Nature Materials*, 13, 50–56 (2014)

B. Fang et al., *Nature Communication*, 7, 11259 (2016)

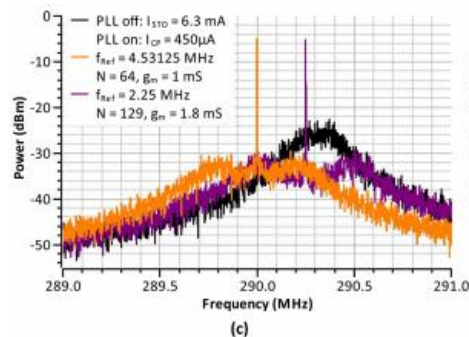
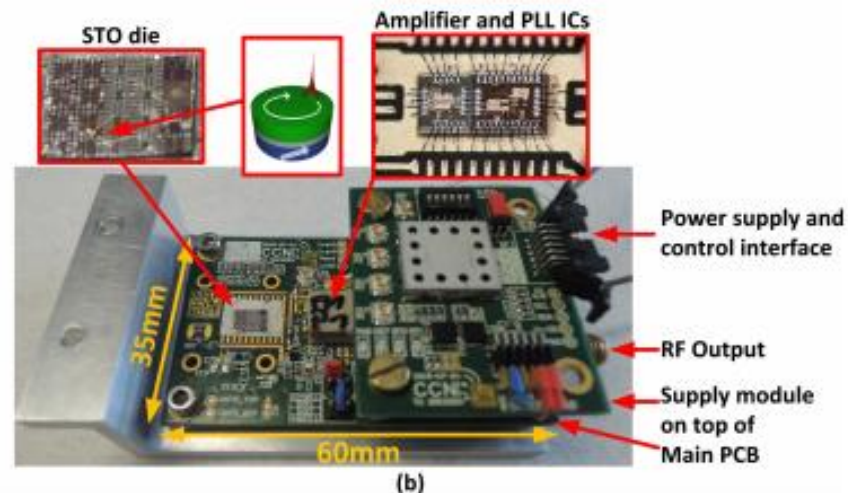
# СИНТЕЗАТОР ЧАСТОТ НА ОСНОВЕ ФАПЧ



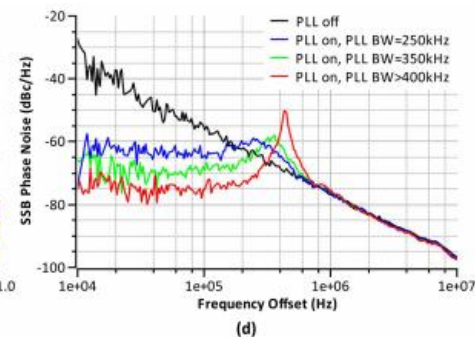
ФД- фазовый дискриминатор  
 ПГ –подстраиваемый генератор (СТНО)  
 ЦУ- цепь управления  
 e-I - преобразователь напряжение-ток

*A. Сафин и др. Письма в ЖТФ, 2014, 2016.*

*A. Safin et al., JAP, 2017*



(c)

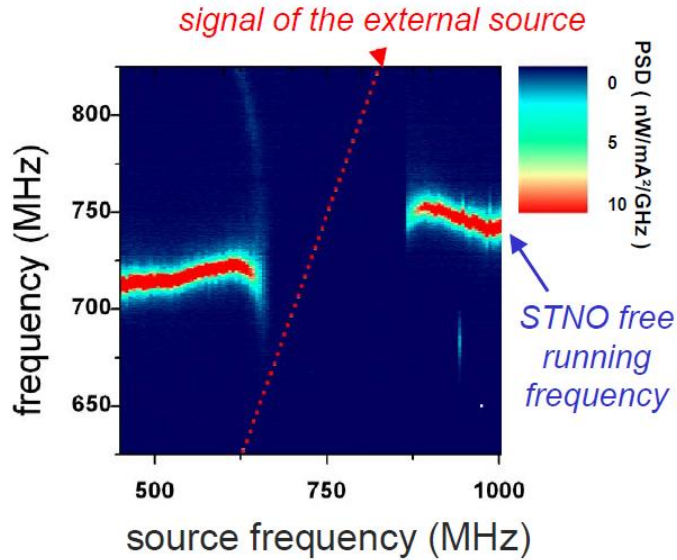


(d)

*U. Ebels, et al. JAP, 2017*

**СТНО перестраивается  
ТОКОМ**

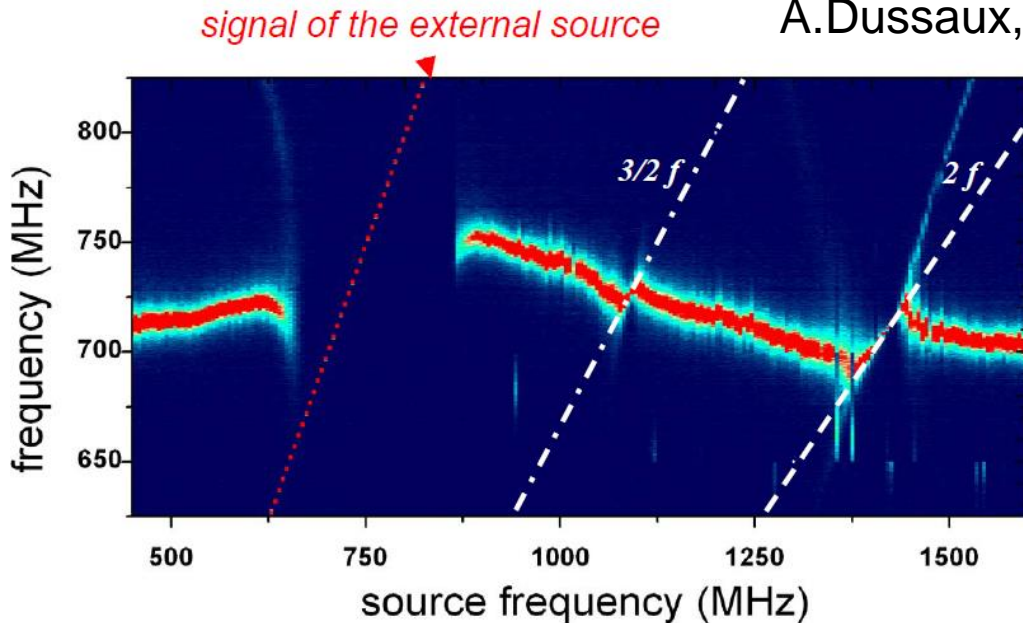
# ВНЕШНЯЯ СИНХРОНИЗАЦИЯ



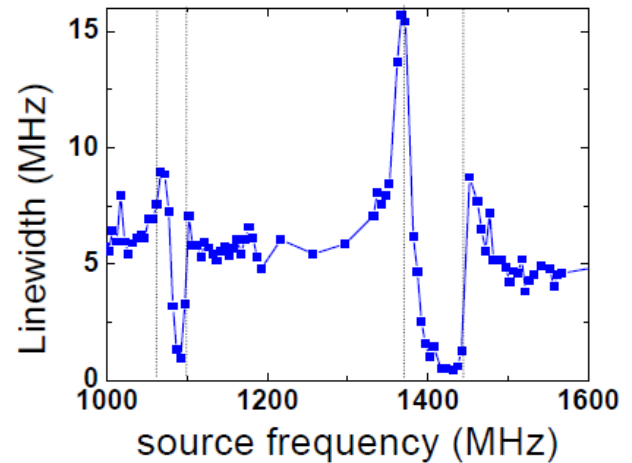
$H_{\text{perp}} = 5.8 \text{ kOe}$   
 $I_{\text{dc}} = 3.5 \text{ mA}$   
 $I_{\text{hf}} = 0.8 \text{ mA}$

Locking range :  
 $\Delta f = 250 \text{ MHz}$

*Высокая эффективность* – полоса синхронизма в 3 раза меньше опорной частоты

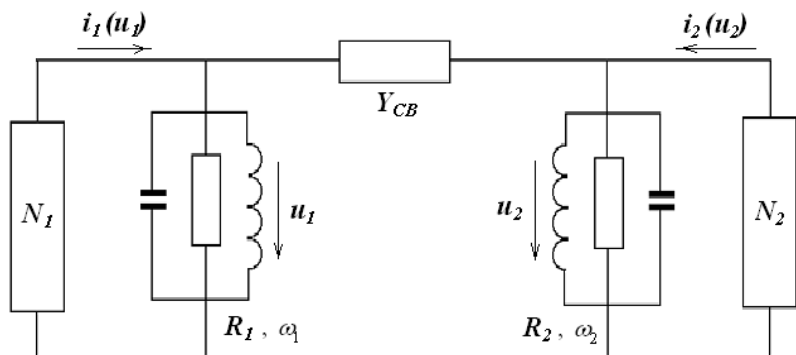


A.Dussaux, App. Phys. Lett **98**, 132506 (2011)

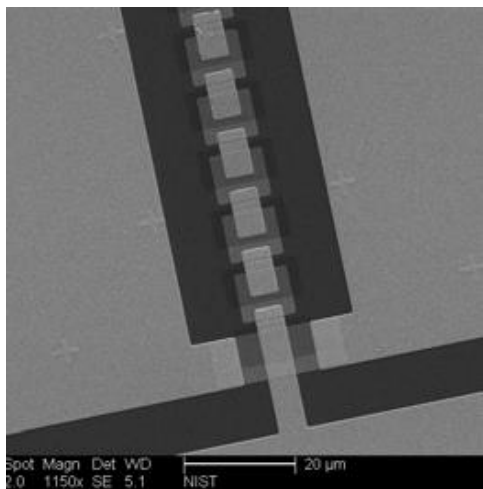


## Нелокальные [1]

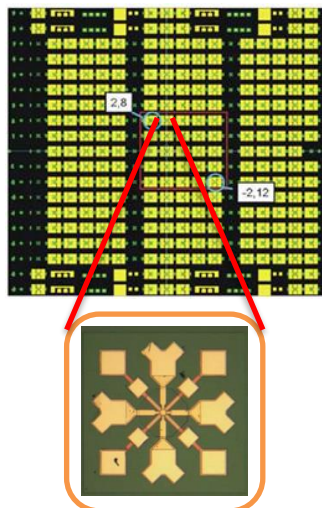
(общим током)



## 1D-цепочка СТНО [2]

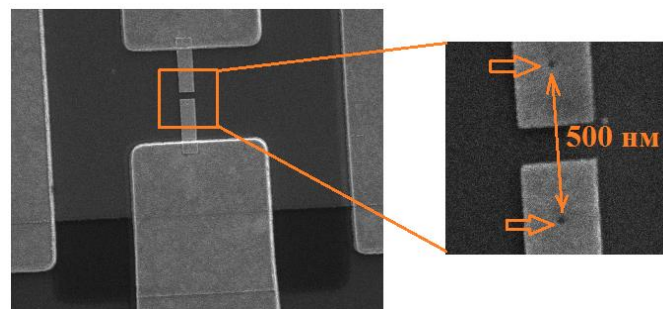
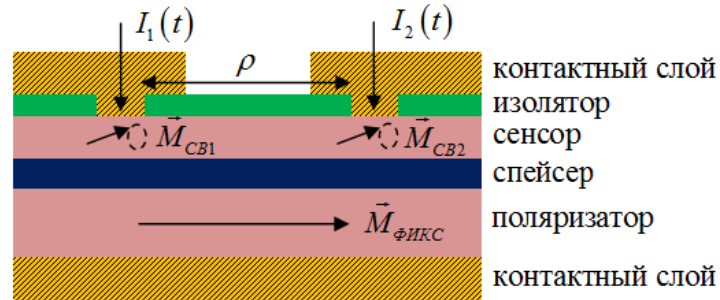


## 2D-Ансамбль СТНО [2]



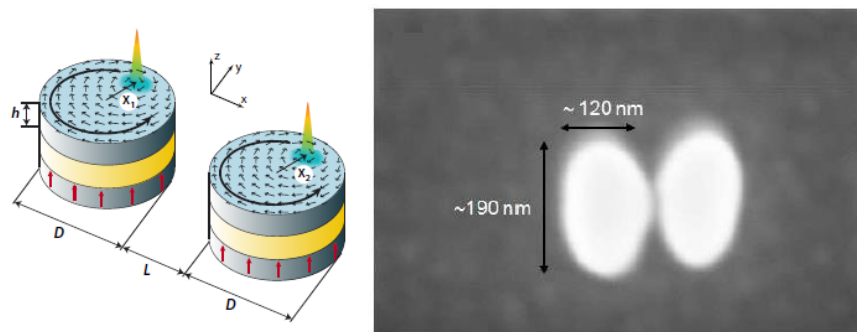
## Локальные [3,4]

а) Спиновые волны [3]



[3]. S.Kaka, et al. Nature, vol. 437, pp. 389–392, 2005

б) Магнетодипольное взаимодействие [4]



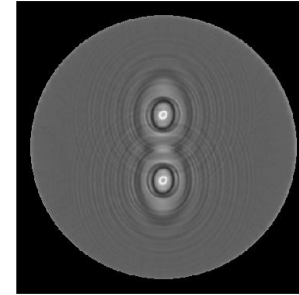
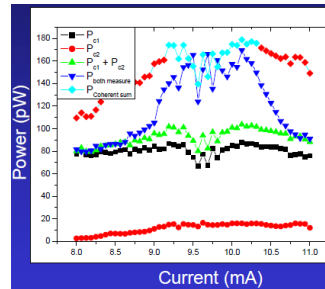
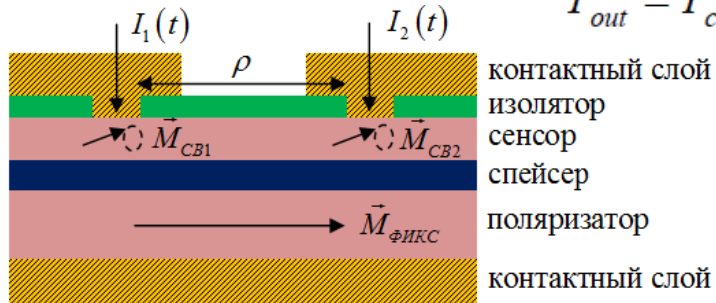
[4]. A.D. Belanovsky, et al. Phys. Rev. B 85, 100409(R), 2012

[1]. J.Grollier, et al. Phys.Rev.B, vol.73, p. 060409, 2006.

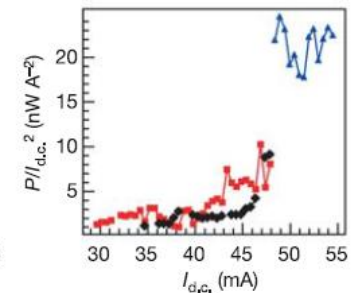
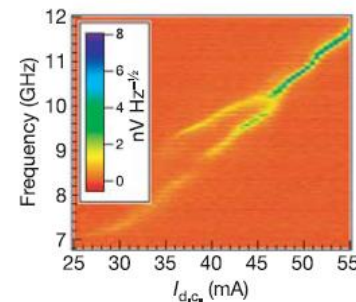
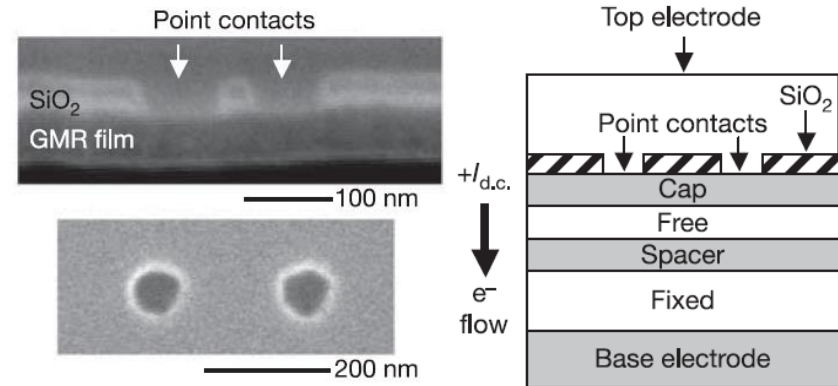
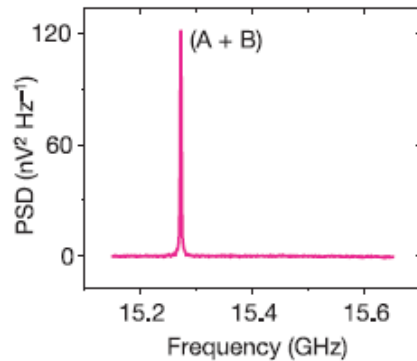
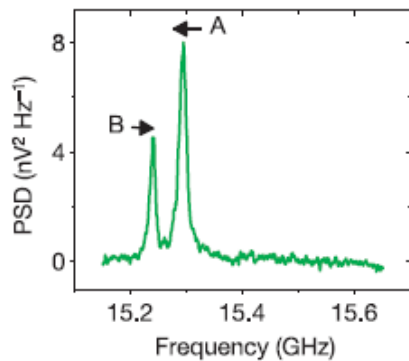
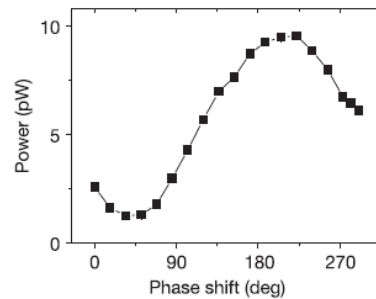
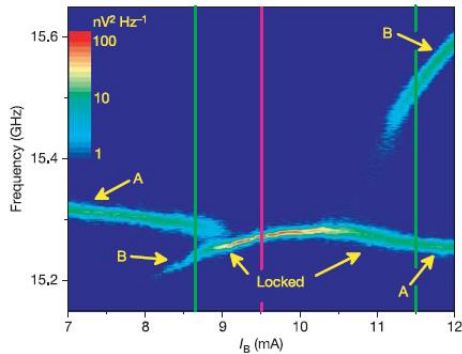
[2]. <http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA520629>

# ЛОКАЛЬНАЯ СВЯЗЬ СТНО (СПИНОВЫЕ ВОЛНЫ)

$$P_{out} = P_{c1} + P_{c2} + 2\sqrt{P_{c1}P_{c2}} \cos(\phi)$$



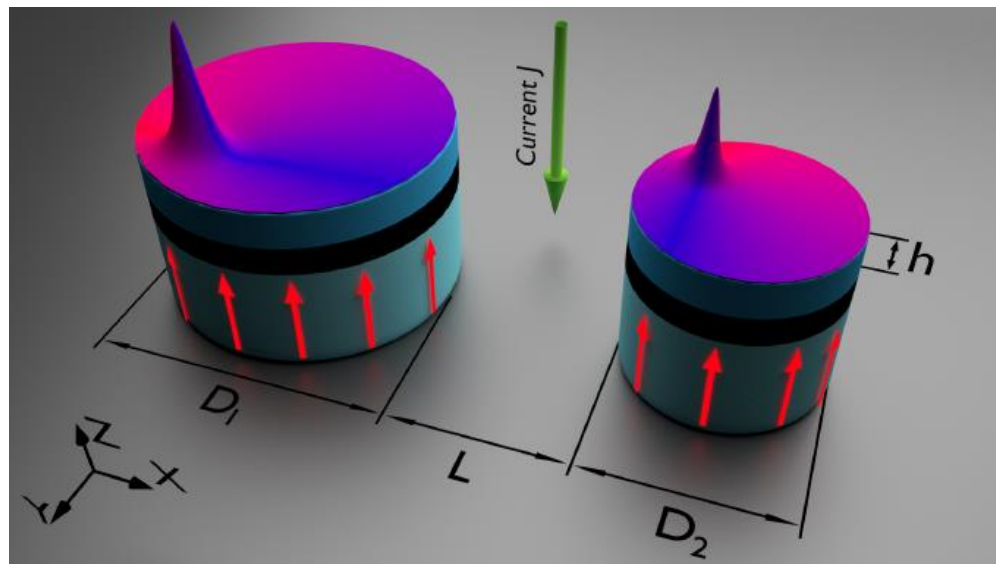
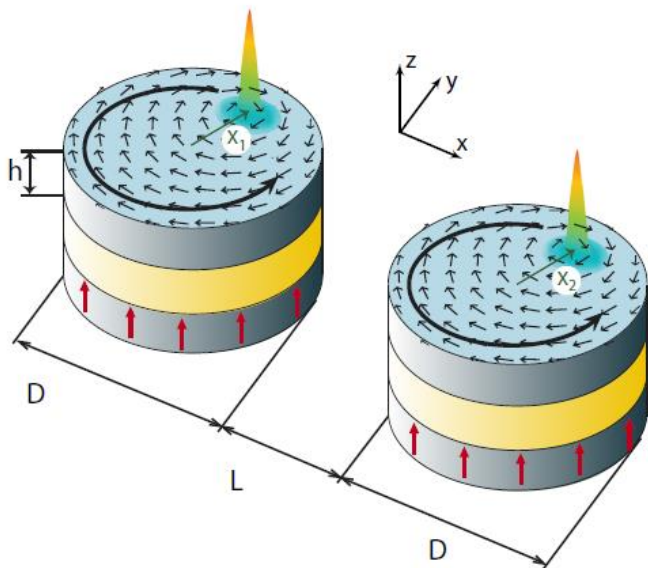
S. Kaka, Phys. Rev. Lett., 97, 2006, 087206.



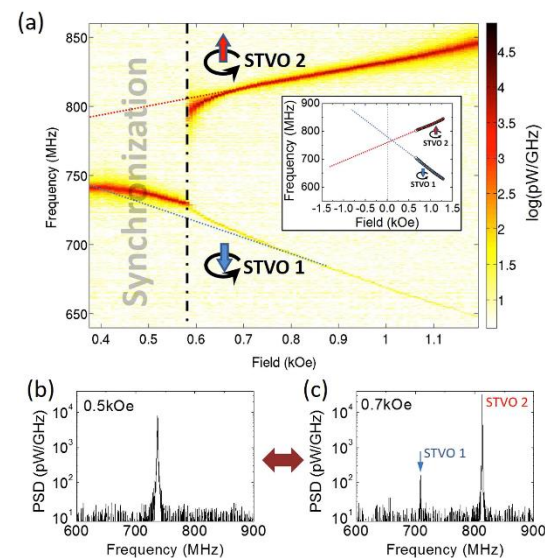
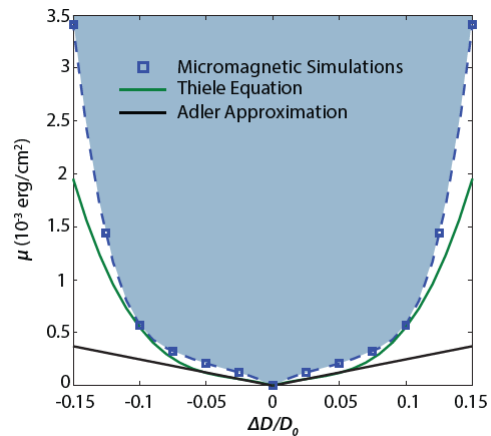
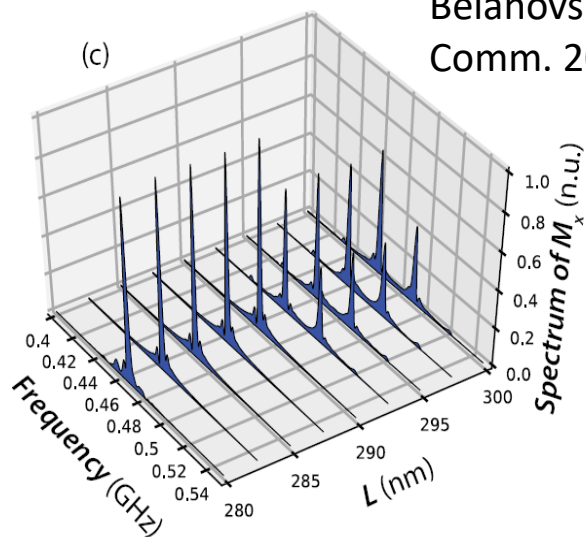
S. Kaka, et al. Nature, Vol.437, 2005, 389-392.

F.B. Mancoff, et al. Nature, Vol.437, 2005, 393-395.

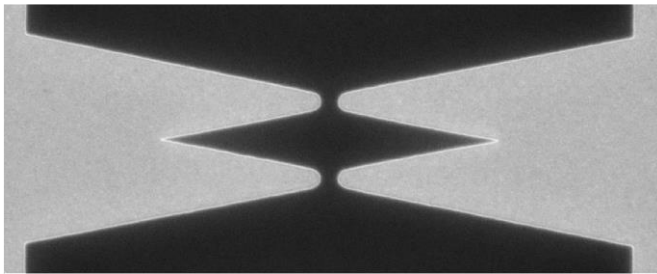
# ЛОКАЛЬНАЯ СВЯЗЬ СТНО (МД-взаимодействие)



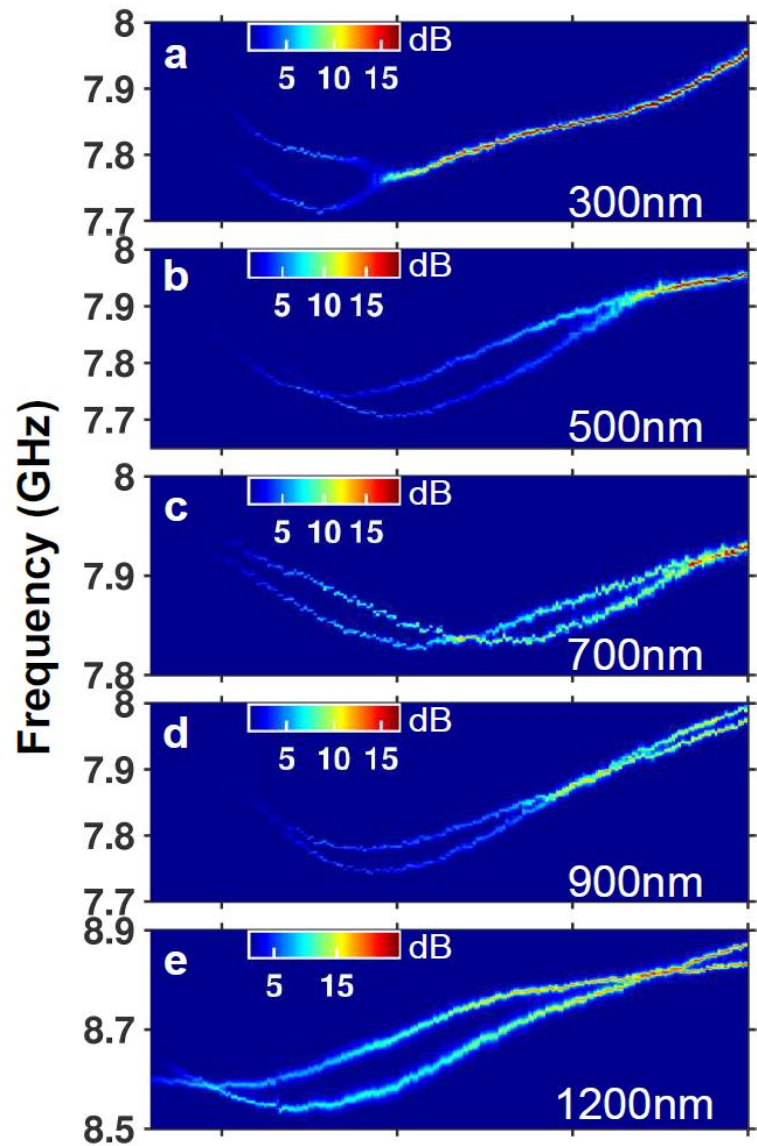
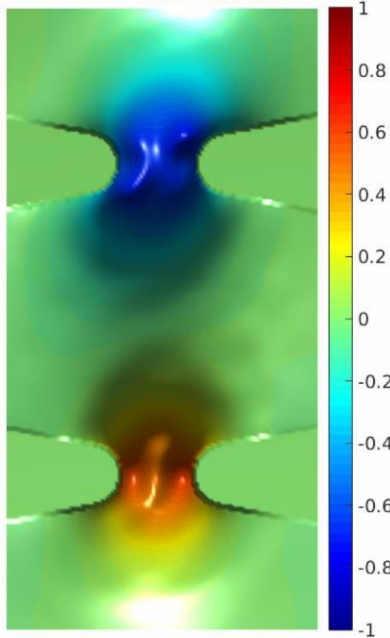
Belanovsky et al, PRB 2012, APL 2014, Nat Comm. 2016



# ЛОКАЛЬНАЯ СВЯЗЬ 2 СХНО (связь током и СВ)

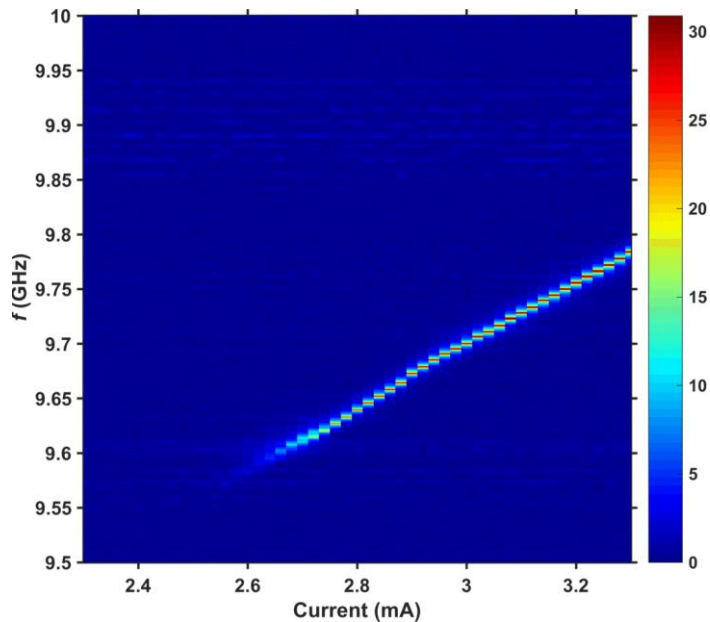
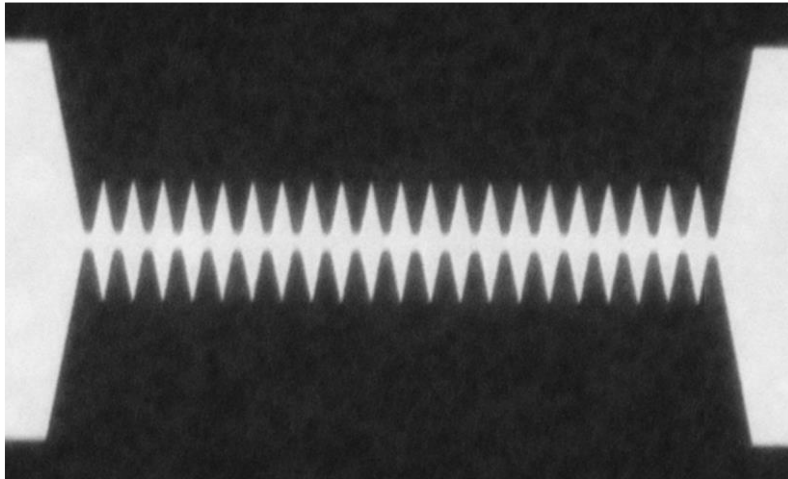


$[\Delta M_y] f = 8.6\text{GHz}, H_{cp} = 0.72\text{T}$   
Time = 0.0000ns

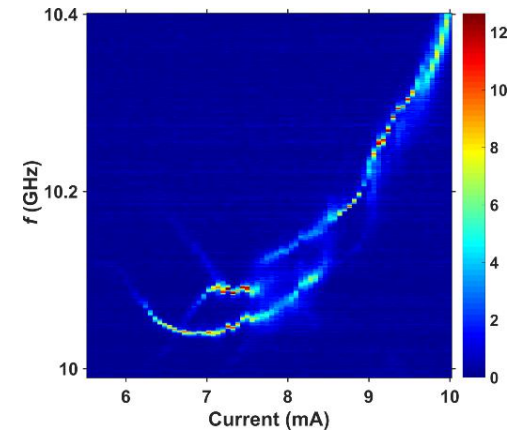
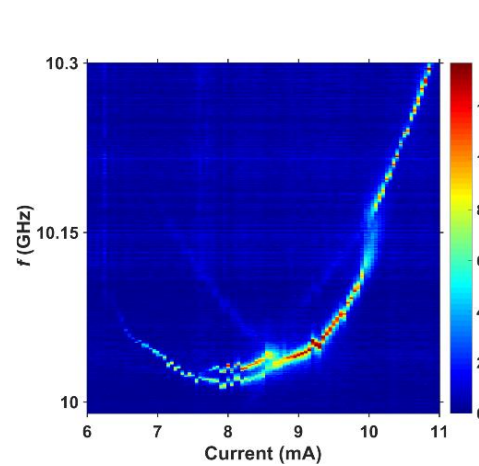
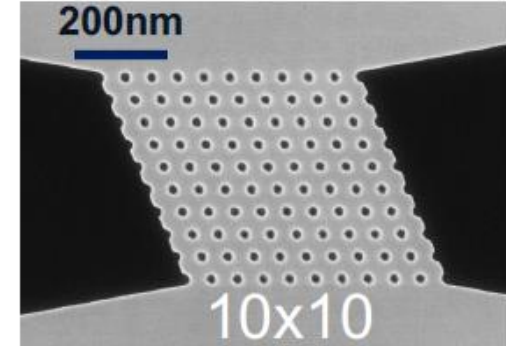
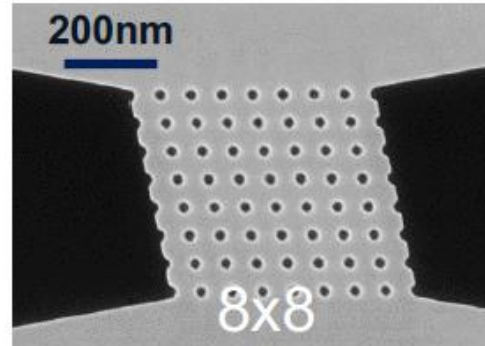


# ЛОКАЛЬНАЯ СВЯЗЬ БОЛЬШИХ МАССИВОВ СХНО

Линейка из 21 осциллятора



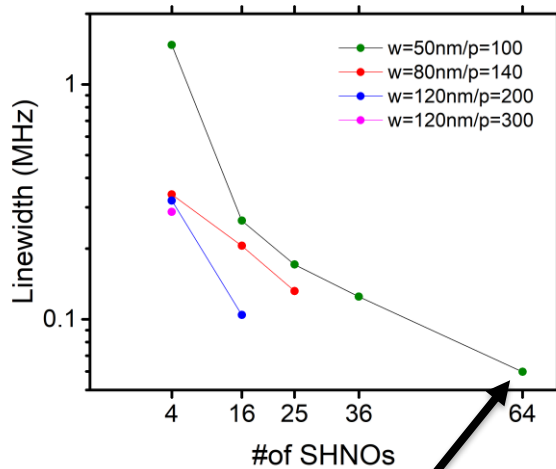
Решетка из 64 и 100 осцилляторов



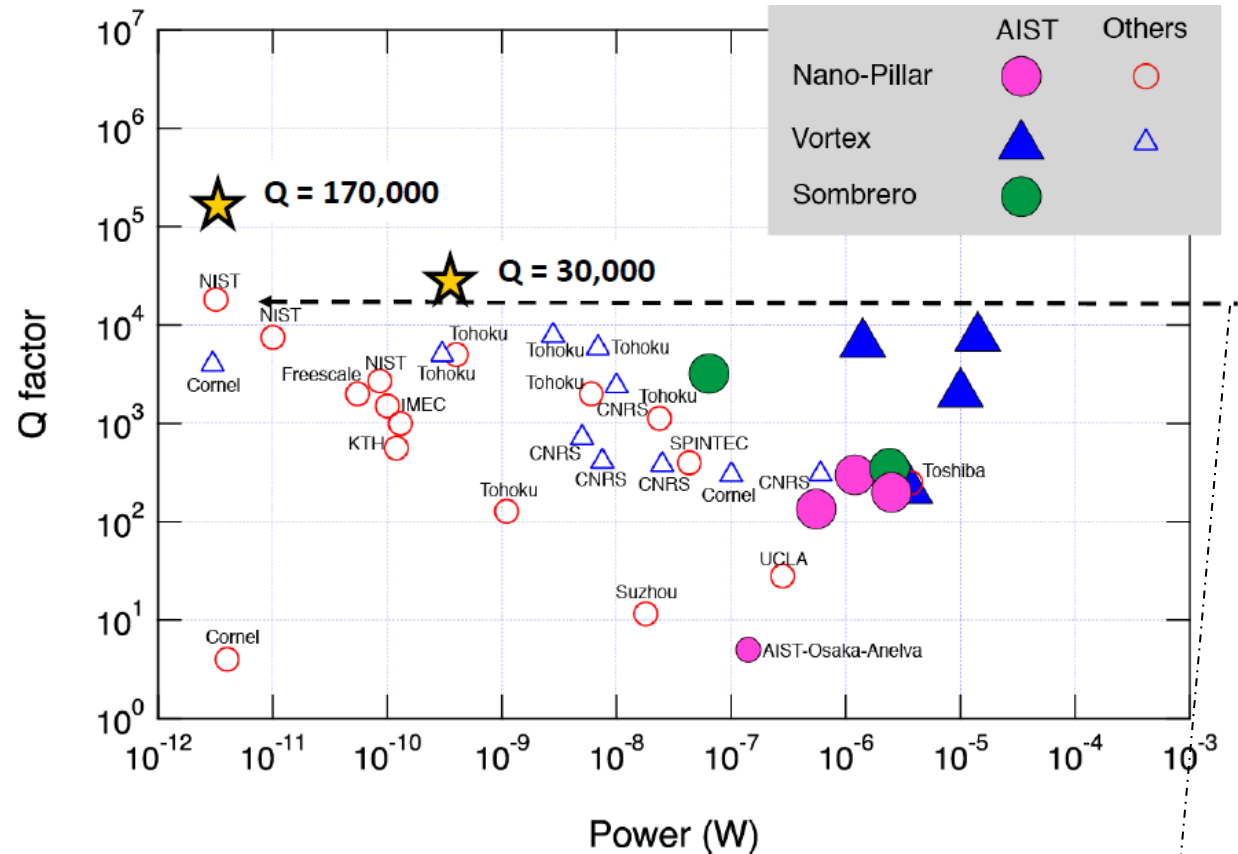
M. Zahedinejad, et al. ArXiv:1812.09630v1.



# ЛУЧШИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПО МОЩНОСТИ И ШИРИНЕ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЛИНИИ ДЛЯ ОСЦИЛЛЯТОРОВ



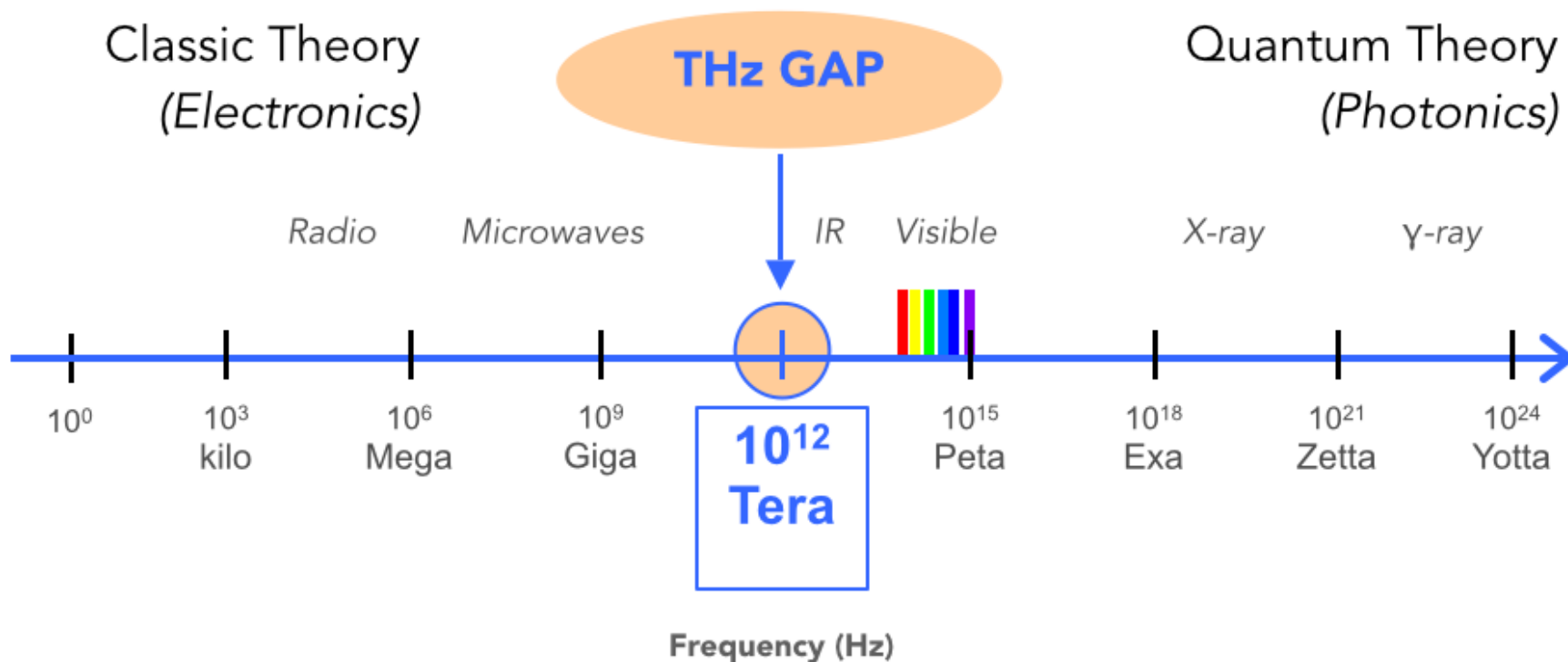
$\Delta f = 60 \text{ kHz}$   
 $Q = 170,000$



$Q = 18,000$   
 NIST (2004)

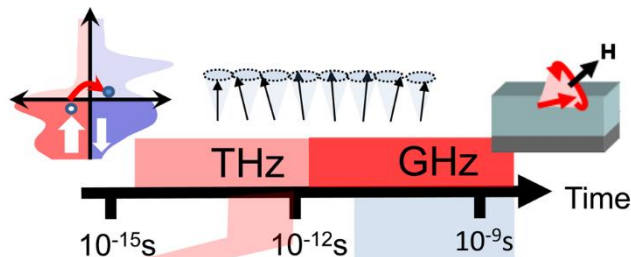
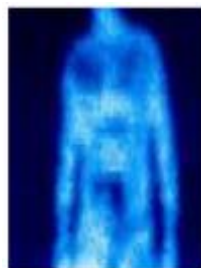
# МОТИВАЦИЯ

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

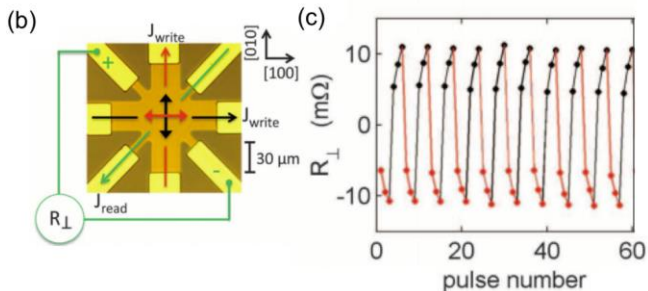
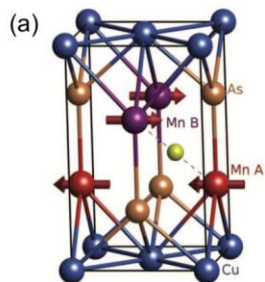


$$1 \text{ THz} \sim 33 \text{ cm}^{-1} \sim 1 \text{ ps} \sim 300 \text{ um} \sim 4 \text{ meV} \sim 47 \text{ K}$$

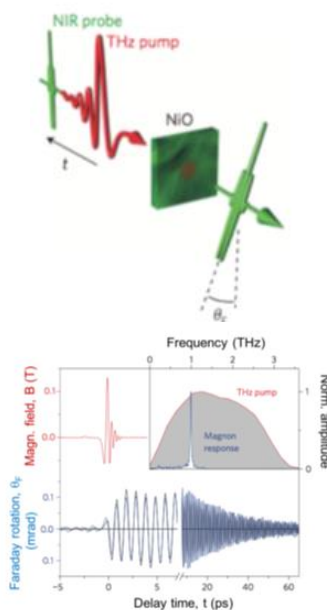
# АФМ & ТГц спинтроника



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

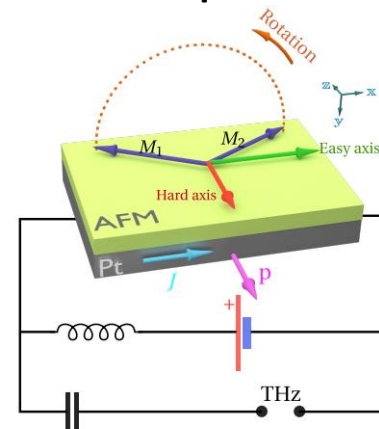


**Электрическое переключение АФМ полупроводников**  
*P. Wadley, et al. Science 2016*

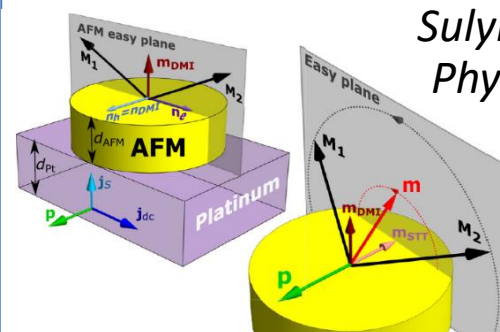


**Сверхбыстрый ТГц спиновый резонанс**  
*T. Kampfrath, et al. Nat.Phot. 2011*

## ТГц АФМ осцилляторы

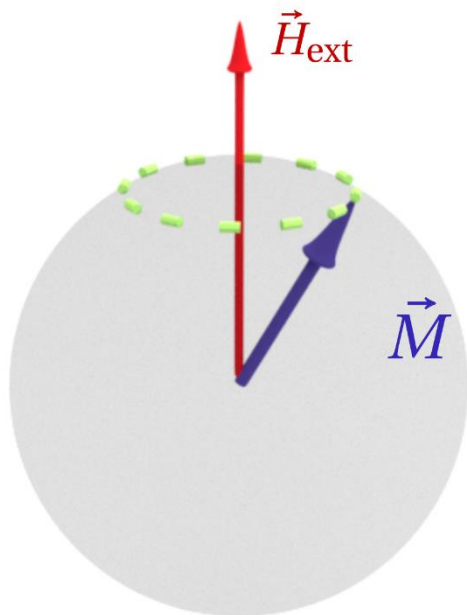


*Khymyn et al. Sci. Rep. 2017*



*Sulymenko et al. Phys.Rev. Appl. 2017*

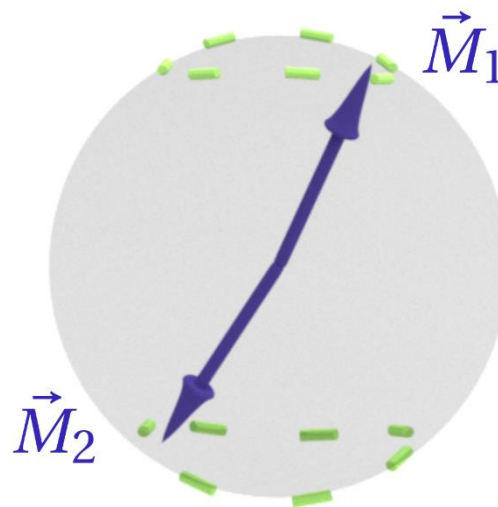
# Резонансные частоты ФМ и АФМ



$$H_{\text{ext}} \approx 1\text{T}$$

$$\omega_{\text{FMR}} = \gamma \sqrt{H_{\text{ext}} H_{\text{dip}}} \approx 1 - 20\text{GHz}$$

Ферромагнетики



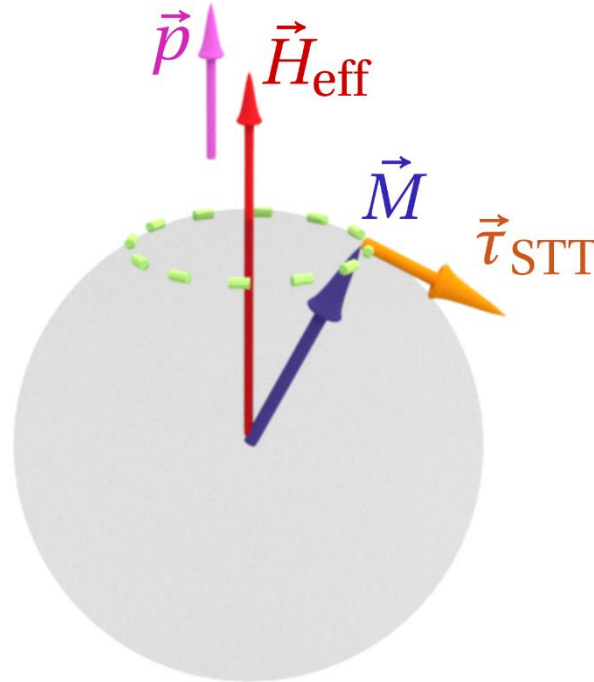
$$H_{\text{ex}} \approx 10^3\text{T}$$

$$\omega_{\text{AFMR}} = \gamma \sqrt{H_{\text{ex}} H_a} \approx 500\text{GHz} - 1.5\text{THz}$$

Антиферромагнетики

# Спиновый вращающий момент в ФМ

$$\vec{\tau}_{\text{STT}} = \vec{M} \times \dot{\vec{M}} \times \vec{p}$$

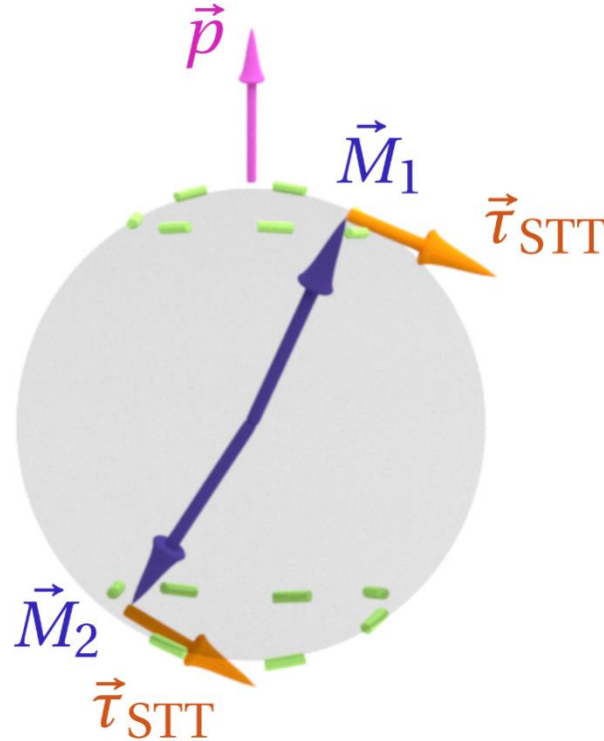


Полярность спинового тока параллельна стационарному направлению намагничивания:

- Спиновый вращающий момент компенсирует затухание
- Приводит к прецессии намагниченности (STNO, SHNO)

# Спиновый вращающий момент в **АФМ** для поляризации параллельной легкой оси

$$\vec{\tau}_{\text{STT}} = \vec{M} \times \vec{M} \times \vec{p}$$



Полярность спинового тока параллельна стационарному направлению намагничивания:

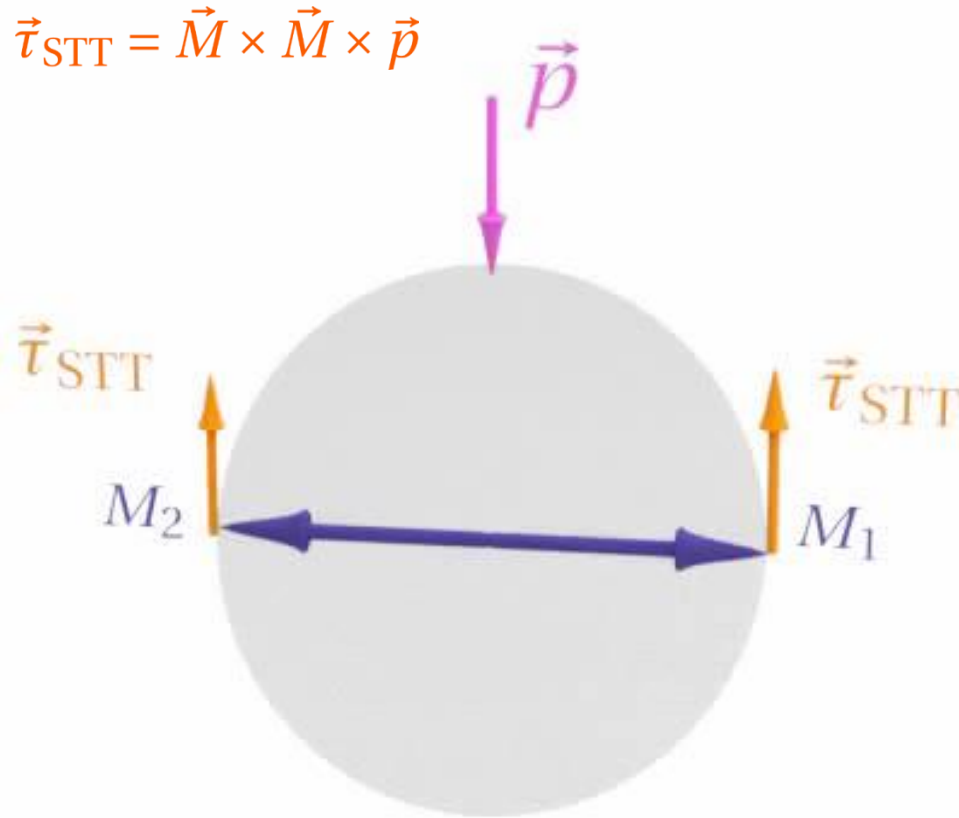
***Спиновый момент компенсирует потери в одной подрешетке , но увеличивает затухание в другой***

Cheng *et al* Phys. Rev. Lett. **116** 207602 (2016)

Gomonay and Loktev Low. Temp. Phys. **40**, 17 (2014)

# Спиновый вращающий момент в **АФМ** для поляризации параллельной **трудной** оси

$$\vec{\tau}_{\text{STT}} = \vec{M} \times \vec{M} \times \vec{p}$$



$$H_{\text{AFM}} = H_{\text{ex}} \sin \Theta$$

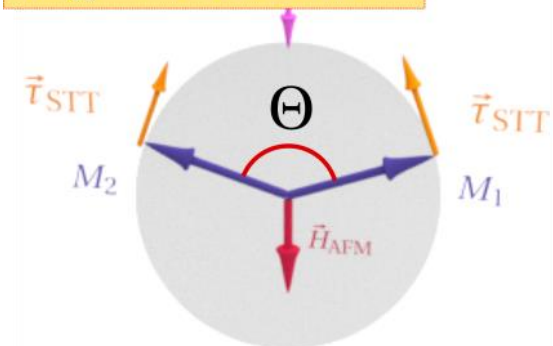
$$\vec{\tau}_{\text{ex}}^1 = \vec{M}_1 \times \vec{H}_{\text{AFM}}$$

Larmor precession:

$$\omega_L = \gamma H_{\text{AFM}}$$

$$\sin \Theta \approx 0.02$$

$$\omega_L \approx 0.5 \text{THz}$$



# Уравнения движения

Потери

СПИНОВЫЙ ТОК

$$d\mathbf{M}_1/dt = \gamma[\mathbf{H}_1 \times \mathbf{M}_1] + \frac{\alpha}{M_s} [\mathbf{M}_1 \times d\mathbf{M}_1/dt] + \frac{\tau}{M_s} [\mathbf{M}_1 \times [\mathbf{M}_1 \times \mathbf{p}]]$$

$$d\mathbf{M}_2/dt = \gamma[\mathbf{H}_2 \times \mathbf{M}_2] + \frac{\alpha}{M_s} [\mathbf{M}_2 \times d\mathbf{M}_2/dt] + \frac{\tau}{M_s} [\mathbf{M}_2 \times [\mathbf{M}_2 \times \mathbf{p}]]$$

$$\mathbf{H}_1 = \frac{1}{M_s} \left[ -\frac{1}{2} H_{\text{ex}} \mathbf{M}_2 + H_h \mathbf{n}_h (\mathbf{n}_h \cdot \mathbf{M}_1) - H_e \mathbf{n}_e (\mathbf{n}_e \cdot \mathbf{M}_1) \right]$$

$$\mathbf{H}_2 = \frac{1}{M_s} \left[ -\frac{1}{2} H_{\text{ex}} \mathbf{M}_1 + H_h \mathbf{n}_h (\mathbf{n}_h \cdot \mathbf{M}_2) - H_e \mathbf{n}_e (\mathbf{n}_e \cdot \mathbf{M}_2) \right]$$

Обмен

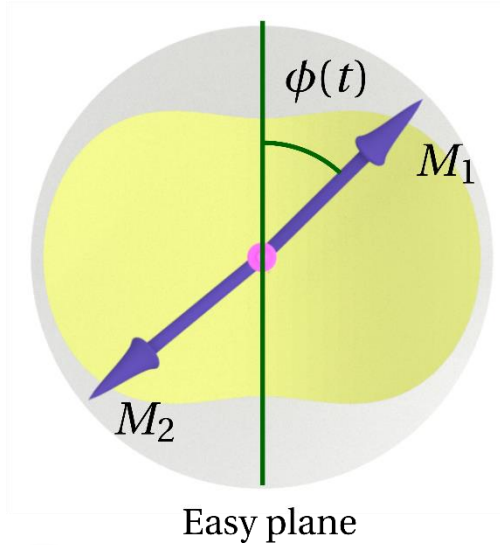
Анизотропия

$\sigma$ -model: 
$$\vec{l} = \frac{M_1 - M_2}{2M_s} = \vec{x} \cos \phi(t) + \vec{y} \sin \phi(t)$$



# Простейшая модель осциллятора

$$\vec{l} = \frac{M_1 - M_2}{2M_s} = \vec{x} \cos \phi(t) + \vec{y} \sin \phi(t)$$



$$\frac{1}{\omega_{\text{ex}}} \ddot{\phi} + \alpha \dot{\phi} + \frac{\omega_e}{2} \sin 2\phi = \sigma j$$

Обмен

Затухание

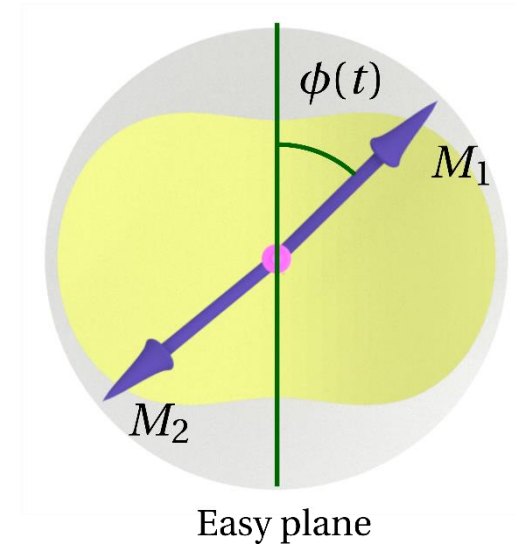
Анизотропия  
(легкая плоскость)

Спиновый ток

# Простейшая модель осциллятора

$$\vec{l} = \frac{M_1 - M_2}{2M_s} = \vec{x} \cos \phi(t) + \vec{y} \sin \phi(t)$$

$$\frac{1}{\omega_{\text{ex}}} \ddot{\phi} + \alpha \dot{\phi} + \frac{\omega_e}{2} \sin 2\phi = \sigma j$$



Решение:

$$\dot{\phi}(t) \approx \frac{\omega_{\text{gen}}}{2} + \frac{\omega_e \omega_{\text{ex}}}{4 \sqrt{\alpha^2 \omega_{\text{ex}}^2 + \omega_{\text{gen}}^2}} \cos \omega_{\text{gen}} t$$

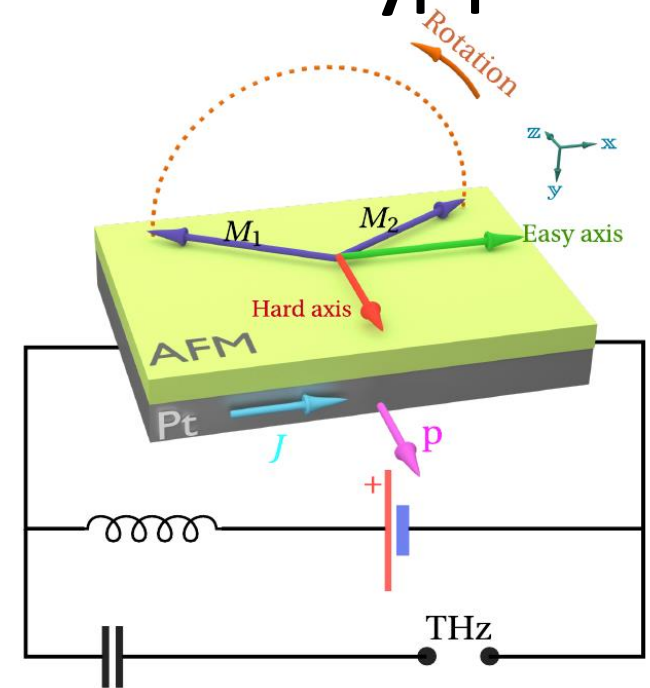
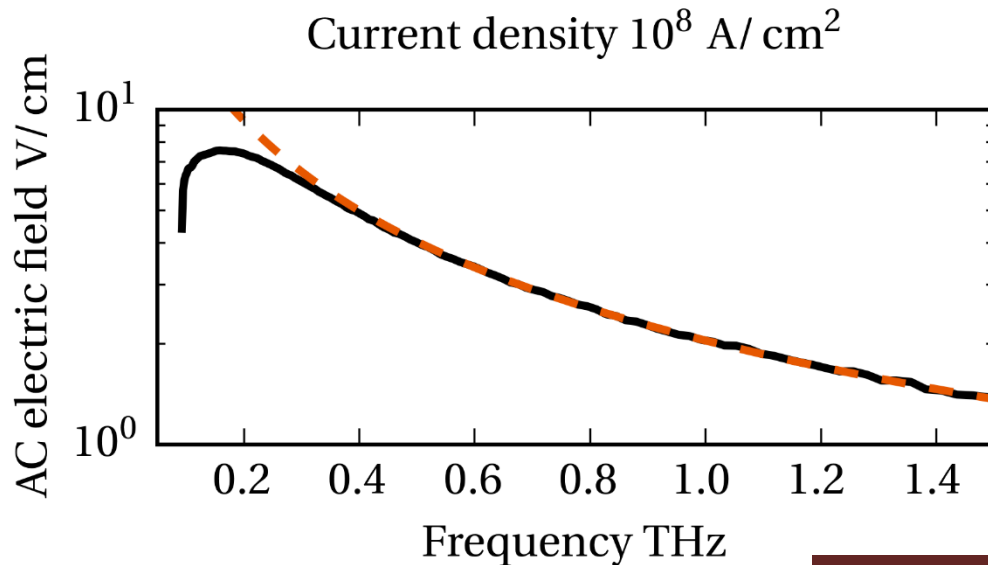
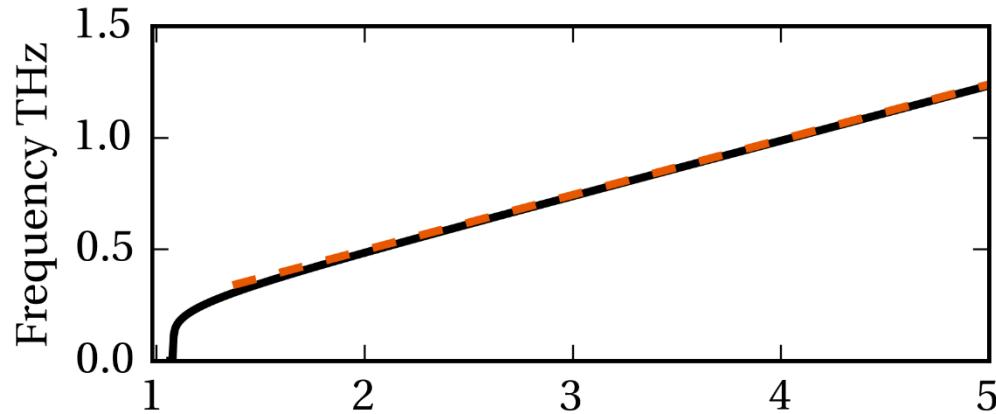
$$\omega_{\text{gen}} = 2 \frac{\sigma j}{\alpha}$$

$$\omega_{\text{gen}} = 2\omega_L$$

DC

AC (THz)

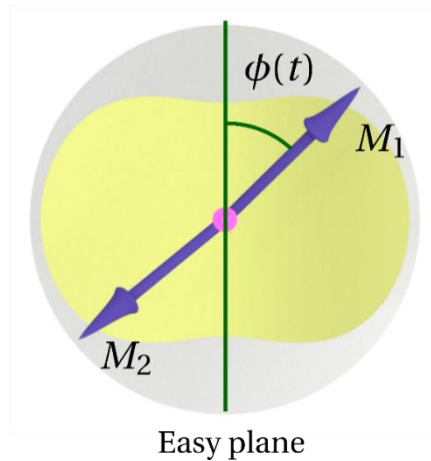
# Выходная частота и амплитуда



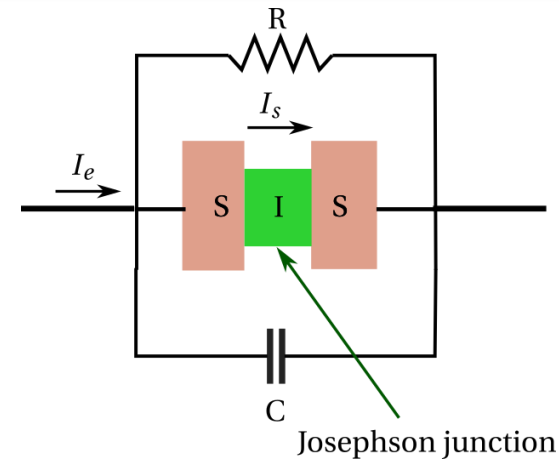
- AFM: NiO
- Effective damping  $\alpha = 3.4 \cdot 10^{-3}$
- Thickness: 5 nm
- Radius:  $10 \mu\text{m}$
- Pt thickness: 10 nm

# Аналогия со сверхпроводниками

## Bi-axial AFM



## Superconductor-isolator-superconductor tunnel junction



$$\frac{1}{\omega_{\text{ex}}} \ddot{\phi} + \alpha \dot{\phi} + \frac{\omega_e}{2} \sin 2\phi = \sigma j$$

$\phi$  – Rotation angle of vector **I**

$$\ddot{\phi} + \frac{1}{RC} \dot{\phi} + \omega_J^2 \sin \phi = \omega_J^2 \gamma$$

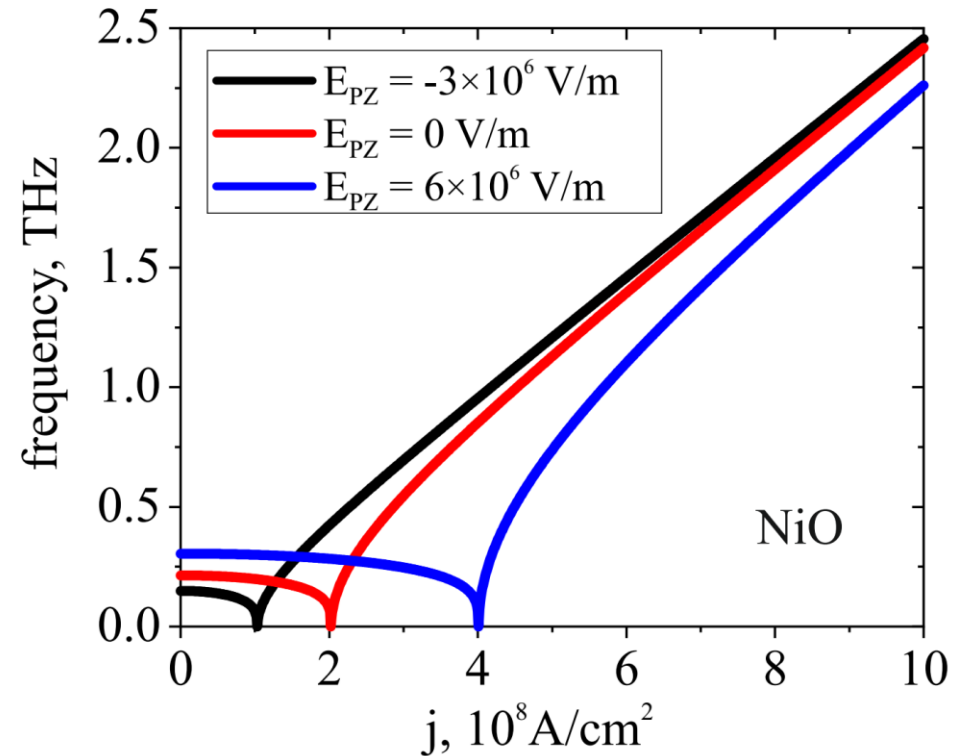
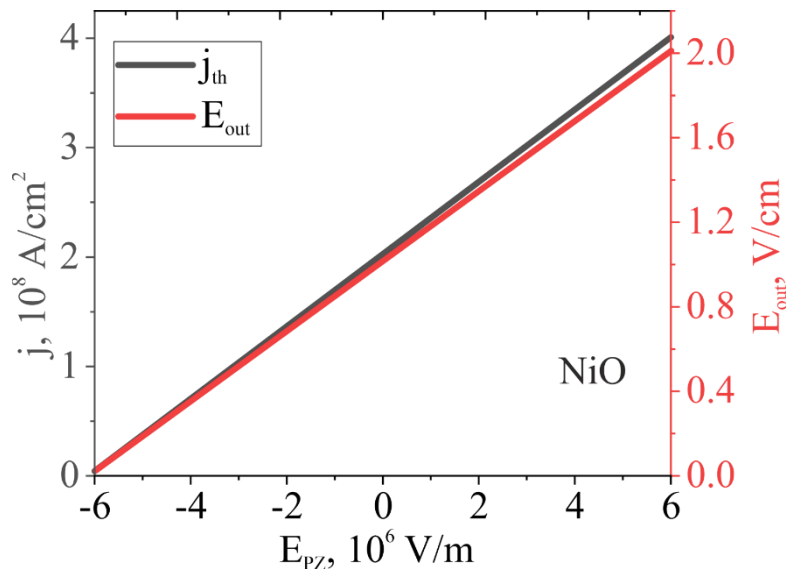
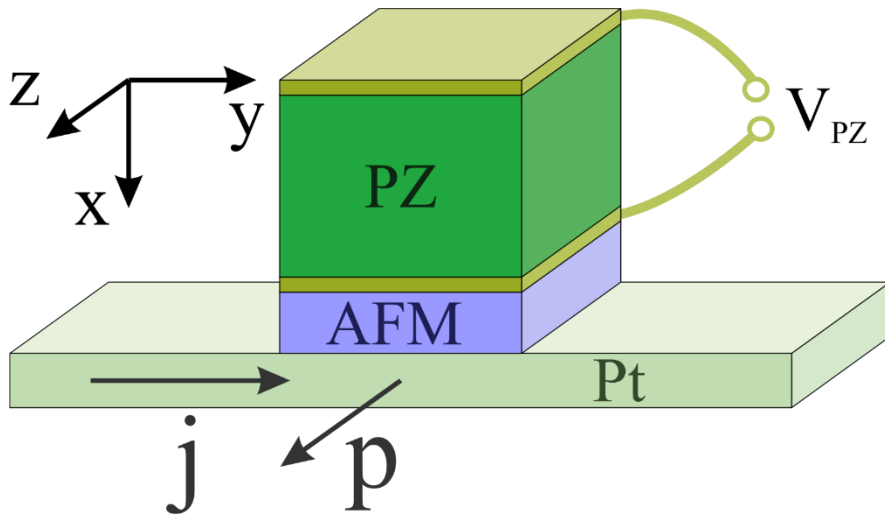
$$\omega_J^2 = (2e/\hbar)^2 j_0 / C$$

$$\gamma = j_e / j_0$$

$$V = \frac{\hbar}{2e} \dot{\phi}$$

$\phi$  – phase of a supercurrent

# Изменение частоты АФМ резонанса с помощью магнитострикции



P.A. Popov, A.R. Safin, A. Kirilyuk, et al.  
 PHYSICAL REVIEW APPLIED 13,  
 044080 (2020)

# 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

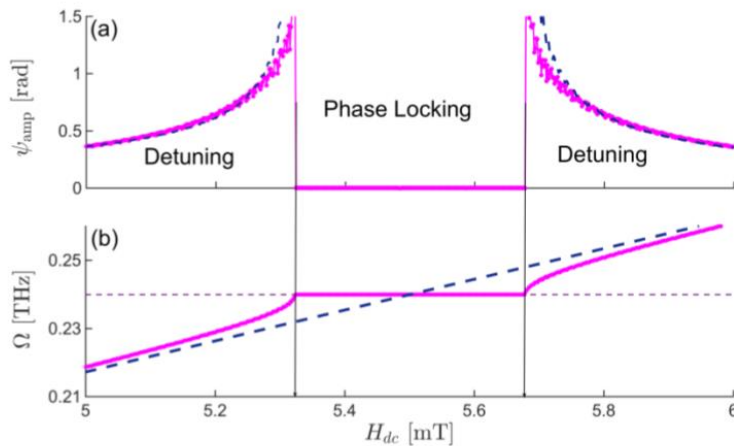
O. Gomonay,<sup>1,2</sup> T. Jungwirth,<sup>3,4</sup> and J. Sinova<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Institut für Physik, Johannes Gutenberg Universität Mainz, D-55099 Mainz, Germany

<sup>2</sup>National Technical University of Ukraine "KPI", 03056, Kyiv, Ukraine

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

<sup>4</sup>School of Physics and Astronomy, University of Nottingham, Nottingham NG7 2RD, United Kingdom



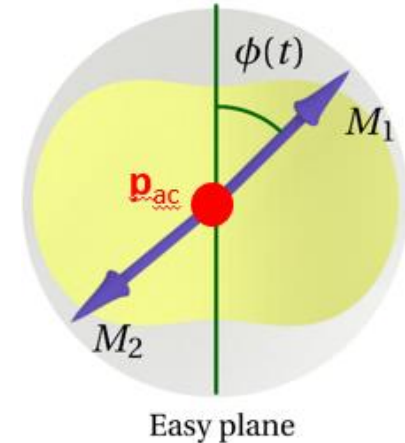
O. Gomonay, et al. PRB. 2018.

Anti-damping-like torque:

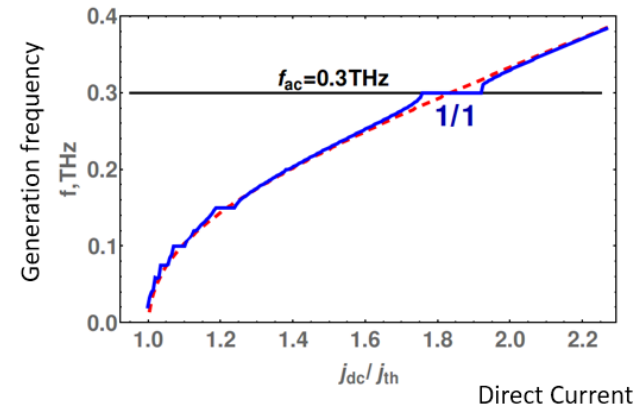
$$\tau_{STT} \sim j(\mathbf{l} \times \mathbf{p} \times \mathbf{l})$$

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

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

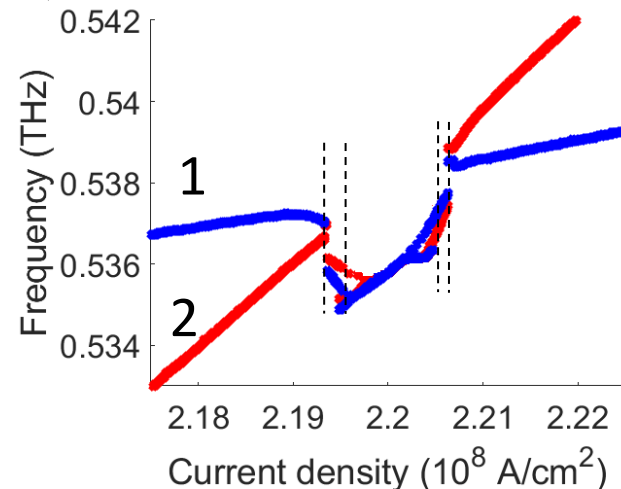
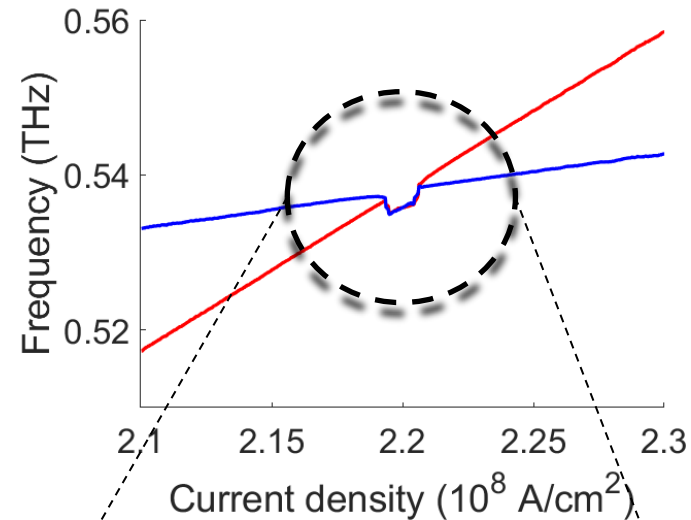
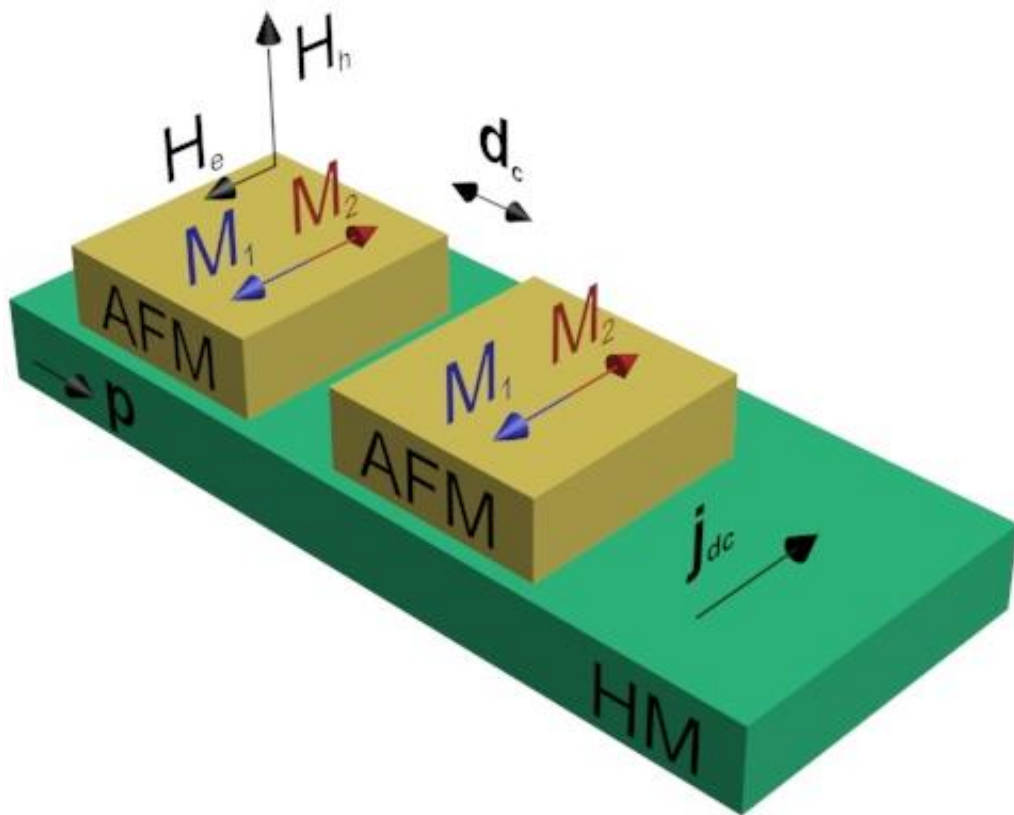


Efficient injection-locking via parallel pumping



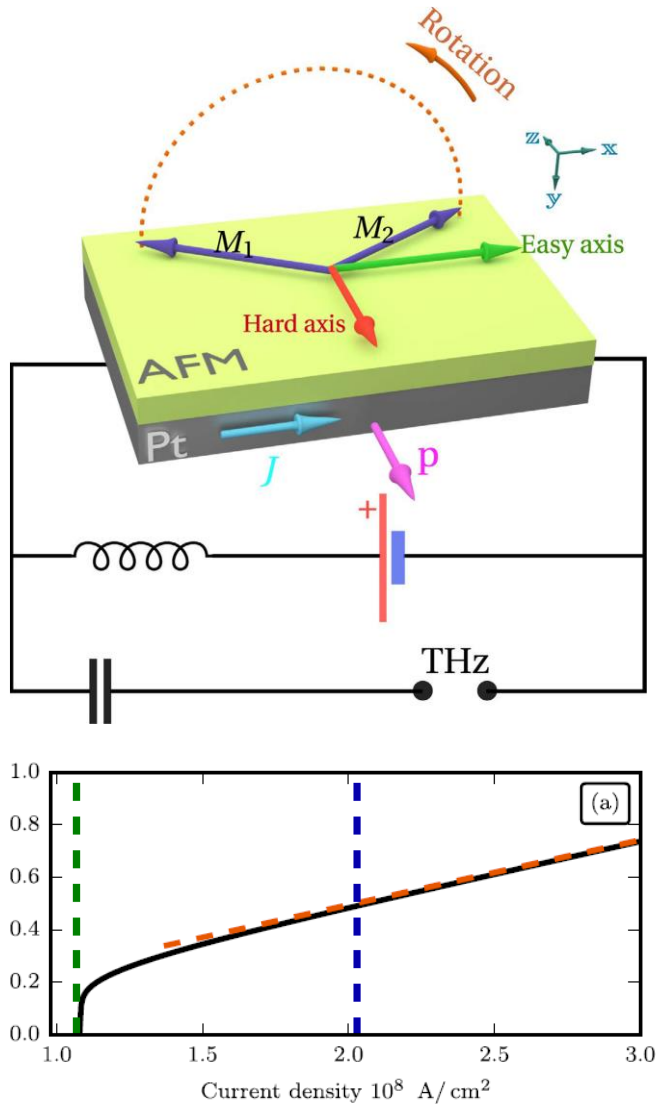
R. Khymyn, et al. INTERMAG. 2017.

# Взаимная синхронизация АФМО

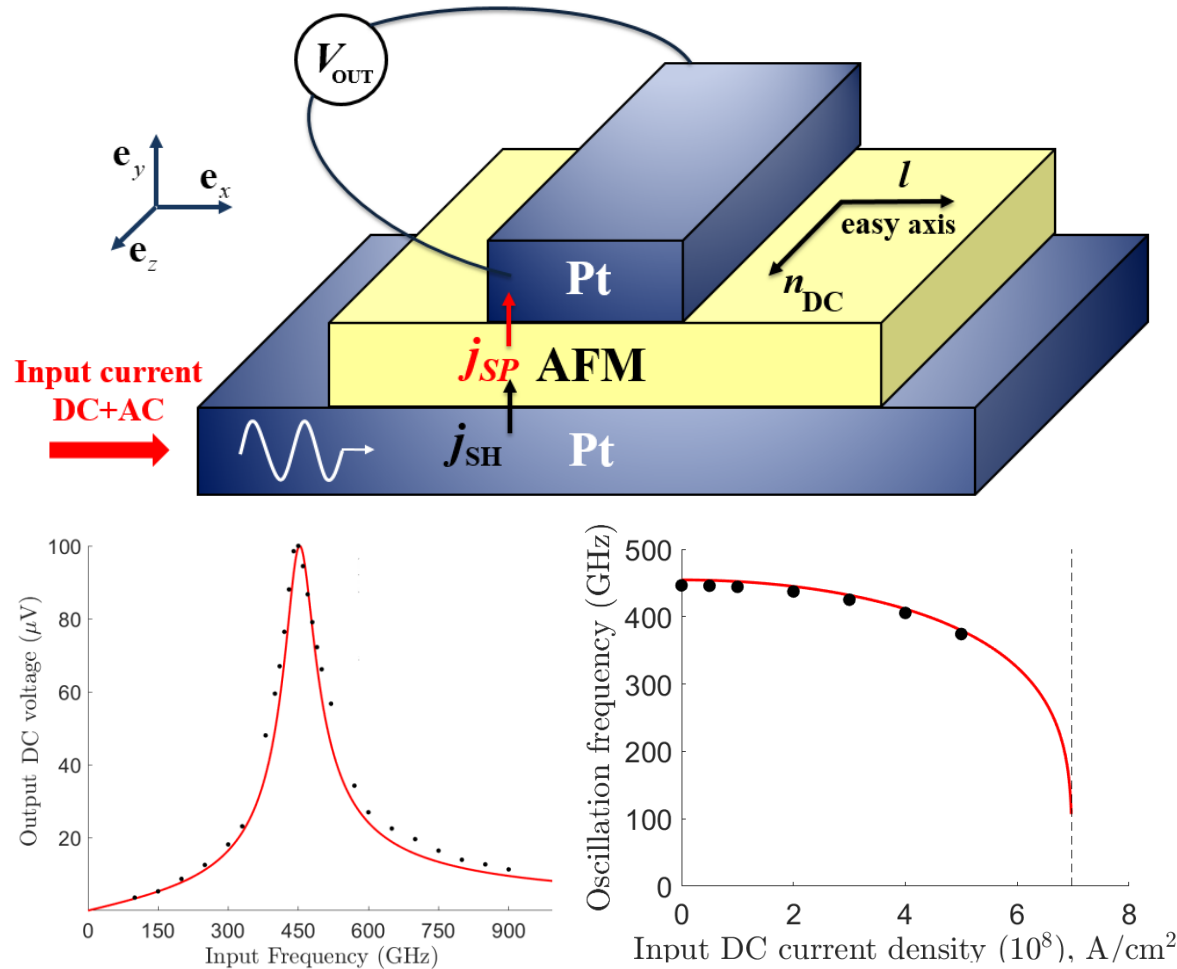


A. Safin, et al. INTERMAG. 2019.

# AFM-based devices



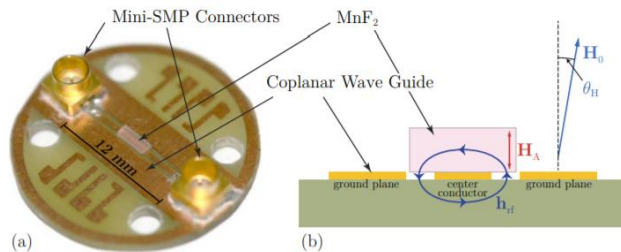
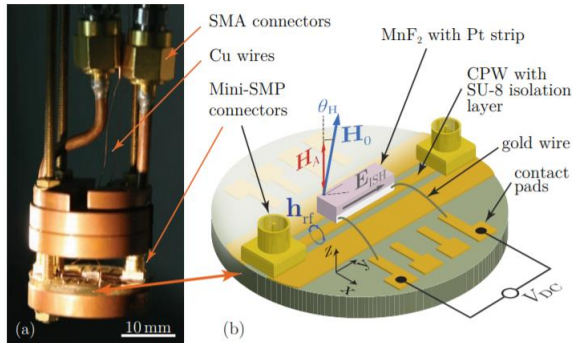
R. Khymyn, et al. Sci. Rep. 2017.



A. Safin, V. Puliafito, M. Carpentieri, G. Finocchio, S. Nikitov, P. Stremoukhov, A. Kirilyuk, V. Tyberkevych and A. Slavin.. **Electrically tunable detector of THz-frequency signals based on an antiferromagnet.** Applied physics letters. 2020.

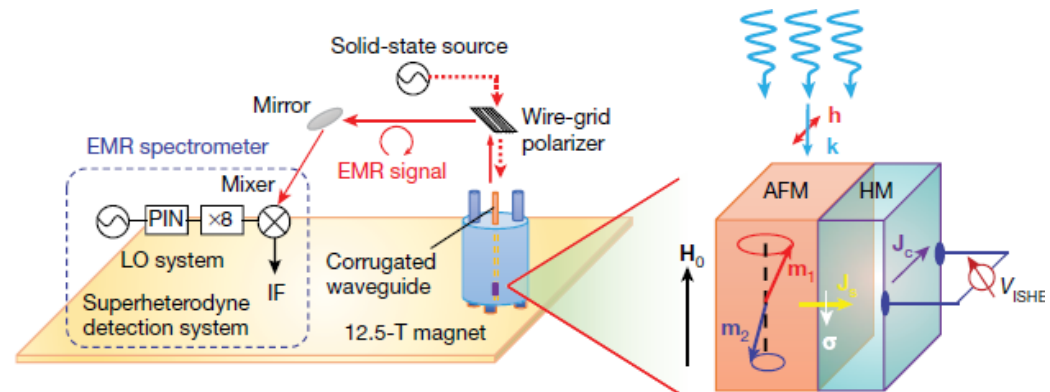


# Эксперименты по спиновой накачке



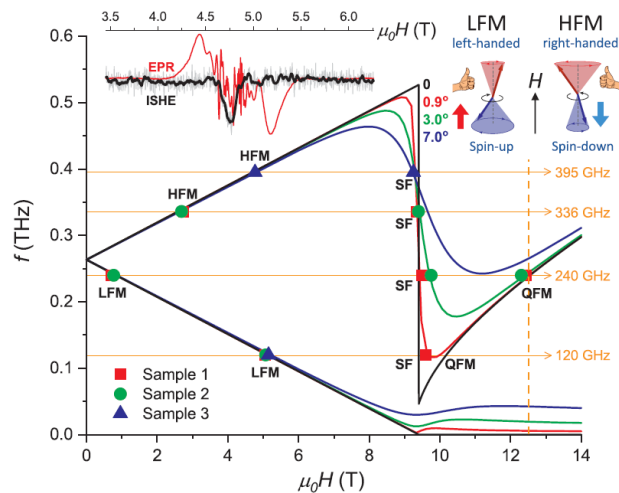
- ✓ Electrical detection of AFMR in  $\text{MnF}_2/\text{Pt}$  bilayer
- ✓ Coplanar waveguide excitation
- ✓ Easy axis is perpendicular to the interface
- ✓  $\text{MnF}_2$  @  $3\text{mm} \times 1\text{mm} \times 0.5\text{mm}$ ,
- ✓ Pt @  $3\text{mm} \times 250\mu\text{m} \times 7\text{nm}$

M.P. Ross, et al. JAP, 2015. Vol. 118. No. 233907



- ✓ Electrical detection of AFMR in  $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Pt}$  bilayer
- ✓ Gunn diode excitation
- ✓ Easy axis is parallel to the interface
- ✓  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  @  $5\text{mm} \times 5\text{mm} \times 1\text{mm}$ ,
- ✓ Pt @ 5 nm thickness

J. Li, et al. Nature, 2020. Vol. 578. P. 70-74.

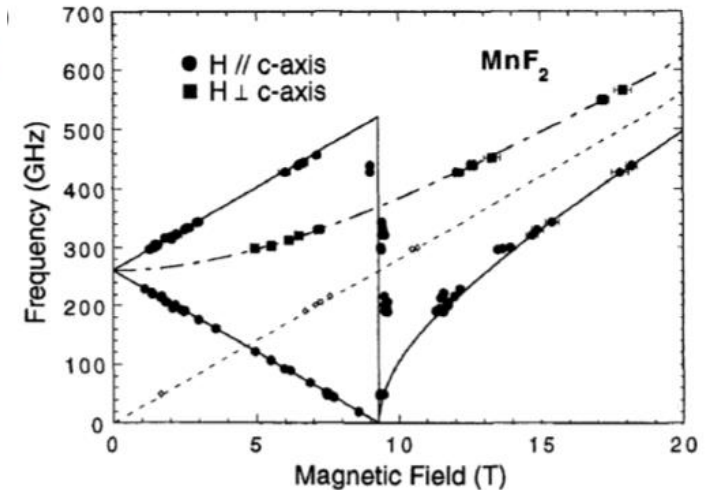
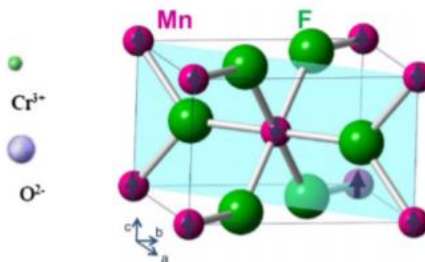
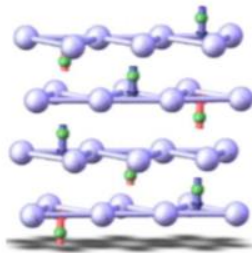
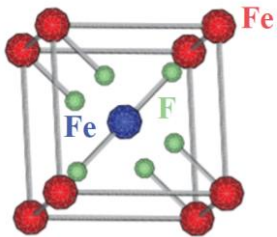


- ✓ Electrical detection of AFMR in  $\text{MnF}_2/\text{Pt}$  bilayer
- ✓ Gunn diode excitation and circular waveguide
- ✓ Easy axis is parallel to the interface
- ✓  $\text{MnF}_2$  @  $5\text{mm} \times 5\text{mm} \times 0.3\text{mm}$ ,
- ✓ Pt @ 4 nm thickness

P. Vaidya, et al. Science, 2020. Vol. 368. P. 160-165.

# Одноосные АФМ изоляторы

AFM easy axis	$\mu_0 H_A$ (T)	$\mu_0 H_{EX}$ (T)	$f_{AFMR}$ (GHz)	$\Delta f$ (GHz)	Ref.
FeF <sub>2</sub>	20	54	<b>1400</b>	~30	[1,2]
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.07	245	<b>163</b>	~5.6	[3,4]
MnF <sub>2</sub>	0.85	53	<b>245</b>	~2.64	[5,6]

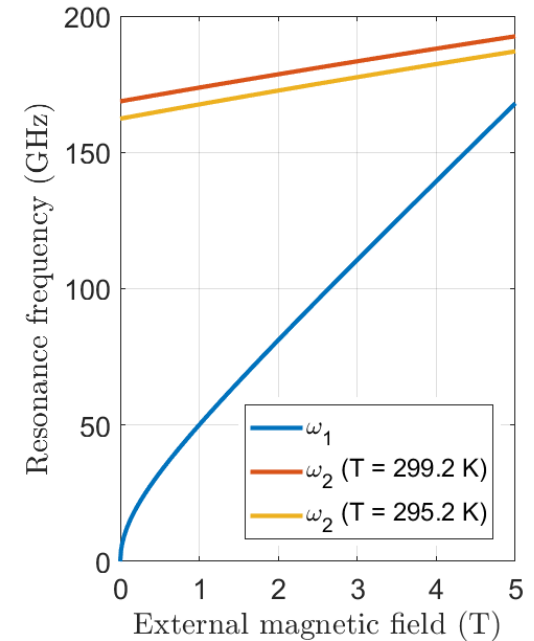
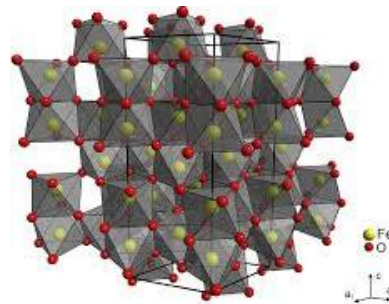
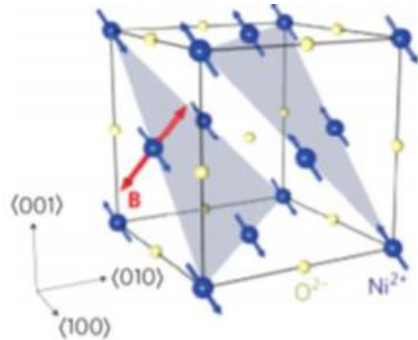


1. R.C. Ohlmann, M. Tinkham. Phys. Rev. 1961. Vol. 123. No.2. P. 425-434.
2. M.T. Hutchings, et al. J. Phys. C: Solid State Phys. 1970. Vol.3. P. 307-322.
3. E.S. Dayhoff. Phys. Rev. 1957. Vol. 107. No. 1. P. 84-91.
4. S. Foner. Phys. Rev. 1963. Vol. 130. No. 1. P. 183-198.
5. F.M. Johnson, A.H. Nethercot. Phys. Rev. 1959. Vol. 114. No. 3. 705-716.
6. J.C. Burgiel, M.W.P. Strandberg. JAP. 1964. Vol. 3. No. 3. P. 852-853.

Hagiwara, M., et al. Int. J. Infrared Millimeter Waves. 1999. Vol. 20. P. 617.

# Двуосные АФМ изоляторы

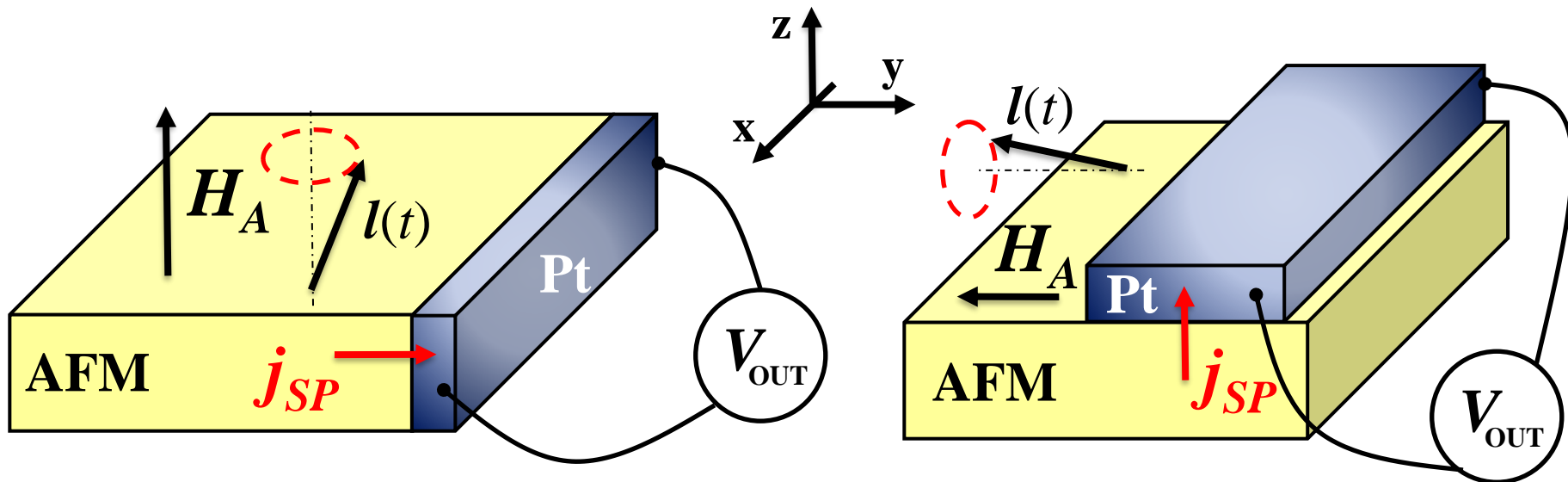
AFM easy plane	$\mu_0 H_{A1}$ (mT)	$\mu_0 H_{A2}$ ( $\mu$ T)	$\mu_0 H_{EX}$ (T)	$\mu_0 H_{DMI}$ (T)	$f_{AFMR1}$ (GHz)	$f_{AFMR2}$ (GHz)	$\Delta f$ (GHz)	Ref.
NiO	635	11000	968.4	-	<b>1070</b>	<b>~140</b>	~18	[1-3]
$\alpha$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23.8	1.54	1040	2.72	<b>~160</b>	<b>~ 6.7</b>	~2.8	[4-6]



1. B. Condon. Journ. of Phys. Soc. of Jap. 1960. Vol. 15. No.11. P. 1970-1975.
2. A.J. Sievers, M. Tinkham. Phys. Rev. 1963. Vol. 129. No.4. P. 1566-1571.
3. Z. Wang, et al. APL. 2018. Vol. 112. No. 252404.
4. H. Kumagai, et al. Phys. Rev. 1955. Vol. 99. No. 4. P. 1116-1118.
5. P.R. Elliston, G.J. Troup. J. Phys. C. 1968. Vol. 1. P. 169-178.
6. V.I. Ozhogin, V.G. Shapiro. Sov. Phys. JETP. 1969. Vol. 28. No. 5. P. 915-922.

Velikov, L., Rudashevskii, E. Sov. Phys. JETP. 1969. Vol. 29. No.5. P. 836-839.

# Спиновая накачка из АФМ



Easy axis is oriented perpendicular  
to the AFM plane

Easy axis is oriented parallel  
to the AFM plane

## Mathematical model

$$\mathbf{l} \times \left[ \frac{1}{\omega_{ex}} \frac{d^2 \mathbf{l}}{dt^2} + \alpha_{eff} \frac{d\mathbf{l}}{dt} + \hat{\Omega} \cdot \mathbf{l} \right] = \frac{1}{\omega_{ex}} \left( \left[ \mathbf{l} \times \frac{d\boldsymbol{\omega}_{AC}}{dt} \right] \times \mathbf{l} + (\mathbf{l} \cdot \boldsymbol{\omega}_{DC}) [\mathbf{l} \times \boldsymbol{\omega}_{DC}] - 2(\mathbf{l} \cdot \boldsymbol{\omega}_{DC}) \frac{d\mathbf{l}}{dt} \right)$$

Ivanov, 2014. Low Temp. Phys. 40, 91

## External AC and DC magnetic fields

$$\boldsymbol{\omega}_{DC} = \gamma H_{DC} \mathbf{n}_{DC}$$

$$\boldsymbol{\omega}_{AC} = \gamma \mu_0 (\sin \alpha_P, i \cos \alpha_P, 0) h_{\sim} e^{i\omega t} = \omega_{AC} \mathbf{n}_{AC} e^{i\omega t}$$

# Математическая модель

$$\mathbf{l} \times \left[ \frac{1}{\omega_{ex}} \frac{d^2 \mathbf{l}}{dt^2} + \alpha_{eff} \frac{d\mathbf{l}}{dt} + \hat{\Omega} \cdot \mathbf{l} \right] = \frac{1}{\omega_{ex}} \left( \left[ \mathbf{l} \times \frac{d\boldsymbol{\omega}_{AC}}{dt} \right] \times \mathbf{l} + (\mathbf{l} \cdot \boldsymbol{\omega}_{DC}) [\mathbf{l} \times \boldsymbol{\omega}_{DC}] - 2(\mathbf{l} \cdot \boldsymbol{\omega}_{DC}) \frac{d\mathbf{l}}{dt} \right)$$

## External AC force

$$\boldsymbol{\omega}_{AC} = \gamma \mu_0 (\sin \alpha_P, i \cos \alpha_P, 0) h_{\sim} e^{i\omega t} = \omega_{AC} \mathbf{n}_{AC} e^{i\omega t}$$

## Solution

$$\mathbf{l} = \boldsymbol{\lambda} + \mathbf{s} \cdot e^{i\omega t} + \text{c.c.}$$

## Dynamic equation

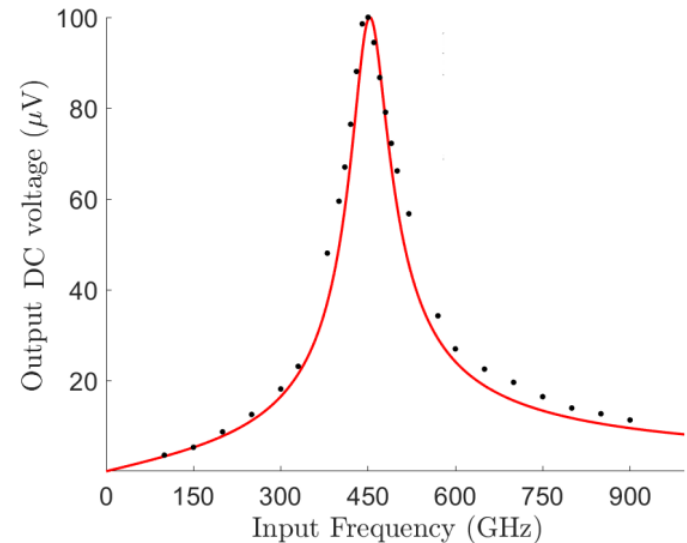
$$\left( -\frac{\omega^2}{\omega_{ex}} + i\omega\alpha_{eff} \right) \mathbf{s} + \Omega \mathbf{s} - (\boldsymbol{\lambda} \cdot \Omega \boldsymbol{\lambda}) \mathbf{s} - (\boldsymbol{\lambda} \cdot \Omega \mathbf{s}) \boldsymbol{\lambda} = \left[ \boldsymbol{\lambda} \times \frac{d\boldsymbol{\omega}_{AC}}{dt} \right]$$

## Solution of dynamic equations

$$\mathbf{s} = \frac{\omega_{AC} \omega}{\omega_{AFMR}^2 - \omega^2 + i\gamma_0 \omega} \mathbf{n}_{AC} = A(\omega) \mathbf{n}_{AC}$$

## Rectified voltage

$$V_{OUT} \sim \kappa \cdot \left\langle \left[ \mathbf{l} \times \frac{d\mathbf{l}}{dt} \right]_{\mathbf{n}_\perp} \right\rangle \sim \omega |A(\omega)|^2 \sin 2\alpha_P$$



A. Safin, et al. APL. 2020.

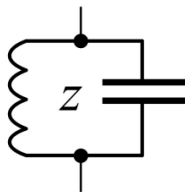
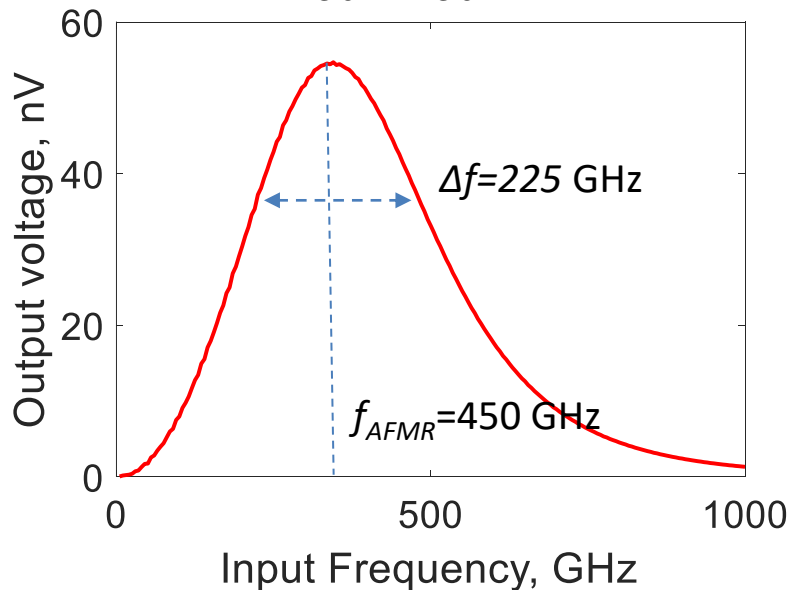
# Выпрямленное напряжение

## Easy axis

$$\hat{\Omega} = \omega_a \mathbf{z} \otimes \mathbf{z}$$

$$V_{\text{OUT}} \sim \omega |A(\omega)|^2 \sin 2\alpha_P$$

$\text{Ir}_{50}\text{Mn}_{50}$

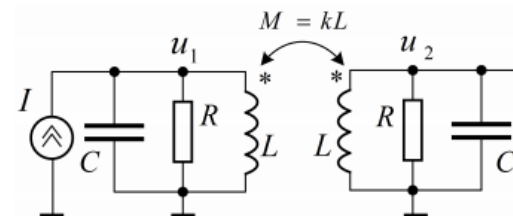
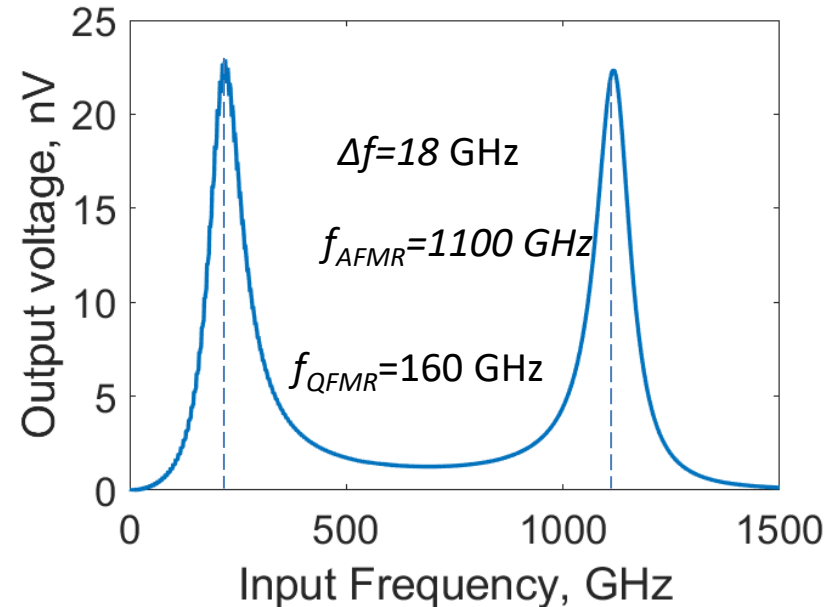


## Easy plane

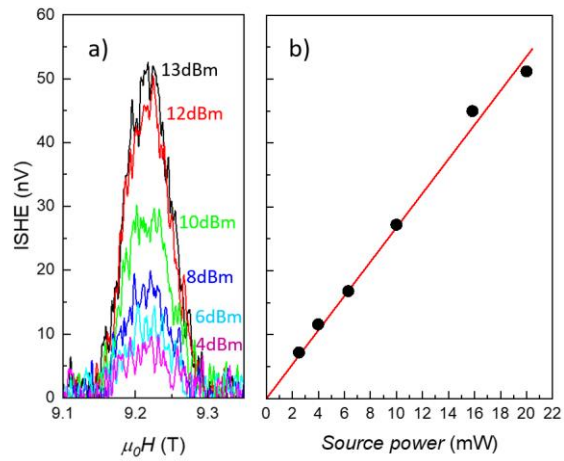
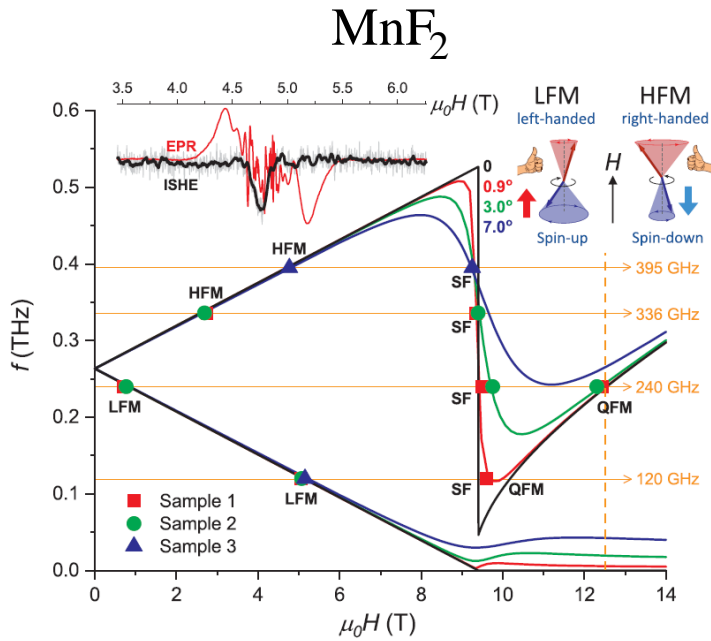
$$\hat{\Omega} = \omega_h \mathbf{x} \otimes \mathbf{x} - \omega_a \mathbf{y} \otimes \mathbf{y}$$

$$V_{\text{OUT}} \sim \omega A(\omega) B(\omega) \sin 2\alpha_P$$

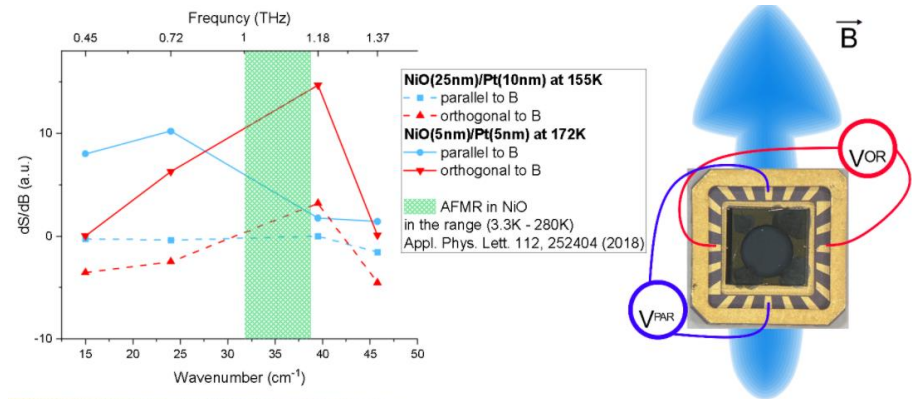
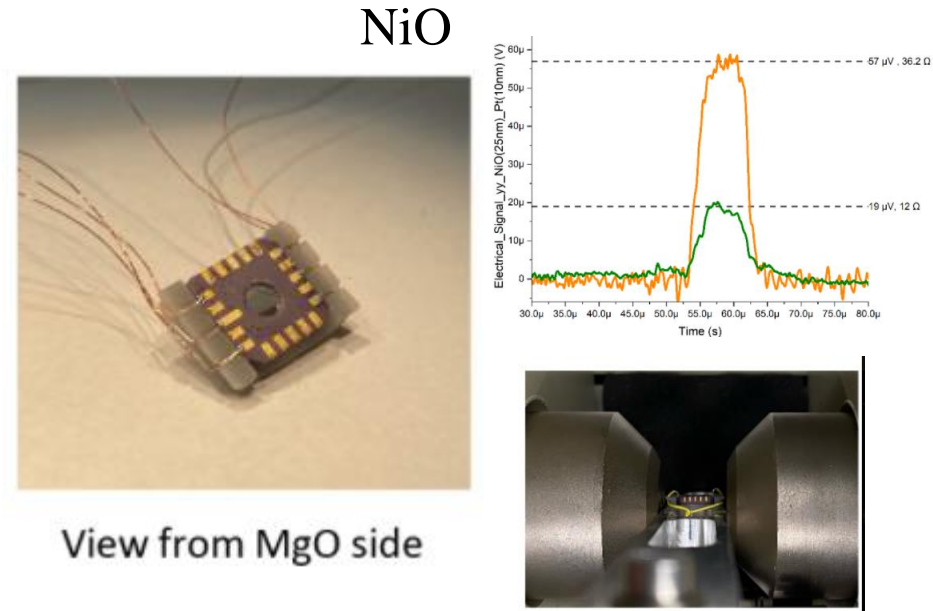
$\text{NiO}$



# Эксперименты по спиновой накачке



P. Vaidya, del Barco, et al.



A. Kirilyuk, P. Strmoukhov, et al.

# Нейроморфные вычисления

*“Neuromorphic computing:*

*use of artificial circuits that mimic neuro-biological architectures and processes characteristic for human’s nervous system.”*

Нейроморфные вычисления в спинтронике:

- M. Sharad et al., “Spin-Based Neuron Model With Domain-Wall Magnets as Synapse”, IEEE Trans. Nanotech. **11**, 843 (2012).
- A. Sengupta et al., “Spin orbit torque based electronic neuron”, Appl. Phys. Lett. **106**, 143701 (2015).
- S. Lequeux et al. “A magnetic synapse: multilevel spin-torque memristor with perpendicular anisotropy”, Sci. Rep. **6**, 31510 (2016).
- A. Jaiswal et al. “Proposal for a Leaky-Integrate-Fire Spiking Neuron Based on Magnetoelectric Switching of Ferromagnets”, IEEE Trans. Electron Devices **64**, 1818 (2017).
- C. Liyanagedera et al., “Stochastic Spiking Neural Networks Enabled by Magnetic Tunnel Junctions: From Nontelegraphic to Telegraphic Switching Regimes”, Phys. Rev. Appl. **8**, 064017 (2017).
- **Experimental work:** J. Torrejon et al., “Neuromorphic computing with nanoscale spintronic oscillators”, Nature **547**, 428 (2017).
- **Review paper:** A. Sengupta and K. Roy, “Neuromorphic computing enabled by physics of electron spins: Prospects and perspectives”, Appl. Phys. Express **11**, 030101 (2018).

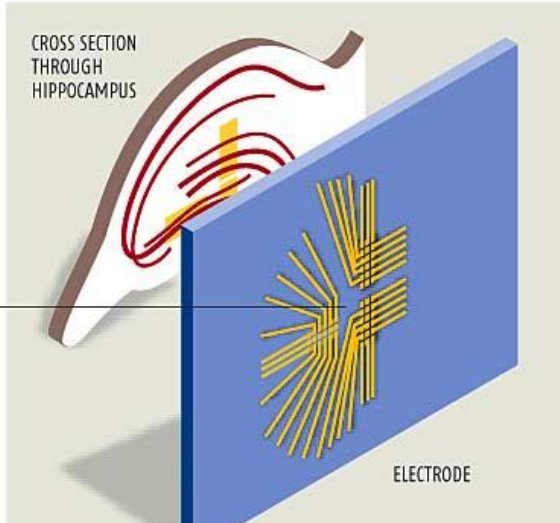
**Только ферромагнитные материалы**



# НЕЙРОМОРФНЫЕ ПРОЦЕССОРЫ

## HIPPOCAMPUS REPLACEMENT

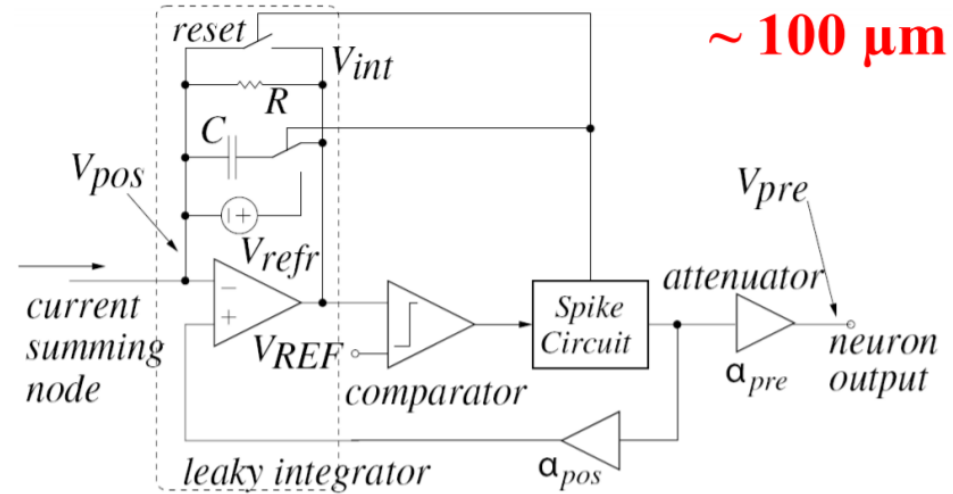
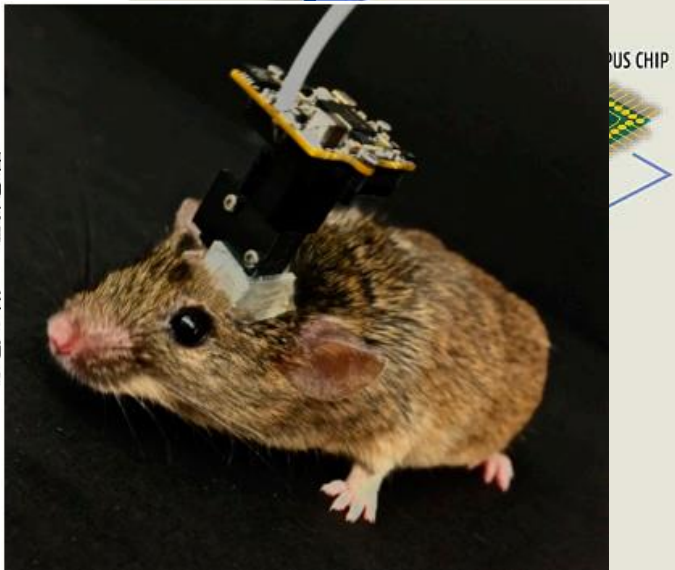
Chip takes over the processing of nervous signals normally performed by the hippocampus



Multiple electrodes are placed on each array. They are positioned to mimic the structure of nerve tissue within a slice of the hippocampus, and make contact with other parts of the brain

Recording electrode "listens" to neuronal activity coming into hippocampus and it to the chip

Stimulating electrode array delivers the appropriate electrical output to the rest of the brain



МОЗГ человека =  $10^{11}$  нейронов

Количество контактов 1 нейрона  $\sim 10^4$

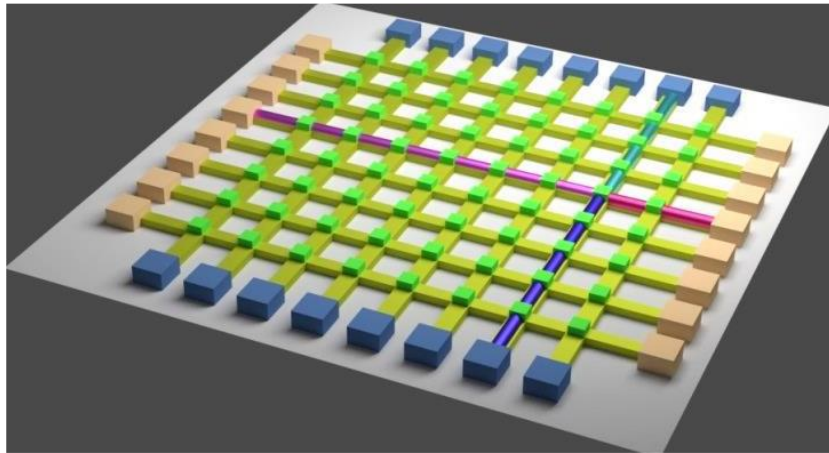
Общее количество связей в мозге  $\sim 10^{15}$

Один нейрон может находиться в 10 состояниях (не в 2)

Количество комбинаций в мозге  $10^{1015}$

Количество атомов во Вселенной  $\sim 10^{80}$

# НЕЙРОМОРФНЫЕ ПРОЦЕССОРЫ НА АФМ СО



**Бежевые** элементы – входные нано-осцилляторы на эффекте переноса спинового момента

**Синие** элементы – выходные наноосцилляторы

**Зеленые** элементы – наномагниты для изменения направления движения спиновых волн

**Желтые** линии – нановолноводы спиновых волн

**Розовые, пурпурные, синие, голубые** линии – примеры распространения спиновых волн по волноводам

## Нейроморфный магнонный процессор

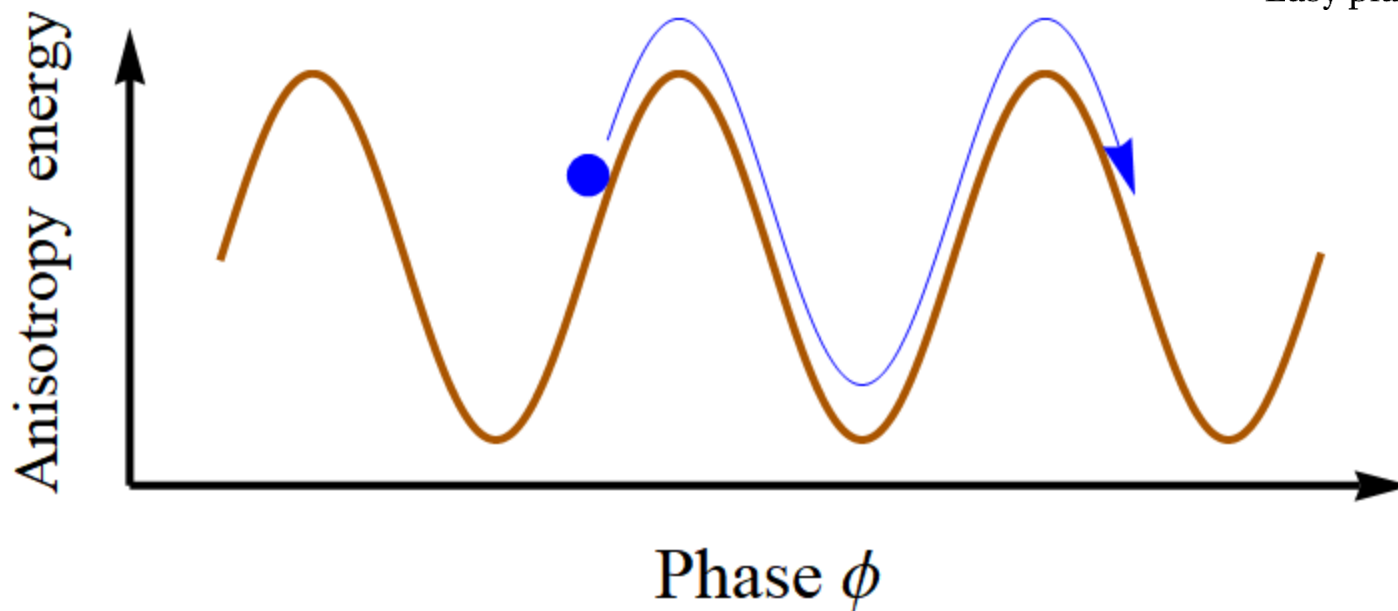
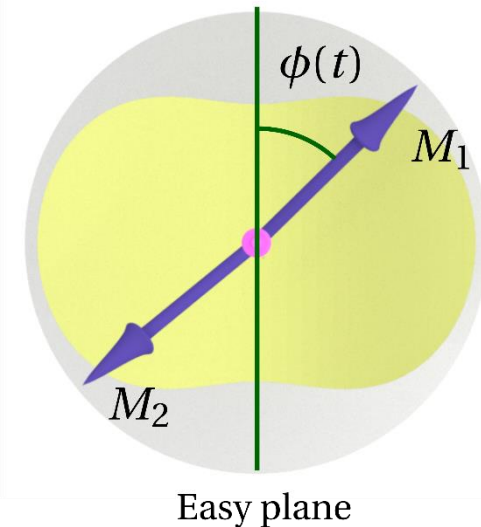
Нейроморфная сеть осуществляет связь между нано-осцилляторами, их взаимную синхронизацию и квазиголографическую обработку сигналов.

- **Сверхбыстрые нано-осцилляторы (нейроны) работают на терагерцовых частотах.**
- **АФМ магноны нечувствительны к паразитным наводкам между передающими волноводами благодаря отсутствию побочного дипольного поля.**
- **Информация закодирована в виде фазы сигналов, что позволяет передавать множество сигналов от разных источников одновременно в одном волноводе.**

# AFM осциллятор: маятниковая модель

$$\frac{1}{\omega_{\text{ex}}} \ddot{\phi} + \alpha \dot{\phi} + \frac{\omega_e}{2} \sin 2\phi = \sigma j$$

Spin torque  $\sigma j$



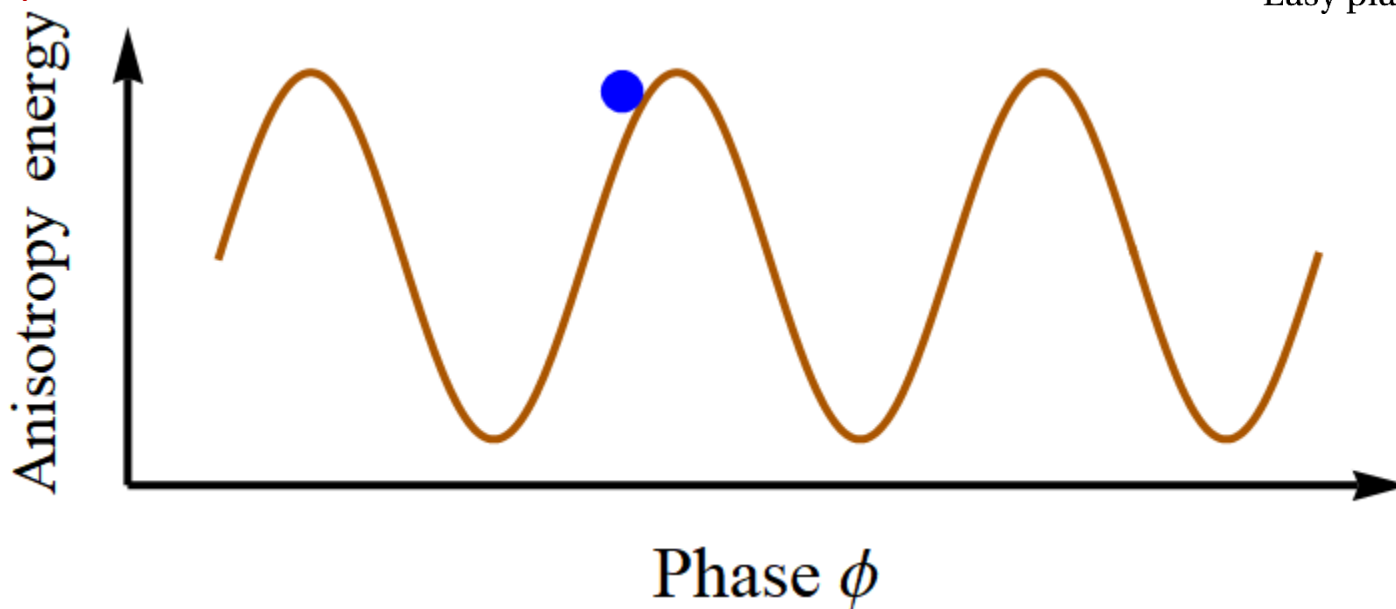
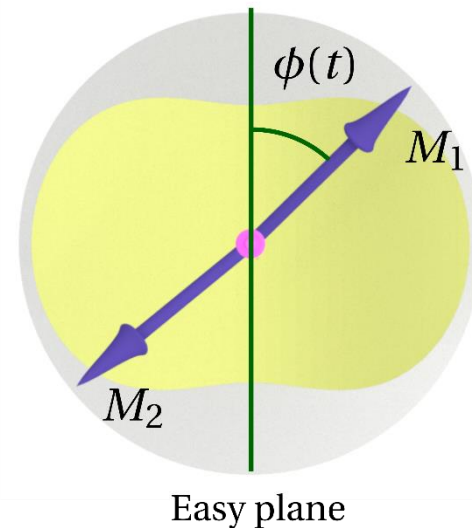
# Докритический режим работы

## AFM осциллятора

$$\frac{1}{\omega_{ex}} \ddot{\phi} + \alpha \dot{\phi} + \frac{\omega_e}{2} \sin 2\phi = \sigma j$$

DC тока не достаточно для  
преодоления потенциального  
барьера

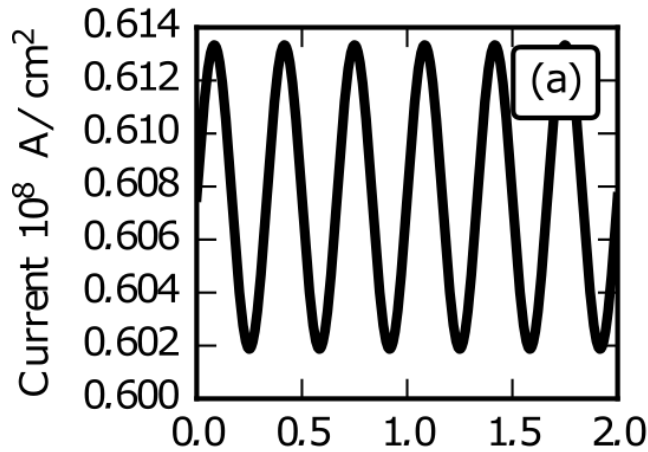
$$j < j_{cr}$$



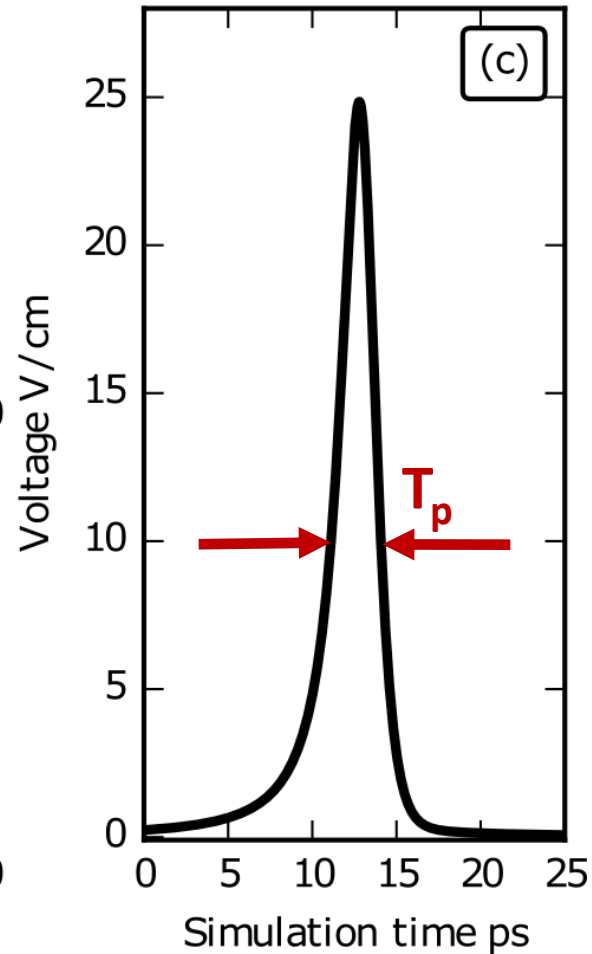
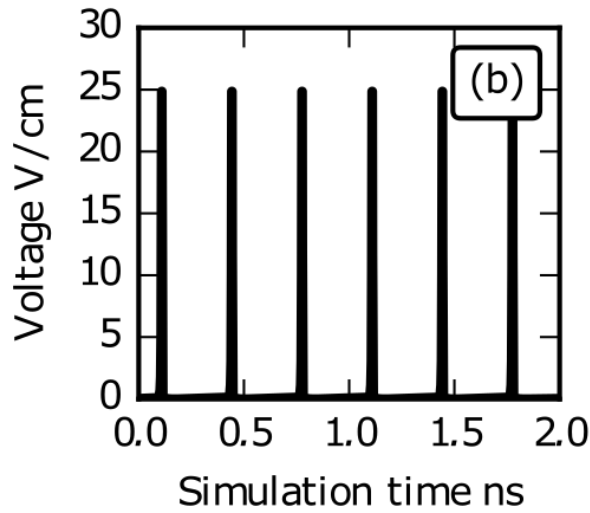
*Дополнительное малое внешнее воздействие будет вызывать  
единичный импульс (единичный спайк)*

# Генератор сверхкоротких ИМПУЛЬСОВ

**Вход:**



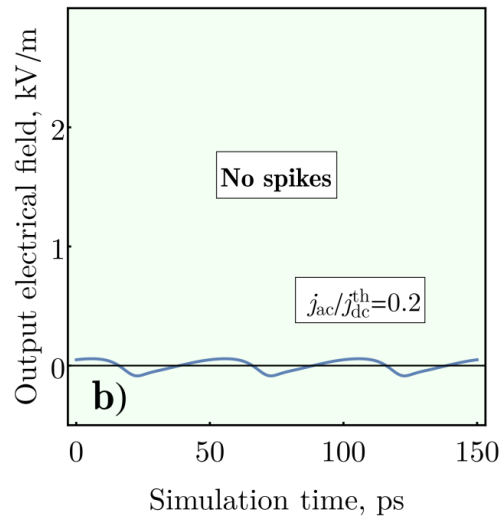
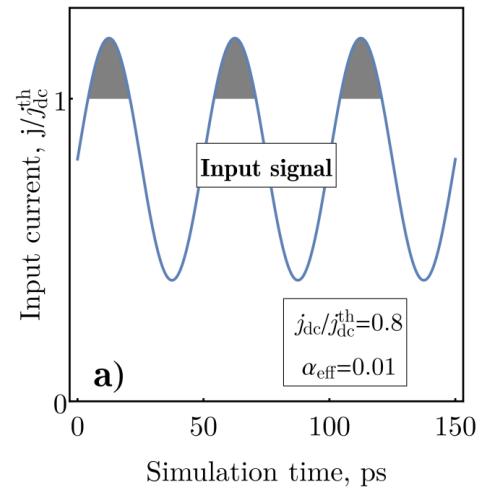
**Выход:**



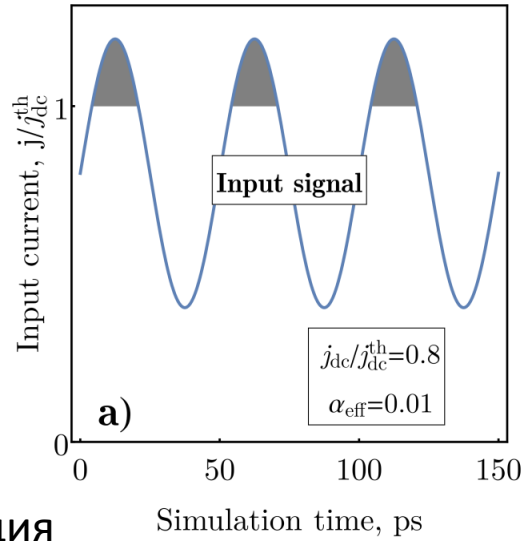
$$T_p = 4 \text{ ps} = 1/f_{\text{AFMR}}$$

# Докритический режим AFM осциллятора – генерация спайков

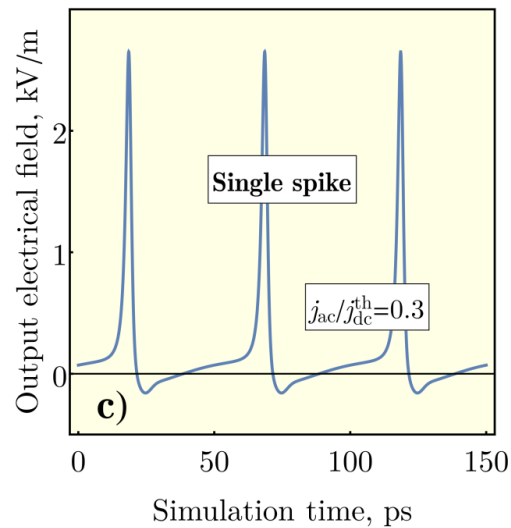
Малая АС модуляция



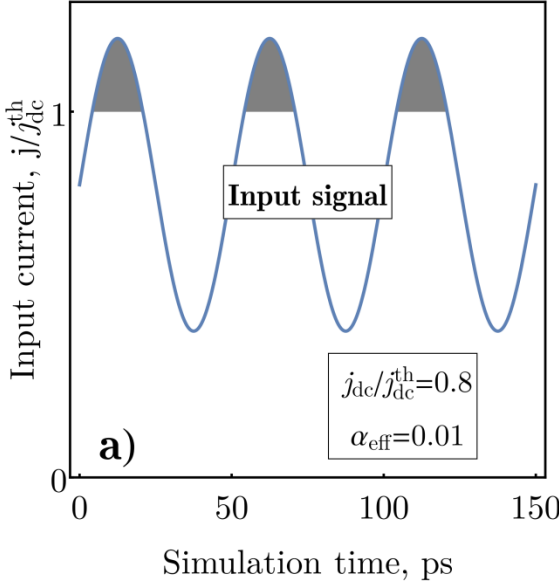
# Докритический режим AFM осциллятора – генерация спайков



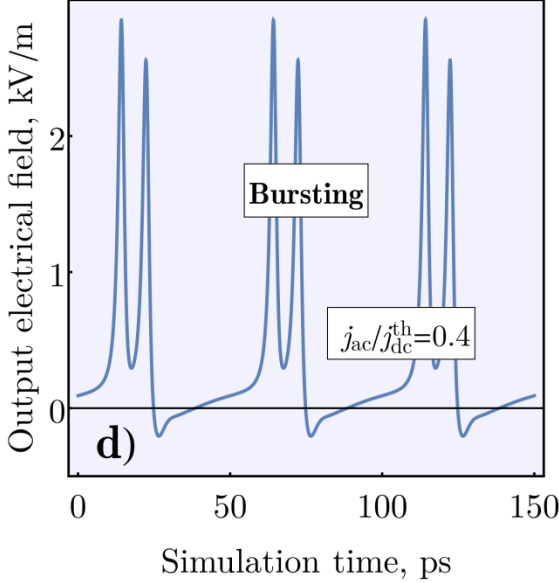
Достаточно большая АС модуляция



# Докритический режим AFM осциллятора – генерация спайков



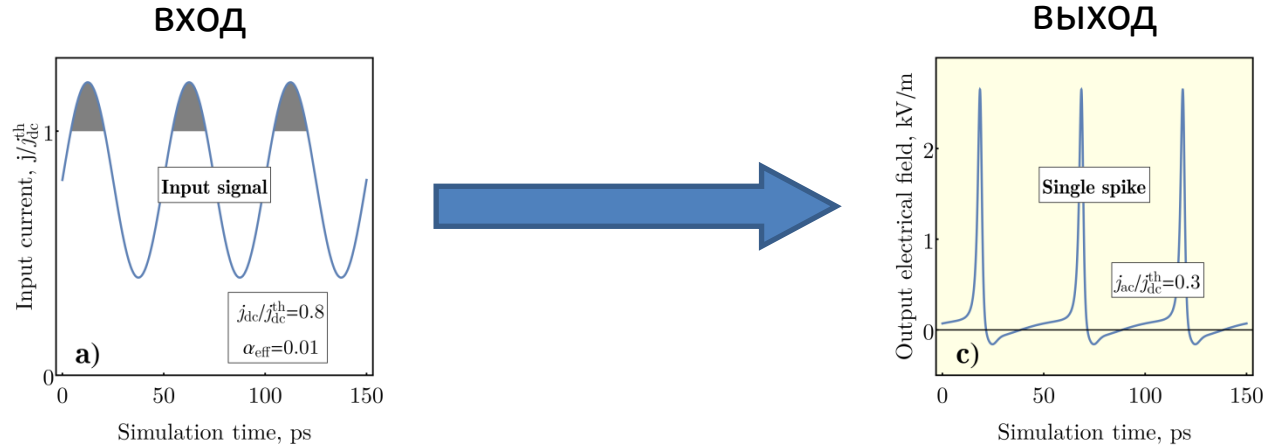
Сильная АС модуляция



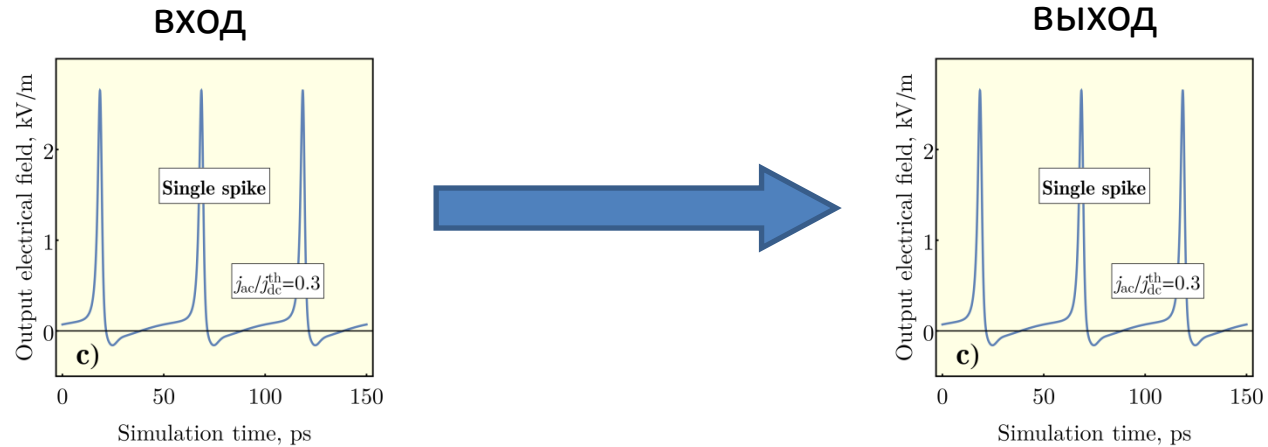


# Докритический режим AFM осциллятора – генерация спайков

Спайки могут быть созданы внешним АС воздействием

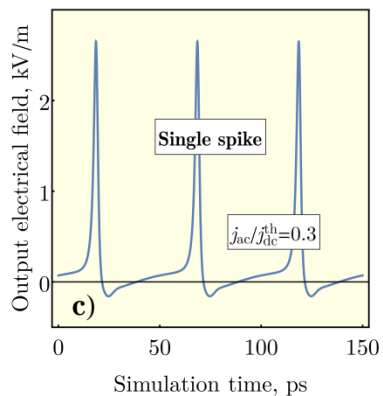


или спайками, созданными другим осциллятором

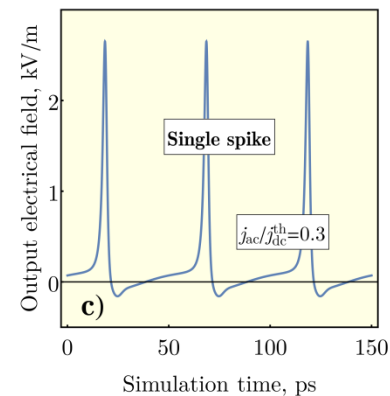


# Нейроморфный режим единичного **AFM** осциллятора

Входной **AFM** осциллятор

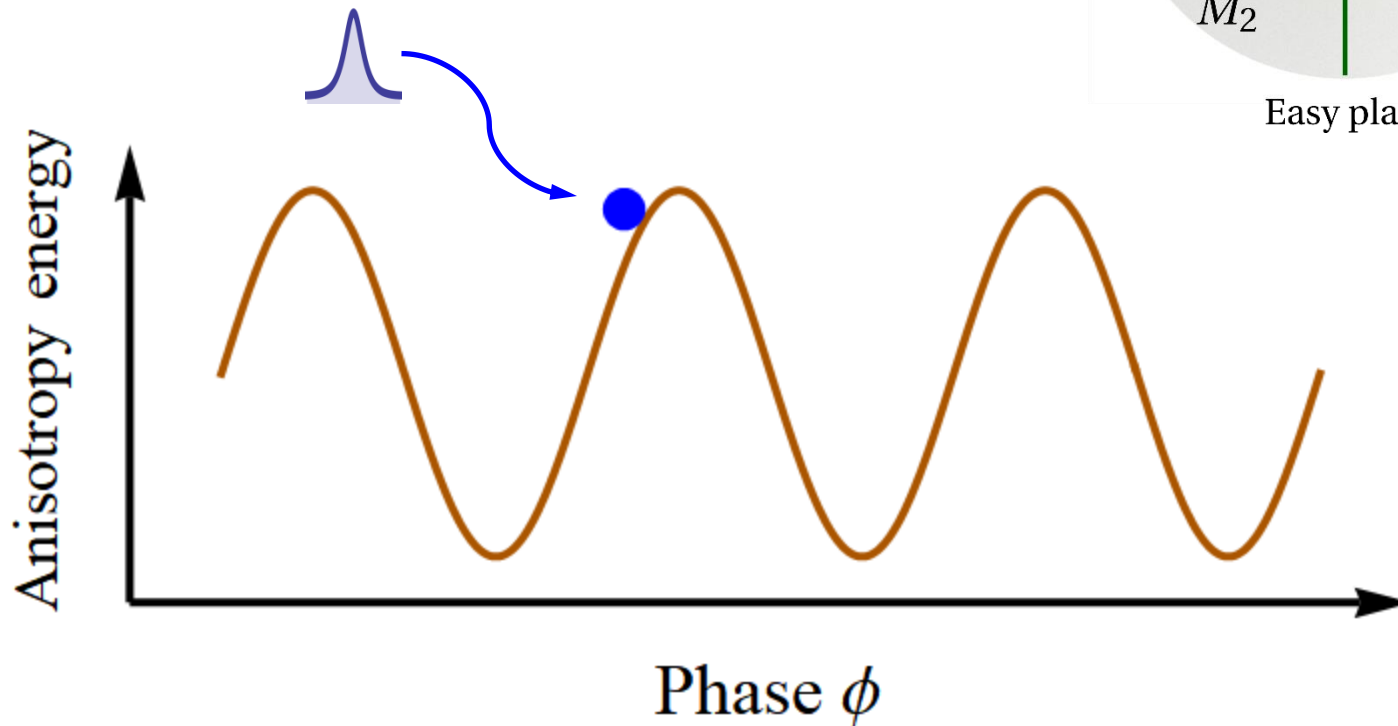
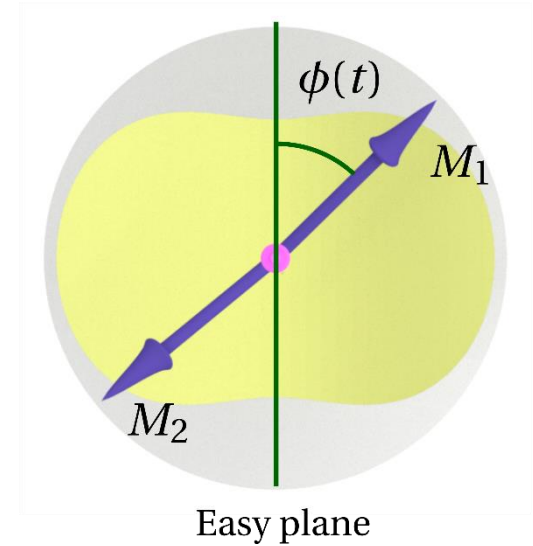


Выходной **AFM** осциллятор



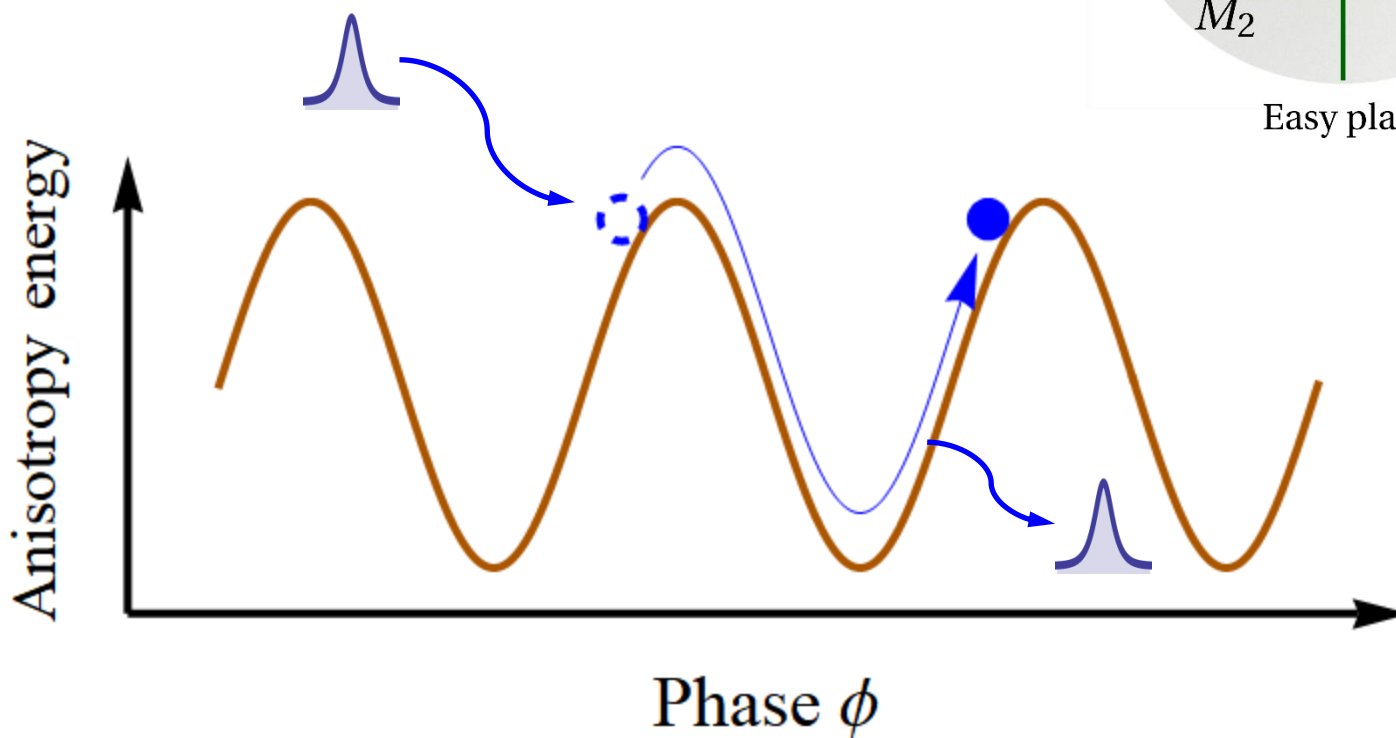
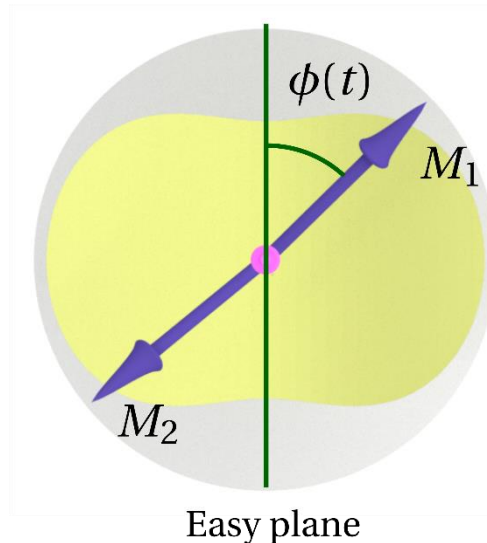
# Нейроморфный режим единичного **AFM** осциллятора

$$\frac{1}{\omega_{\text{ex}}} \ddot{\phi} + \alpha \dot{\phi} + \frac{\omega_e}{2} \sin 2\phi = \sigma j$$

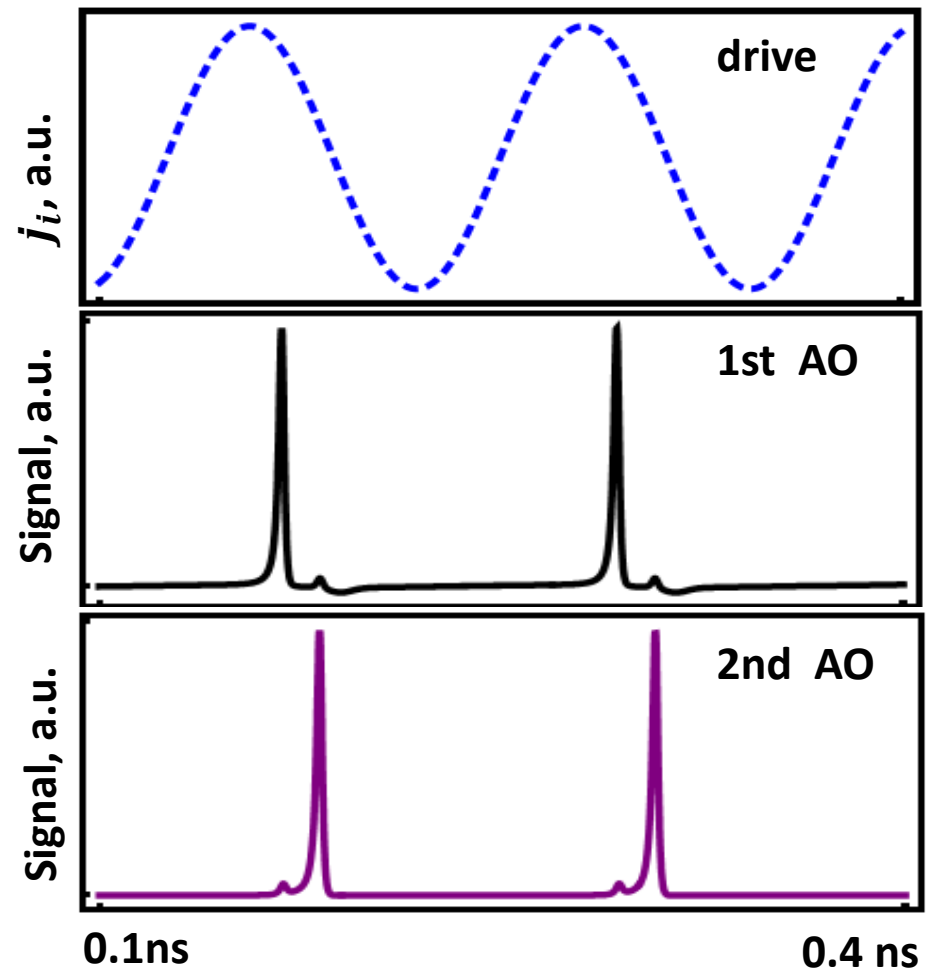
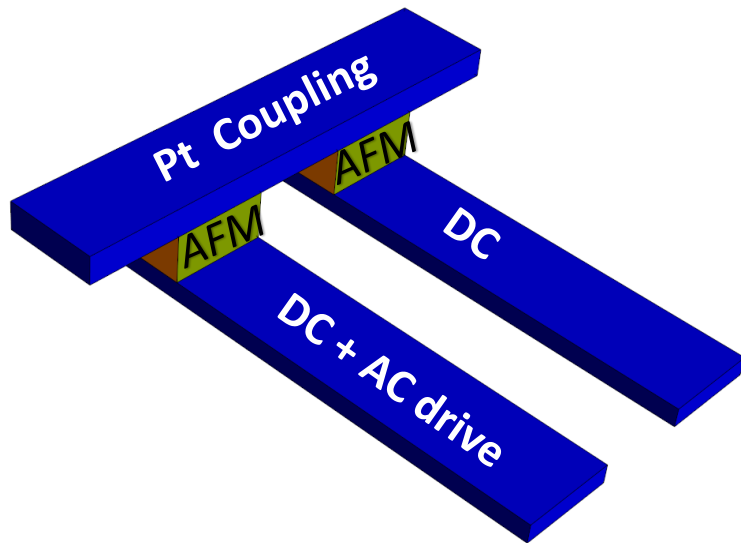


# Нейроморфный режим единичного **AFM** осциллятора

$$\frac{1}{\omega_{\text{ex}}} \ddot{\phi} + \alpha \dot{\phi} + \frac{\omega_e}{2} \sin 2\phi = \sigma j$$



# Моделирование двух AFM ОСЦИЛЛЯТОРОВ



# МОДЕЛЬ

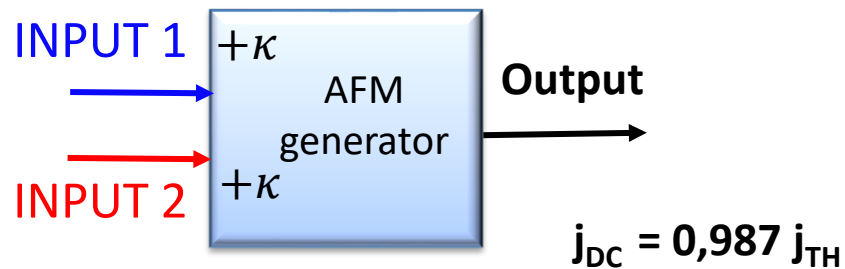
$$\frac{1}{\omega_{ex}} \ddot{\phi}_n + \alpha \dot{\phi}_n + \frac{\omega_{an}}{2} \sin(2\phi_n) = \sigma j_n + \sum_m \kappa_{nm} \dot{\phi}_m$$

**СВЯЗЬ**

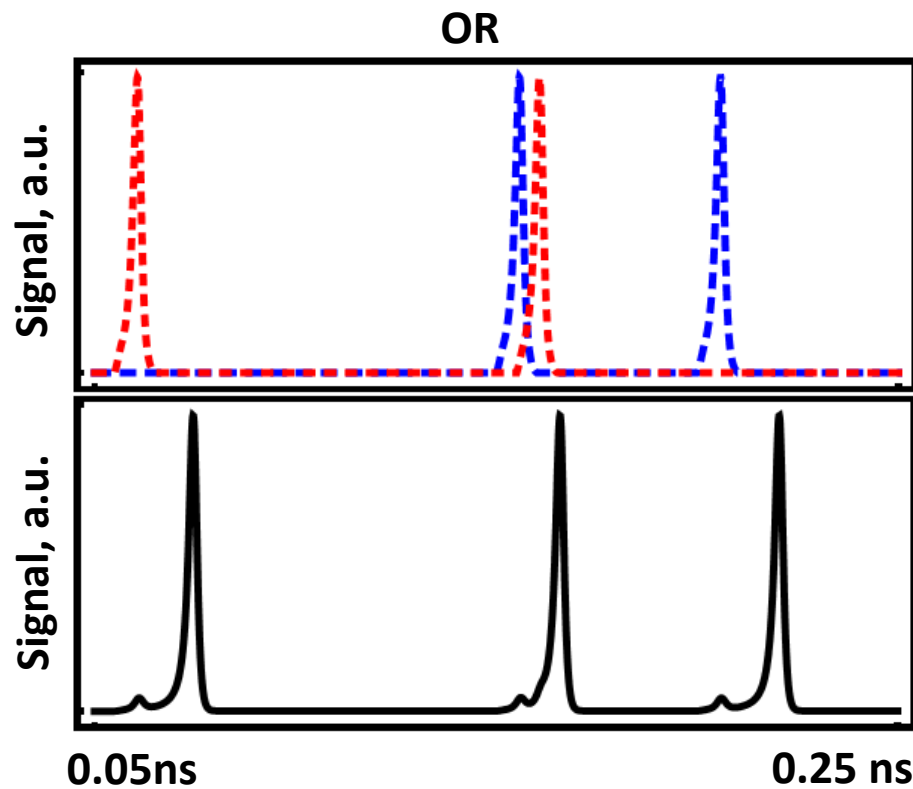
Coupling coefficient  $\kappa$ :

- Coupling by common Pt layer:  $\kappa \sim 10^{-4}$  (simulations:  $\kappa = 5 \times 10^{-4}$ )
- Coupling by Cu layer:  $\kappa \sim 10^{-2} - 10^{-3}$
- Coupling by external control circuit: arbitrary  $\kappa_{nm}$

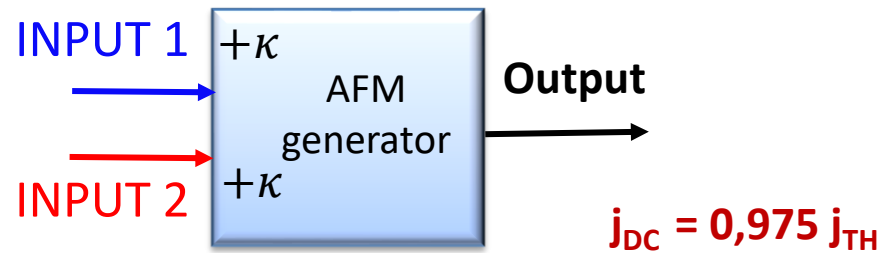
# OR логический элемент



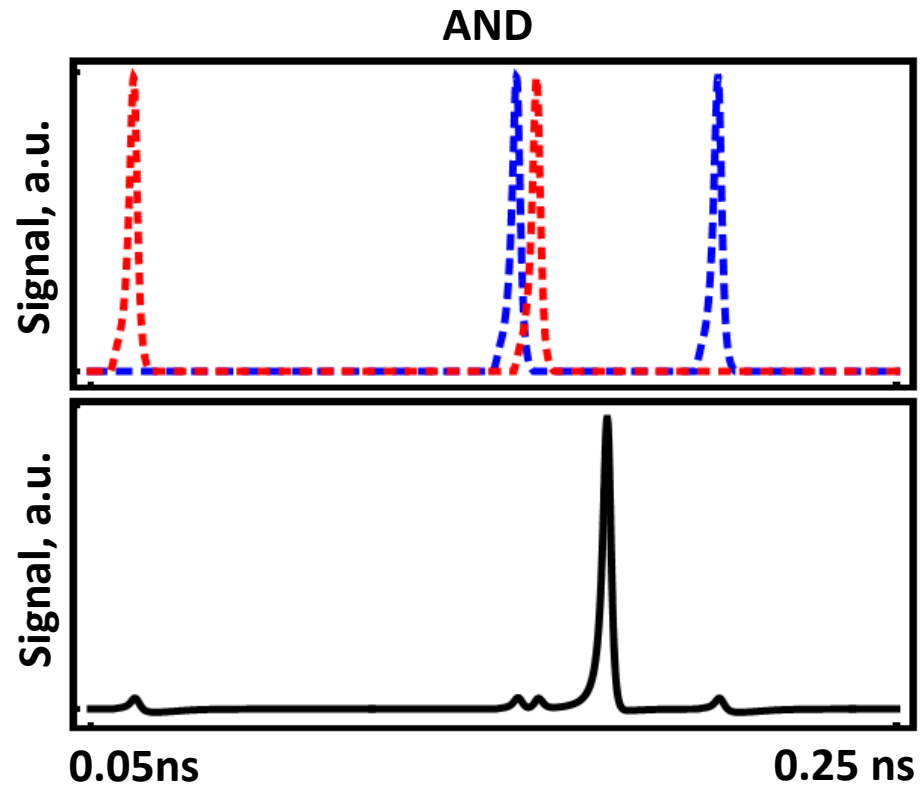
IN1	IN2	OUT
0	1	1
0	0	0
1	1	1
1	0	1



# AND логический элемент



IN1	IN2	OUT
0	1	0
0	0	0
1	1	1
1	0	0





# Заключение

- Антиферромагнитная спинтроника – «горячая» область исследований физики магнитных явлений.
- АФМ осцилляторы и детекторы – перспективные активные элементы функциональных блоков терагерцевых устройств.
- Незатронутые темы: нелинейная динамика доменов, солитонов и скирмионов; конденсация магнонов; генерация чистых спиновых токов и т.д.

## Диэлектрическая магноника — от гигагерцев к терагерцам

С.А. Никитов, А.Р. Сафин, Д.В. Калябин, А.В. Садовников,  
Е.Н. Бегинни, М.В. Логунов, М.А. Морозова, С.А. Одинцов,  
С.А. Осокин, А.Ю. Шаравская, Ю.П. Шаравский, А.И. Кириллов

Представлен обзор современного состояния исследований в области диэлектрической магноники и магнотонной спитроники. Описаны теоретические и экспериментальные методы исследования физических процессов и расчёты параметров магнитных микро- и наноструктур. Рассмотрены основные понятия магнотонной спитроники, физические эффекты, на которых она основана, а также перспективы её применения для систем обработки, передачи и приёма информационных сигналов. Особое внимание уделено возможности повышения рабочих частот магнитных устройств от гигагерцевого частотного диапазона до терагерцевого. Обсуждаются конкретные реализации элементной базы магноники, а также пути их дальнейшего развития.

**Ключевые слова:** магноника, спитроника, спин-волновая электроника, магнитные кристаллы, СВЧ-электроника, магнитные структуры, спиновые волны, волноводы, магнитные плёнки, магнитная логика, устройства обработки информации

PACS numbers: 85.70.–w, 85.75.–d

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFN.2019.07.038609>

## Содержание

1. Введение (1009).
2. Теоретические сведения о диэлектрической магнонике (1010).
  - 2.1. Базовые конструкции магнитных устройств обработки сигналов.
  - 2.2. Математические методы описания магнитных структур.
  - 2.3. Спиновые эффекты в магнитных структурах.
  - 2.4. Топологическая магноника.
  - 2.5. Многослойные магнитные гетероструктуры.
3. Экспериментальные методы исследования диэлектрических магнитных структур (1023).
4. Магнитные кристаллы (1024).

С.А. Никитов<sup>(1,2,3,4)</sup>, А.Р. Сафин<sup>(1,4,6)</sup>, Д.В. Калябин<sup>(1,2,4)</sup>,  
А.В. Садовников<sup>(3,4)</sup>, Е.Н. Бегинни<sup>(3,4)</sup>, М.В. Логунов<sup>(1,2,4)</sup>,  
М.А. Морозова<sup>(3,4)</sup>, С.А. Одинцов<sup>(3,4)</sup>, С.А. Осокин<sup>(1,2,4)</sup>,  
А.Ю. Шаравская<sup>(1)</sup>, Ю.П. Шаравский<sup>(3,4)</sup>, А.И. Кириллов<sup>(1,5)</sup>

- <sup>(1)</sup> Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, ул. Мясницкая 11/7, 125009 Москва, Российская Федерация
  - <sup>(2)</sup> Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Институтский пер. 9, 141701 Долгопрудный, Московская обл., Российская Федерация
  - <sup>(3)</sup> Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, ул. Астраханская 83, 410012 Саратов, Российская Федерация
  - <sup>(4)</sup> Национальный исследовательский университет МЭИ, ул. Краснокалужская 34, 111250 Москва, Российская Федерация
  - <sup>(5)</sup> FELIX Laboratory, Radboud University, 6525, ED Nijmegen, Netherlands
- E-mail: <sup>(1)</sup> [nikitov@cplire.ru](mailto:nikitov@cplire.ru), <sup>(2)</sup> [arsafin@gmail.com](mailto:arsafin@gmail.com),  
<sup>(3)</sup> [dmitry.kalyabin@phystech.edu](mailto:dmitry.kalyabin@phystech.edu), <sup>(4)</sup> [sadovnikovav@gmail.com](mailto:sadovnikovav@gmail.com),  
<sup>(5)</sup> [egbegin@gmail.com](mailto:egbegin@gmail.com), <sup>(6)</sup> [logunovmv@bk.ru](mailto:logunovmv@bk.ru),  
<sup>(7)</sup> [maamorozova@yandex.ru](mailto:maamorozova@yandex.ru), <sup>(8)</sup> [odinoff@gmail.com](mailto:odinoff@gmail.com),  
<sup>(9)</sup> [osokinserg@gmail.com](mailto:osokinserg@gmail.com), <sup>(10)</sup> [sharavskyy@info.sgu.ru](mailto:sharavskyy@info.sgu.ru)

Статья поступила 6 апреля 2019 г., после доработки 5 июля 2019 г.

1 УФН, т. 190, № 10

5. Магнитные волноводные структуры типа феррит–полупроводник (1027).
6. Демонные границы в скирмоне в устройствах магноники (1030).
7. Магнитные осцилляторы и детекторы (1033).
8. Терагерцевая магноника (1034).
9. Заключение. Перспективы применения и открытые проблемы (1037).

Список литературы (1037).

## 1. Введение

Прошло более трёх лет с момента опубликования в журнале *Успехи физических наук* нашего обзора [1], посвящённого магнонике как новому научному направлению в спитронике и спин-волновой электронике. За эти годы число публикаций в данной области стремительно возросло в связи с высокой научной активностью и развитием технологий, позволяющих создавать новые материалы и структуры для исследования новых физических явлений и формирования новой компонентной базы на основе магноники. В эти же годы появилось несколько обзоров в основном в англоязычных журналах, посвящённых отдельным разделам магноники и спитроники, в частности антиферромагнитной спитронике [2, 3], новому направлению в спитронике — стрейбтронике [4, 5], фундаментальным проблемам создания элементной базы нового вида памяти для нейроморфных систем [6, 7], магнитным кристаллам с фокусировкой на обработку информационных сигналов [8].

В то же время многие другие вопросы, связанные с исследованиями в области магноники, остались вне обсуждения. Кроме того, в перечисленных обзорах в основном обсуждались результаты, полученные авторами этих обзоров. В настоящем обзоре мы хотим рассмотреть расширенный круг опубликованных результатов в стиле нашего предыдущего обзора, описать недавно воз-

© С.А. Никитов, А.Р. Сафин, Д.В. Калябин, А.В. Садовников, Е.Н. Бегинни, М.В. Логунов, М.А. Морозова, С.А. Одинцов, С.А. Осокин, А.Ю. Шаравская, Ю.П. Шаравский, А.И. Кириллов 2020

ВОЗБУЖДЕНИЕ ТЕРАГЕРЦЕВЫХ МАГНОНОВ  
В АНТИФЕРРОМАГНИТНЫХ НАНОСТРУКТУРАХ:  
ТЕОРИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТ

А. Р. Сафин<sup>a,а\*</sup>, С. А. Никитов<sup>a,б,в,г\*</sup>, А. И. Кириллов<sup>а,д</sup>, Д. В. Калябин<sup>а,б</sup>,  
А. В. Садовников<sup>а,в</sup>, П. А. Стремелов<sup>а,б,д</sup>, М. В. Логунов<sup>а</sup>, П. А. Попов<sup>а,б</sup>

<sup>a</sup> Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской академии наук  
125009, Москва, Россия

<sup>б</sup> Московский физико-технический институт (Государственный университет)  
141700, Долгопрудный, Московская обл., Россия

<sup>в</sup> Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского  
410071, Саратов, Россия

<sup>д</sup> FELIX Laboratory, Radboud University  
6525, ED Nijmegen, The Netherlands

<sup>е</sup> Национальный исследовательский университет «МЭИ»  
111250, Москва, Россия

Поступила в редакцию 28 января 2020 г.,  
после доработки 28 января 2020 г.  
Принята к публикации 10 марта 2020 г.

Представлен обзор современного состояния теоретических и экспериментальных исследований возбуждения, приема и распространения магновов в антиферромагнитных наноструктурах. Использование свойств антиферромагнитных материалов, таких как отсутствие макроскопической намагниченности, большая величина обменных взаимодействий, сложная магнокристаллическая структура дает возможность реализовать новые виды памяти и устройства функциональной электроники. При этом изучение возможных магнитных эффектов в антиферромагнетиках в микро- и наномасштабе требует новых как экспериментальных, так и теоретических подходов. Целью данного обзора является описание и систематизация последних достижений в области возбуждения магнитных колебаний — магновов в антиферромагнетиках, вызванных током и оптическим излучением. После изложения основных теоретических сведений об антиферромагнетиках и многослойных антиферромагнитных гетероструктурах рассмотрены модели для описания индуцируемых током и оптическими импульсами явлений в наногетероструктурах, содержащих антиферромагнетики. Кратко рассмотрены методы исследования антиферромагнитных микро- и наноструктур с помощью манделштам-бриллионовского рассеяния света, а также перспективы практического применения антиферромагнитной спитроники и магноники.

Статья для специального выпуска ЖЭТФ, посвященного 100-летию А. С. Боровиха-Романова

DOI: 10.31857/S0044451020070081

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Активные исследования в области антиферромагнитных материалов и структур, особенно с раз-

\* E-mail: [arsafin@gmail.com](mailto:arsafin@gmail.com)

\*\* E-mail: [nikitov@cplire.ru](mailto:nikitov@cplire.ru)

мерами в единицы и сотни нанометров, в последние годы позволили получить научные результаты, которые легли в основу нового научного направления — антиферромагнитной (АФМ) спитроники [1–3]. В АФМ-спитронике исследуются процессы переноса магнитного момента или спина электрическим током в структурах, содержащих АФМ. Перенос спина может также осуществляться с позво-

85