



МАГНОНИКА – от ГГц к ТГц

С.А. Никитов, Ю.В. Гуляев,

*Е.Н. Бегинин, Д.В. Калябин, А.В. Садовников, А.Ю. Шараевская,
Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
Саратовский Государственный университет им. Н.Г. Чернышевского*

Мотивация работы

Магнитные пленочные микро- и наноструктуры интенсивно исследуются в качестве возможных кандидатов для создания перспективных устройств спинтроники и магноники. Носителями информационных сигналов в таких устройствах, являются магноны или спиновые волны. **Важным преимуществом** таких носителей по сравнению с традиционной электроникой с переносом зарядов является **отсутствие джоулевого нагрева** среды. В настоящее время в связи с постоянно растущими требованиями к степени интеграции интегральных схем, в технологии создания устройств полупроводниковой электроники наблюдается переход от **двумерных** (планарных) к **трехмерным** вертикально-интегрированным полупроводниковым структурам. Для сохранения конкурентных преимуществ аналогичный переход должен быть реализован и в магнонике, которая базируется на планарных технологиях и магнитных структурах с «горизонтальными» (в плоскости пленки) связями.

Введение

Концепция спинтроники и магноники и обобщенная схема устройства функциональной обработки сигналов

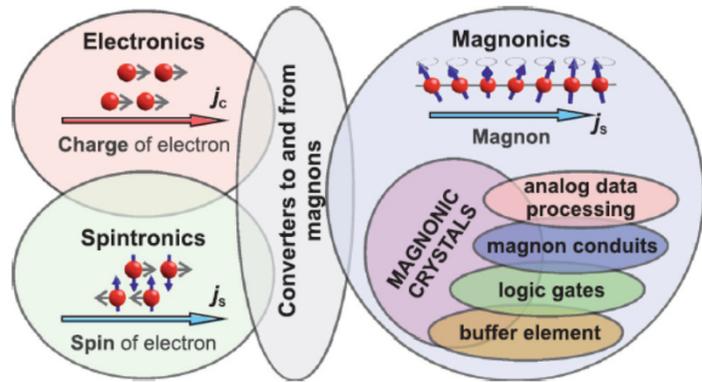
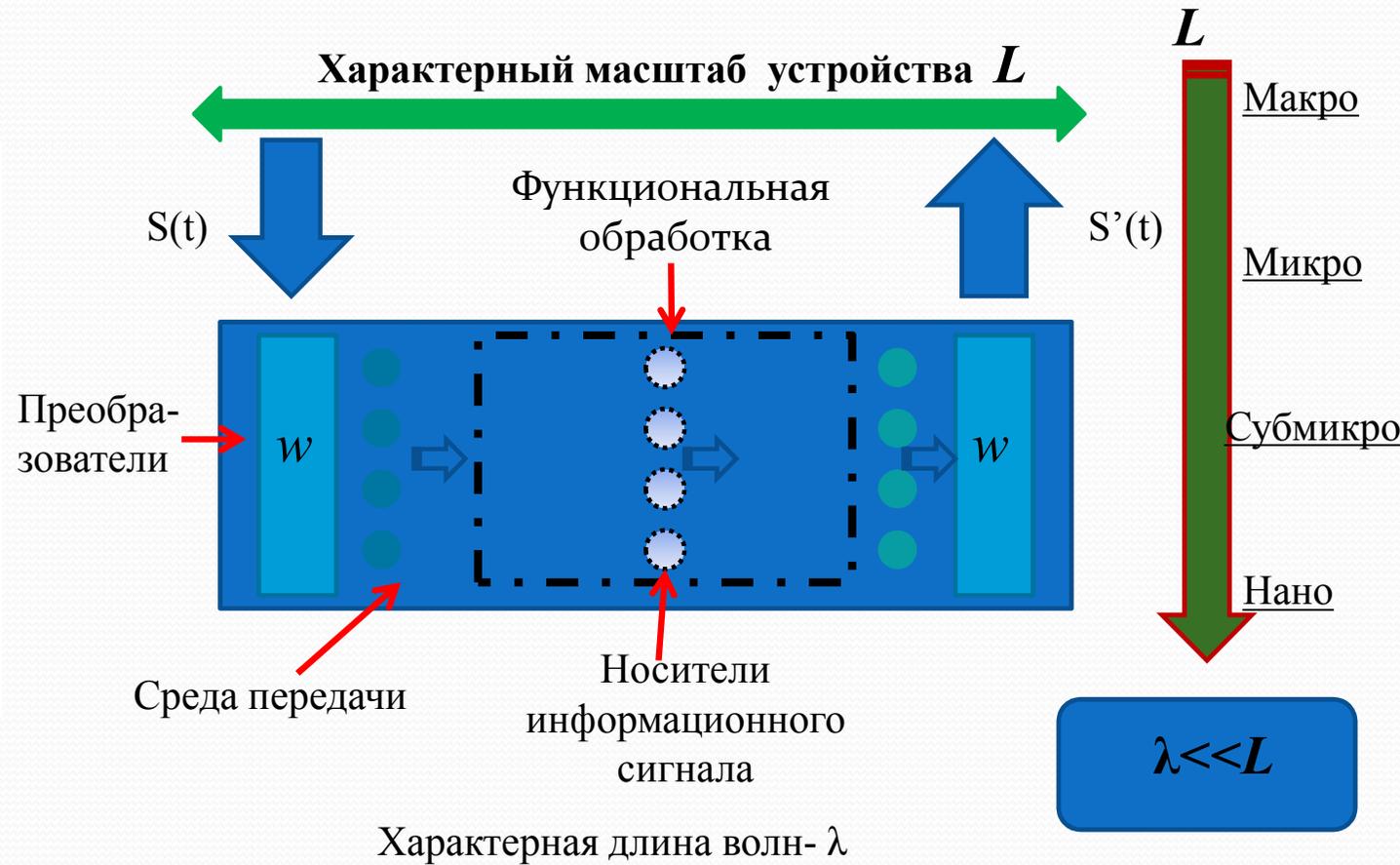


Figure 1. The concept of magnon spintronics. Data coded in charge or spin currents are converted to magnon currents, processed within the magnonic system and converted back. The magnonic crystal is a universal element in the field of magnonics which can be used for data transfer, processing, and buffering.



**Некоторые направления исследований в области систем
функциональной обработки сигналов**

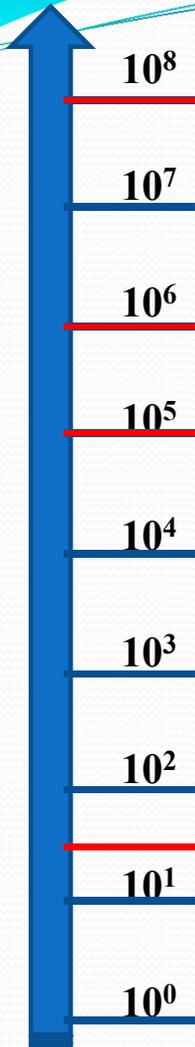
Название	Среда передачи	Носители	Характерная длина волны	Частоты	Проблемы реализации
Электроника	Металл, полупроводник	Электроны, дырки	$2,42 \cdot 10^{-6}$ мкм	ГГц, ТГц	Омические потери, топология межсоединений
Фотоника	диэлектрик	Фотоны, ЭМВ	0.5-10 мкм	40-700 ТГц	Управляемость, масштабируемость
Плазмоника	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, слоистые магнитные структуры, 1D-МК, 2D-МК	Магноны, спиновые и магнитостатические волны	0.1- ∞ мкм	до 100 ГГц, ТГц	Необходимо внешнее магнитное поле

L_d – характеристическая длина распространения

**Классификация
СПИНОВЫХ ВОЛН**

Когерентные волны $k_{max} \approx 4.8/w$

Некогерентные волны $k_{max} \approx 10^6 \text{ см}^{-1}$



**Среда передачи,
характерная толщина ферромагнетика**

Обменные

Нано $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$
 $d=5-10 \text{ нм}$

Дипольно-обменные

Субмикро
Микро
 Py, YIG
 $d=5-300 \text{ нм}$
 $w=1-3 \text{ мкм}$

Py
 $\Delta H \approx 100 \text{ Э}$
 $L_d \approx 10-100 \text{ мкм}$

Магнитостатические

Макро
 YIG
 $d=5-10 \text{ мкм}$
 $w=10-30 \text{ мкм}$

YIG
 $\Delta H=0.1-0.5 \text{ Э}$
 $L_d > 1000 \text{ мкм}$

Электромагнитные

L_d – характерная длина распространения

Magnonic logic circuits

Alexander Khitun, Mingqiang Bao and Kang L Wang

Device Research Laboratory, Electrical Engineering Department, Focus Center on Functional Engineered Nano Architectonics (FENA), Western Institute of Nanoelectronics (WIN), University of California at Los Angeles, Los Angeles, California, 90095-1594, USA

Необходим переход от 2D к 3D-магنونным системам!

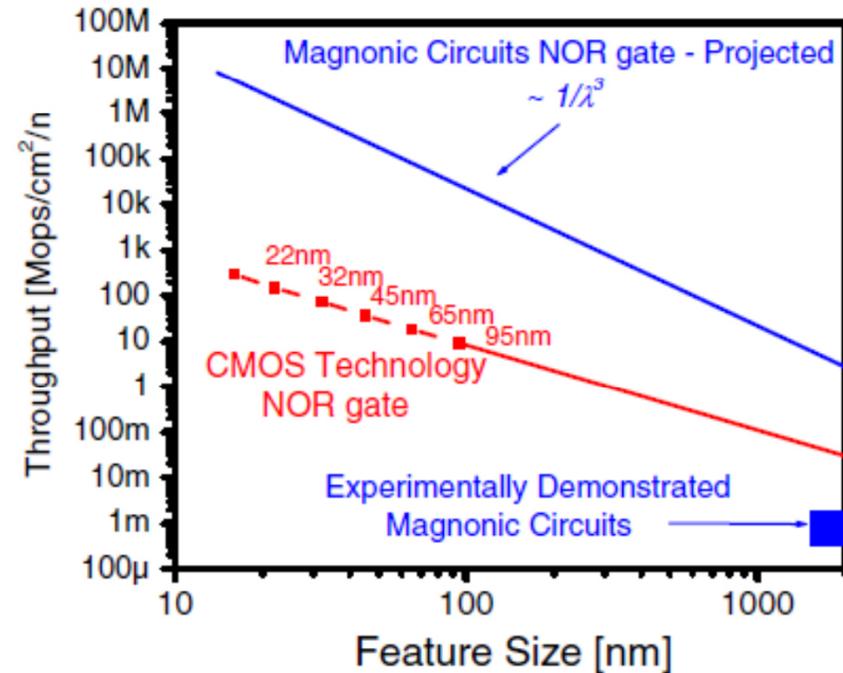


Figure 4. Numerical estimates on the functional throughput of the Magnonic majority logic gate (can be used as AND or OR gates) and conventional CMOS-based NOR gate. The throughput is plotted as a function of the minimum feature size, which is the gate length for CMOS and the wavelength λ for spin wave circuit, respectively. (This figure is in colour only in the electronic version)

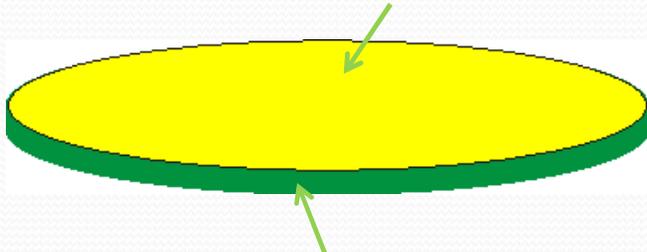
Базовые конструкции магنونных устройств

Технологии

Жидко-фазная эпитаксия (LPE),
фотолитография

Параметр диссипации $\alpha = 5 \times 10^{-5}$
FMR $\Delta H \cong 0.4$ Oe, $\Delta f \cong 1$ MHz

Магнитная пленка (YIG) $d=1-20 \mu\text{m}$

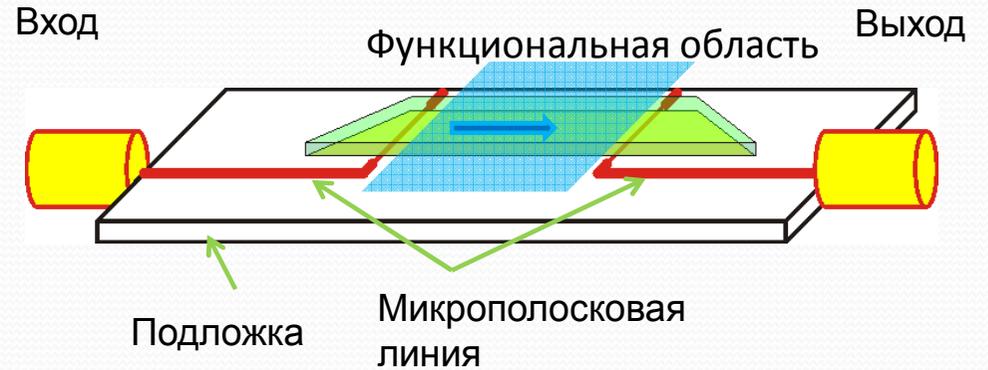


Диэлектрическая подложка (GGG) $500 \mu\text{m}$

Спиновые волноводы:
ширина $0.5-5 \text{ mm}$, длина $5-20 \text{ mm}$

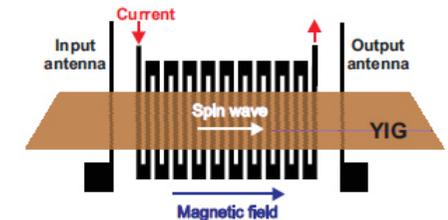
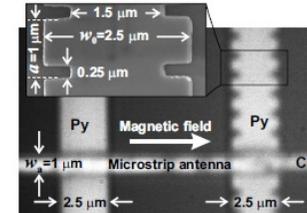
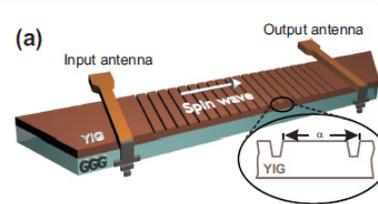


Схема базового спин-волнового устройства на основе регулярного волновода



- Линии задержки
- Фазовращатели
- Частотные фильтры
- Резонаторы

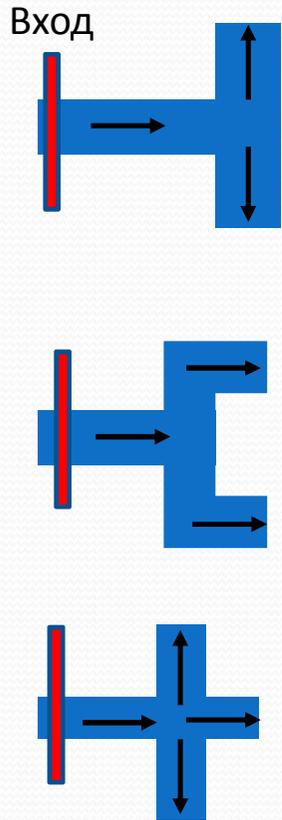
Примеры реализации 1D-магنونных кристаллов



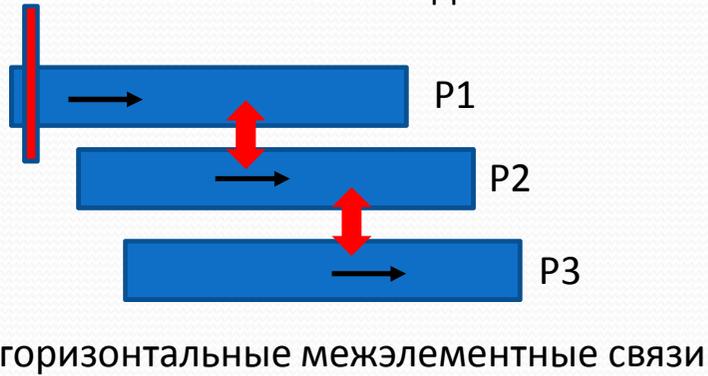
2D

Нерегулярные, планарно – связанные, логические спин-волновые элементы и 2D – магنونные кристаллы

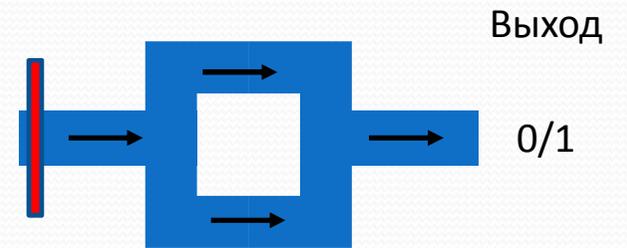
Планарные делители мощности различной топологии



Ответвители на основе связанных волноводов

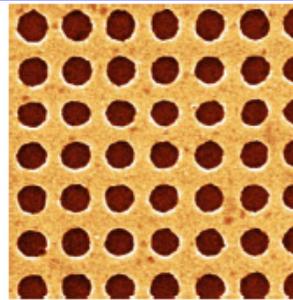


Логический элемент на основе интерферометра Маха-Цандера

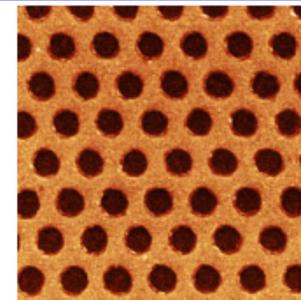


H_0

Топология 2D- магنونных кристаллов



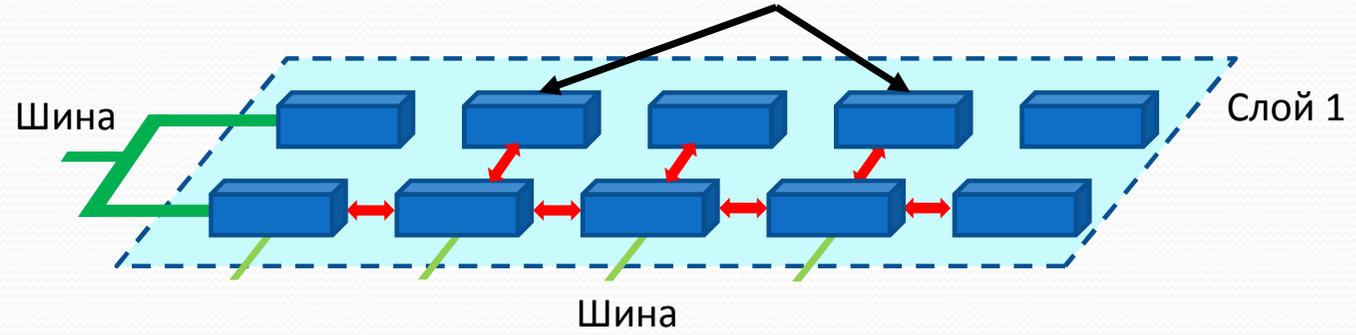
Square



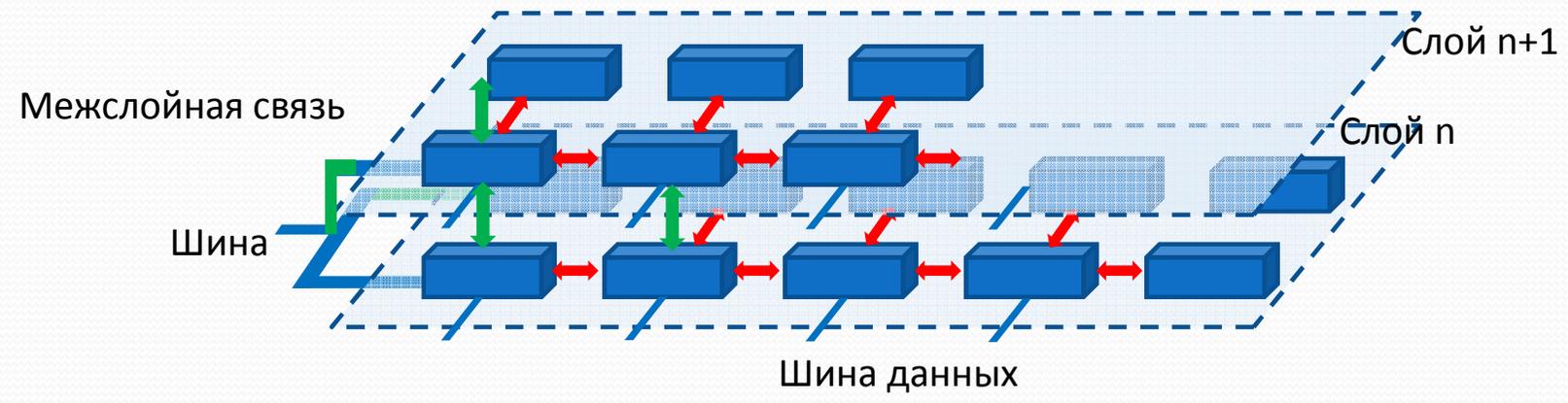
Rhombic

Магنونная 2D-сеть с латеральными связями

Функциональные спин-волновые устройства



Магنونная 3D-сеть с латеральными и вертикальными связями (концепция)



Необходимо обеспечить формирование вертикальных межслойных и межэлементных связей

- ↔ Горизонтальные межэлементные связи
- ↕ Вертикальные межэлементные и межслойные связи

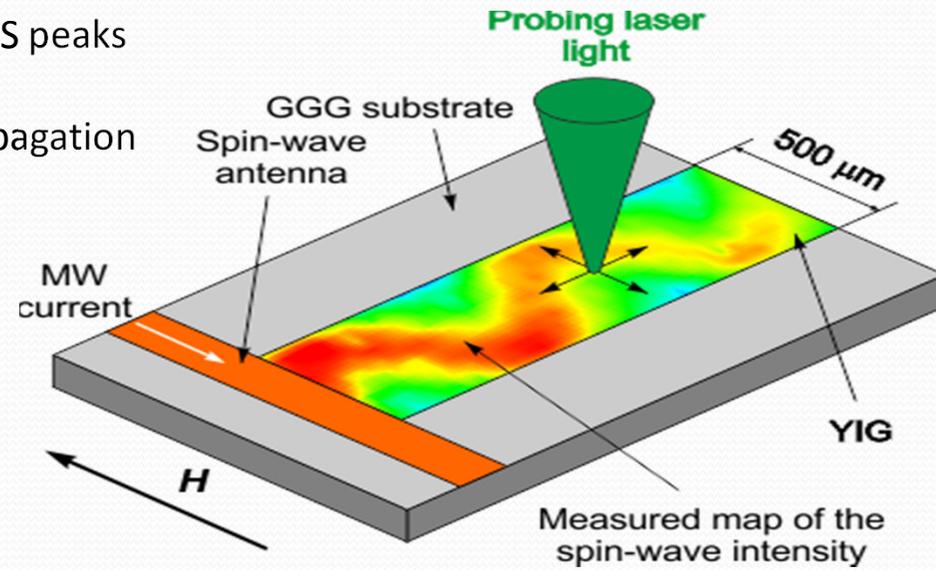
Рассеяние света спиновыми волнами.
БРС спектроскопия волновых процессов в магнитных
микро- и наноструктурах

Institute of Radio-engineering
and Electronics of RAS



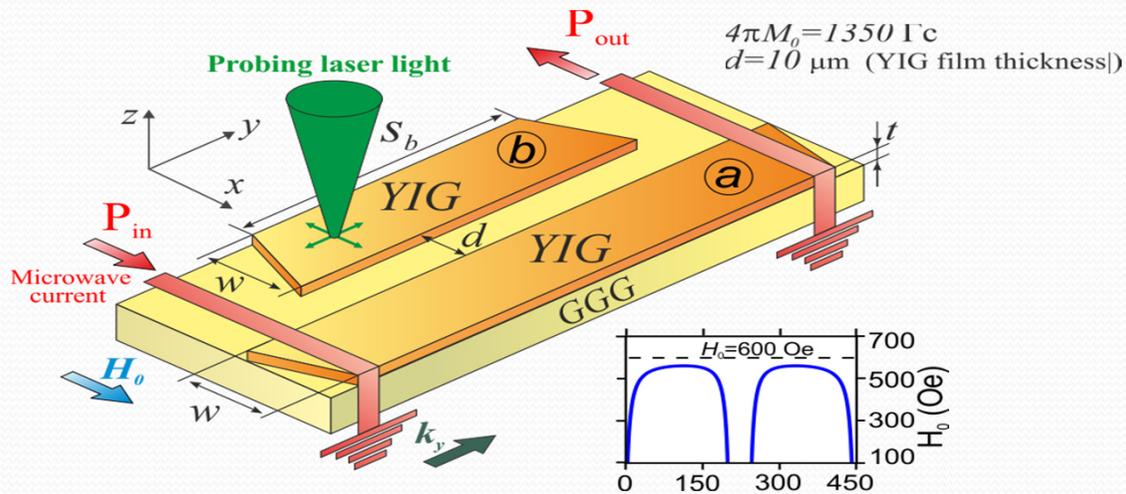
BLS complex of measurements in magnetic thin films and structures

Scanning surface of magnetic film one can measure BLS peaks intensities and form
2D pictures of time-space dynamics of spin waves propagation

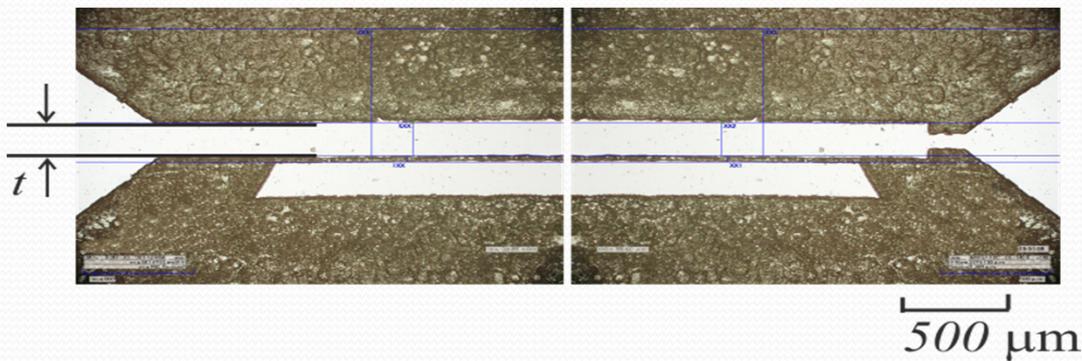


Связанные ЖИГ микроволноводы

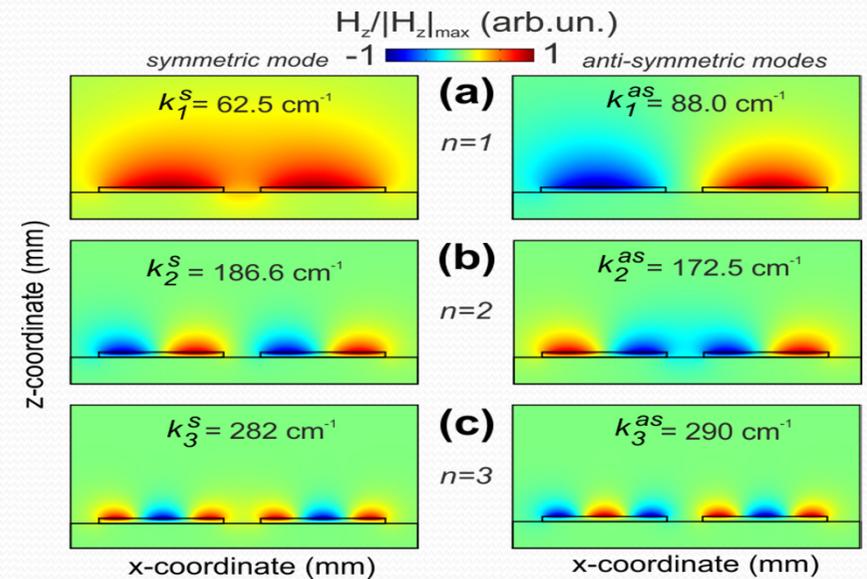
Experimental set-up



Photos of side-coupled waveguides



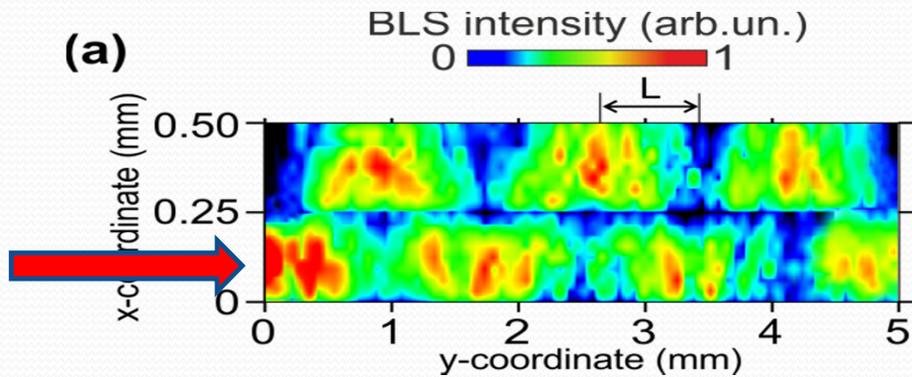
Results of numerical calculations of intrinsic modes of coupled waveguides. Performed by finite elements method in COMSOL Multiphysics 5.0



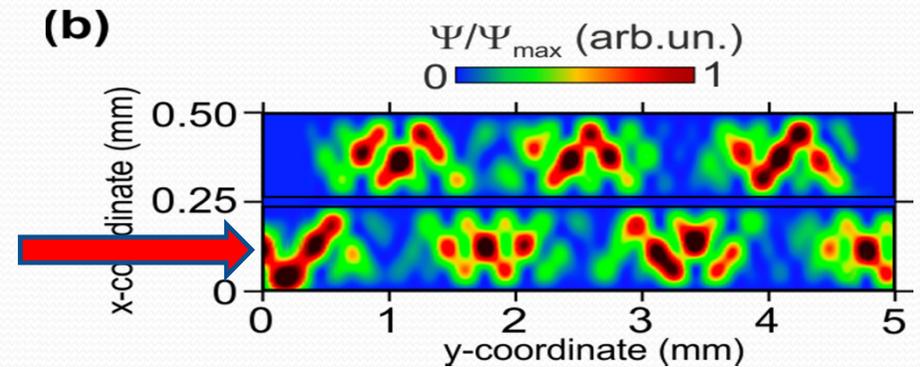
Связанные ЖИГ микроволноводы

Space distribution of second power of spin wave magnetization. Red arrow shows spin wave excitation region in one YIG film. Power transmits between the coupled films.

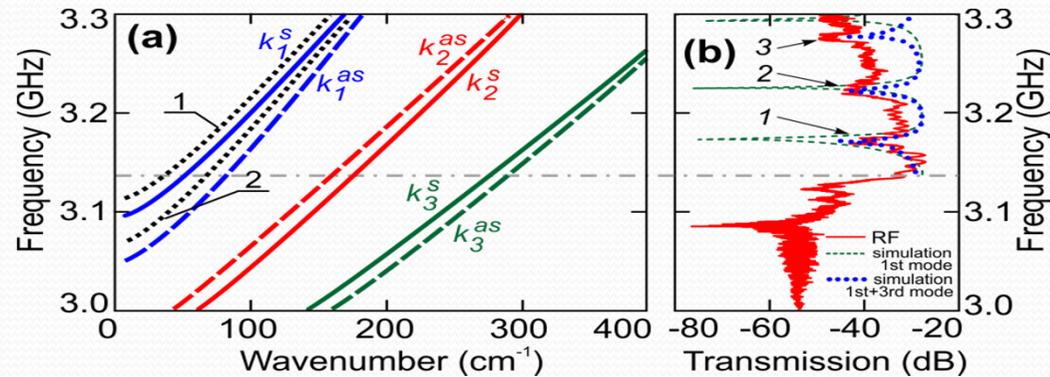
Experimental data (BLS)



Numerical data (micromagnetic calculations)



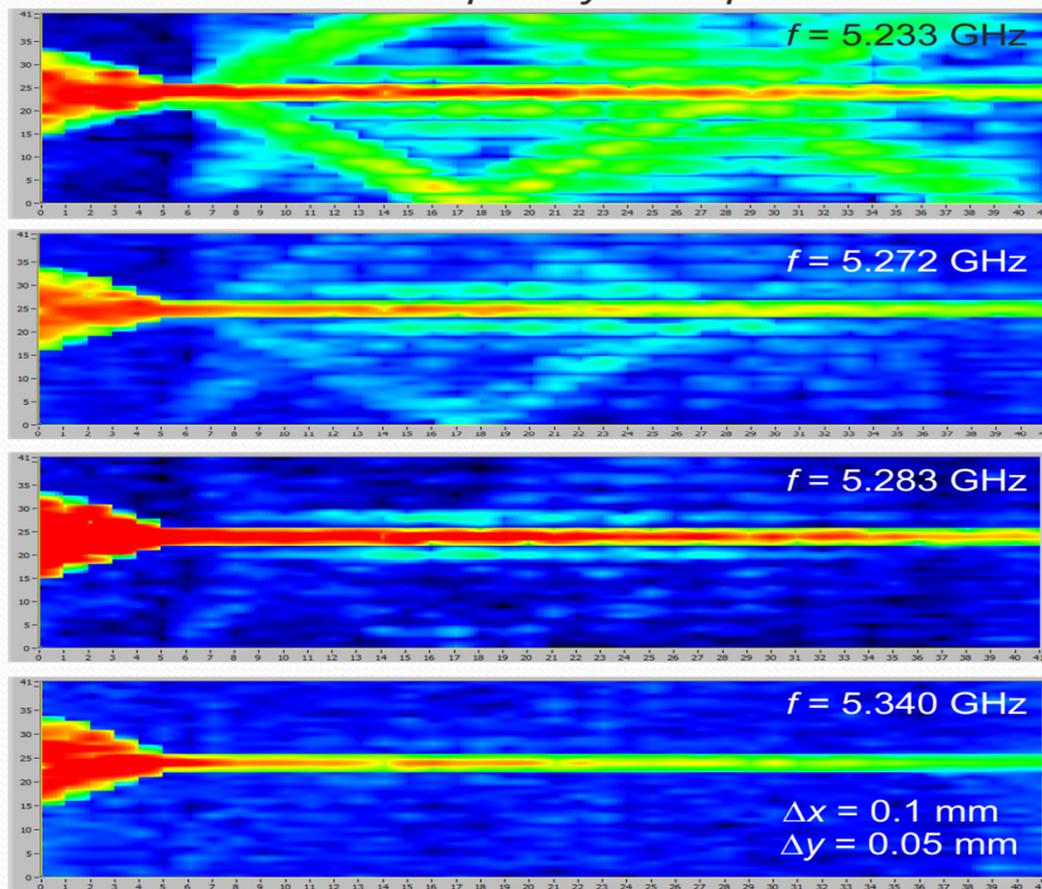
Spin wave dispersion in side-coupled films (a) and measured amplitude-frequency curve of this structure (b)



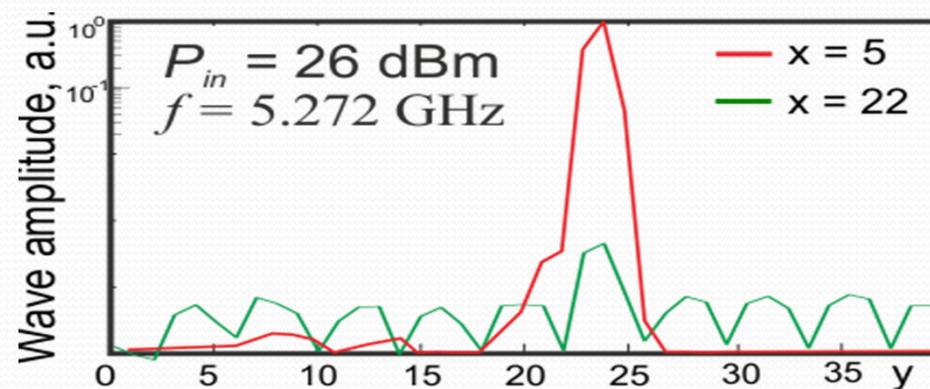
Дискретная дифракция

Пространственное распределение квадрата намагниченности спиновой волны. Возбуждается центральный канал и наблюдается известный в оптике процесс дискретной дифракции спиновой волны в системе латерально связанных пленок ЖИГ.

Frequency sweep



Experimental data

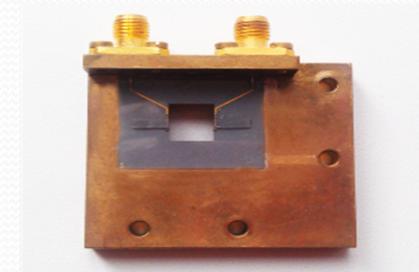
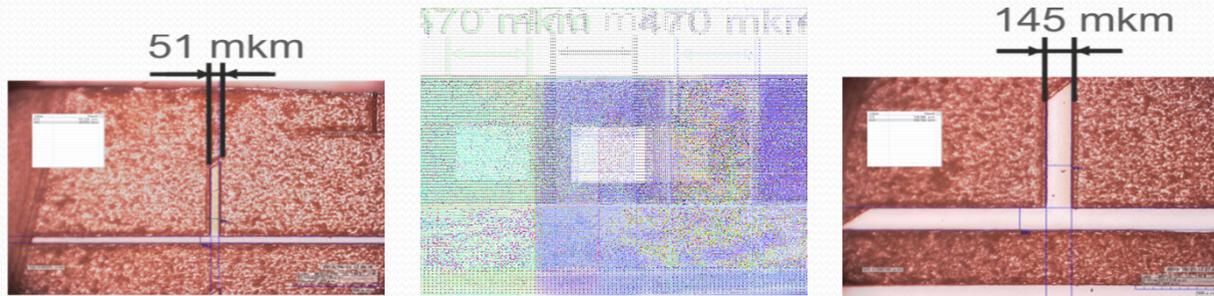


Magnetization distribution in transverse direction

Преобразователь мощности на основе ЖИГ микроволноводов

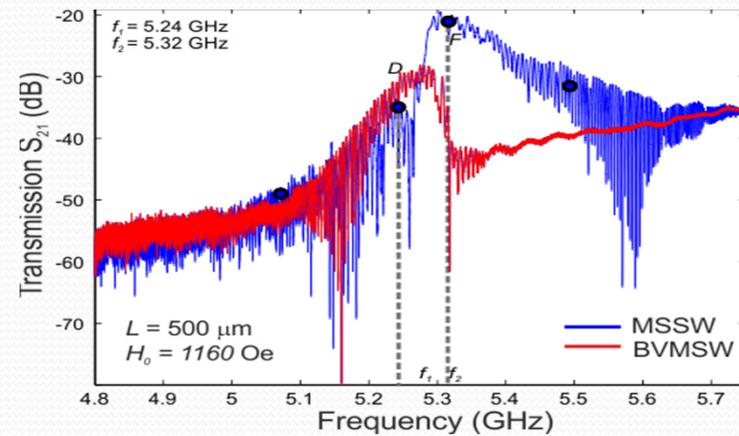
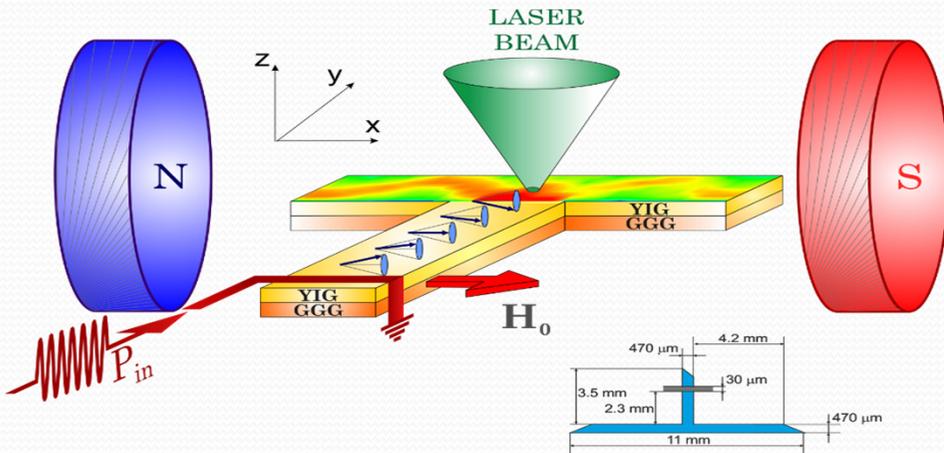
Pictures of T-shaped waveguides prepared by laser scribing technique from 7 mkm YIG film

Microstrip delay line



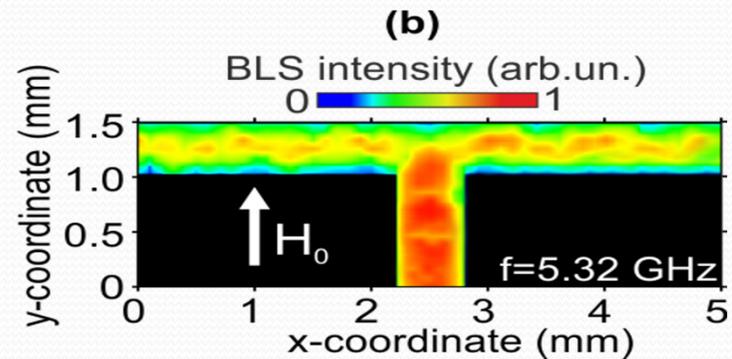
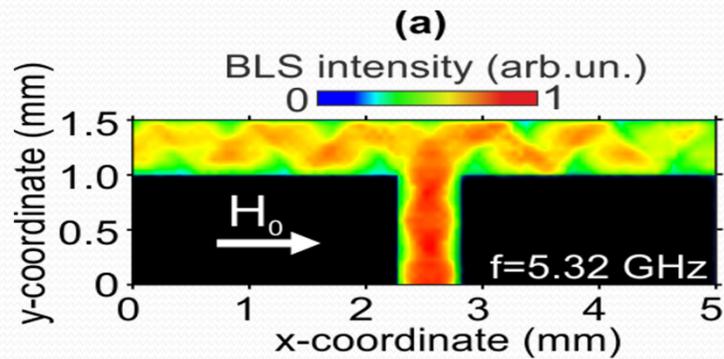
BLS experimental set-up

Amplitude-frequency curves for T-waveguide

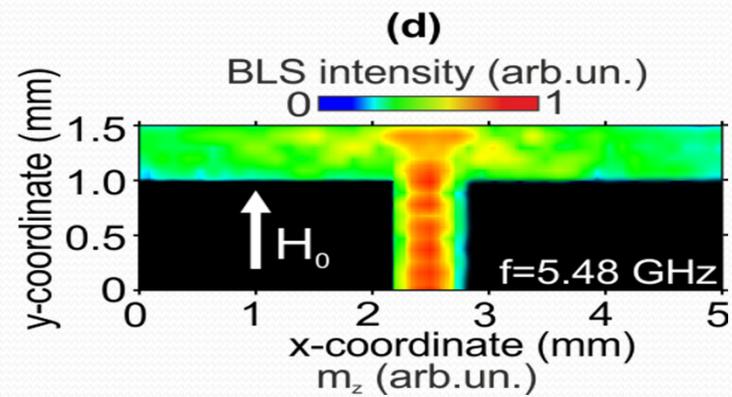
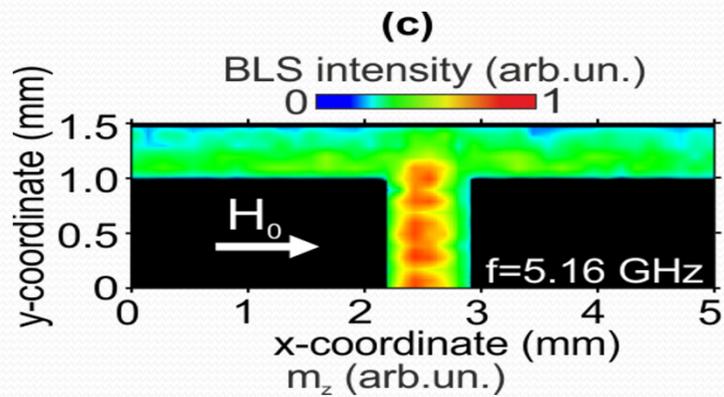


T-shaped преобразователь мощности

MSSW and BVMSW waves spectra are intersected

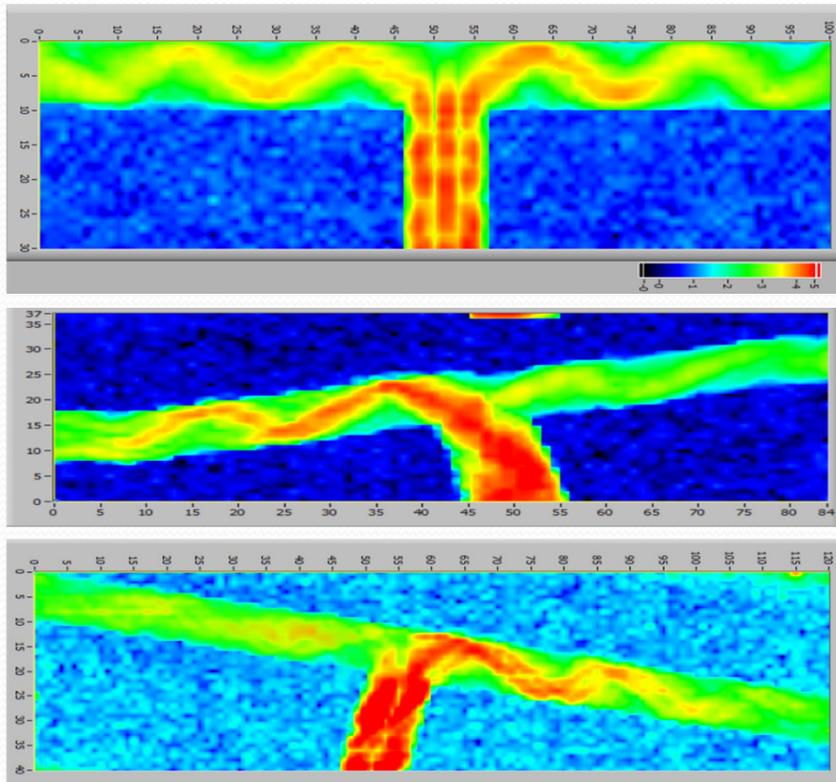
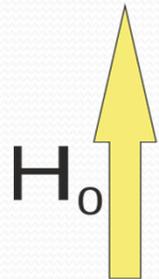


Spectra are not intersected



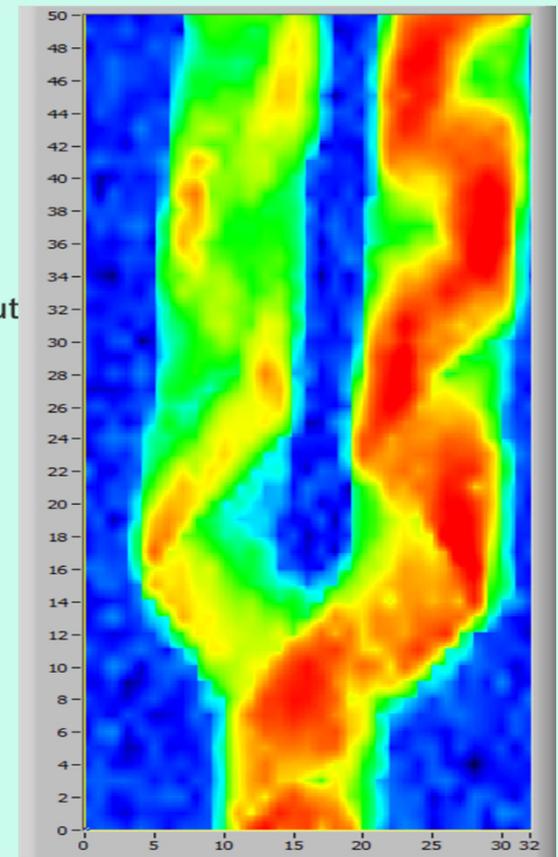
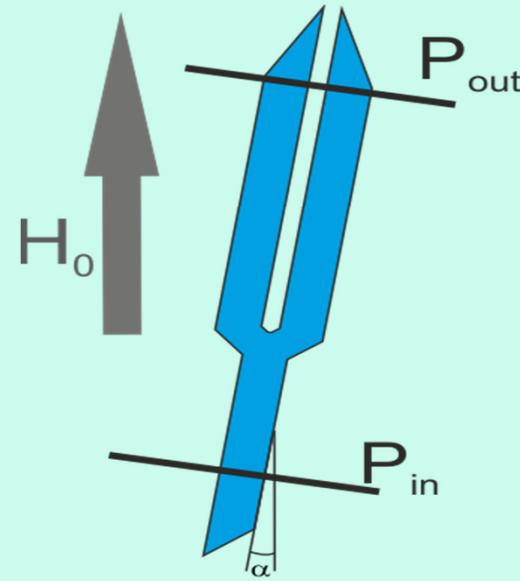
Power Divider Based on T-Shaped Waveguide Structure

Power control with change the angle between external field and wavevector.



BLS data

Y-shaped waveguide

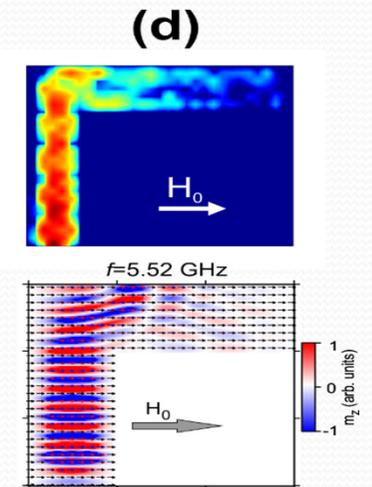
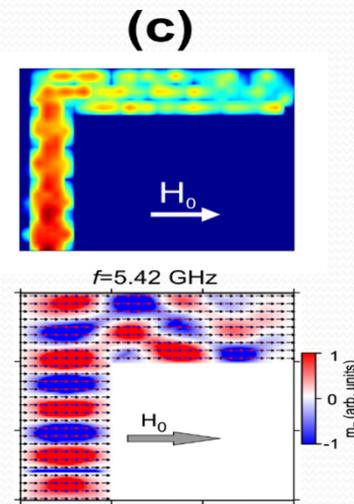
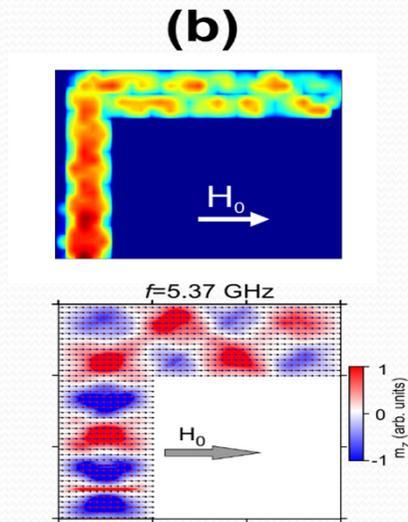
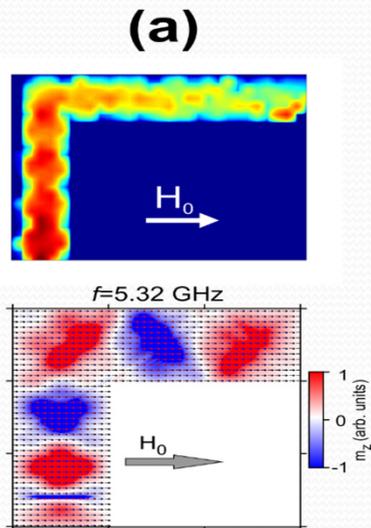
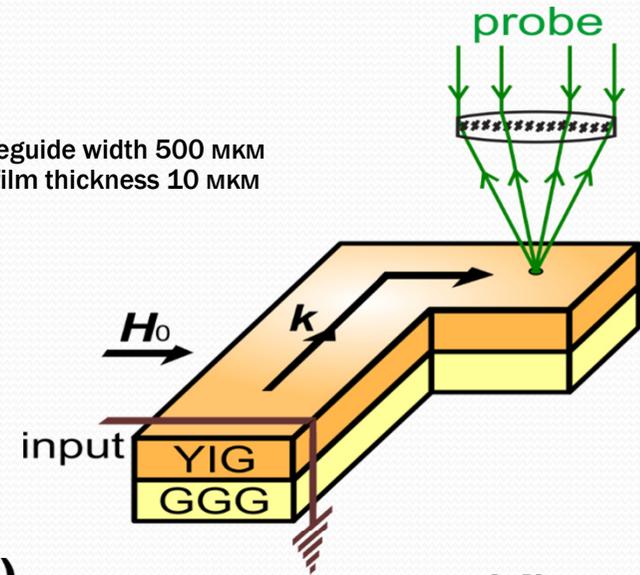


Spin Waves Modes Transform in a Γ -shaped Microstrip Waveguide

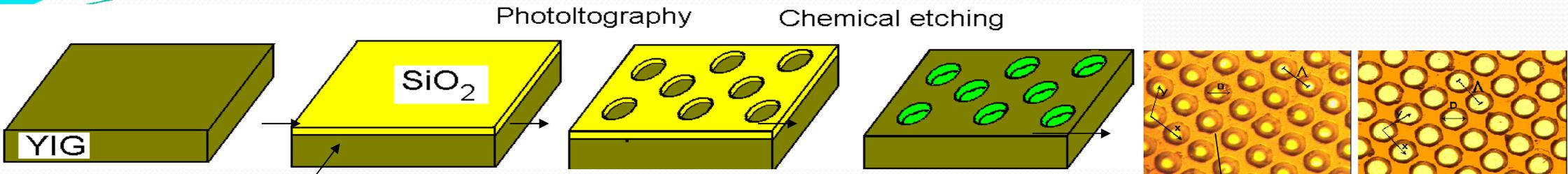
Shaped waveguide and spatial modes control by external field.

Experimental and numerical data for modes numbers in the waveguide

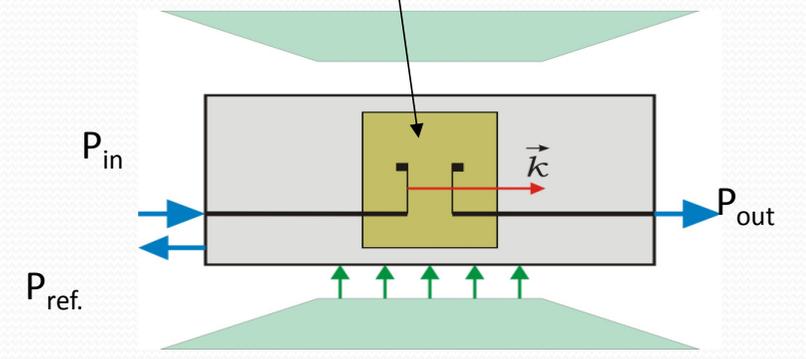
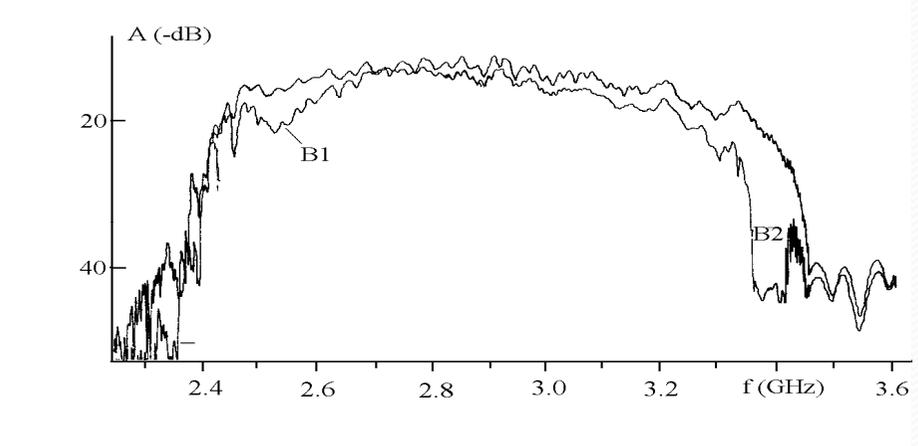
Waveguide width 500 μm
YIG film thickness 10 μm



MAGNONIC CRYSTALS



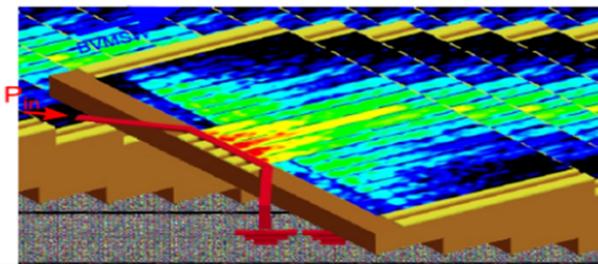
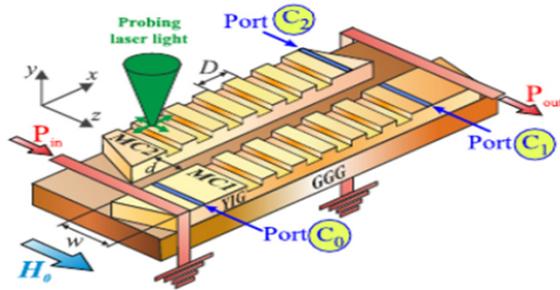
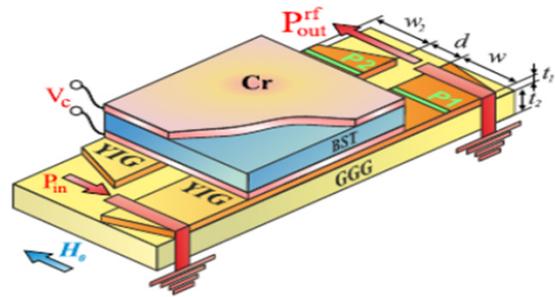
Photoresist AZ5214



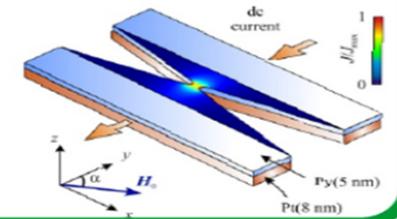
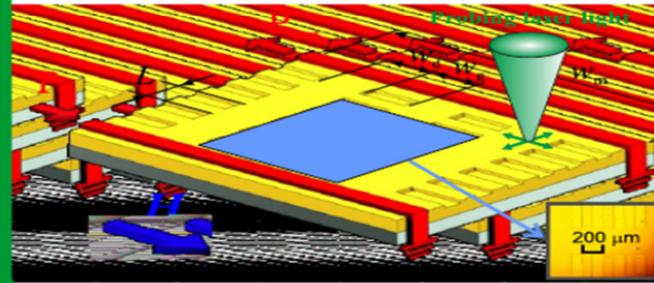
S.L.Vysotskii, S.A. Nikitov, Yu.A. Filimonov «Magnetostatic Spin Waves in Two-Dimensional Periodic Structures (Magnetophoton Crystals)»//JETP, Vol.101, NO.3, 2005, pp.547-553.

Новая компонентная база микро - и наноэлектроники на основе магнитных микроструктур для селективной обработки информационных сигналов в телекоммуникационных системах и цифровой обработки сигналов на принципах магنونной логики

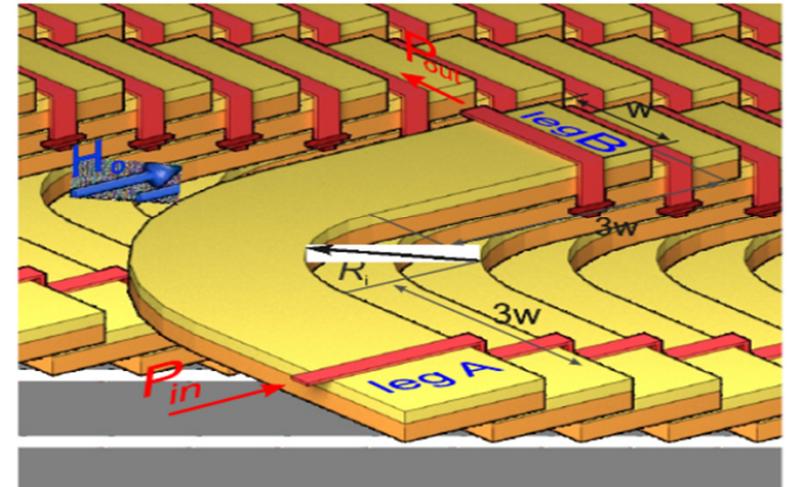
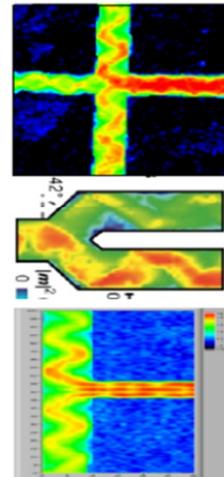
МНОГОКАНАЛЬНЫЕ НАПРАВЛЕННЫЕ ОТВЕТВИТЕЛИ И ДЕЛИТЕЛИ МОЩНОСТИ



СИСТЕМА ГЕНЕРАЦИИ И ОБРАБОТКИ СПИН-ВОЛНОВОГО СИГНАЛА



ЭЛЕМЕНТЫ МЕЖСОЕДИНЕНИЙ В ПЛАНАРНЫХ ТОПОЛОГИЯХ МАГНОННЫХ СЕТЕЙ



1. Формирование 3D магнонных кристаллов

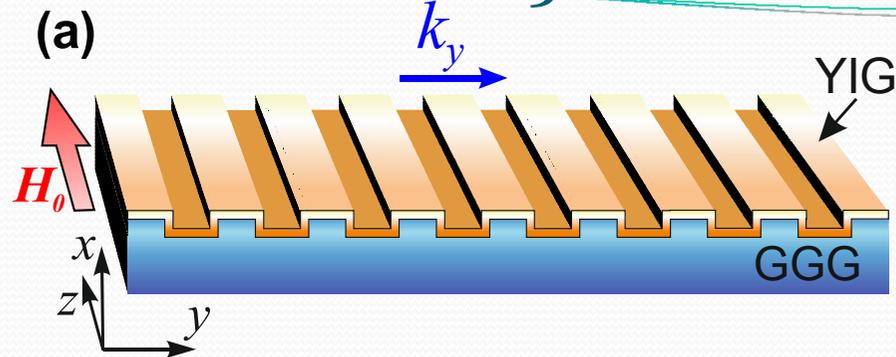
На примере структур магноники и прототипирования с привлечением ионно-лучевых методов по направлению снизу-вверх показано, что доращивание родственных слоев распылением мишеней широким ионным пучком - это путь получения объемных 3D-структур на пассивной подложке с новыми свойствами!

Структуры 1D и 2D магноники на основе феррит-гранатов:

- ионно-лучевой IBSD метод формирования магнонных кристаллов;
- маски на основе легких Me для глубокого анизотропного травления пленок оксидов тяжелых Me медленными пучками ионов кислорода;
- магнонные кристаллы;
- кристаллизация с опережением диффузии при быстром отжиге;

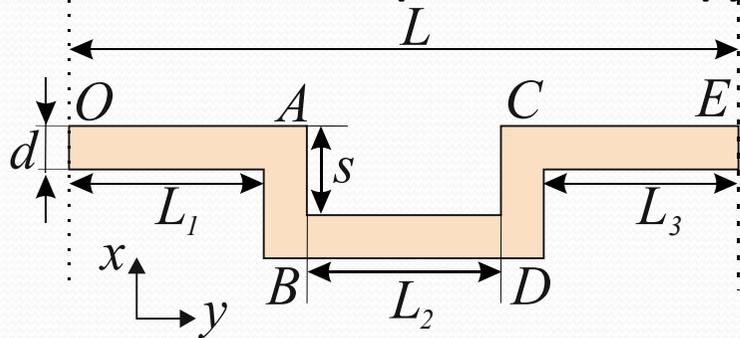
3D моделирование. Капсулирование и заращивание магнонных структур.

Спиновые волны в 3D-магнонных кристаллах



3D-магнонный кристалл меандрового типа с конечным числом периодов m . Внешнее магнитное поле H_0 направлено вдоль оси z , спиновая волна распространяется вдоль оси y .

Сечение элементарной ячейки структуры



Толщина YIG - d
Глубина структуры - s

Сегменты AB, CD обеспечивают формирование вертикальных связей

Период

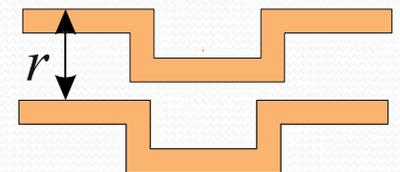
$$L = L_1 + L_2 + L_3 + 2d$$

Геометрическая длина

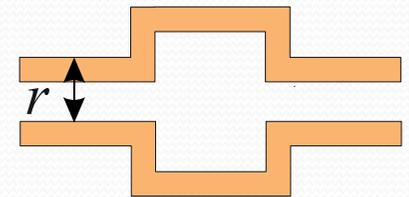
$$l = L + 2s$$

Связанные МК

Несимметричный тип



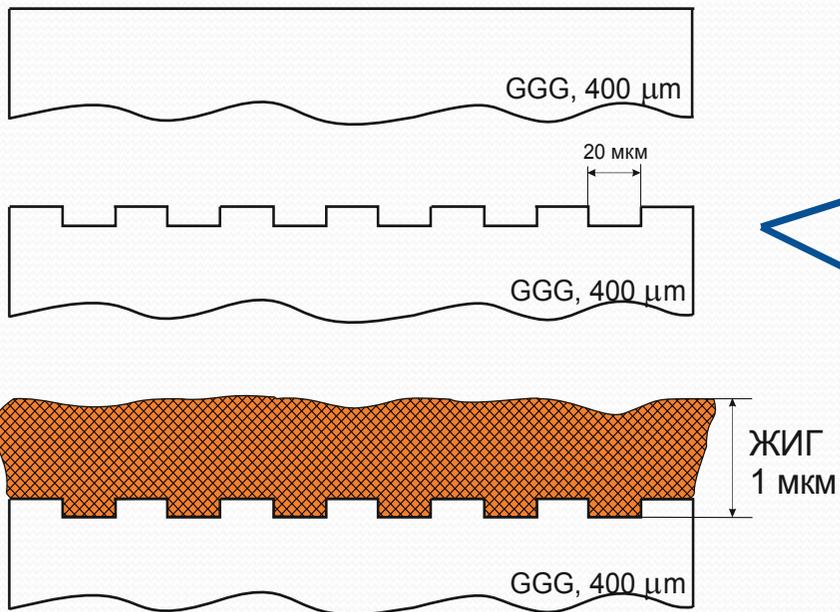
Симметричный тип



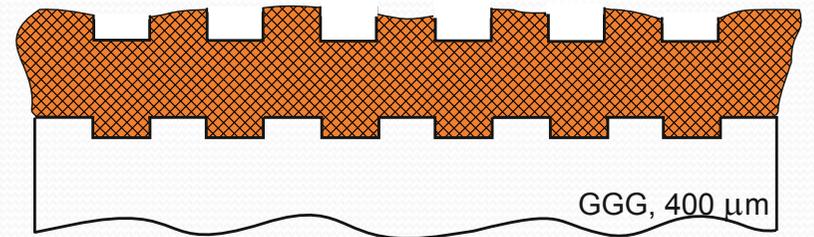
r -параметр сдвига

Структура 3D магнонных кристаллов

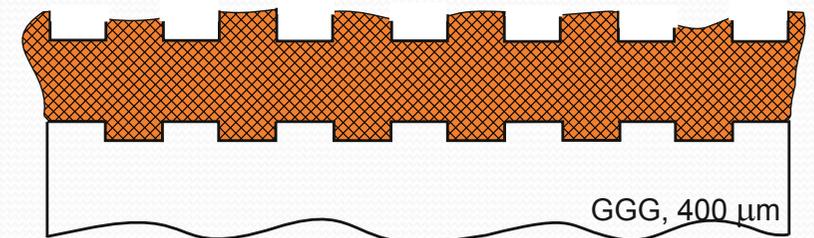
Базовая структура



несимметричный магнонный кристалл

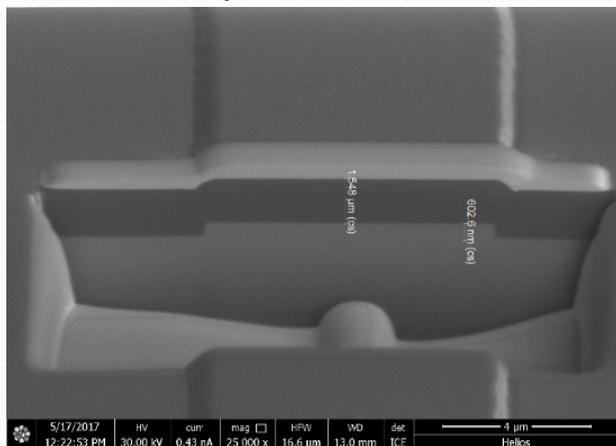


симметричный магнонный кристалл

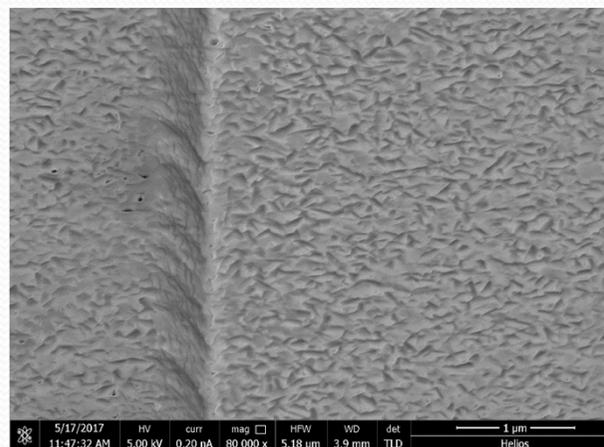


3D несимметричный магнитный кристалл.

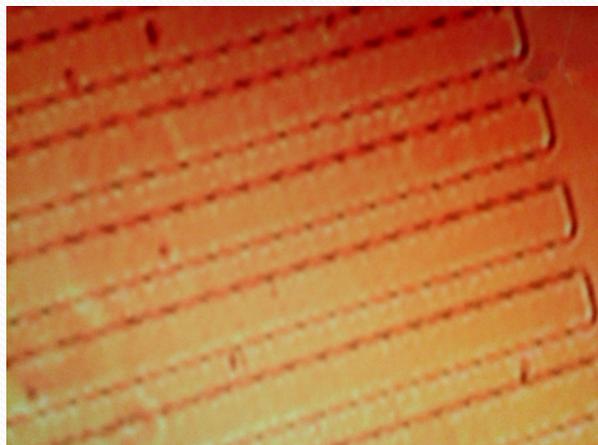
Поперечное сечение



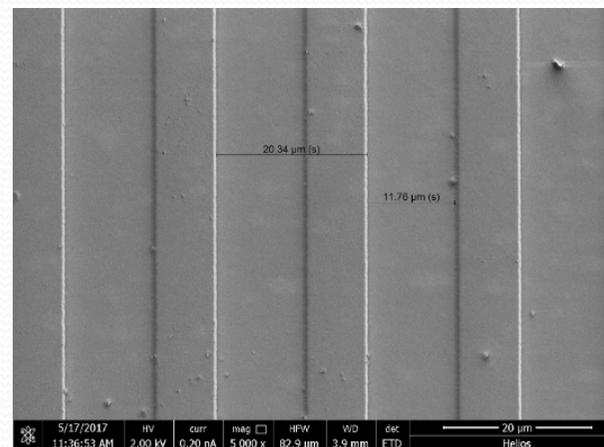
Рельеф поверхности

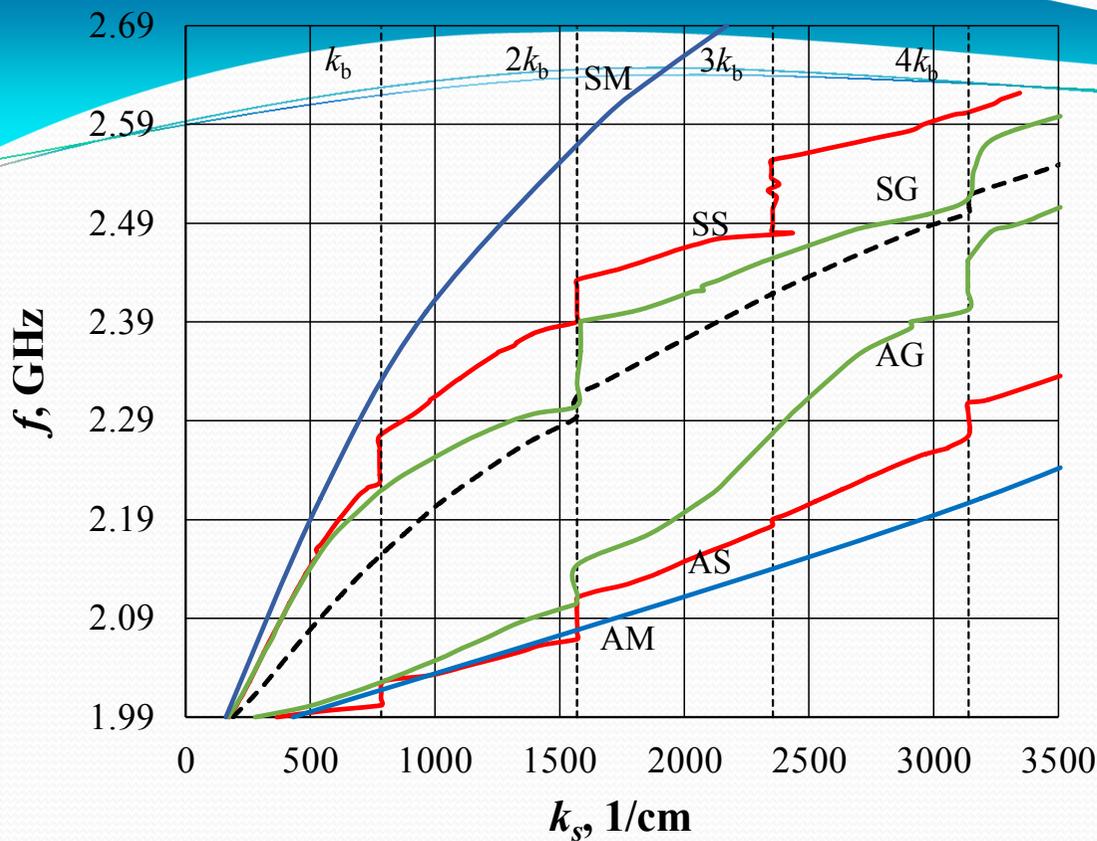


Поляризационный микроскоп

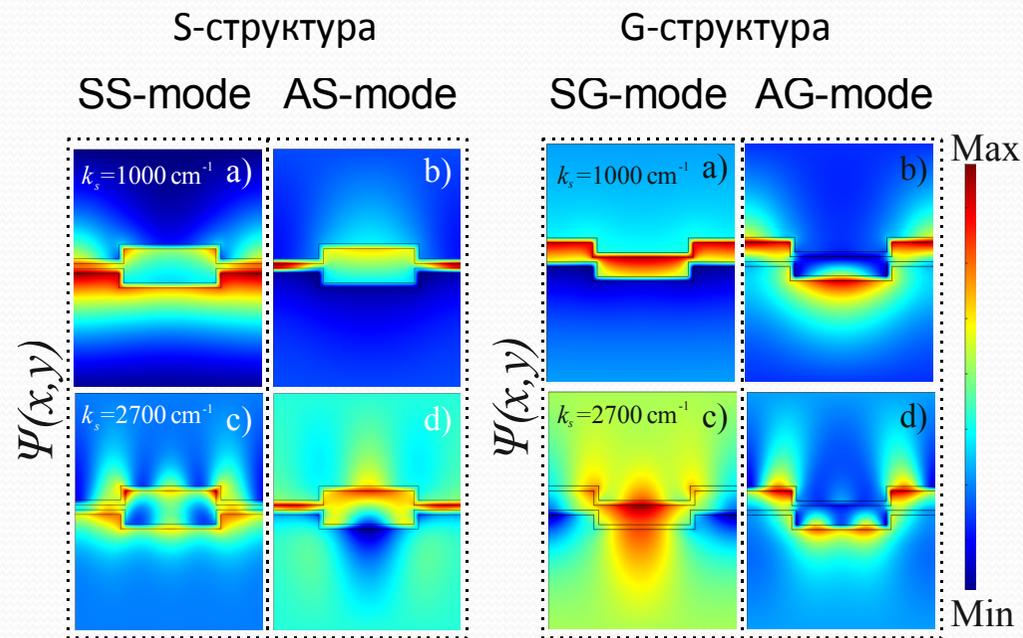


Растровый электронный микроскоп





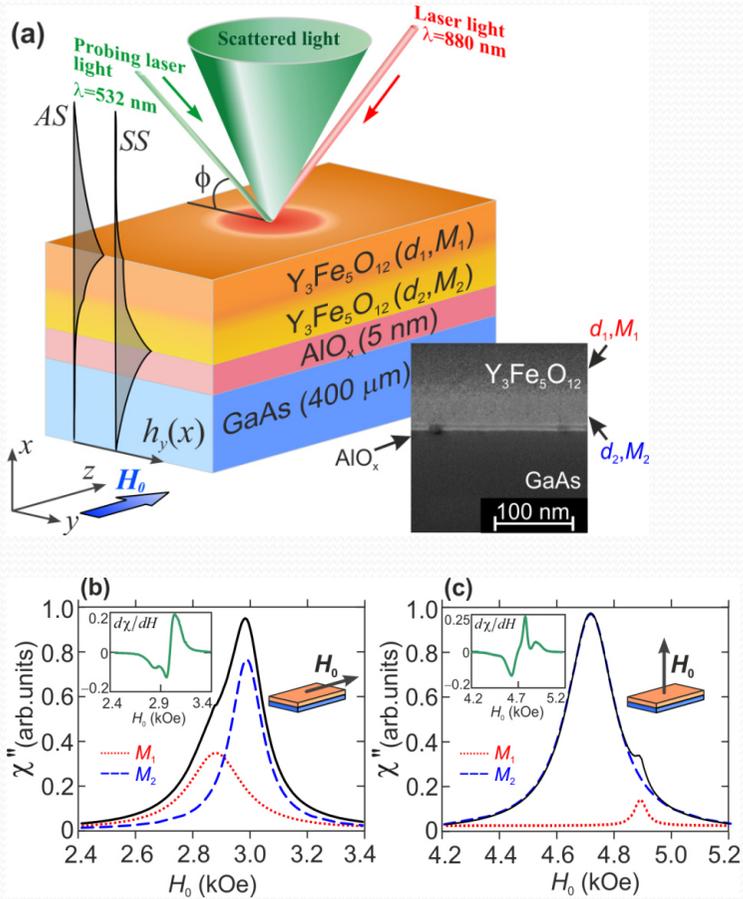
Дисперсионные характеристики блоховских волн в связанной симметричной структуре (тип S, $r=2 \mu\text{m}$, SS, AS), несимметричной структуре (тип G, $r=4 \mu\text{m}$, SG, AG) и референсной структуре из двух однородных пленок ЖИГ ($r=2 \mu\text{m}$, AM, SM). AM, AS, AG и SM, SS, SG – антисимметричные и симметричные моды, соответственно. Глубина меандра $s=3 \mu\text{m}$. Пунктирная линия – дисперсионная характеристика одиночного 3D-МК.



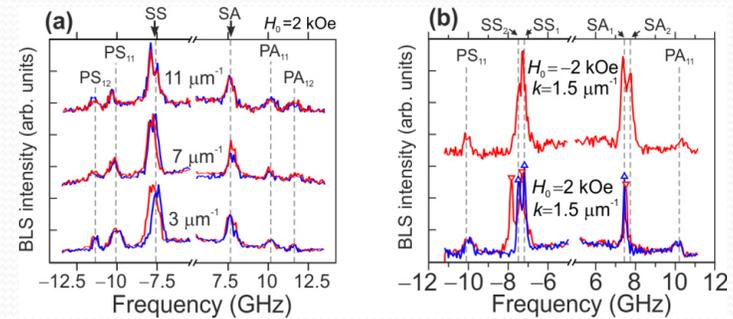
Распределение потенциала в элементарной ячейке связанных 3D-МК различной симметрии при фиксированных значениях блоховских волновых чисел $k_s=1000 \text{ cm}^{-1}$ и $k_s=2700 \text{ cm}^{-1}$.

Совмещение магноники и традиционной электроники

ЖИГ на GaAs



Влияние лазерного нагрева на свойства полупроводника
Как следствие- изменение свойств магнетика

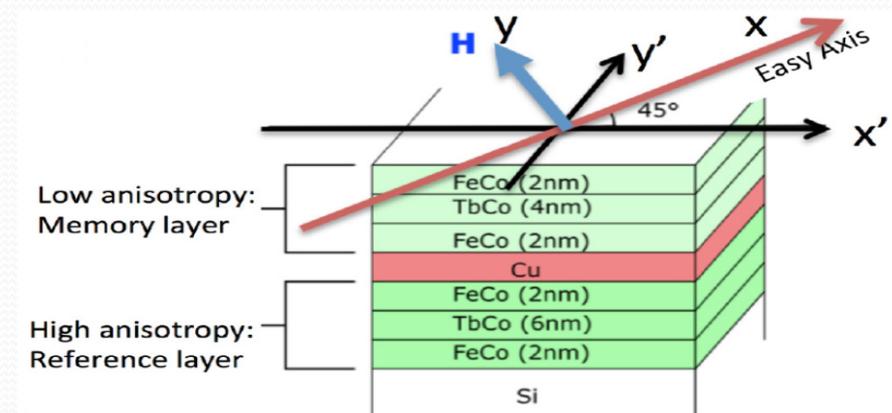


Магнитоэлектрическая память MELRAM

Multiferroic spintronic nanostructures development with lowest energy consumption by 1-2 order of value less than in MRAM

Basic technical parameters MELRAM cell

- Size of an element $100 \times 100 \text{ nm}^2$;
- Recording energy reading time less than 0,3 ns;
- Number of cycles 5000;
- Time of information storage 10 years.



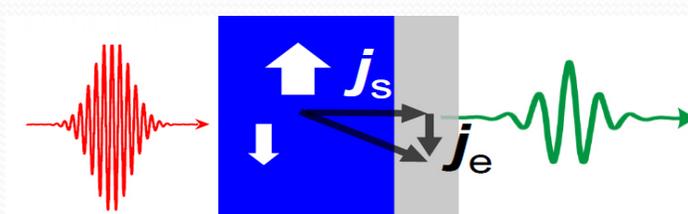
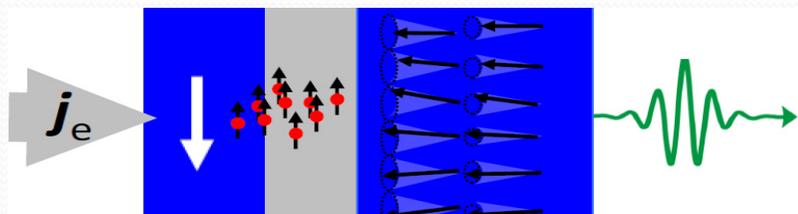
IEMN – IRE RAS

Nanomagnetic and Spintronic Devices for Energy Efficient Computing», Wiley & Sons, 221-257 (2016).

Терагерцовая спинтроника и спин-фотоника

Возбуждение ТГц колебаний спинов:
лазерными импульсами

спин-поляризованным током

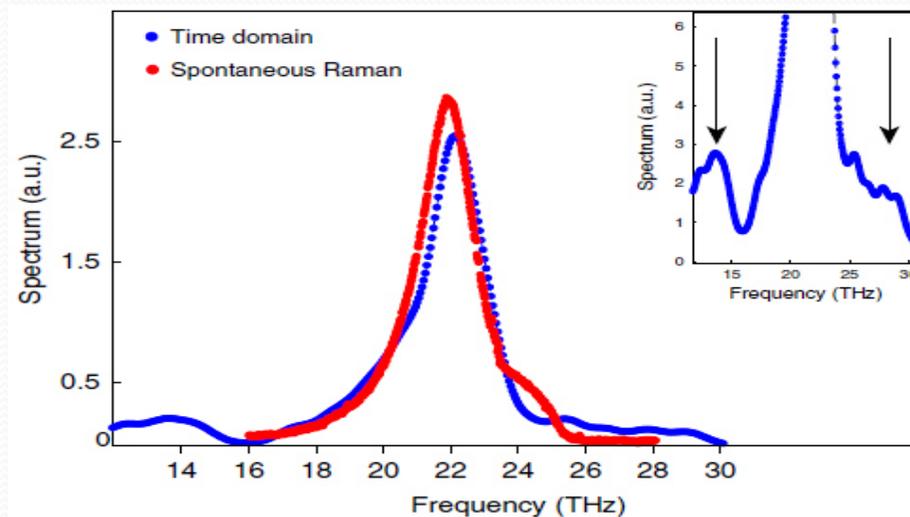


Спин-инжекционные генераторы терагерцовых волн на основе магнитных структур

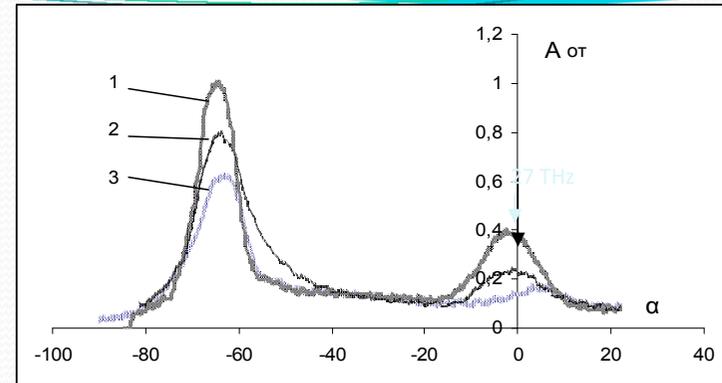
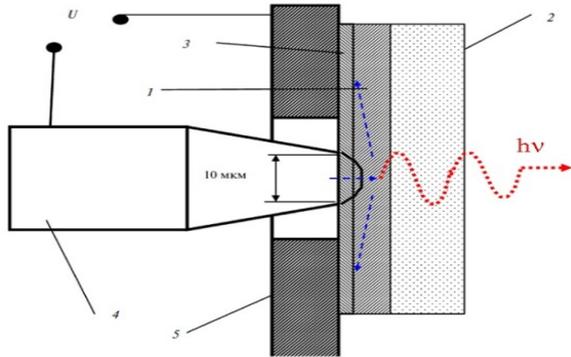
Ю.В. Гуляев, П.Е. Зильберман, С.Г. Чигарев. *Радиотехника и электроника* 60, 441 (2015)

Экспериментально обнаружено возбуждение лазерными импульсами **когерентных** колебаний спинов с частотой **22 ТГц** в антиферромагнетике

D. Bossini et al., *Nature Communications* 7, 10645 (2016)



Ferromagnetic rod – magnetic thin film constriction



Some experimental results:

- Emission spectra consists of spectral bands in 8-30 THz range
- Emission spectra depends on film composition (Fe, Co, Ni, their alloys and oxide, FeMn and others) and applied to magnetic junction current with some threshold current.
- Radiative power emission in whole solid angle may reach, as estimated, near one mW.
- Emission power is proportional to injected electrons into the magnetic junction and does not to applied current power.

Unfortunately, the rod-film constriction is not suitable for high quality lasing effect experiment. It demands completely planar spin injector developing.

Спин-инжекционная терагерцовая фотоника на основе нанопереходов в магнитных металлах и диэлектриках

G.M. Mikhailov ^a, E.A. Vilkov ^b, S.A. Nikitov ^b,
V. Korenivski ^c

^a *Institute of Microelectronics Technology and High Purity Materials, Russian Academy of Sciences, str. Ac. Osipian 6, Chernogolovka, Moscow district, 142432 Russia. mikhailo@iptm.ru*

^b *Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics, Russian Academy of Sciences, str. Mokhovaya 11, bld. 7, Moscow, 125009 Russia.*

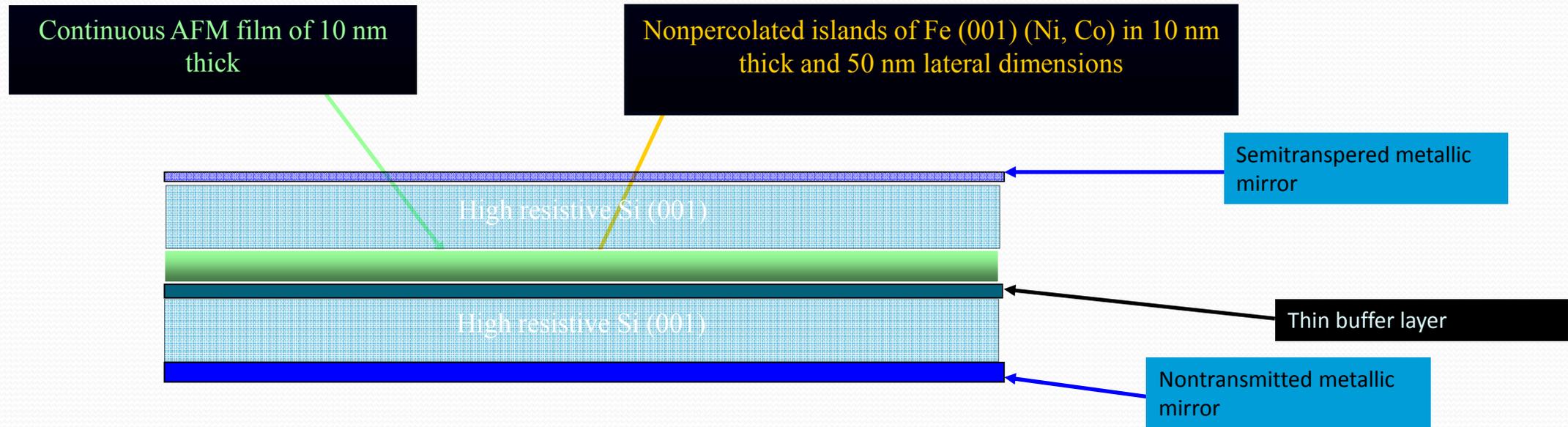
^c *Royal Institute of Technology, Valhallavägen, 79, Stockholm, SE-100 44 Sweden.*

Abstract. Magnetic junctions including ferromagnetic, antiferromagnetic and nonmagnetic metallic layers of nanometer scale thickness may emit terahertz radiation through by spin-subband transitions of injected electrons with negative spin-temperature.

We consider three type of THz spin-injection emitters on the base of magnetic metals nanojunction that include the ferromagnetic rod – magnetic thin film constriction, the magnetic metamaterial film emitter and magnetic point contact arrays.

Some results of the investigations are presented and the field of subsequent activity is considered in concern to lasing effect .

Direct evidence of spin-injection radiation may come from observation of high quality lasing effect by inserting spin-injection planar emitter into the resonator



Planar constriction scheme for laser effect observation on the base of magnetic metamaterials junctions.

Терагерцовая магнетика

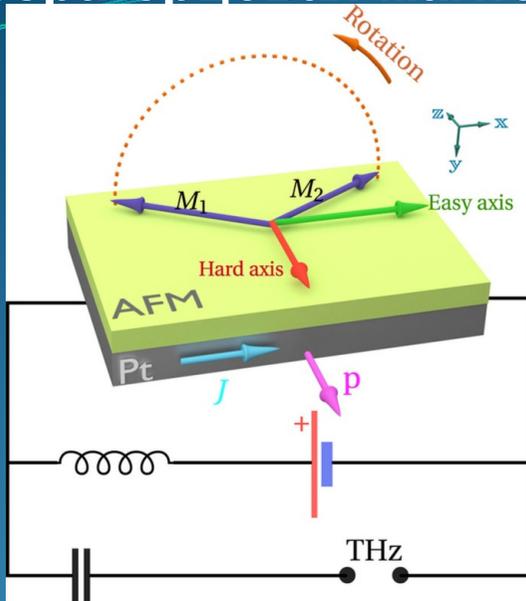
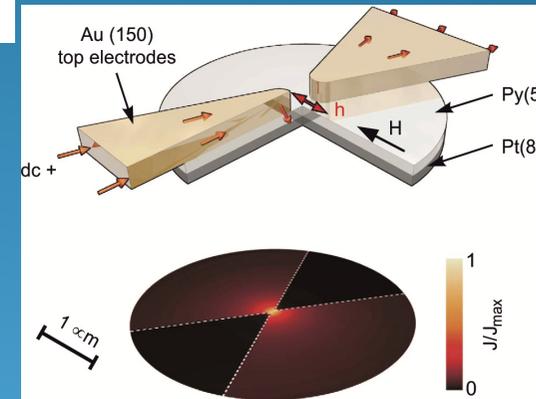
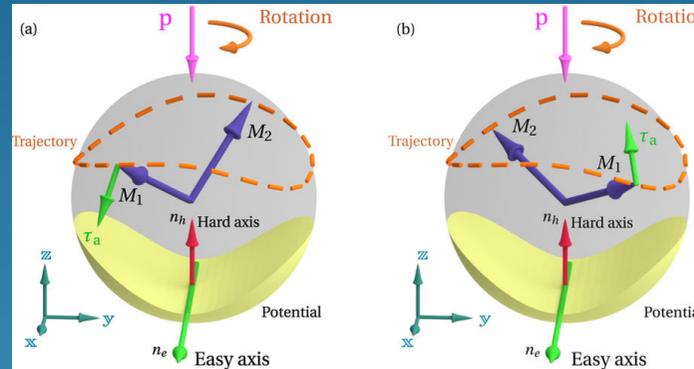


Схема осциллятора ТГц-частоты, состоящего из слоев Pt / AFM

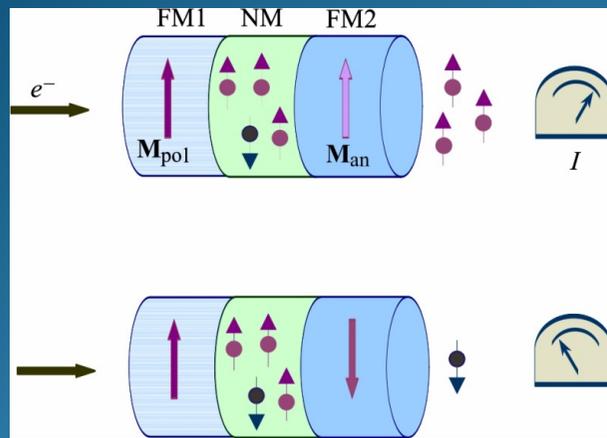


Одиночный спин-трансферный осциллятор

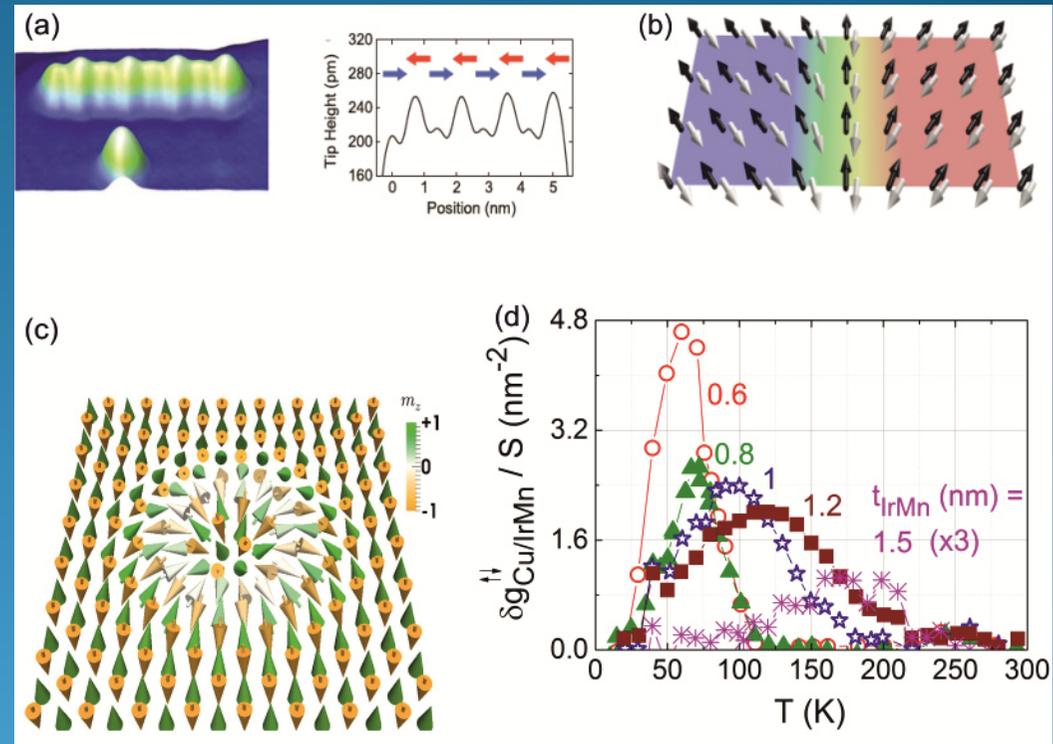
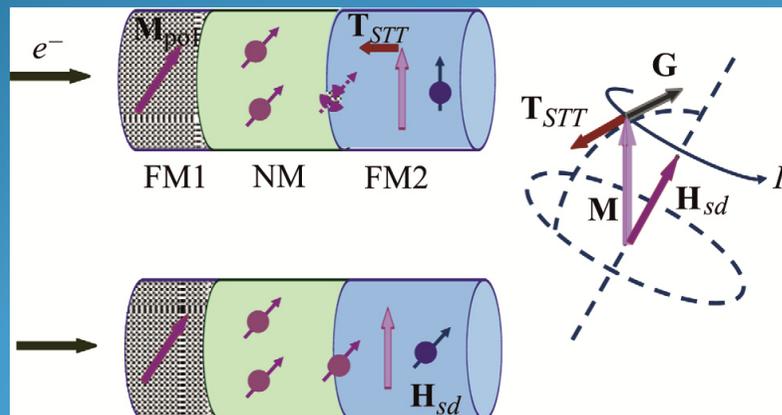
*V. E. Demidov, H. Ulrichs, S. V. Gurevich, S. O. Demokritov, V. S. Tiberkevich, A. N. Slavin, A. Zholud & S. Urazhdin//Nature Communications volume 5, Article number: 3179 (2014)

*Roman Khymyn, Ivan Lisenkov, Vasyl Tiberkevich, Boris A. Ivanov, and Andrei Slavin, Antiferromagnetic THz-frequency Josephson-like Oscillator Driven by Spin Current// Sci Rep. 2017; 7: 43705.

Терагерцовая магноника



Эффект ГМР в двух магнитных слоях



Антиферромагнитный скирмион обладает сильной связью между антиферромагнитными спин-подрешеткам

*E. V. Gomonay and V. M. Loktev, Spintronics of antiferromagnetic systems//Low Temperature Physics 40, 17 (2014);

Терагерцовая магноника, СКИРМИОНЫ

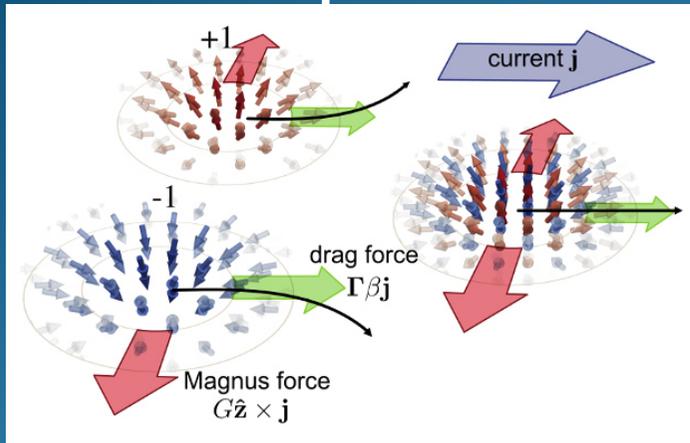
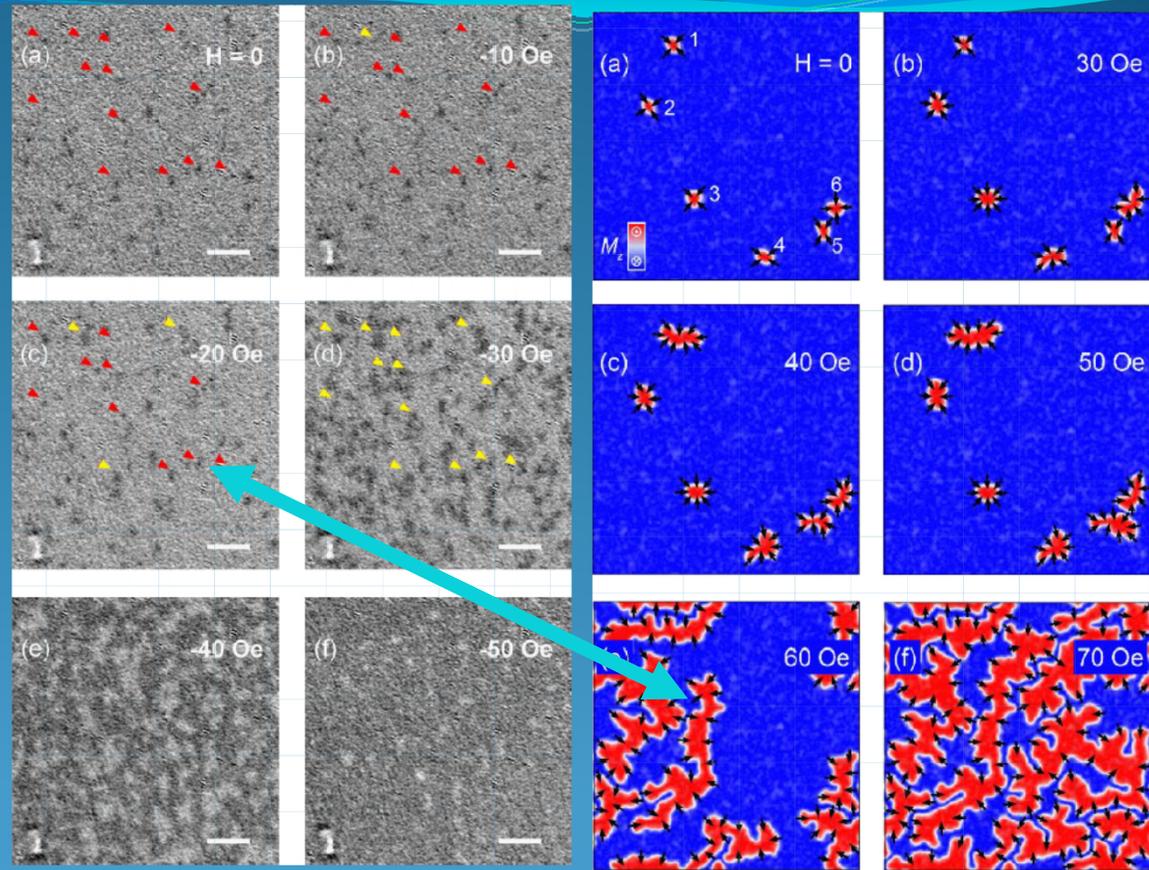


Схема движения АФМ скирмиона

Сверхбыстрая антиферромагнитная
спинтроника двух и более
топологических объектов

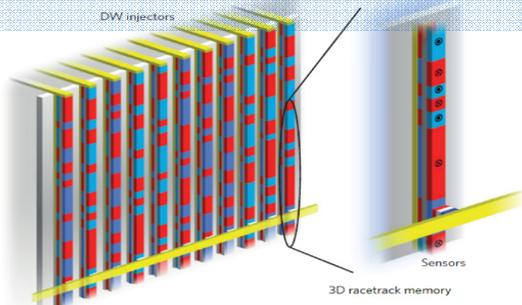
Нейроподобная функциональная логика
на принципах антиферромагнитной
спинтроники



Магнитная доменная структура *Ru* (10) / *Co* (1.1) / *W* (0.25) / *Ru* (2). Скирмионные домены

Alexander Samardak, Alexander Kolesnikov, Maksim Stebliy, Ludmila Chebotkevich, Alexandr Sadovnikov, Sergei Nikitov, Abhishek Talapatra, Jyoti Mohanty, and Alexey Ognev // *Appl. Phys. Lett.* 112, 192406 (2018);

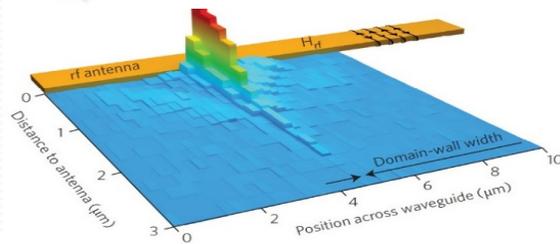
Доменные границы в наноспинтронике



Доменные границы в 3D запоминающих и логических устройствах

Memory on the racetrack. 3D solid-state device.

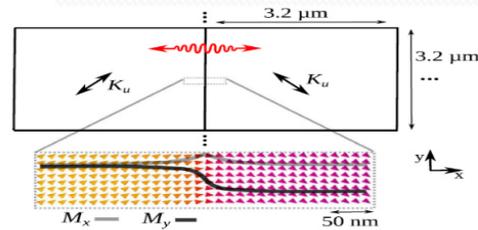
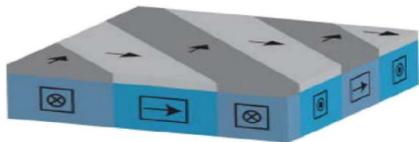
S. Parkin et al., Nature Nanotechnology **10**, 195–198 (2015)



Доменные границы как реконфигурируемые наноэлементы

Доменная граница – нановолновод спиновых волн.

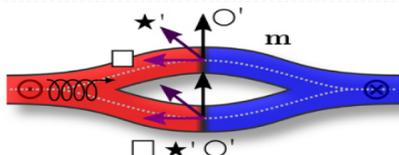
K. Wagner et al., Nature Nanotechnology 10.1038/nnano.2015.339 (2016)



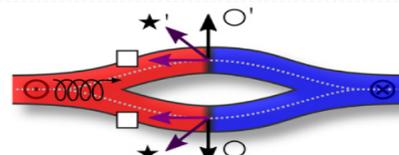
Наногенераторы и наноантенны.

Up to 100 GHz and wavelengths down to 20 nm.

B. Van de Wiele et al., Scientific Reports 6:21330 (2016)



(a) Identical chiralities:
constructive interference



(b) Opposite chiralities...

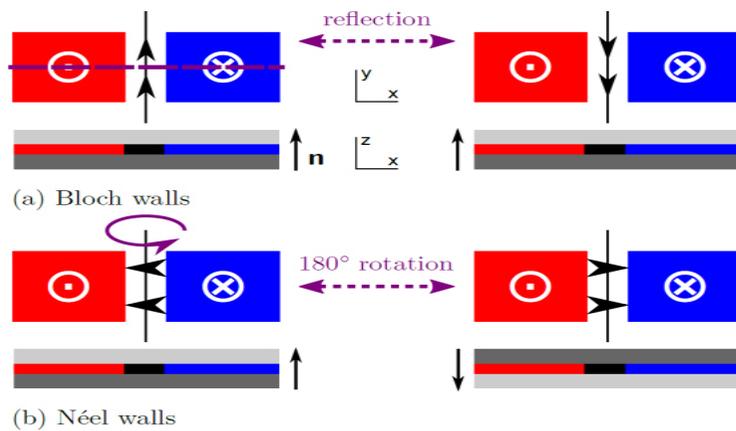
Наноинтерферометр на доменных границах.

F. J. Buijnsters et al., Phys. Rev. Lett **116**, 147204 (2016)

THz spintronics and spin-photonics

Development of new principles of ultrahigh energy effective signal controlling devices
Novel investigation on crystal-on-chip systems based on spintronics and spin-photonics principles with the frequencies up to 20 THz

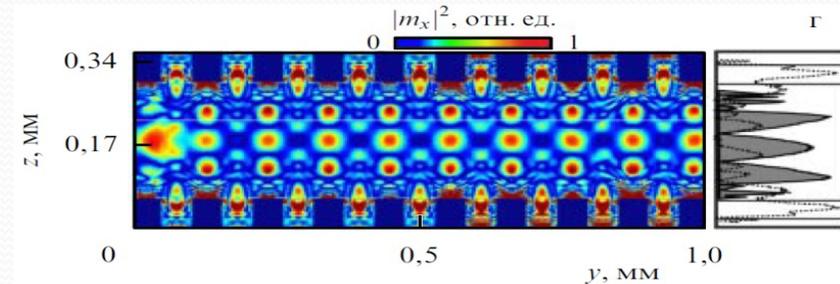
Generation-routing-coding-synchronization-detection og THz spin waves



Domain walls as nanoantennas, nanowaveguides and spin wave control devices

F. J. Buijnsters et al., Phys. Rev. Lett. 116, 147204 (2016)

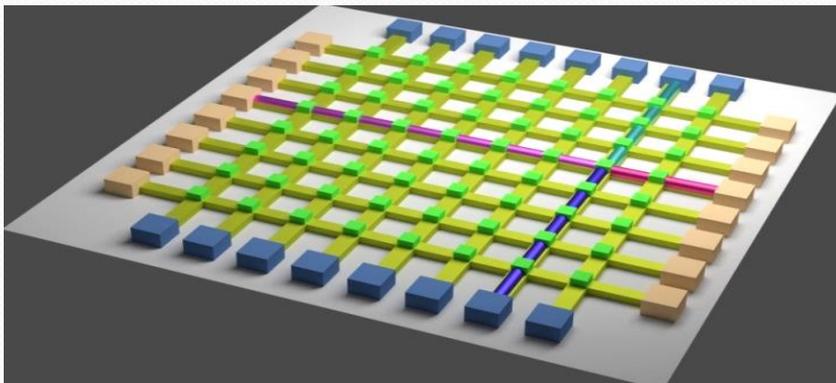
B. Van de Wiele et al., Scientific Reports 6:21330 (2016)



Magnonics new direction of spintronics and spin wave electronics

S A Nikitov et al, Phys Uspekhi, v.185, 1099 (2015)

Энергоэффективные нейроморфные компьютеры на базе элементов спинтроники



Бежевые элементы – входные нано-осцилляторы

на эффекте переноса спинового момента

Синие элементы – выходные нано-осцилляторы

Зеленые элементы – наномagnиты для изменения направления движения спиновых волн

Желтые линии – нановолноводы спиновых волн

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

Нейроморфный магنونный 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.**

Акустическая спиновая накачка

в магнитоэлектрических резонаторах на объемных акустических волнах (НВАР) для устройств микроволновой спинтроники (фононная спинтроника)

AIP Advances 8, 056128 (2018)

- Впервые наблюдалось возбуждение и детектирование спиновых волн (СВ) и спиновых токов (СТ) в НВАР со структурой Al/ZnO/Al – ЖИГ/ГГГ/ЖИГ–Pt в широком диапазоне резонансных частот и полей. Впервые наблюдалась величина напряжения обратного спинового эффекта Холла (ISHE) в мкВ диапазоне: $V_{ISHE} \sim 4 \text{ мкВ}$ (Рис.2) при подаваемой на электроды пьезо-преобразователя мощности $\sim 2 \text{ мВт}$ и активной области возбуждения $\sim 170 \text{ мкм}$.

Преимущества АСН в НВАР

- пьезоэлектрическое возбуждение СВ не требует создания rf магнитных полей \rightarrow **исключаются омические потери и энергопотребление.**
- НВАР: эффективное возбуждение гиперзвука (строго определённой поляризации) **на резонансных частотах с $Q \sim 10000$** эффективно накапливается упругая энергия для **передачи** ее в магнитную подсистему при магнитном поле, соответствующем магнитоупругому резонансу (MER).

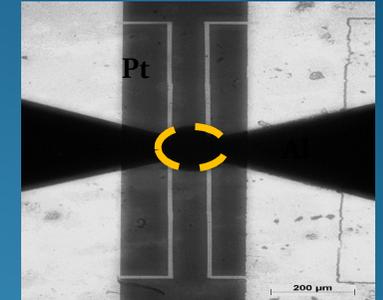
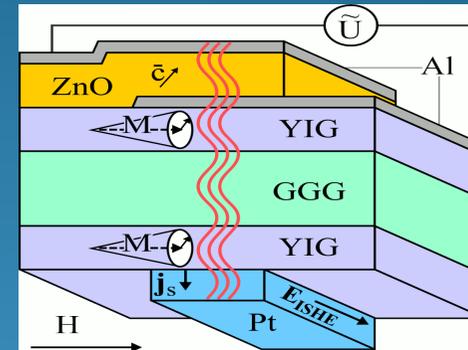


Рис.1. Магнитоэлектрический НВАР, для акустической спиновой накачки (АСН): схема и микрофотография на просвет.

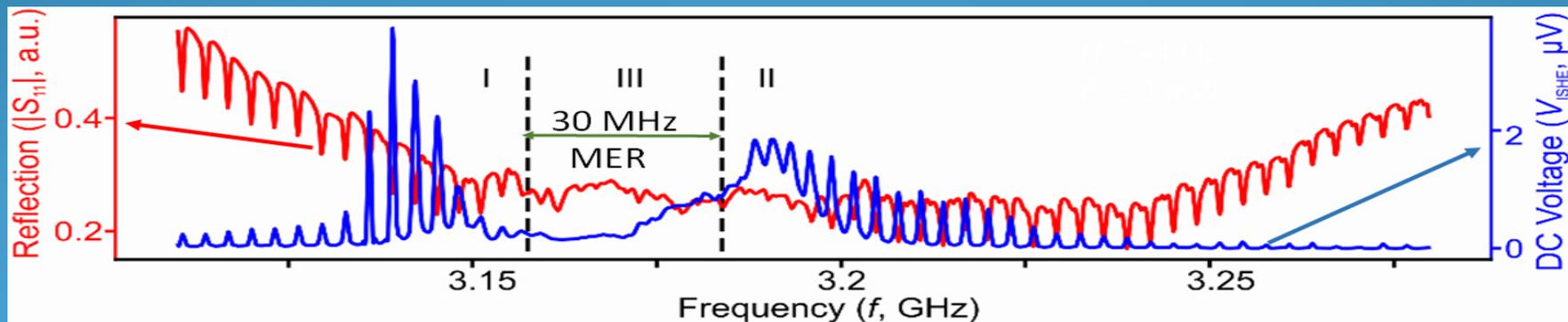


Рис.2. Частотная зависимость dc V_{ISHE} на Pt (синяя кр.) и модуль коэффициента отражения резонатора (красная кр.)

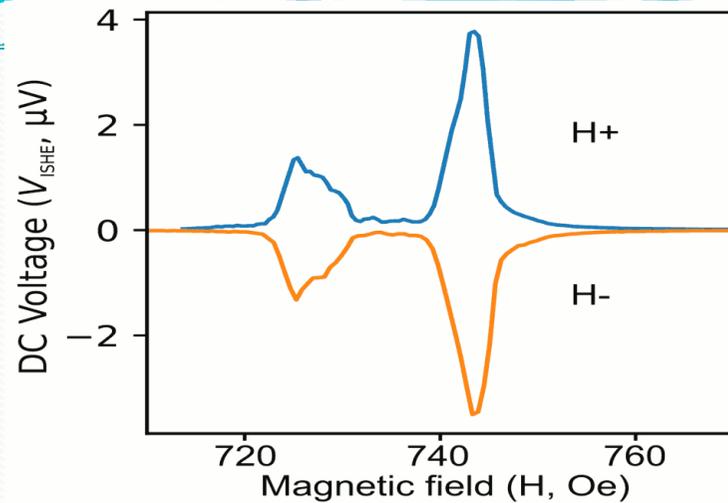


Рис.3. Зависимость напряжения от магнитного поля при возбуждении резонатора на частоте одного из максимумов Рис. 2. ($f_n = 3.1385$). Нижняя кривая снята при смене направления магнитного поля.

- Измерения при инвертированном направлении магнитного поля показали, что напряжение меняет знак, но не меняет свою величину при заданной величине поле. Это подтверждает, что детектирования СТ в платине происходит в результате ISHE – конвертации чисто спинового тока в ток проводимости.

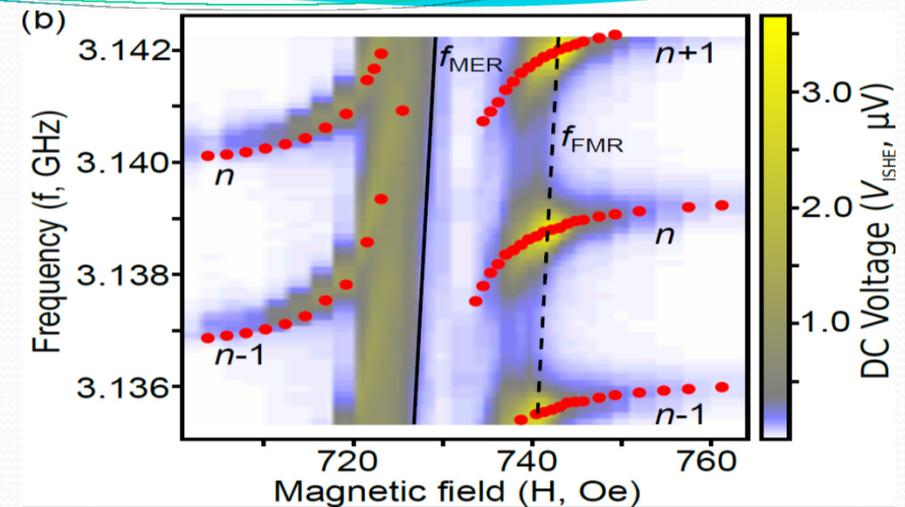


Рис.4. Зависимость напряжения от поля и частоты (правая шкала) и изменение трех соседних частот резонансных частот НВАР (красные точки)

- Частотные и полевые зависимости $V_{ISHE}(f, H)$, демонстрируют полное соответствие между локализацией максимумов напряжения и положением резонансных частот в плоскости (f, H) .

Т.о., вся совокупность приведенных и других данных подтверждает, что наблюдаемые эффекты связаны с магнитоупругим возбуждением спиновых волн и акустической спиновой накачкой из ЖИГ в платину, детектируемой в пленке Pt за счет обратного спинового эффекта Холла.

Выводы

- Создано новое направление в магнетизме и электронике
- Развивается элементная база
- Есть потребность в новых композиционных материалах и структурах