



# «Гетероструктуры на основе тяжелых металлов/ферро- или антиферромагнетиков для элементной базы вне КМОП».

Ю.В. Гуляев, С.А. Никитов, Д.В. Калябин,  
А.В. Садовников, А.Р. Сафин  
ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН,  
Московский физико-технический институт,  
СГУ им. Н.Г. Чернышевского,  
Московский энергетический институт

# МОТИВАЦИЯ

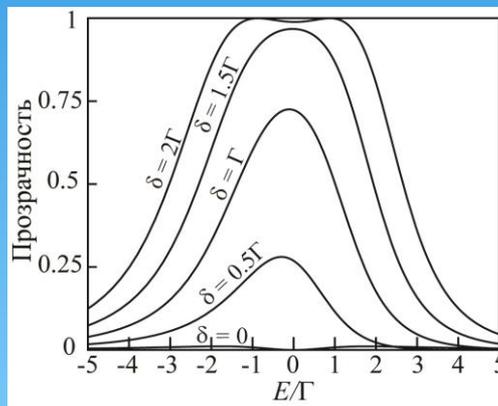
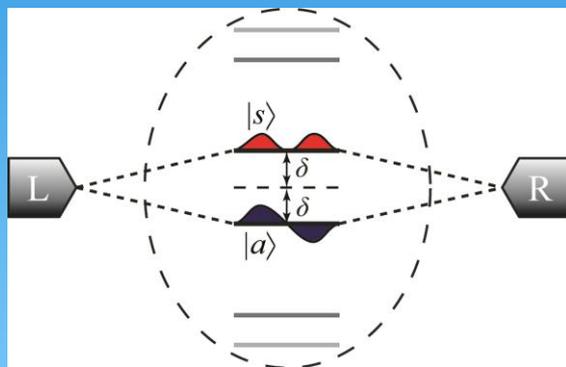
- \* Элементная база на принципах отличных от традиционных
- \* Развитие спинтроники и магноники
- \* Переход к системам, не использующим внешнее магнитное поле

# План доклада

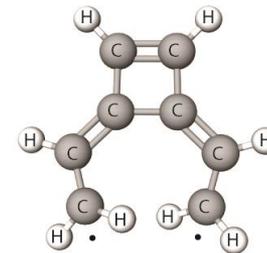
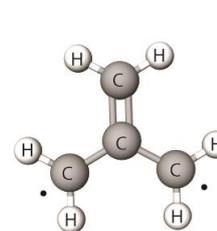
- \* Основы спинтроники и магноники
- \* Материалы для исследования
- \* Генерация излучения
- \* Терагерцовая спинтроника
- \* Логические устройства магноники

# Молекулярный квантовый интерференционный транзистор со сверхнизким энергопотреблением

На основе построенной ранее теории резонансов и антирезонансов в открытых квантовых системах предложена модель молекулярного транзистора [1], переключение которого осуществляется за счет двух физических механизмов: резонанса Фано и коллапса резонансов в особой точке молекулы, соединенной с электродами. Данные физические механизмы реализуются, например, в дирадикалах – органических молекулах с вырожденными орбиталями. Показано, что на базе такого транзистора возможно создать логические вентили с теоретически сколь угодно малыми рабочими напряжениями даже при комнатной температуре.



Примеры дирадикалов:

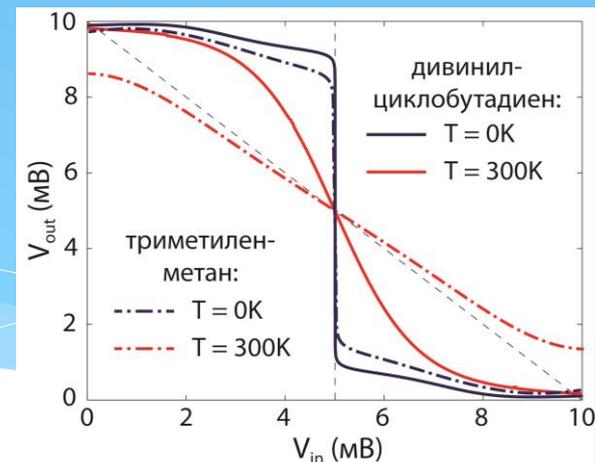


Триметиленметан Дивинилциклобутадие

Схематичный вид квантовой системы с вырожденными уровнями, подключенной к контактам. Вырождение симметричного  $|s\rangle$  и антисимметричного  $|a\rangle$  состояний может быть снято внешним возмущением ( $\delta$ ).

Изменение зависимости прозрачности от энергии ( $E$ ) при снятии вырождения.  $\Gamma$  – величина туннельной связи с контактами.

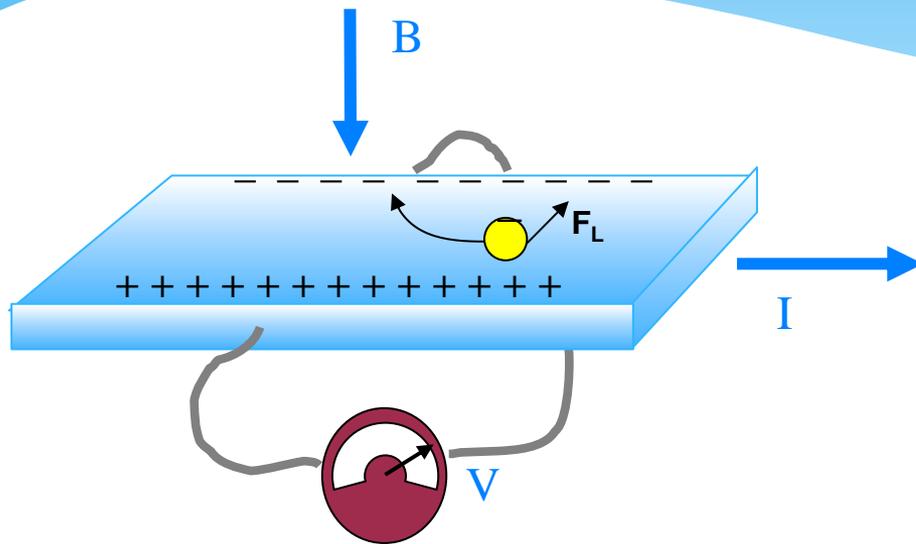
Справа: Передаточная характеристика квантового интерференционного инвертора, на основе дивинилциклобутадиена и триметиленметана при разных температурах.



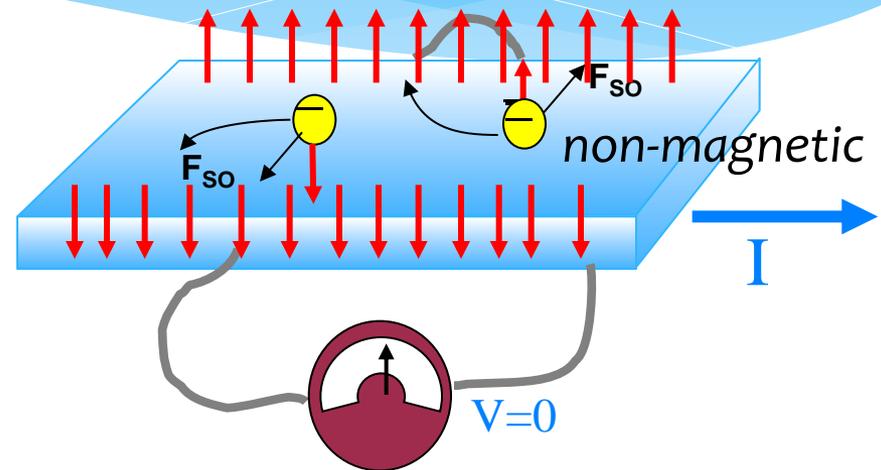
- Gorbatsevich A. A., Krasnikov G. Ya. and Shubin N. M., "PT-symmetric interference transistor", *Sci. Rep.* **8**, 15780 (2018).

# Спиновый эффект Холла

Эффект Холла



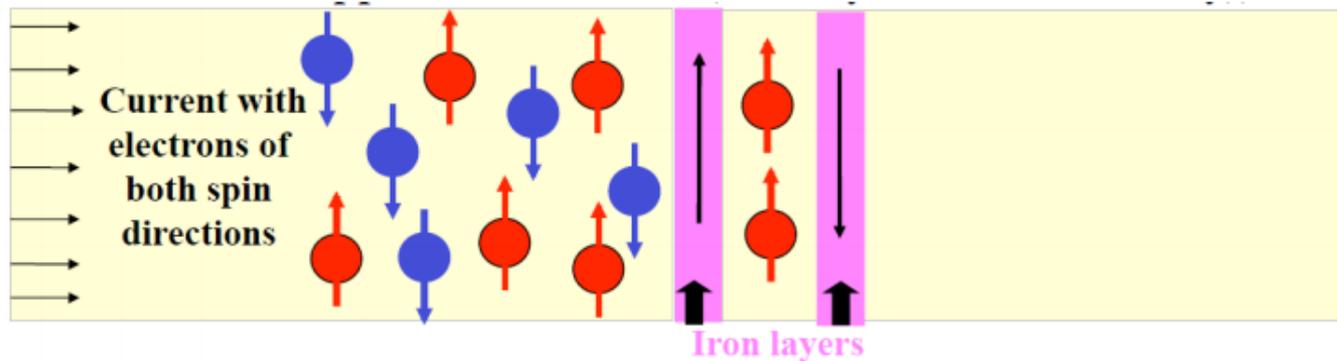
Спиновый эффект Холла



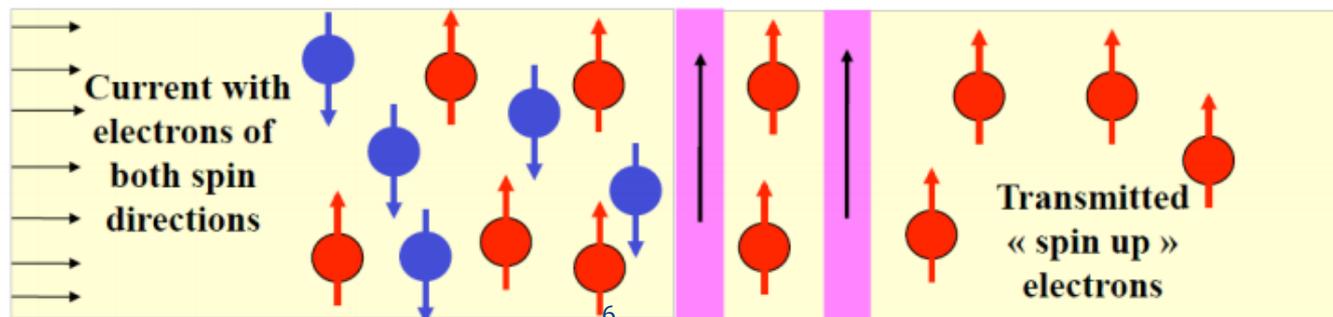
В тяжелых металлах за счет сильного спин-орбитального взаимодействия электроны с разным направлением спинов разделяются.

# Гигантское магнитосопротивление

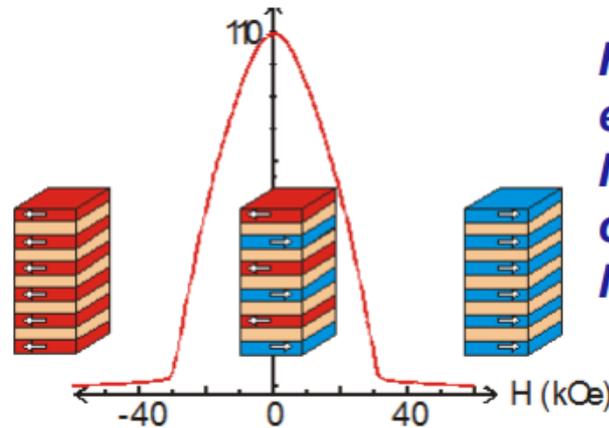
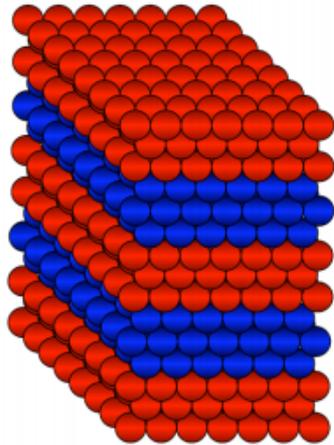
- Ферромагнитные слои с противоположными направлениями намагниченностей слоев останавливают электроны обоих направлений спина.



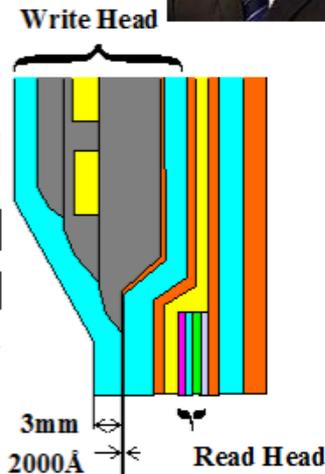
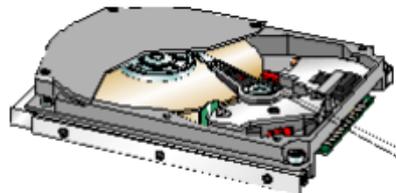
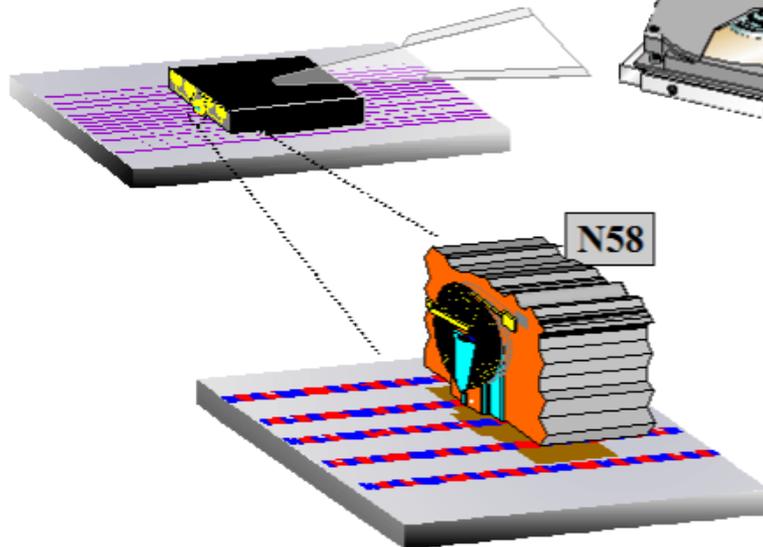
- Ферромагнитные слои с коллинеарными направлениями намагниченностей слоев «пропускают» электроны со спином-вверх.



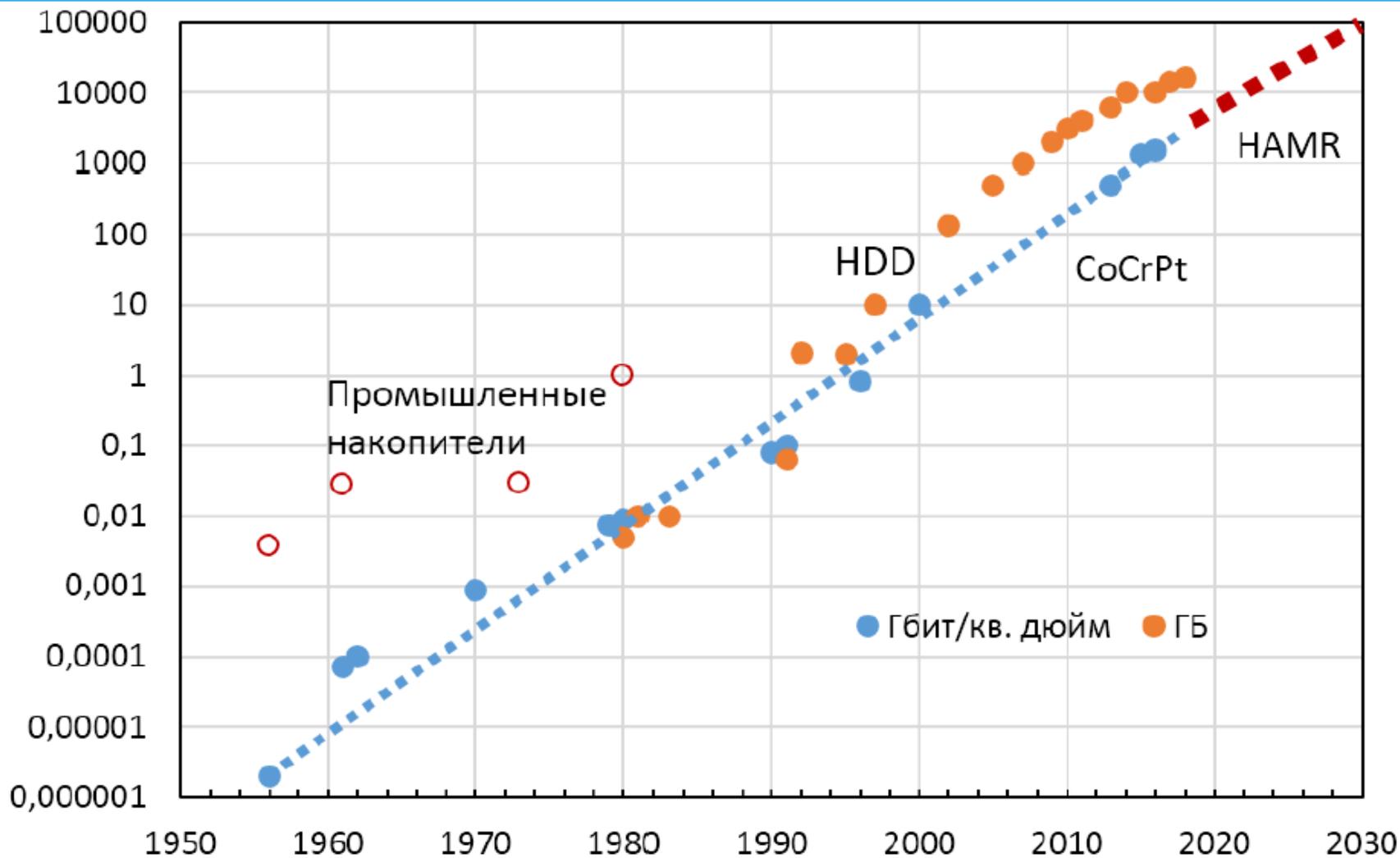
# Считывание информации с помощью эффекта ГМС



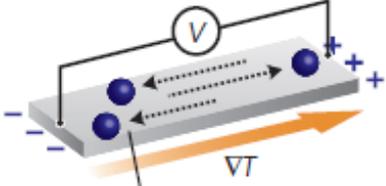
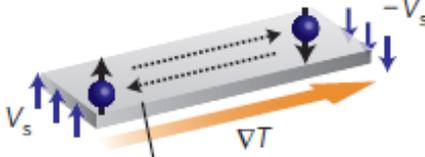
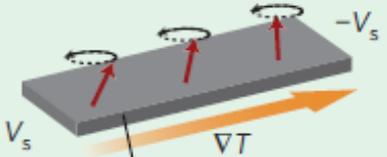
*Нобелевская премия в 2007 г. (А. Ферт и П.Грюнберг) за открытие эффекта ГМС.*

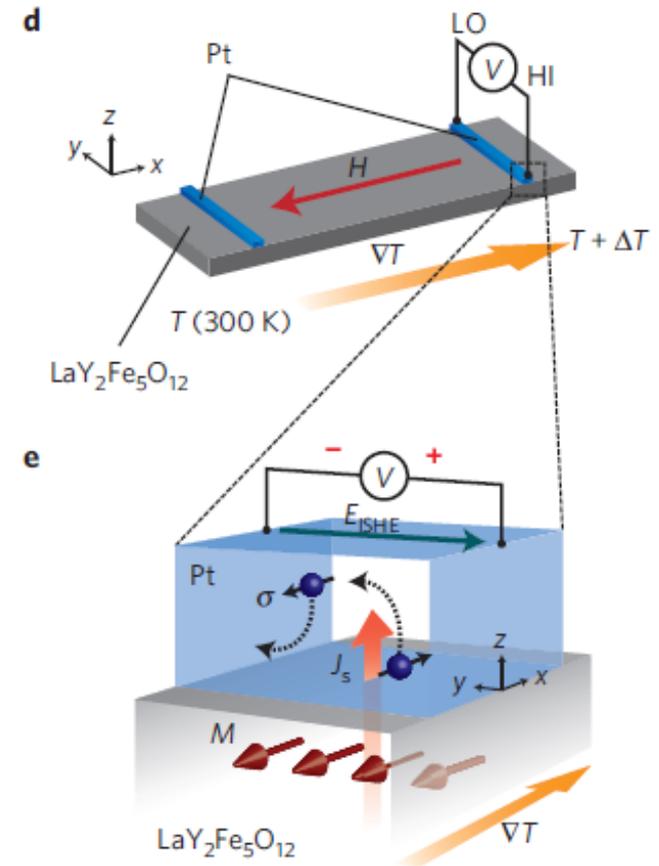


# Плотность записи информации

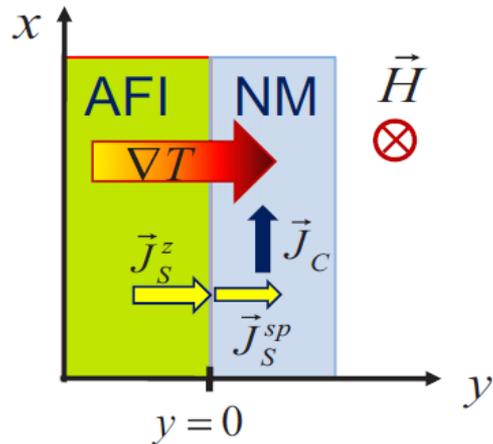


# Эффект Зеебека и спиновый эффект Зеебека

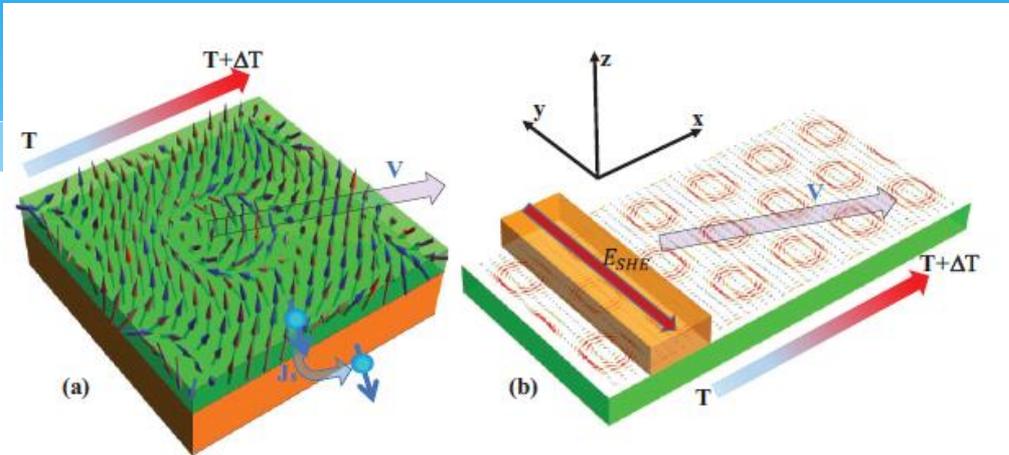
Output / Material	Electricity	Magnetism
Conductor	<p><b>a</b> Seebeck effect</p>  <p>Metal or semiconductor</p>	<p><b>b</b> Spin Seebeck effect</p>  <p>Ferromagnetic metal</p>
Insulator		<p><b>c</b> Spin Seebeck effect</p>  <p>Magnetic insulator</p>



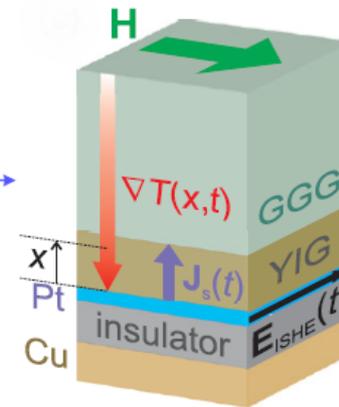
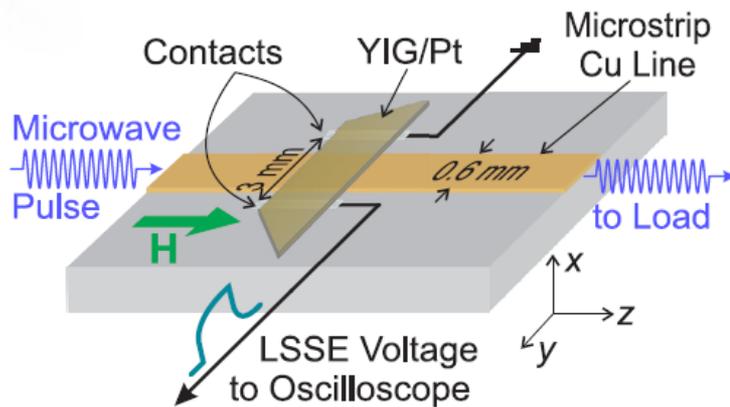
# Эффект Зеебека в различных конфигурациях



S.M. Rezende et al. Theory of the spin Seebeck effect in antiferromagnets. PHYSICAL REVIEW B 93, 014425 (2016)

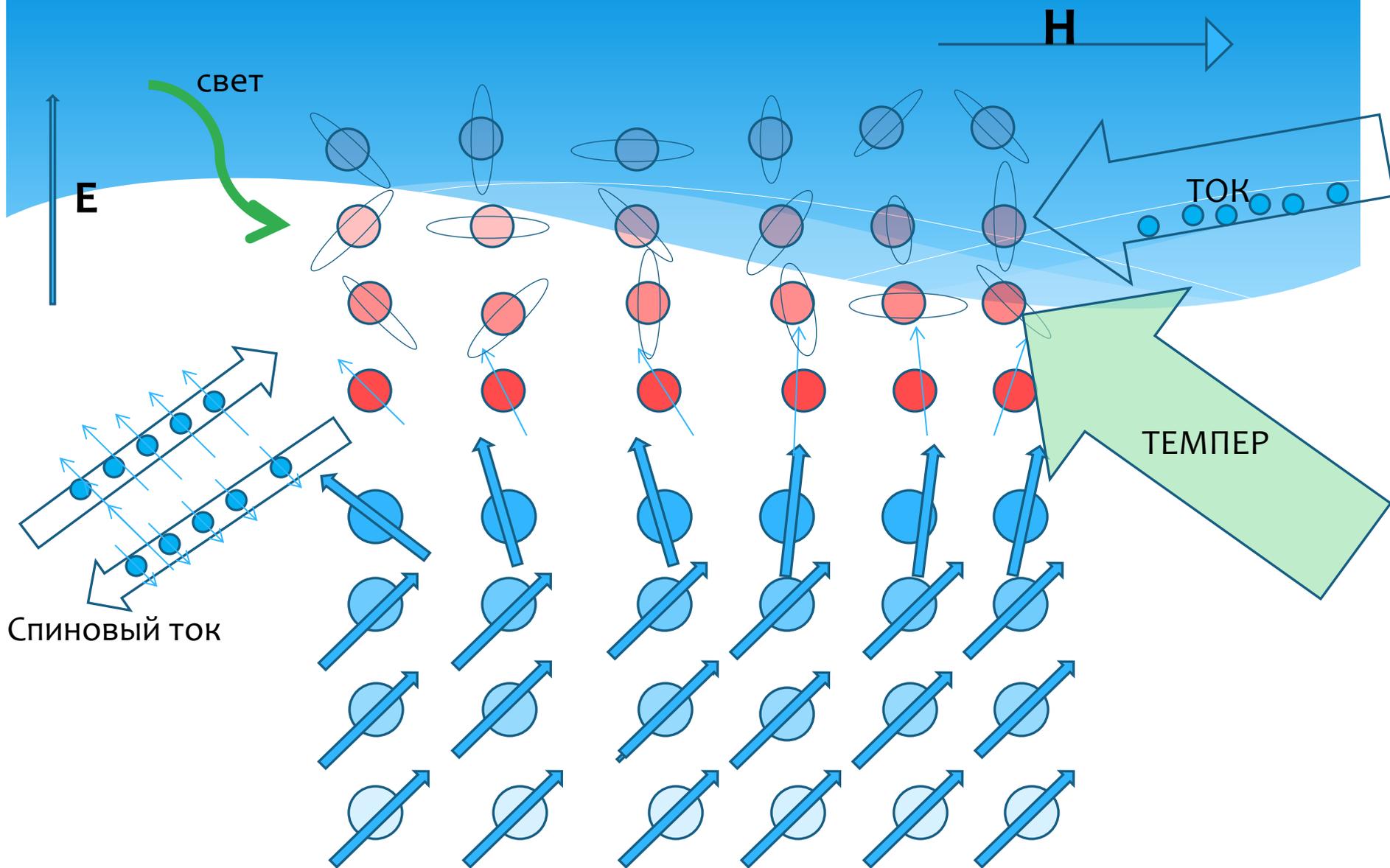


A.A. Kovalev. Skyrmionic spin Seebeck effect via dissipative thermomagnonic torques. PHYSICAL REVIEW B 89, 241101(R) (2014)

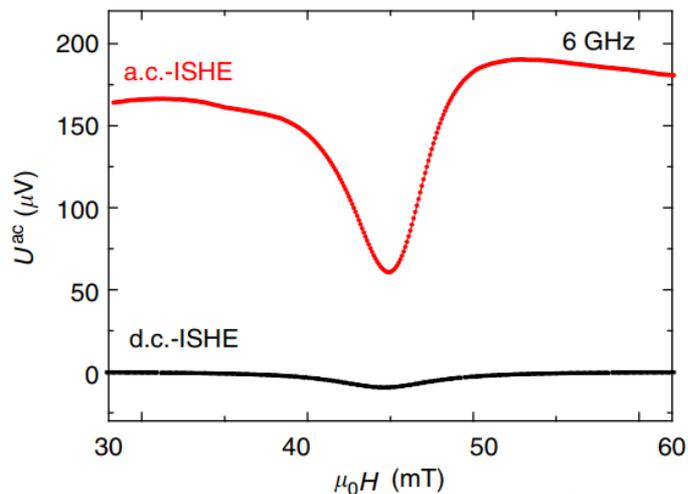
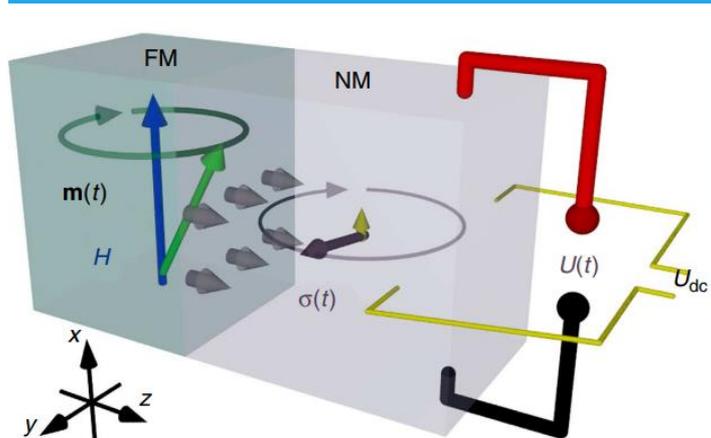


Timo B Noack et al. Spin Seebeck effect and ballistic transport of quasi-acoustic magnons in room-temperature yttrium iron garnet 2018 <sup>19</sup> J. Phys. D: Appl. Phys. 51 234003

# Граница между ферромагнетиком и тяжелым металлом

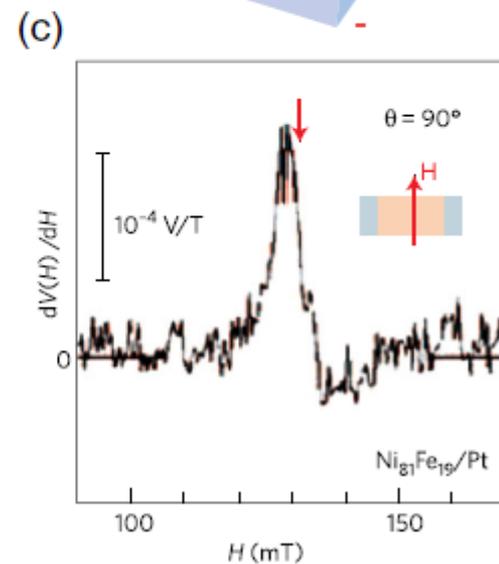
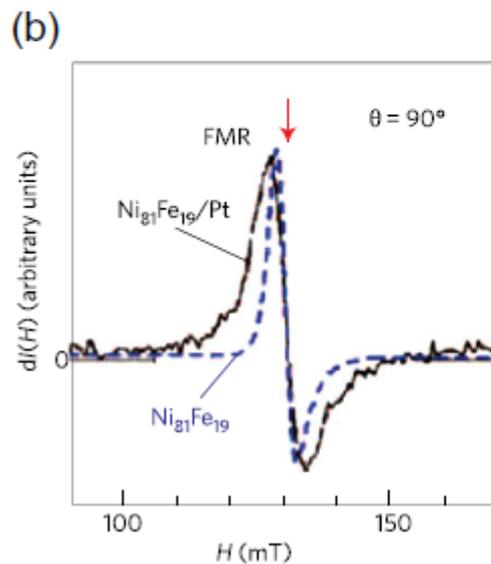
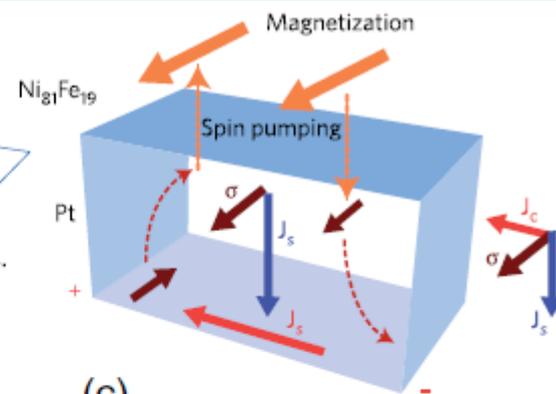
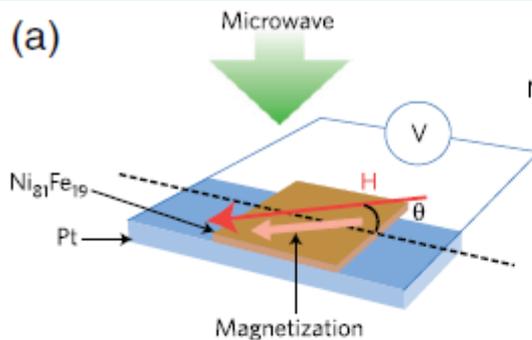


# Спиновая накачка



АС и DC сигналы за счет обратного  
спинового эффекта Холла

Wei, D., M. Obstbaum, M. Ribow, C.  
H. Back, and G. Woltersdorf, 2014,  
Nat. Commun. 5, 3768.

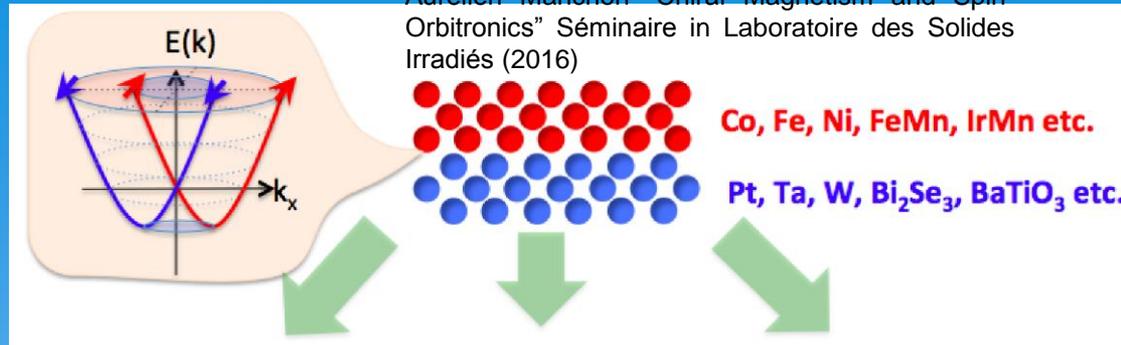


Спиновая накачка из FM в Pt

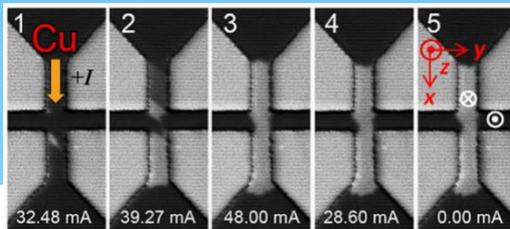
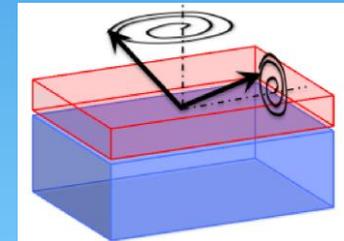
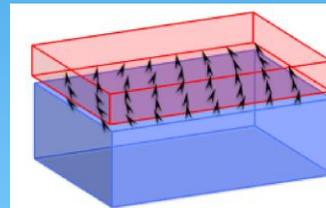
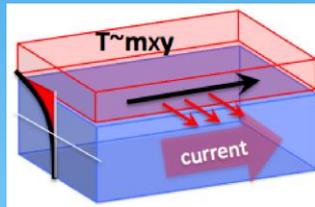
Saitoh, E., M. Ueda, H. Miyajima, and G. Tatara,  
2006, Appl. Phys. Lett. 88, 182509.

# Дзялошинский-Мория обмен и гетероструктуры

Aurélien Manchon "Chiral Magnetism and Spin-Orbitronics" Séminaire in Laboratoire des Solides Irradiés (2016)



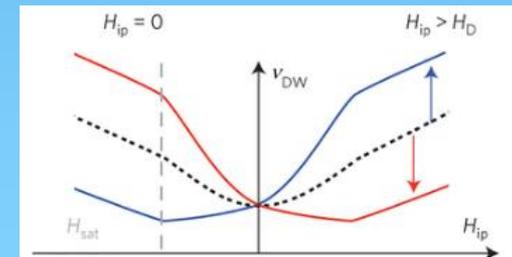
## Dzyaloshinskii-Moriya Interaction (DMI)



J. Yu, X. Qiu [et al] Scientific Reports **6**, 32629 (2016)

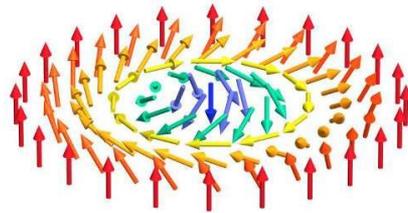
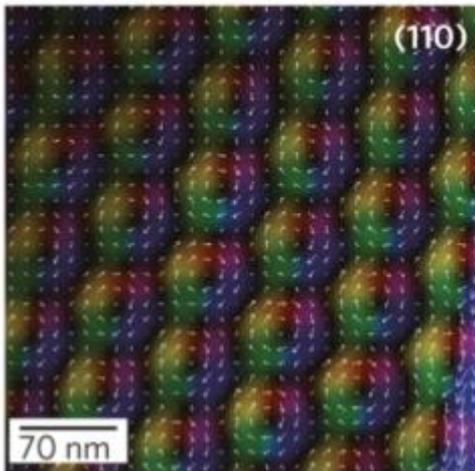


I. Kézsmárki [et al] Nature Materials **14** (2015)

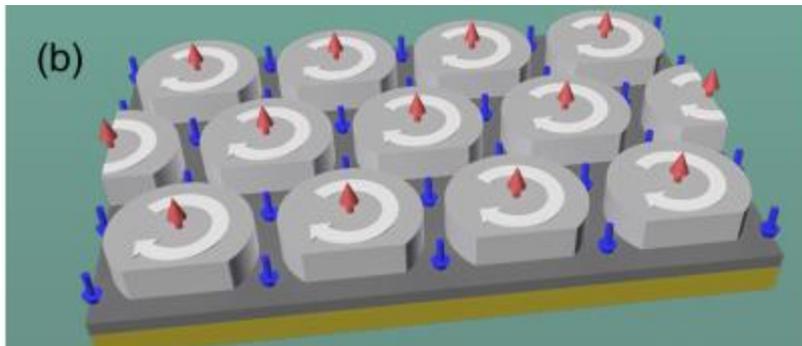
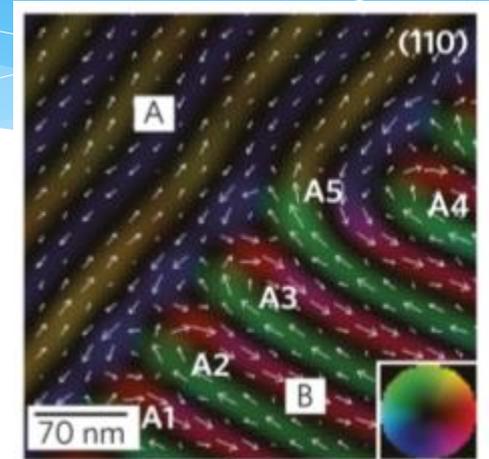


# СКИРМИОНЫ

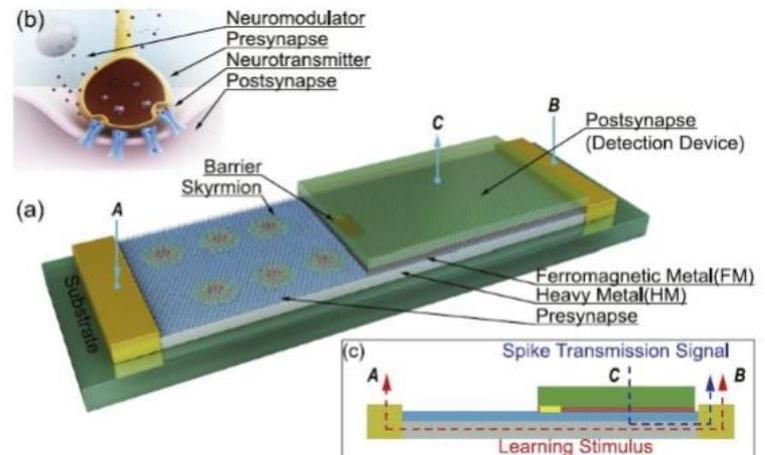
Скирмионы – локализованные, топологические наноразмерные (1-2 нм) вихри намагниченности



Т. Скирми (1962)



L. Sun, et al,  
Phys. Rev. Lett. **110**, 167201 (2013)



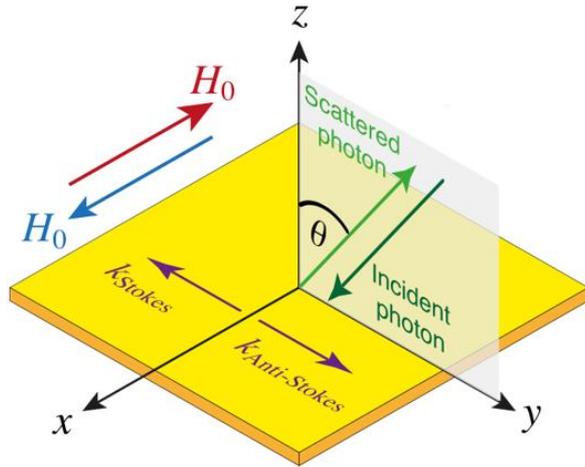
# Brillouin Light Scattering Spectroscopy

The **spin Hall angle** of the  $\beta$ -phase of W is **-0.4**, which is twice that of the  $\beta$ -phase of Ta (-0.15)  $\rightarrow$  **W is a more interesting material in for SOT devices.**

The **spin diffusion length** in  $\beta$ -phase of W is about **3.5 nm**  $\rightarrow$  to be a good spin Hall current source, the thickness of the layer **must be thicker** than the spin diffusion length (at least 5-10 nm).

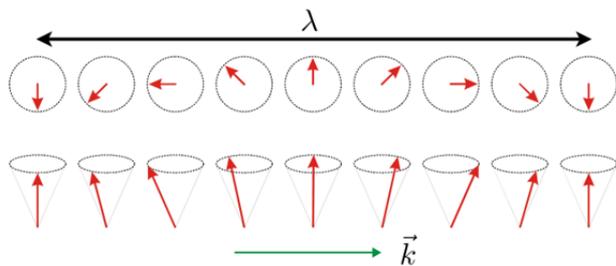
A system like W/CoFeB/MgO is a host of DMI, which intermediate value can do magnetization switching more effective and faster for SOT-MRAMs.

Наша работа в Phys Rev Appl

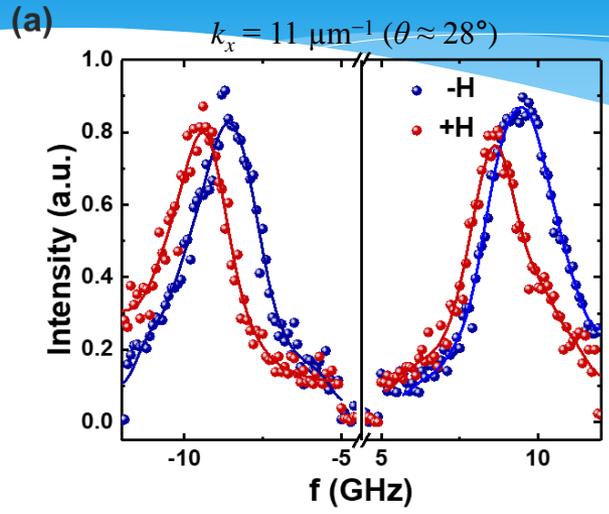


$$\Delta f = f_S - f_{AS} = \frac{2\gamma}{\pi M_s^{eff}} D_{eff} k_x = \frac{2\gamma D_s}{\pi M_s^{eff} t_{eff}} k_x$$

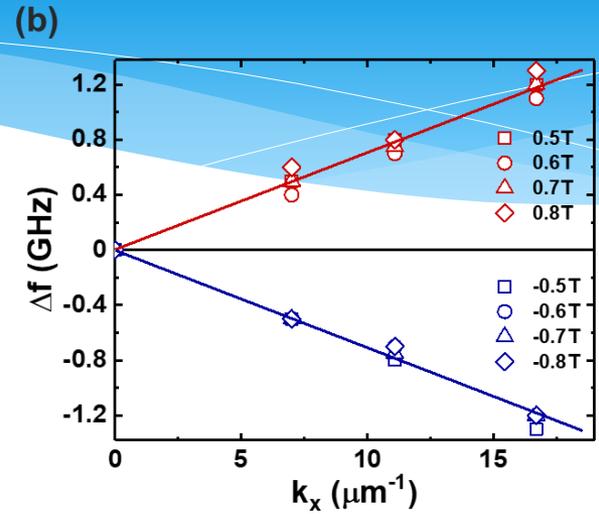
$$D_{eff} = \frac{\pi M_s^{eff} \Delta f}{2\gamma k_x}$$



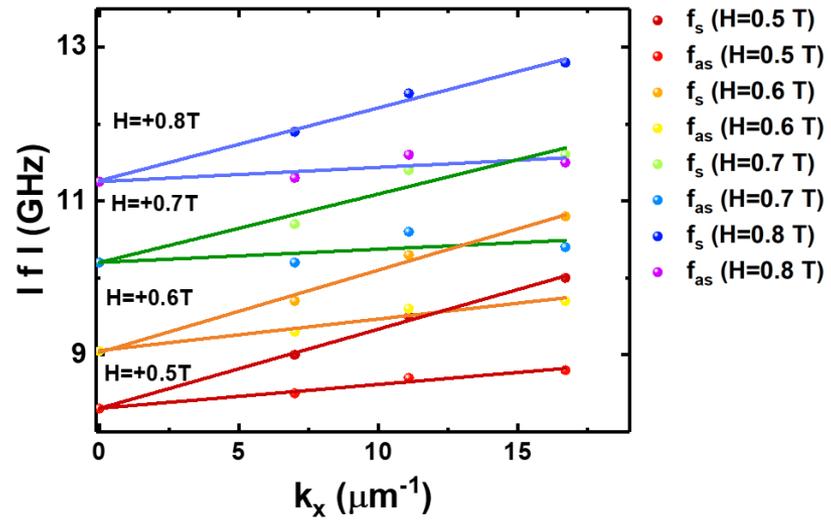
# Brillouin Light Scattering Spectroscopy



**(a)** BLS spectra recorded for the *W(11)/CoFeB(0.9)/MgO(1)/Ta(2)* film annealed at 400°C with positive and negative in-plane magnetic fields. Symbols refer to the experimental data, and solid lines are Lorentzian fits.

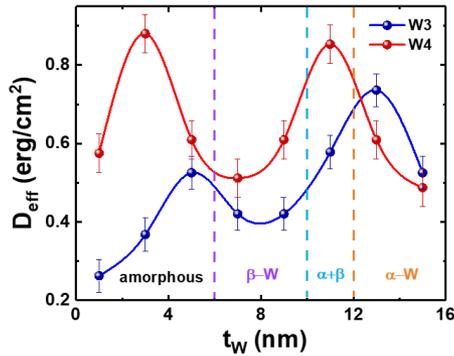


**(b)** Frequency shifts  $\Delta f$  as functions of the wave vector  $k_x$  at various positive and negative applied fields for the same film.

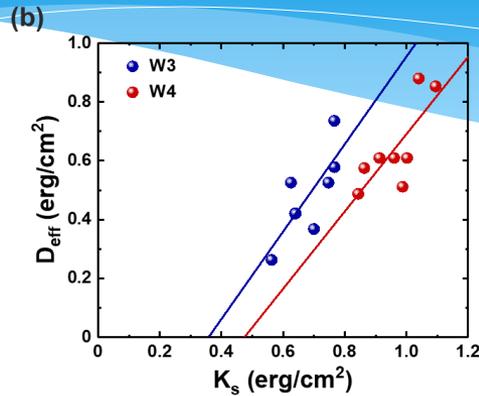


Stokes and Anti-Stokes frequencies versus  $k_x$  measured at various magnitudes of the applied field for the *W(11)/CoFeB(0.9)/MgO(1)/Ta(2)* film.

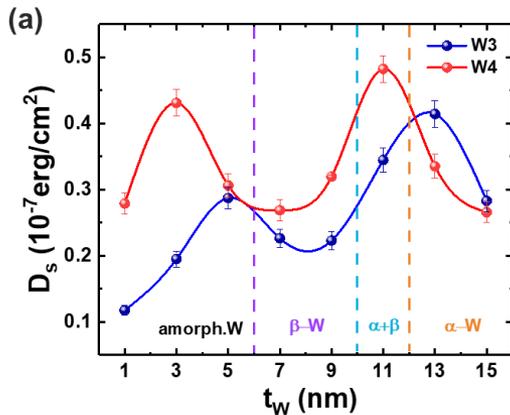
# Interfacial Dzyaloshinskii-Moriya interaction



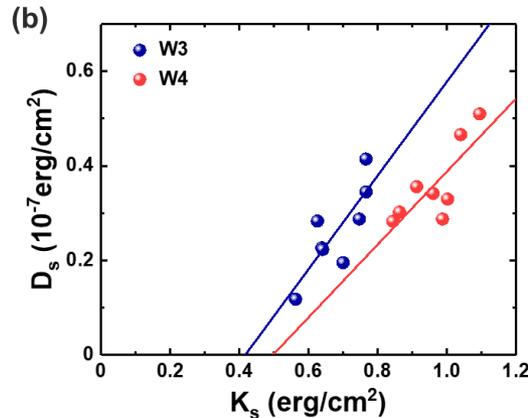
(a) Values of the iDMI energy density ( $D_{eff}$ ) as functions of  $t_W$  for the W3 and W4 series.



(b) Linear relation between  $D_{eff}$  and  $K_s$  for both series of samples.



(a) Dependence of  $D_s$  on  $t_W$  for the W3 and W4 samples.



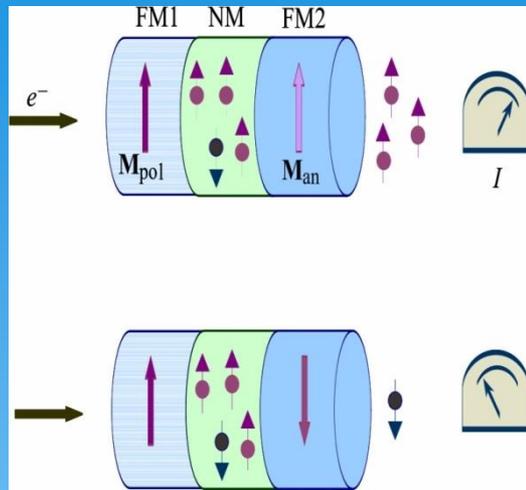
(b) Correlation between  $D_s$  and  $K_s$  for both series of samples.

The W layer thickness significantly affects on iDMI, which is explained in terms of structural and morphological transformation of W ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\alpha+\beta$  phases).

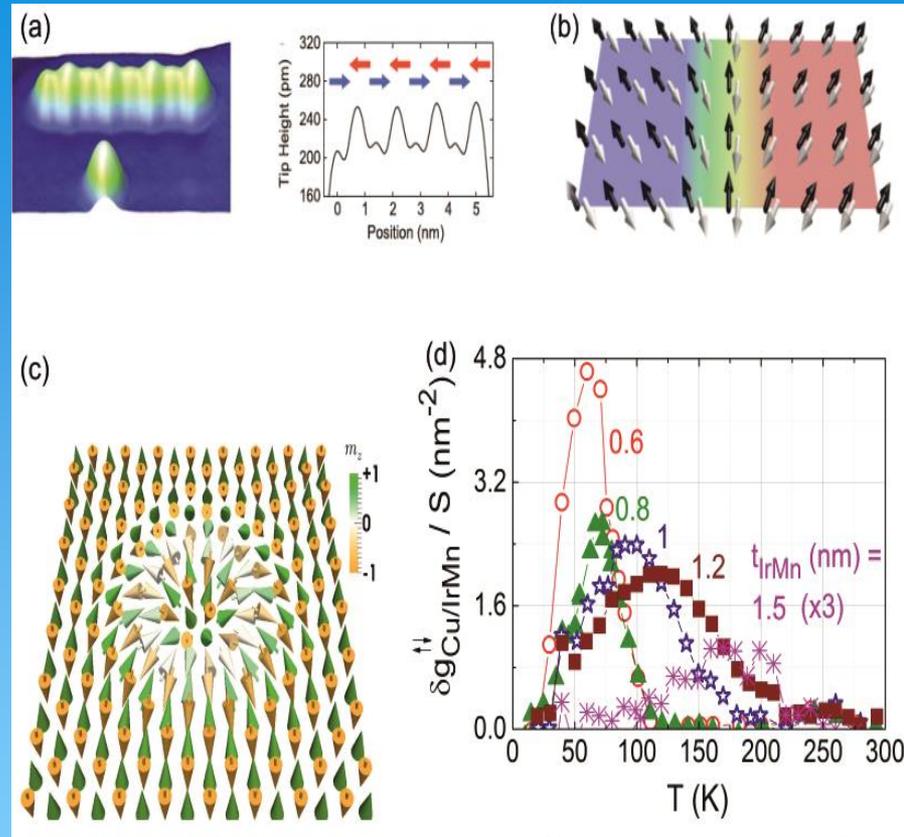
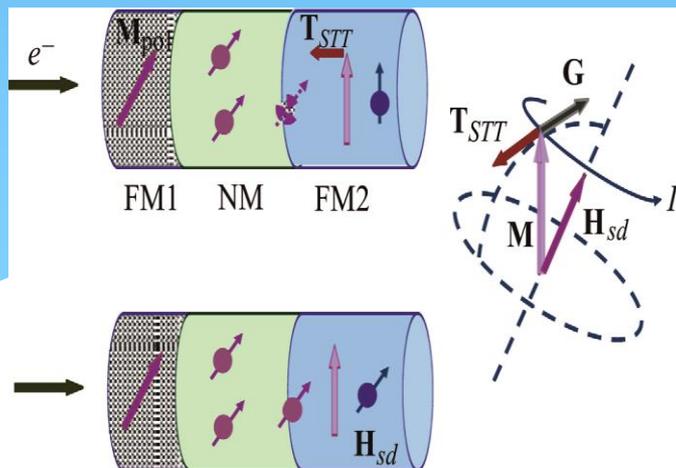
We explained the oscillations of iDMI as caused by the variation of the interatomic distance between *HM* and *FM* atoms at the interface for different phases of W.

The maximum values of iDMI can be achieved for the *amorphous-like* and  $\alpha$ -W phases, while the  $\beta$ -W phase desirable for spin-orbitronics offers the smallest but still significant DMI magnitude.

# 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);<sup>18</sup>

# Терагерцовая магноника, скирмионы

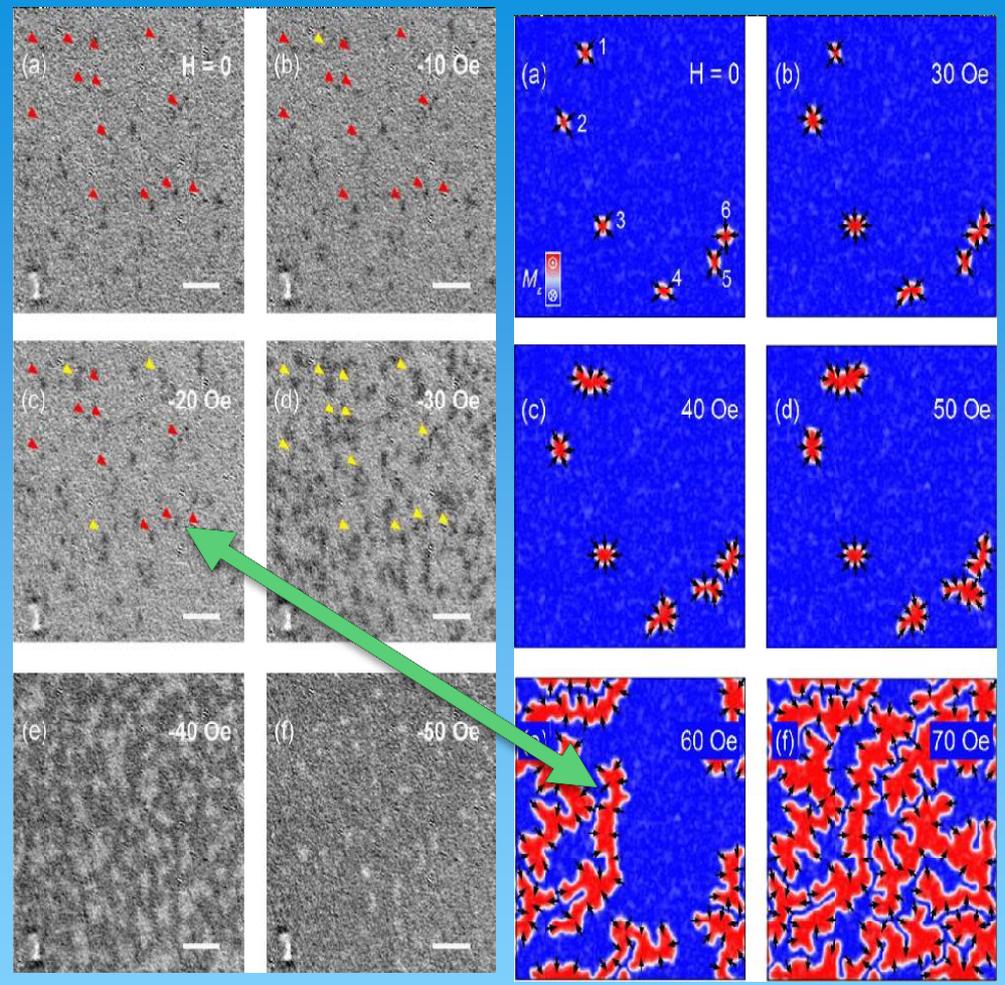
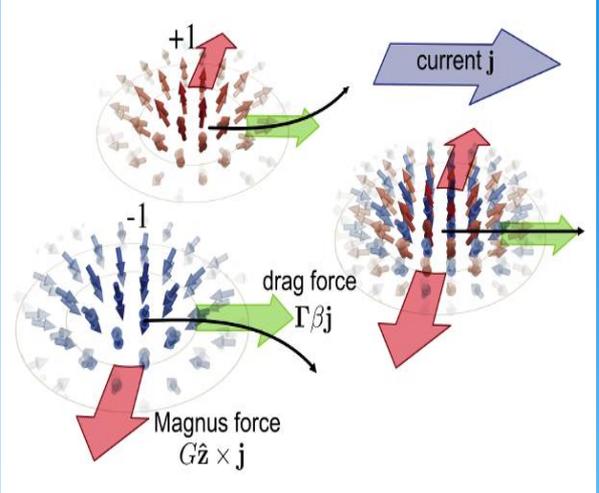
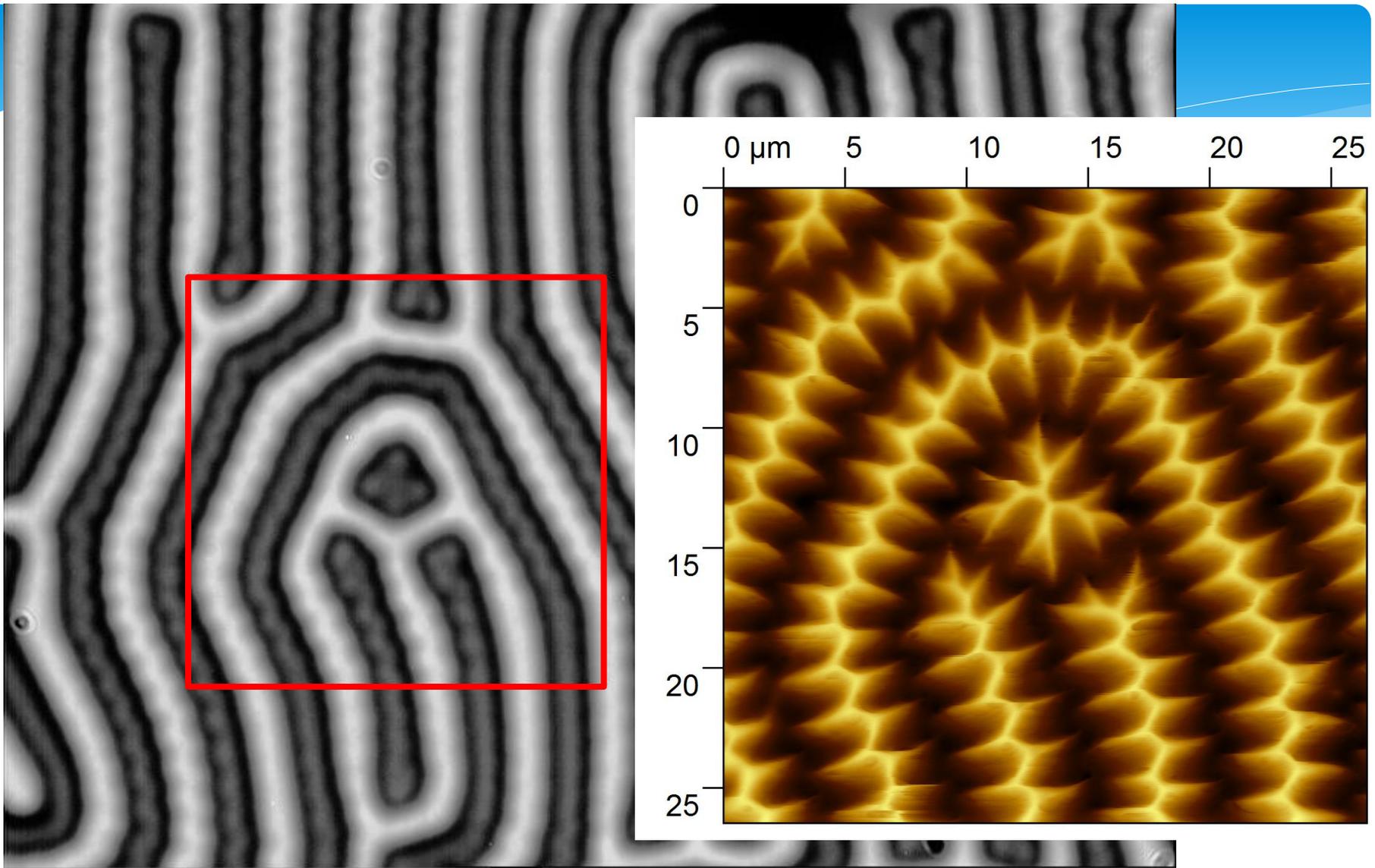


Схема движения АФМ скирмиона  
**Сверхбыстрая антиферромагнитная спинтроника двух и более топологических объектов**

**Нейроподобная функциональная логика на принципах антиферромагнитной спинтроники**

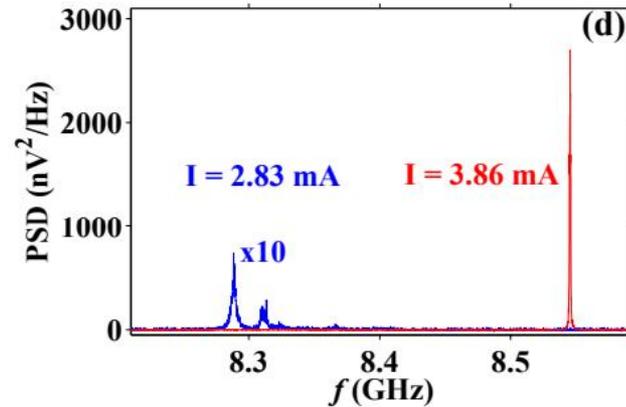
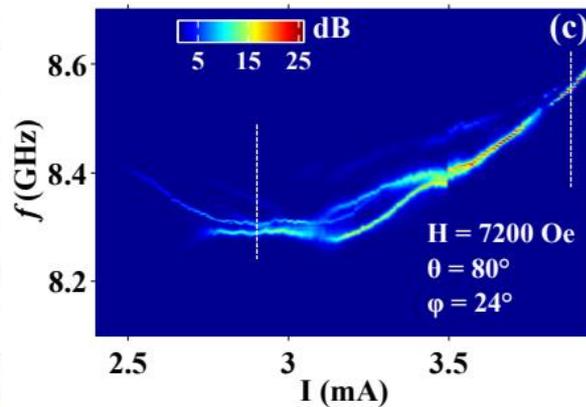
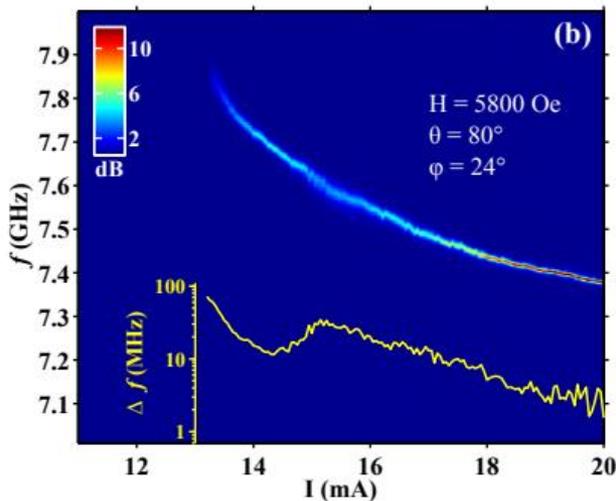
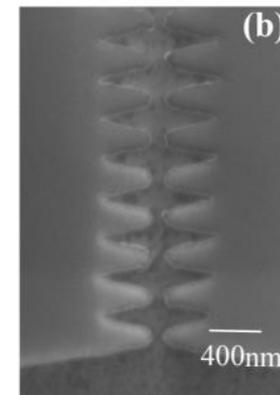
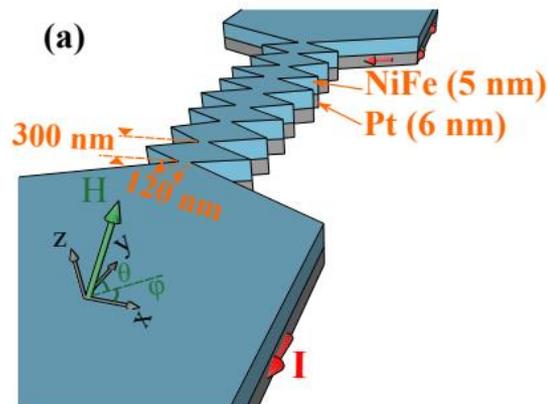
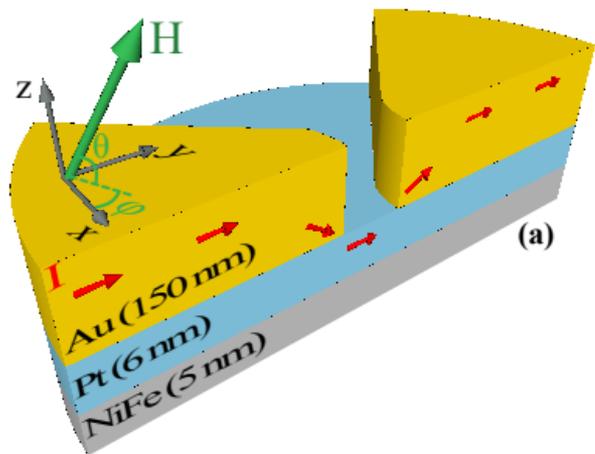
Магнитная доменная структура *Ru* (10) / *Co* (1.1) / *W* (0.25) / *Ru* (2). Скирмионные домены

Alexander Samardak, Alexander Kolesnikov, Maksim Stebliy, Ludmila Chebotkevich, Alexandr Sadoynikov, Sergei Nikitov, Abhishek Talapatra, Jyoti Mohanty, and Alexey Ognev // Appl. Phys. Lett. 112, 102406 (2018):

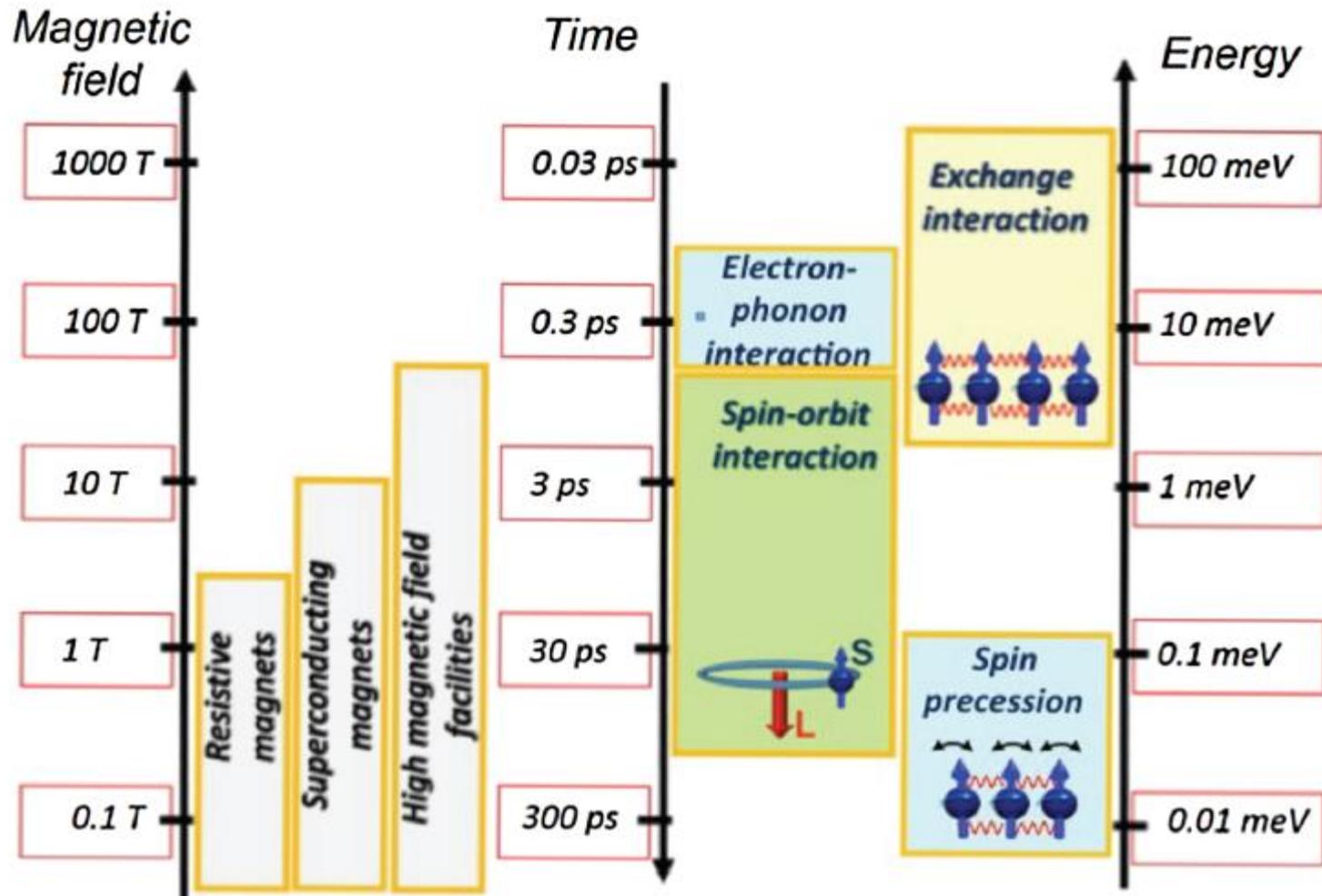


**На вставке MCM изображение участка, выделенного на магнитооптическом изображении.**

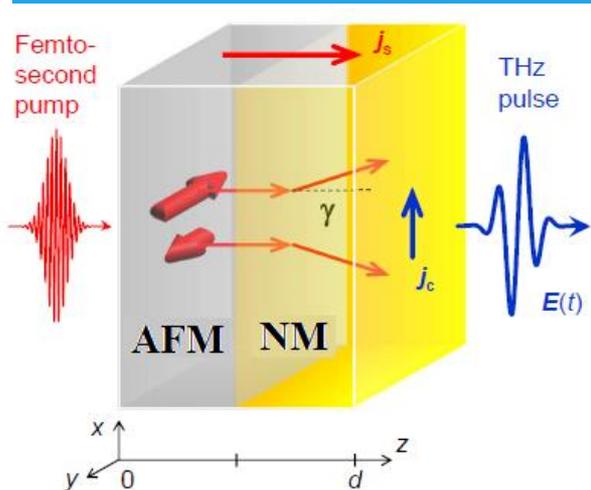
# Возбуждение спиновым током



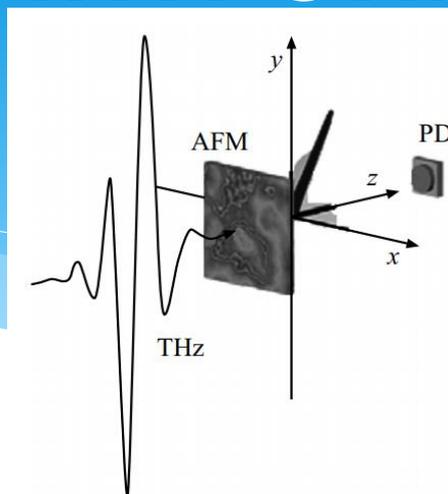
# ТЕРАГЕРЦОВАЯ СПИНТРОНИКА



# ТЕРАГЕРЦОВАЯ СПИНТРОНИКА

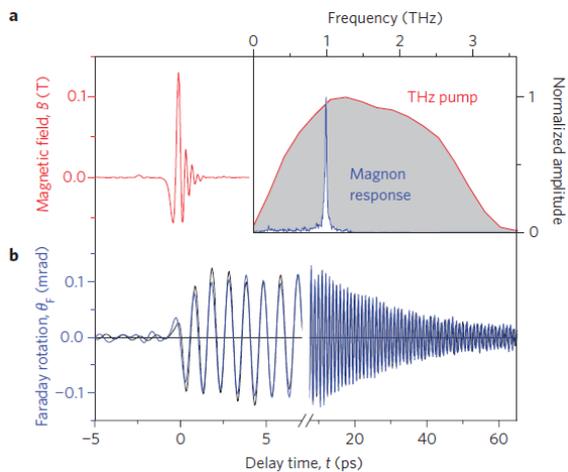


Генерация терагерцовых колебаний в АФМ под действием фс-импульсов лазера



Генерация терагерцовых колебаний в АФМ под действием терагерцовых импульсов

## Генераторы с внешним возбуждением



## Автогенераторы

T. Kampfrath, et al.  
Nat. Phot. 2010

# Терагерцовая магноника

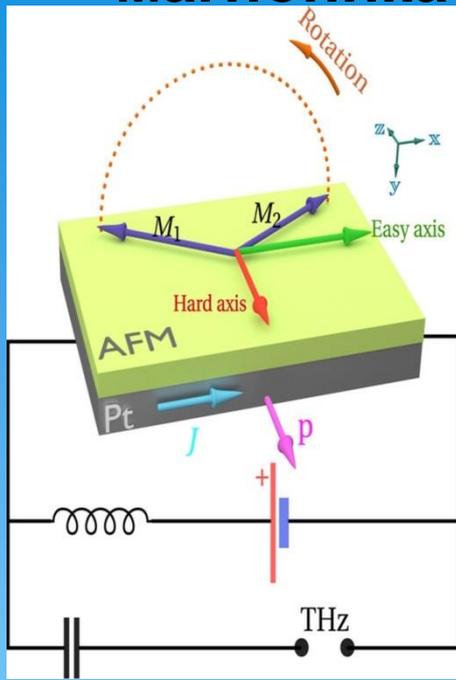
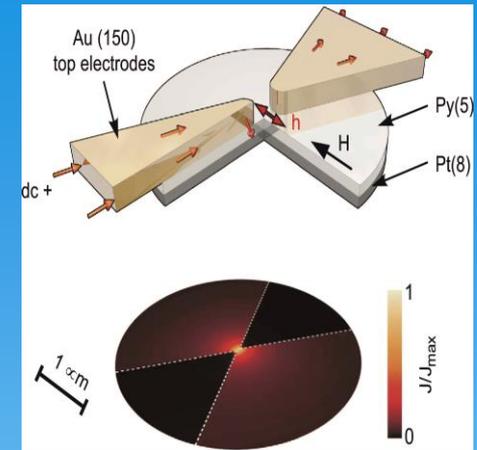
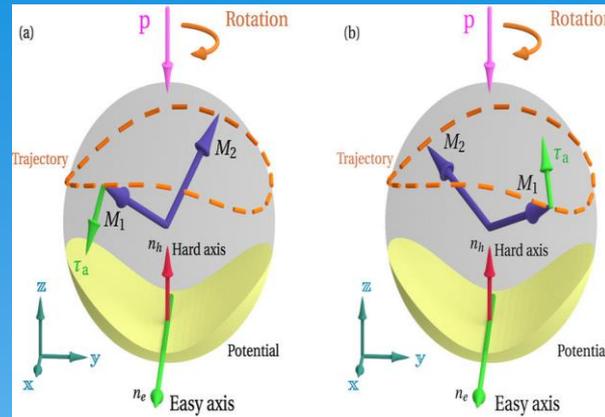
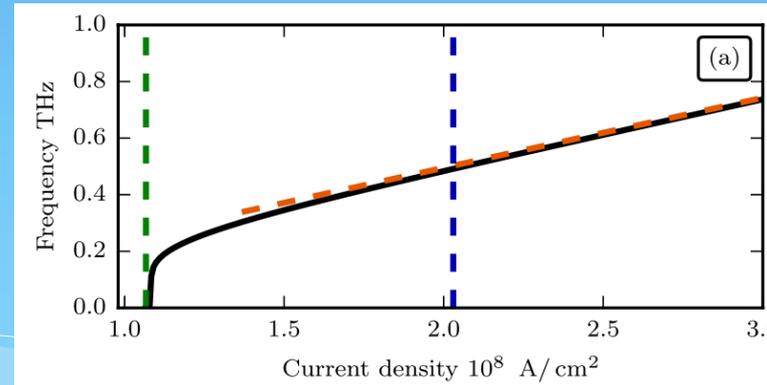


Схема осциллятора ТГц-частоты, состоящего из слоев Pt / AFM



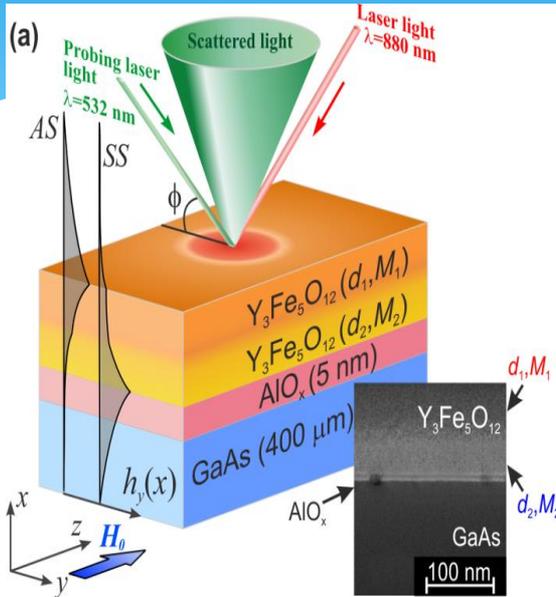
## Одиночный спин-трансферный осциллятор



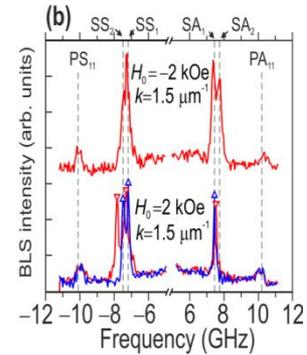
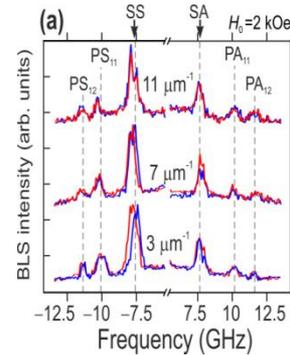
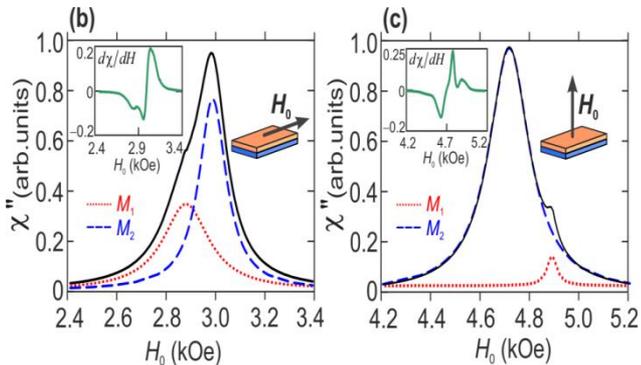
\*V. E. Demidov et al, Nature Comm. v 5, Article number: 3179 (2014)

\*Roman et al, Antiferromagnetic THz-frequency Josephson-like Oscillator Driven by Spin Current// Sci Rep. 2017; 7: 43705.

# Совмещение магноники и традиционной электроники (наша работа Phys Rev B) ЖИГ на GaAs



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

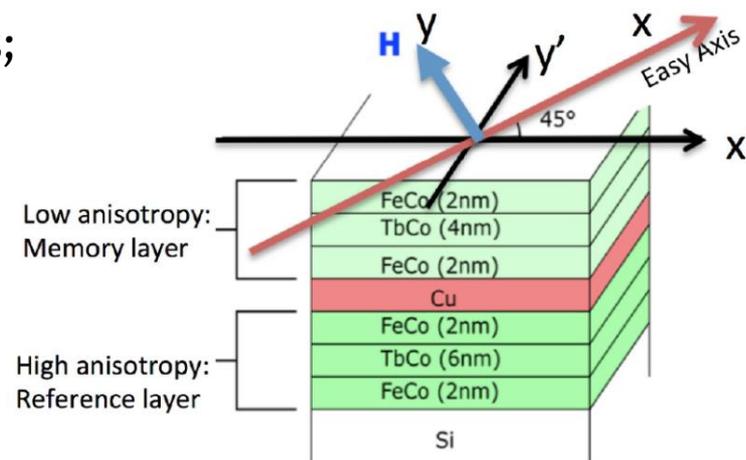


# Магнитоэлектрическая память MELRAM

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  $0,3 \text{ ns}$ ;
- 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).*

# Концепция спинтроники и обобщенная схема устройства функциональной обработки сигналов

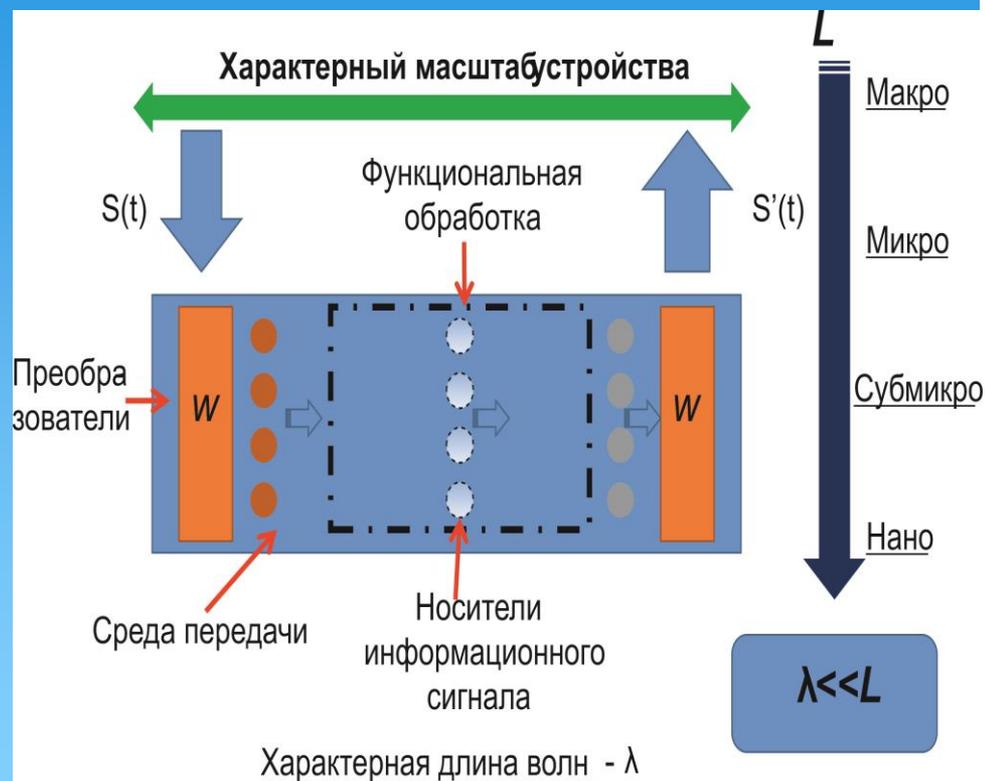
Магنونные кристаллы  
(обработка сигнала,  
магنونный ток, элементы  
связи, логические устройства)

Преобразование  
магнонов

Магنونика

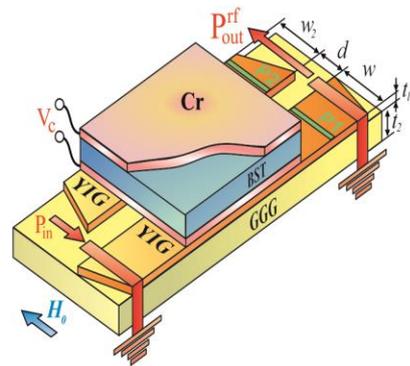
Электроника

Спинтроника

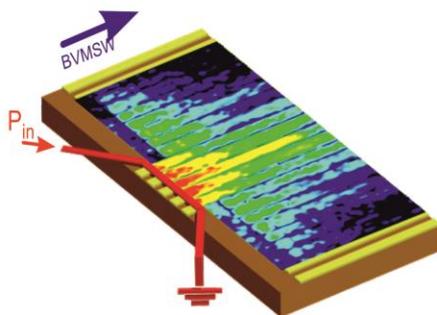
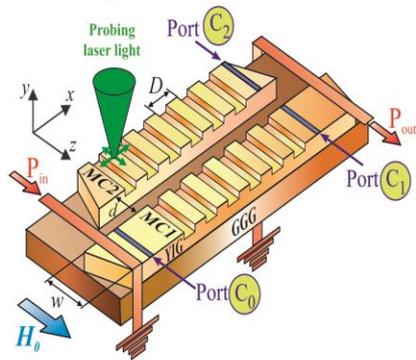
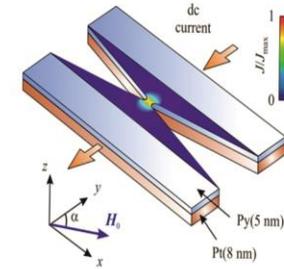
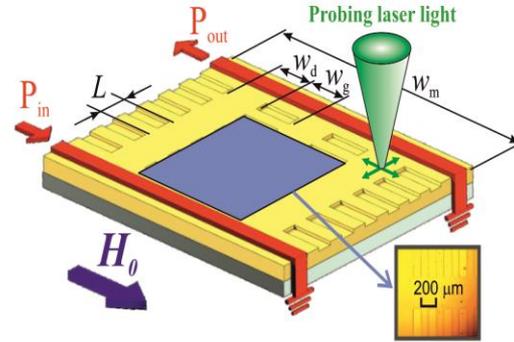


# 2D и 3D логические спин - волновые элементы

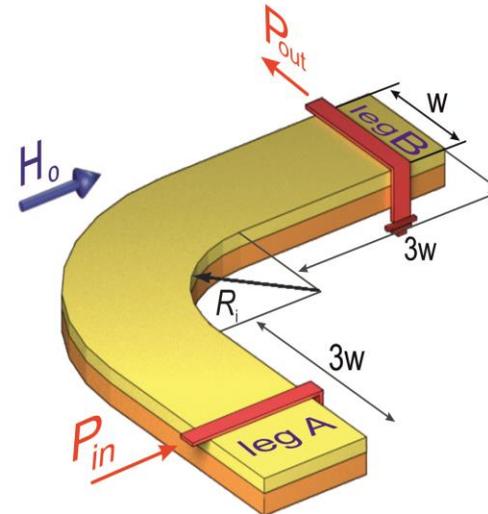
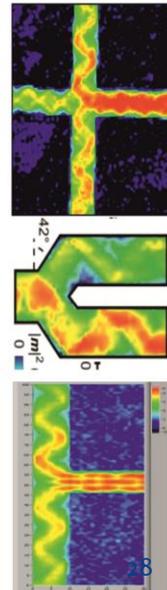
МНОГОКАНАЛЬНЫЕ НАПРАВЛЕННЫЕ  
ОТВЕТВИТЕЛИ И ДЕЛИТЕЛИ МОЩНОСТИ



СИСТЕМА ГЕНЕРАЦИИ И ОБРАБОТКИ СПИН-ВОЛНОВОГО СИГНАЛА

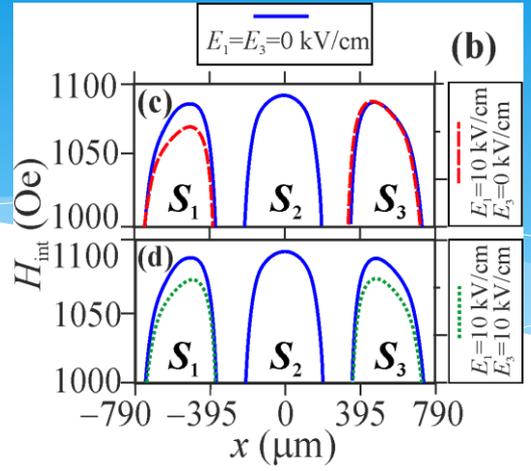
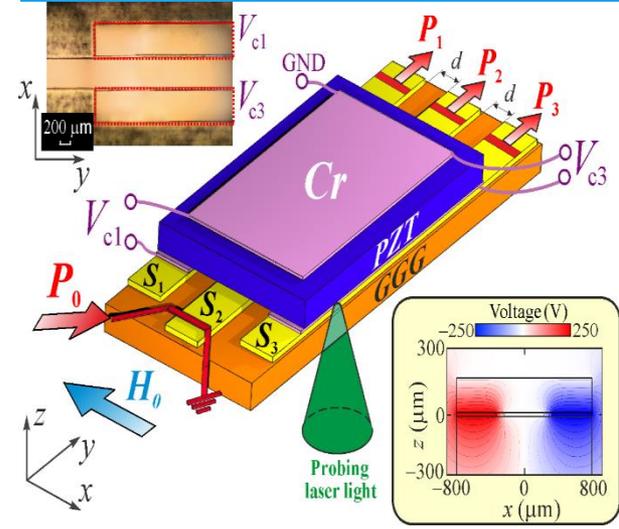


ЭЛЕМЕНТЫ МЕЖСОЕДИНЕНИЙ  
В ПЛАНАРНЫХ ТОПОЛОГИЯХ МАГНОННЫХ СЕТЕЙ

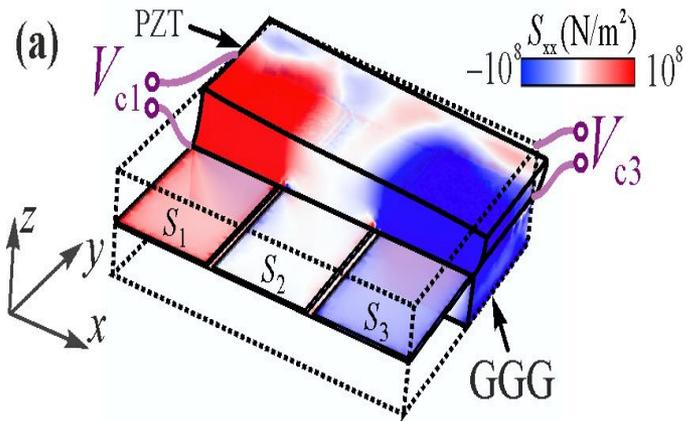


# Стрейнтроника: Новое направление

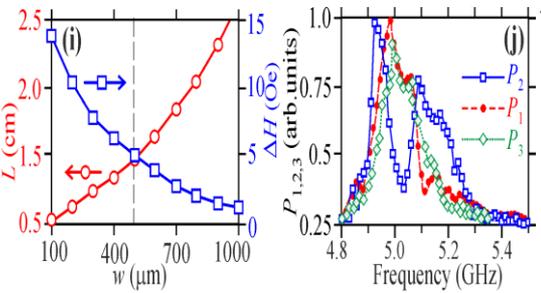
## магноники и спинтроники



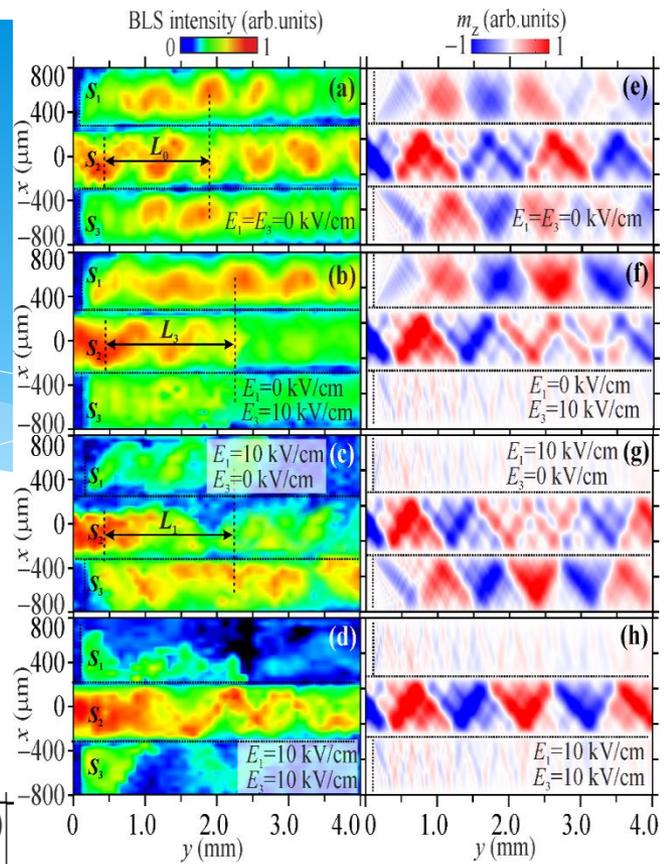
Профили внутреннего магнитного поля в случае положительных (красные кривые) и нулевых значений



Распределение компоненты тензора упругих деформаций  $S_{xx}$  в случае приложения внешнего электрического поля  $E = \pm 12.5$  кВ/см к пьезоэлектрическому слою.



(i) Рассчитанная длина связи и разность внутреннего магнитного поля в зависимости от ширины микроволноводов. (j) Частотная зависимость выходного сигнала  $P_1$ ,  $P_2$ , и  $P_3$  в микроволноводах  $S_1$ ,  $S_2$ , и  $S_3$ , соответственно. Все показанные результаты были



(a)–(d) BLS-интенсивность спиновой волны на частоте  $f_1 = 4.925$  ГГц в случае приложения внешнего электрического поля (значения обозначены на рисунке); (c)–(h) Результаты расчета пространственного распределения  $m_z(x,y)$  компоненты динамической намагненности для частоты входного сигнала  $f_1 = 4.925$  ГГц. Все показанные результаты были получены при величине внешнего

# Выводы

- \* **Необходимость** исследования новых материалов
- \* Совершенствование технологии
- \* Переход к системам без магнитного поля

**Благодарю за внимание**