

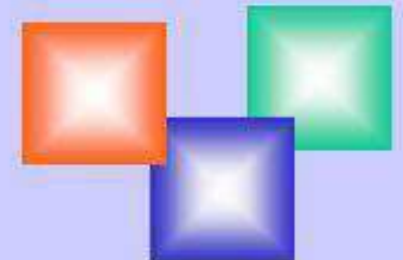
Школа 22 июля 2024

ВВЕДЕНИЕ В СПИНТРОНИКУ

А.Б. Грановский
кафедра магнетизма физического факультета
МГУ им. М.В. Ломоносова

Лекция 2:
Спинтронные эффекты и устройства

“Few subjects in science are more difficult to understand than magnetism.” *Encyclopedia Britannica*, 15th Edition, 1989.



SPINTRONICS = SPIN+TRANSPORT+ELECTRONICS

(1996)

Spintronics

Charge + Spin of Electron

Spin control and manipulation

Spin current without dissipation!!!!?

Спин-орбитроника

Спин-калориметрия=Термоспинтроника

Магноника

Антиферромагнитная спинтроника

Органическая спинтроника

Полупроводниковая спинтроника

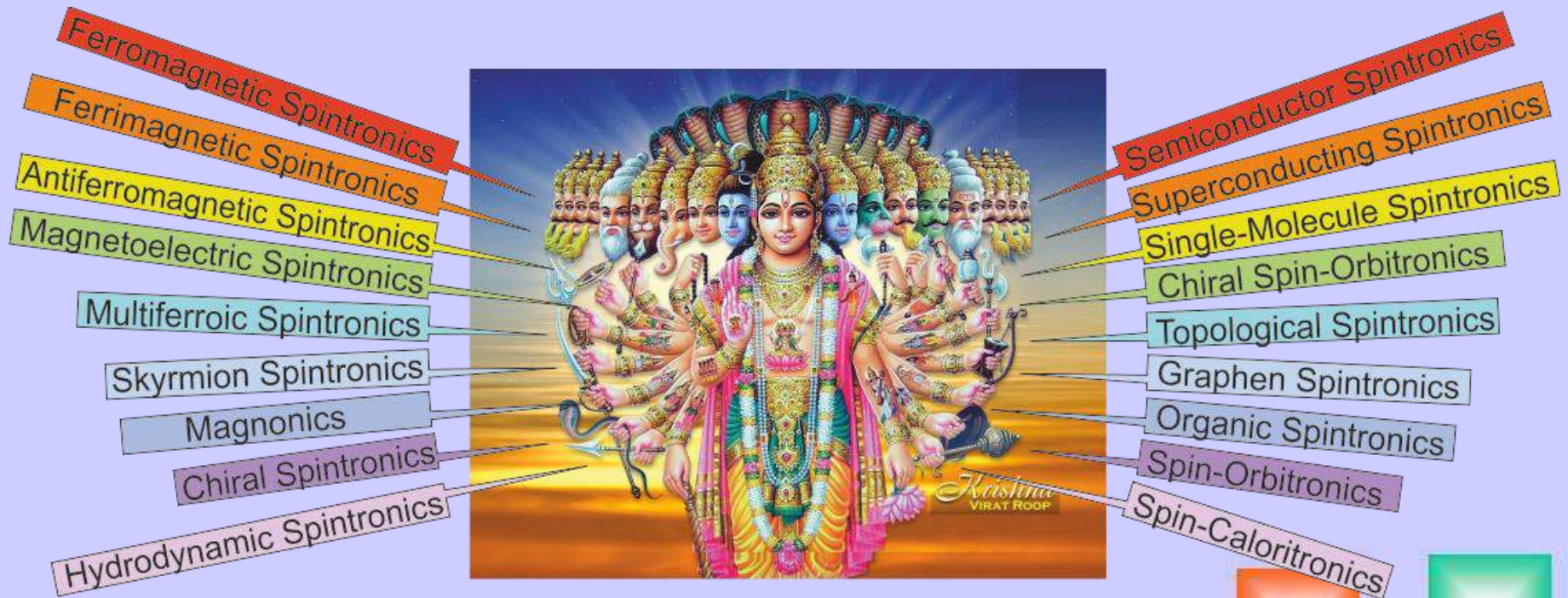
Скирмионика, Хиральная спинтроника

Стрейтроника

Spin-photonics=Магнитофотоника



Multi-faceted world of spintronics





План

1. Спинтронные эффекты.
2. MRAM и STT-MRAM
3. Память на беговой дорожке (Race track memory)
4. Спинтронные наноосцилляторы (СННО)
5. Спинтронные терагерцовые эмиттеры
6. Магноника
7. Заключение

“I swear to tell the truth, all the truth and nothing but the truth”

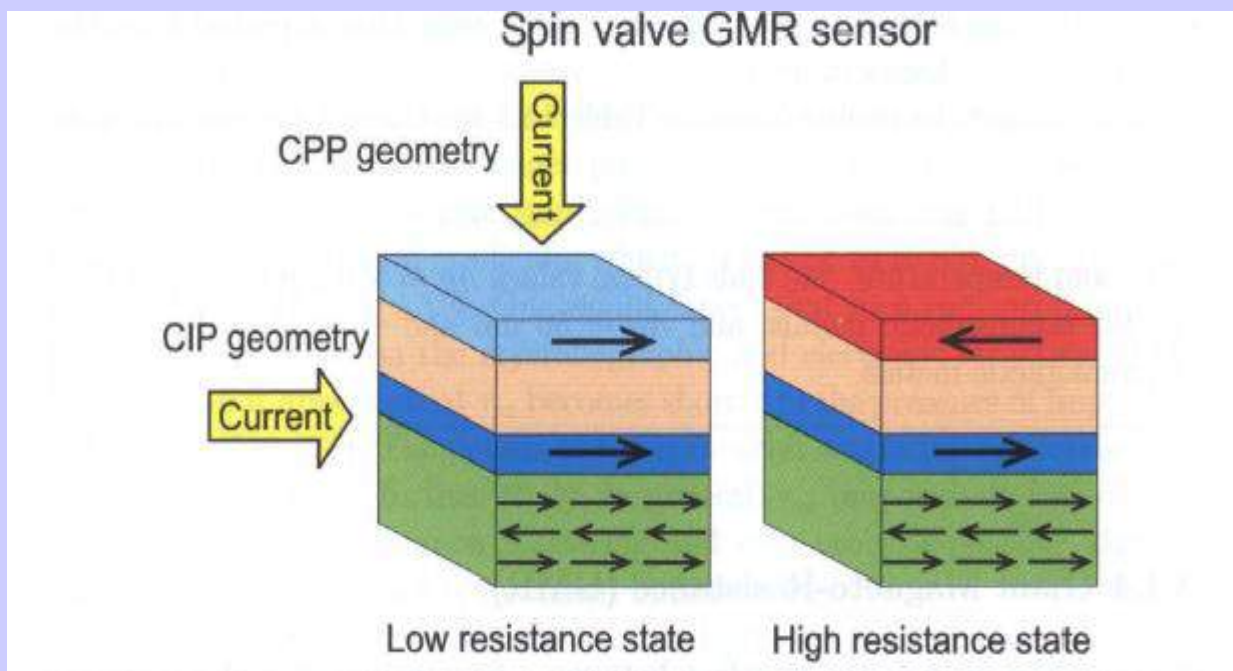
Спинтронные эффекты

- Спин-зависящее рассеяние
- Спин-зависящее туннелирование
- Спин-торк
- Спиновый эффект Холла
- Спиновый эффект Зеебека
- Спиновая накачка и Сверхбыстрое размагничивание

Эти эффекты обеспечивают управление намагниченностью без магнитного поля, конверсию зарядового тока или теплового потока в спиновые токи и обратную конверсию



Спиновый клапан= Спиновый вентиль



Паркин и Диени



СПИН ТОРК

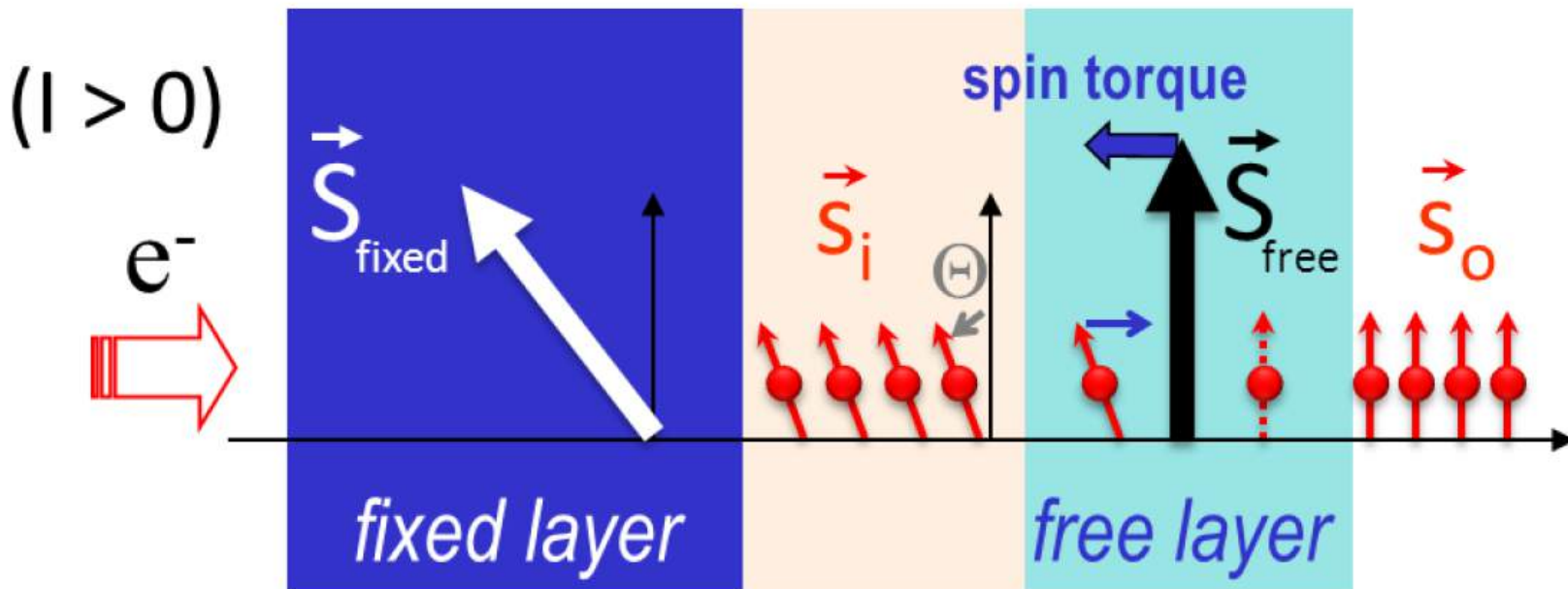
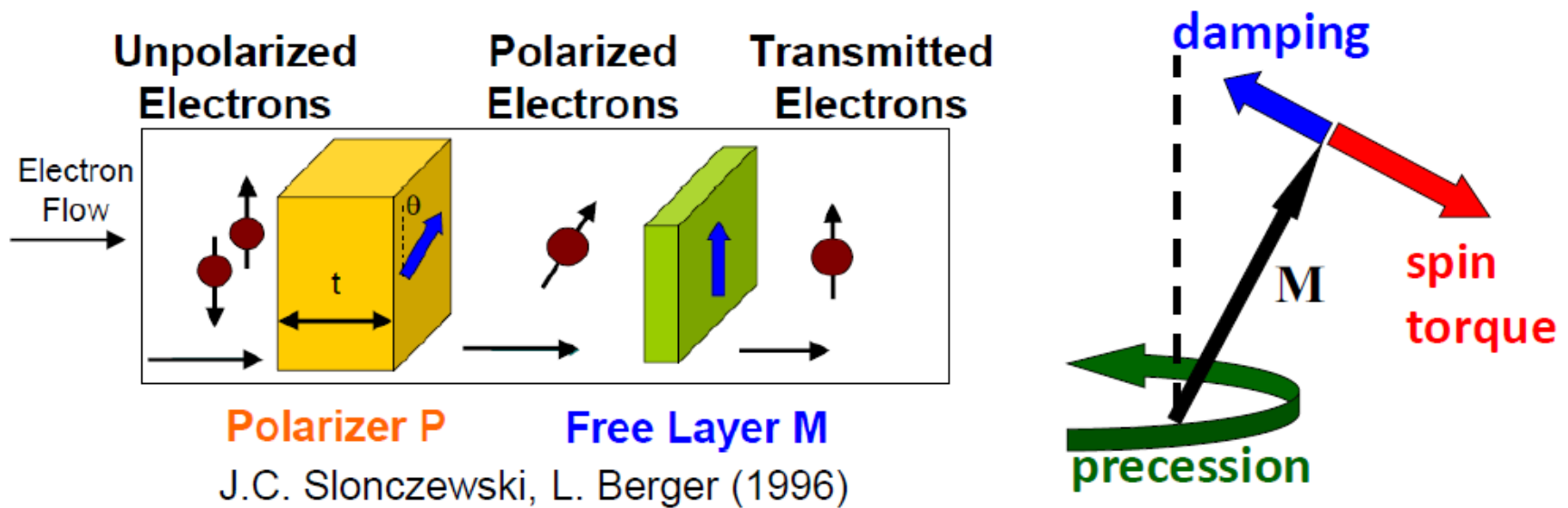


Figure 1: Spin torque principle: in a ferromagnet/non-magnetic/ferromagnet trilayer, the transverse spin component of the conduction electrons is absorbed as they pass through the free layer, generating a torque on the local magnetization: the spin-transfer torque.

За счет спин торка возникает возможность управлять намагниченностью не магнитным полем, а током

ЭФФЕКТ ПЕРЕНОСА СПИНА



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

$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} = \underbrace{\gamma [\mathbf{H}_{eff} \times \mathbf{M}]}_{\text{прецессия}} + \underbrace{\frac{\alpha}{M_0} \left[\mathbf{M} \times \frac{d\mathbf{M}}{dt} \right]}_{\text{затухание}} + \underbrace{\frac{a_I}{M_0} [\mathbf{M} \times [\mathbf{M} \times \mathbf{p}]]}_{\text{Перенос крутильного момента (spin torque)}}$$



Future: From charge current to pure spin current

$$J_e = J_{\uparrow} + J_{\downarrow} \quad (1)$$

$$J_s = J_{\uparrow} - J_{\downarrow} \quad (2)$$

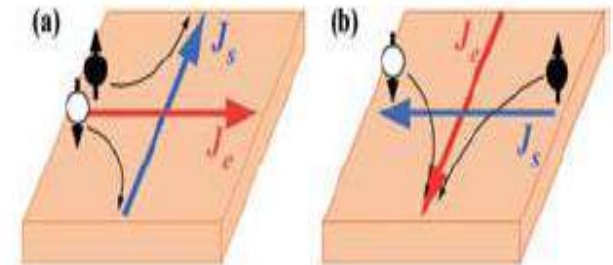
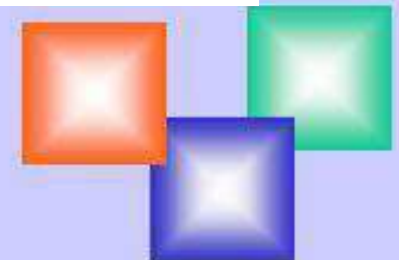
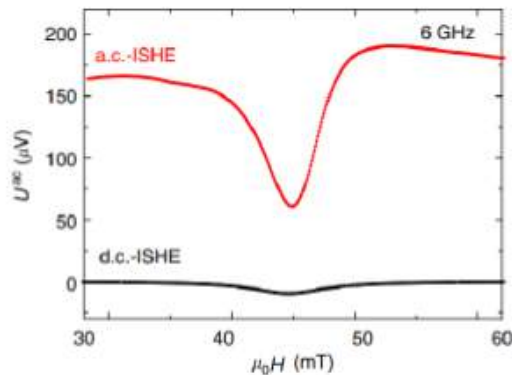
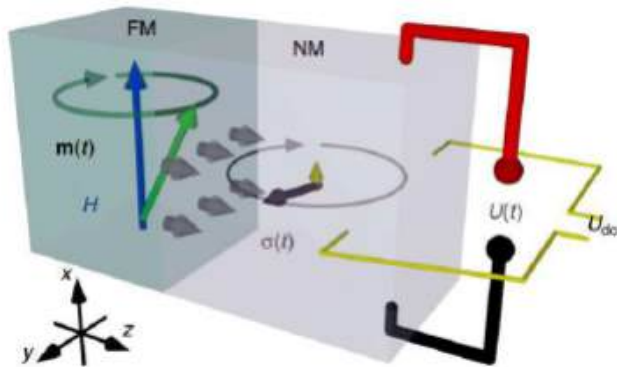


Fig. 6: Schematic illustration of (a) direct and (b) inverse spin-Hall effects in a nonmagnetic material. J_e and J_s are the charge and spin currents, respectively.

Spin Hall Effect



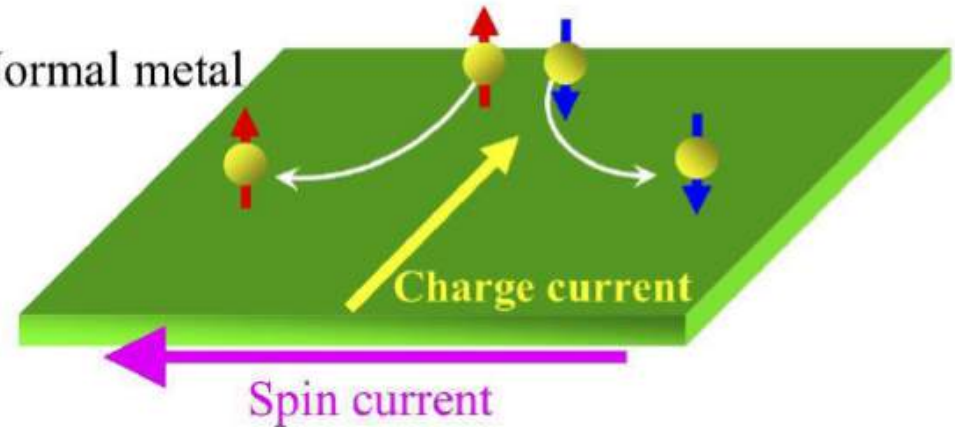
СПИНОВЫЙ ЭФФЕКТ ХОЛЛА И СПИНОВАЯ НАКАЧКА



АС и DC сигналы за счет обратного спинового эффекта Холла

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

Normal metal

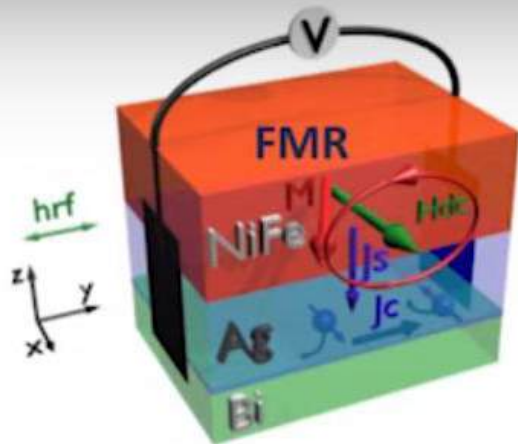


Эффект возникает из-за анизотропии рассеяния электронов с разными направлениями спинов на примесях немагнитного металла вследствие спин-орбитального взаимодействия.

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

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

Spin pumping from FMR



Spin pumping : generation of out of equilibrium spin distribution in FM and spin current injection in adjacent layer

Tserkovnyak et al. PRL 88, 117601 (2002)

1) Increase of effective damping and FMR linewidth

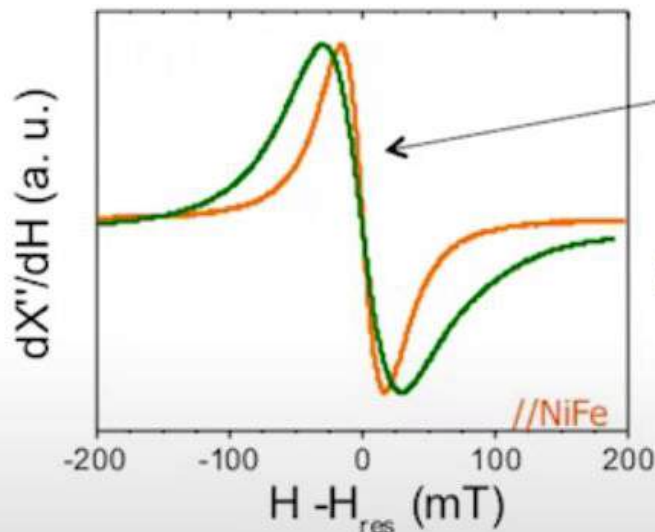
$$\alpha_{FM/NM} - \alpha_{FM} = \frac{g\mu_B}{4\pi M_s t_F} g_{eff}^{\uparrow\downarrow} \quad (1)$$

Y. Tserkovnyak et al. RMP 77, 1375 (2005)

2) Injected spin current from $g^{\uparrow\downarrow}$ derived from $\Delta\alpha$

$$J_{s0}^{int} = \frac{g_{eff}^{\uparrow\downarrow} \gamma^2 \hbar h_{rf}^2}{8\pi\alpha^2} \left[\frac{4\pi M_s \gamma + \sqrt{(4\pi M_s \gamma)^2 + 4\omega^2}}{(4\pi M_s \gamma)^2 + 4\omega^2} \right] \quad (2)$$

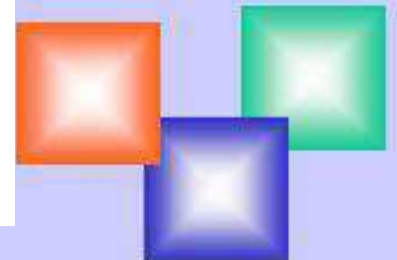
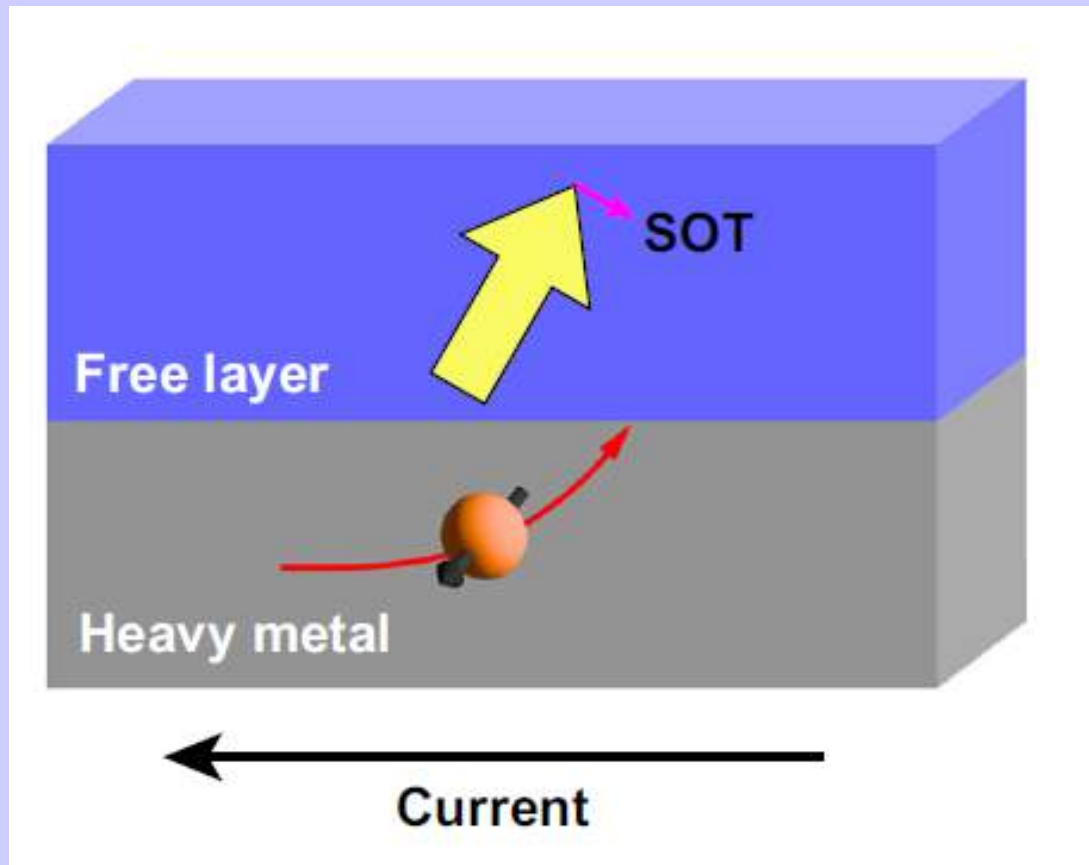
K. Ando, E. Saitoh et al. JAP 108 , 113925 (2010)
etc



//Bi/Ag/NiFe



SOT = спин-орбитальный-трансфер торк



Термоспинтроника=spin caloritronics

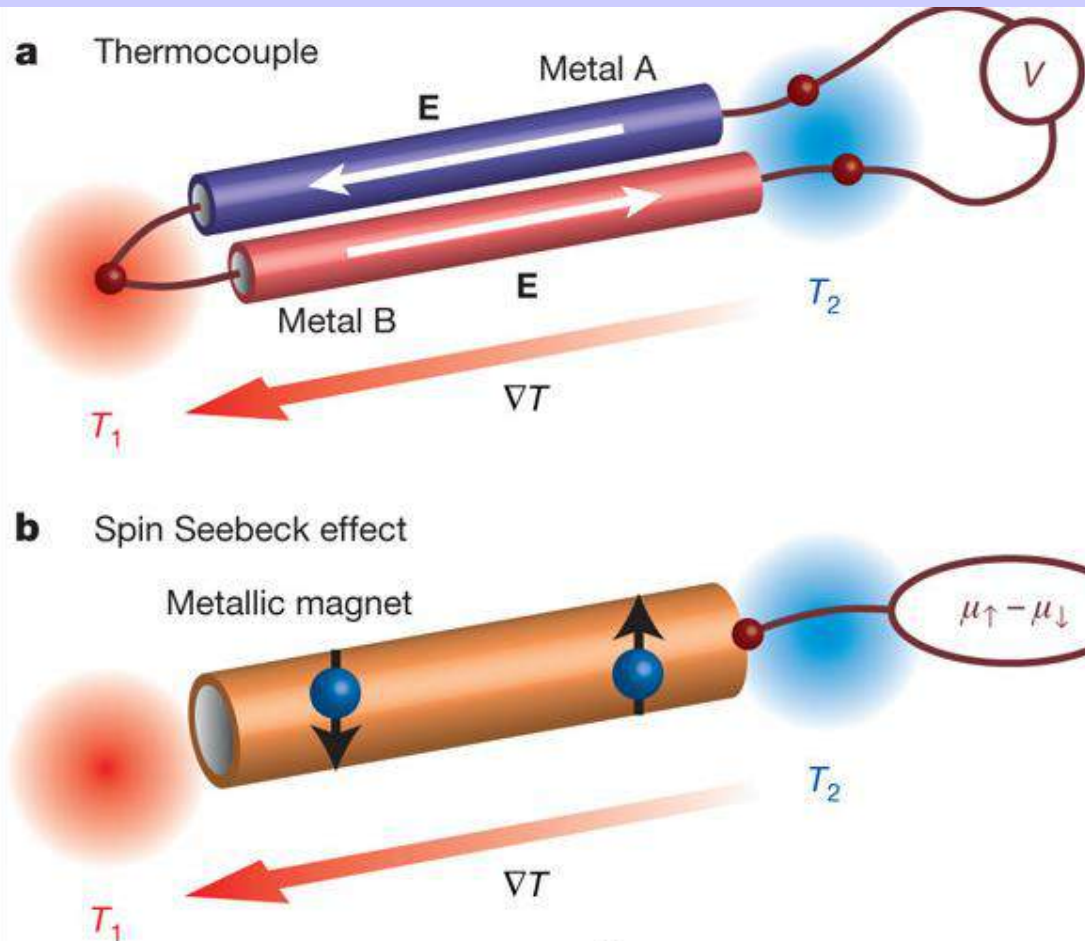


Рис. 1. а — изображение термопары, состоящей из двух разнородных металлов А и В, соединенных друг с другом. Металлы имеют разные коэффициенты Зеебека, поэтому напряжение, возникающее между «холодными» концами термопары, прямо пропорционально разности температур $T_1 - T_2$ между «горячим» и «холодным» концами.

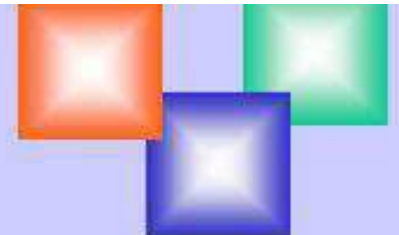
б — объяснение спинового эффекта Зеебека. В металлическом магните электроны проводимости в состояниях «спин вверх» и «спин вниз» имеют разные коэффициенты Зеебека. Если к магниту приложить температурный градиент, то спиновый ток $\mu_{\uparrow} - \mu_{\downarrow}$ будет пропорционален разности температур на концах. Рис. из обсуждаемой статьи в *Nature*

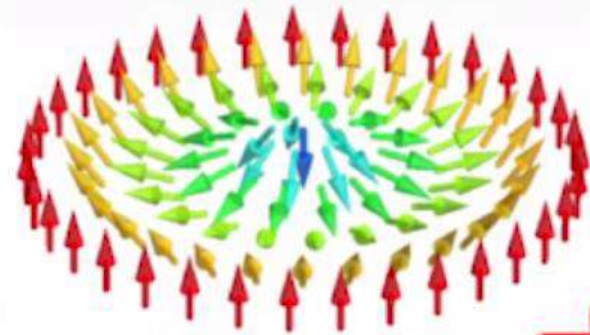


Спин-орбитальное взаимодействие

$$H = \lambda [\nabla V(\mathbf{r}) \times \mathbf{p}] \cdot \mathbf{s}$$

1. Собственное СОВ (движение электрона со своим спином)
2. Несобственное (движение одного электрона с чужим спином)
3. Периодический потенциал решетки
4. Непериодический потенциал примеси
5. Потенциал электрического поля (Рашба)
6. Поверхность (Рашба и Дрессельхаус)
7. Почему большие эффекты – пересечение зон?



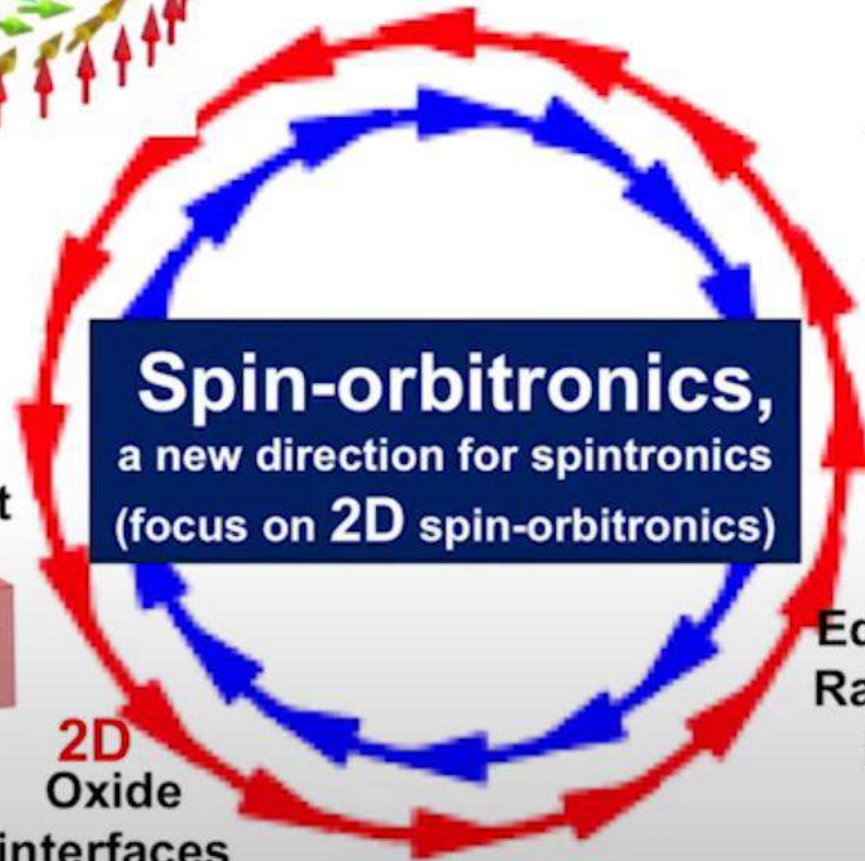


2D
Interface- induced
skyrmions and
chiral domain walls



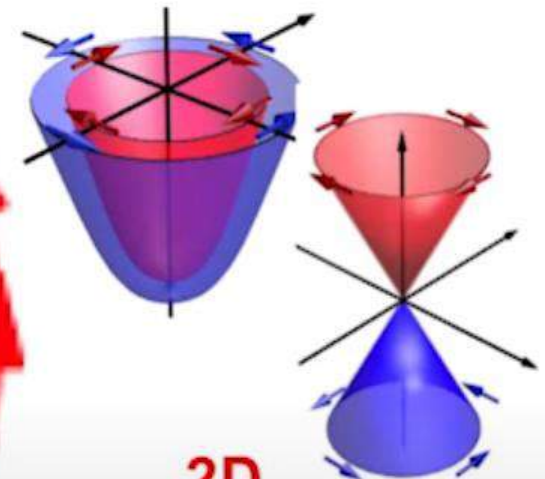
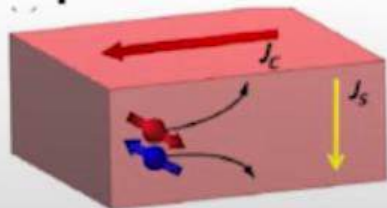
$t = 1.04 \text{ ns}$ Motion of skyrmion
motion by SHE

2D
Graphene
+ spin-orbit



Spin-orbitronics,
a new direction for spintronics
(focus on **2D** spin-orbitronics)

3D
Spin Hall effect



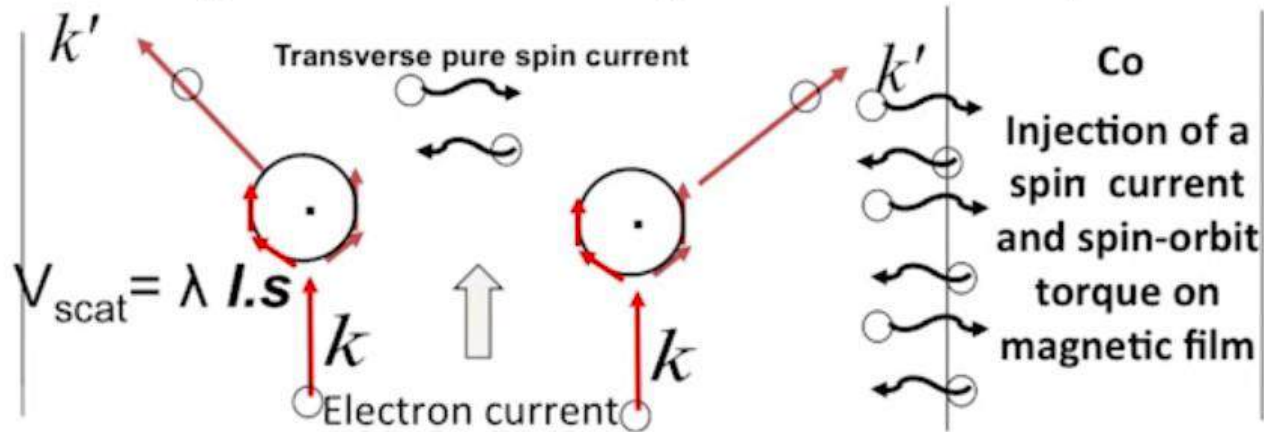
2D
Edelstein-type effects at
Rashba and topological
insulator interfaces

2D
Oxide
interfaces

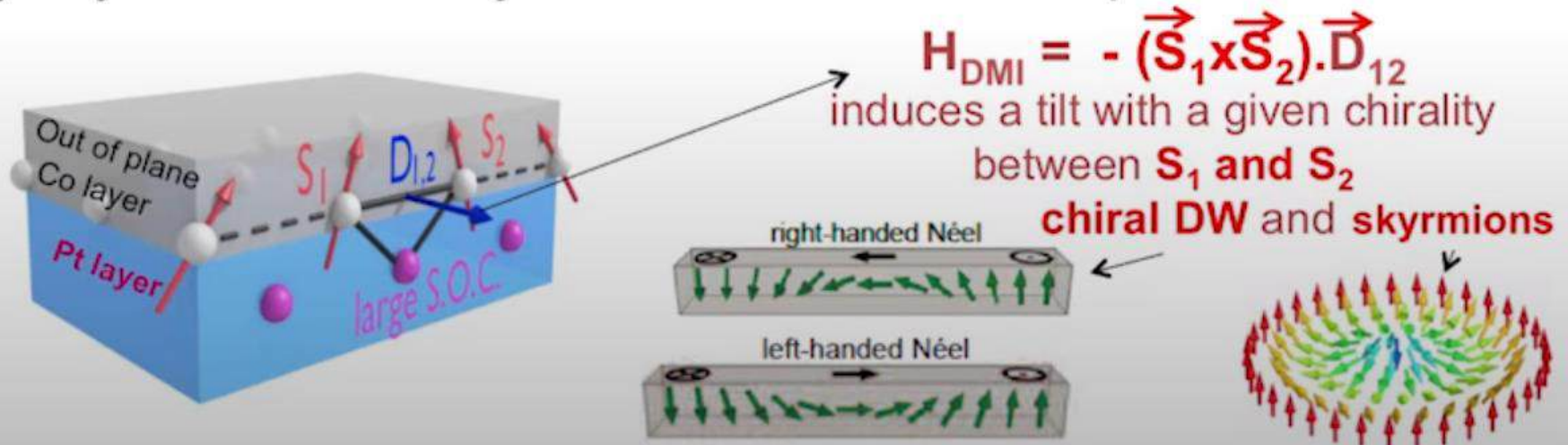


Spin Orbit Coupling $V_{\text{SOC}} = \lambda_{\text{SOC}} \mathbf{l} \cdot \mathbf{s}$: examples of SOC effects

1) Asymmetry between electron scattering to left and right
(Mott's scattering and skew scattering contribution to Spin Hall Effect)

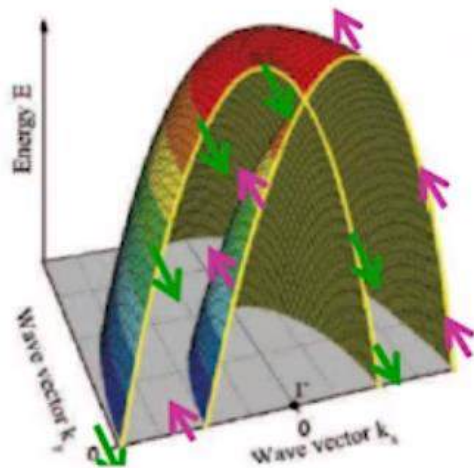


2) Dzyaloshinskii-Moriya Interactions between spins at interfaces

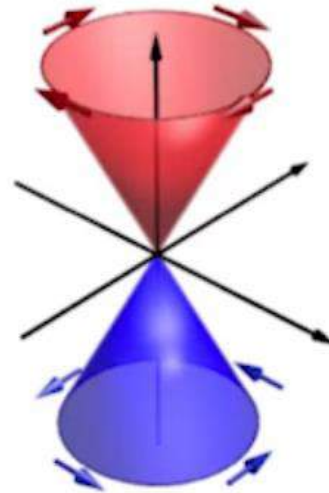


Spin/charge conversion by Rashba interfaces and topological insulators

Rashba interface

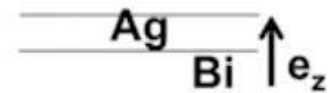
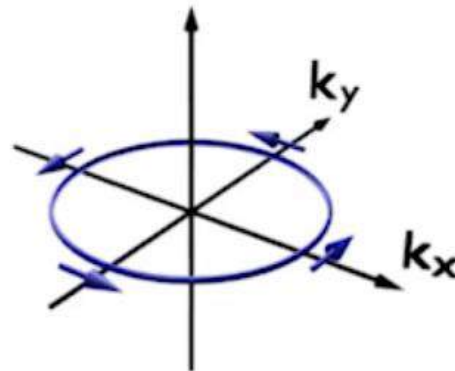
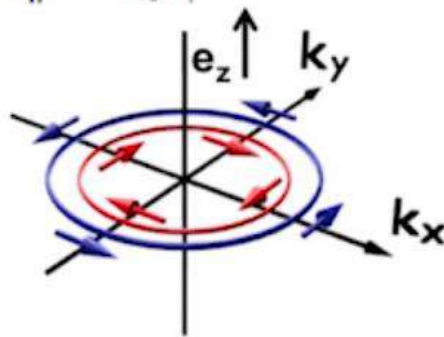


Topological insulator



$$\hat{H}_{SO} = \alpha_R \boldsymbol{\sigma} \cdot (\mathbf{k}_{\parallel} \times \mathbf{e}_z),$$

α_R = Rashba coefficient
(example at the Bi/Ag interface 2DEG)



Edelstein (EE) and Inverse Edelstein Effect (IEE)

Rashba interface

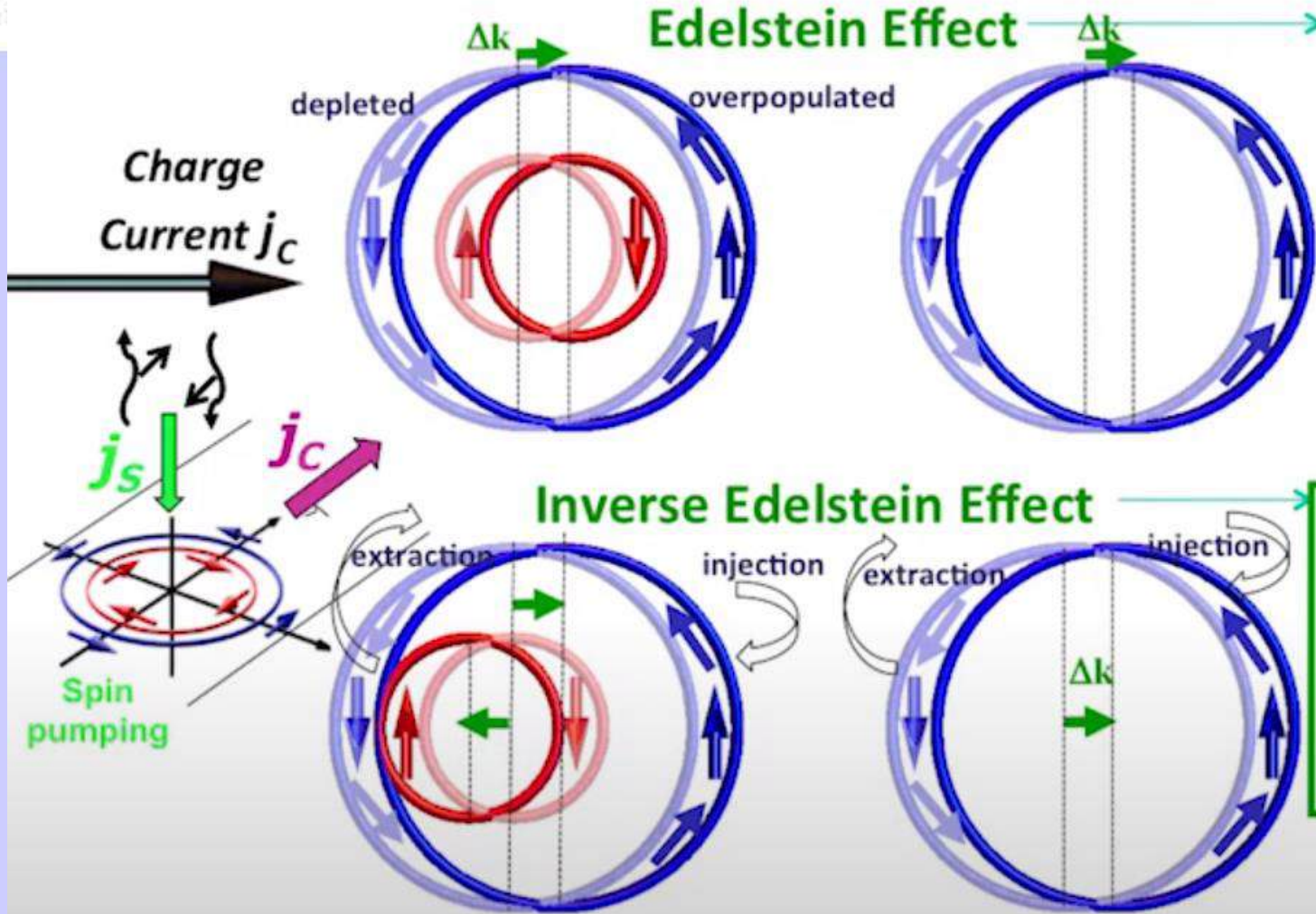
Topological insulator

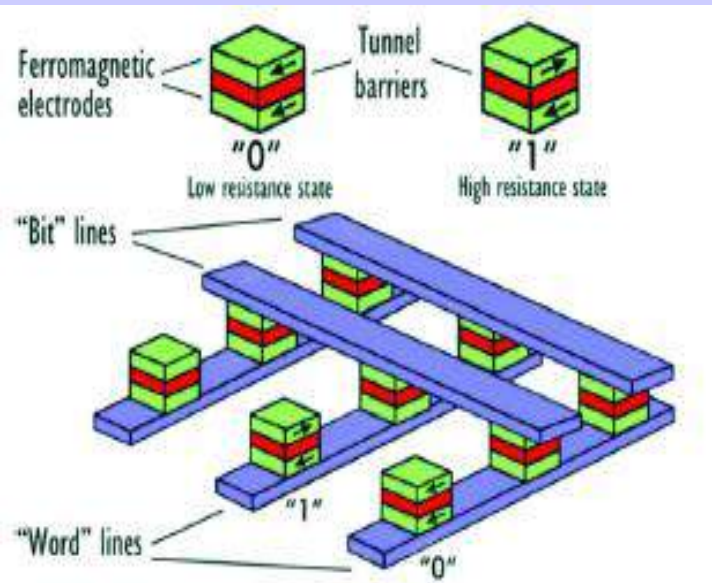
Edelstein Effect

Inverse Edelstein Effect

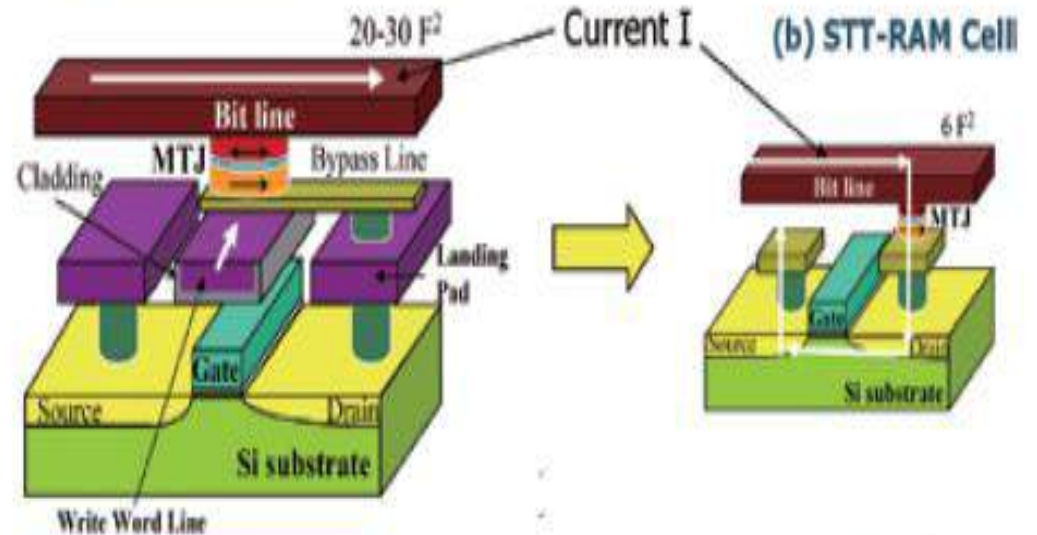
charge current j_C in 2DEG induces nonzero spin density σ_y

Injection of spin current j_S induces charge current j_C





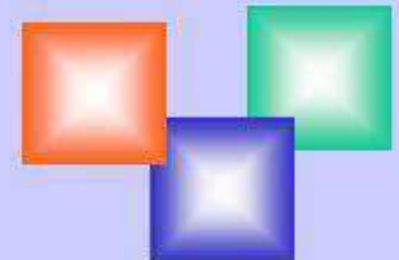
(a) Conventional MRAM Cell



Write Current: $I_{sw} \sim 1 / \text{Volume}$

$I_{sw} \sim \text{Volume}$

Fig. 1: Comparison of memory cell architecture between conventional field switching MRAM (a) and spin-transfer torque MRAM (STT-MRAM) (b).



Память на беговой дорожке

[DESIGN]

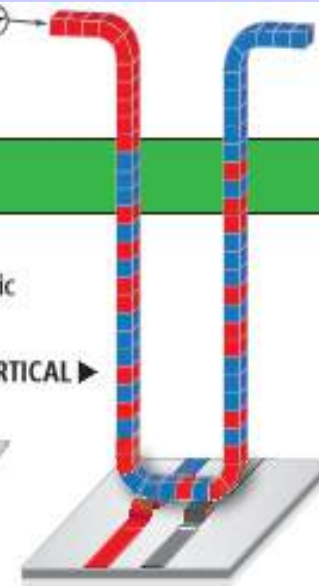
RACETRACKS FOR DATA

Racetrack memory stores data in the form of magnetized regions, or domains (*red* and *blue*), in nanoscopic wires on a silicon substrate. The nanowires may lie horizontally (*below*) or stand as vertical columns (*right*). Pulses of electric current move the magnetic domains rapidly along the racetracks past heads for reading and writing data.

HORIZONTAL ▼



VERTICAL ►



Read

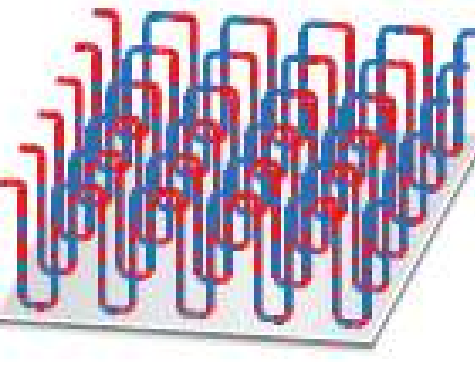


A sensor (gray) reads the data by detecting the changing magnetization (arrows)

Write



A strip containing two oppositely magnetized domains uses the domain wall that separates its two domains to write a data bit on the racetrack. As the domain wall crosses underneath the racetrack, magnetic fields (yellow) emanating from the domain wall set the magnetization direction in the racetrack's bit.



Стюарт Паркин (2004) 256 треков
в 10 миллионов раз быстрее



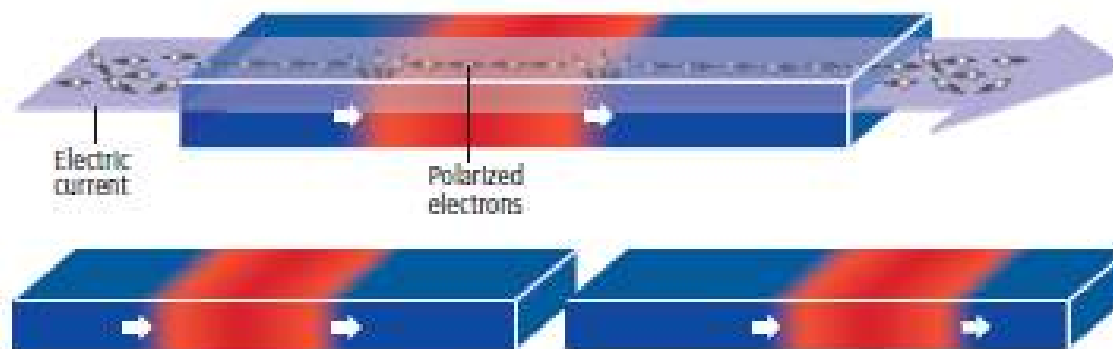
USING SPIN TO MOVE BITS

The ability to use an electric current to move magnetic domains along a nanowire is essential to making racetrack memory practical (*bottom*). Older techniques using magnetic fields would be too complicated (*top*).



Magnetic domains representing 0s and 1s contain atoms whose intrinsic magnetism (yellow arrows) is aligned. The atoms' orientation changes at the domain walls. Applying a field pointing in, say, the 1 direction (blue arrow), causes domain wall atoms to turn to the 1 direction, which moves the domain walls (white arrows)—but in opposite directions, shrinking the 0 region. Moving the bits along the wire requires a more complicated magnetic field.

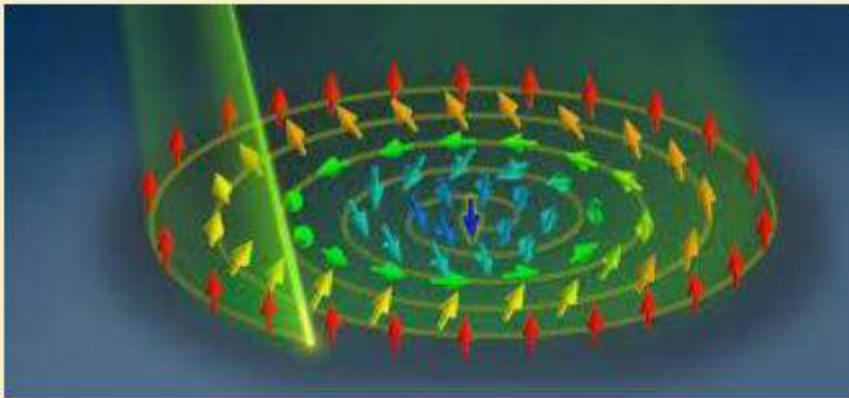
CURRENT-DRIVEN MOTION



The electrons (gray) of a current in a racetrack become "spin polarized"—their spin and intrinsic magnetism align with the magnetization of the material. When these spin-polarized electrons cross from a 1 region to a 0, their orientations flip. Because spin is a form of angular momentum, which must be conserved, each electron that switches from 1 to 0 must flip an atom in the wire from 0 to 1. Thus, the spin-polarized current moves the 1-0 domain wall along the racetrack. The current moves the 0-1 domain walls in the same direction, so the data bits flow along the wire.



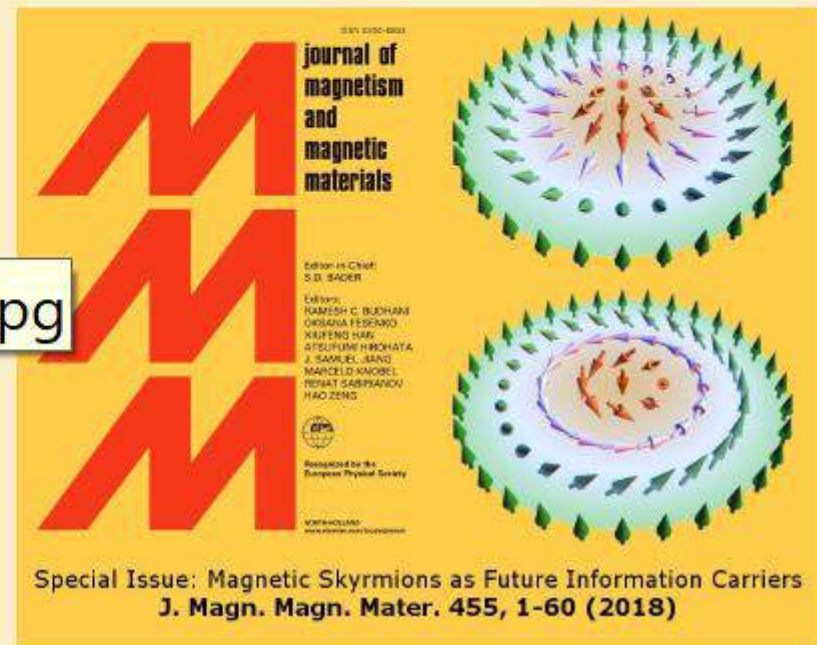
5. Магнитные скирмионы (skyrmion, 2010)



А.Н. Богданов, Д.А. Яблонский, 1989.
 Магнитный скирмион - топологически устойчивая кольцевая структура.
 Возникает в результате конкуренции обменного и D-M взаимодействий.
 Размер в плоскости 1-10 нм
 Наблюдали при $T \sim 300$ К (2018 г.)
 Методы генерации и детектирования ?



Scyr_2.jpg





Топологические спиновые структуры

Скирмионы Блоха и Нееля

Антискирмионы

Бискирмионы

Вихри

Мероны

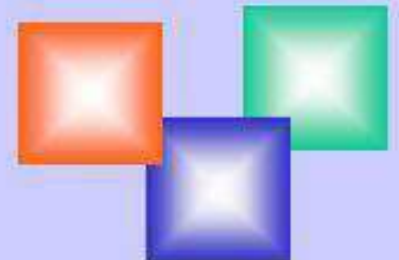
Бимероны

Скирмиониомы

Скирмионные трубки

Магнитные поплавки - бобберы

Хопфионы



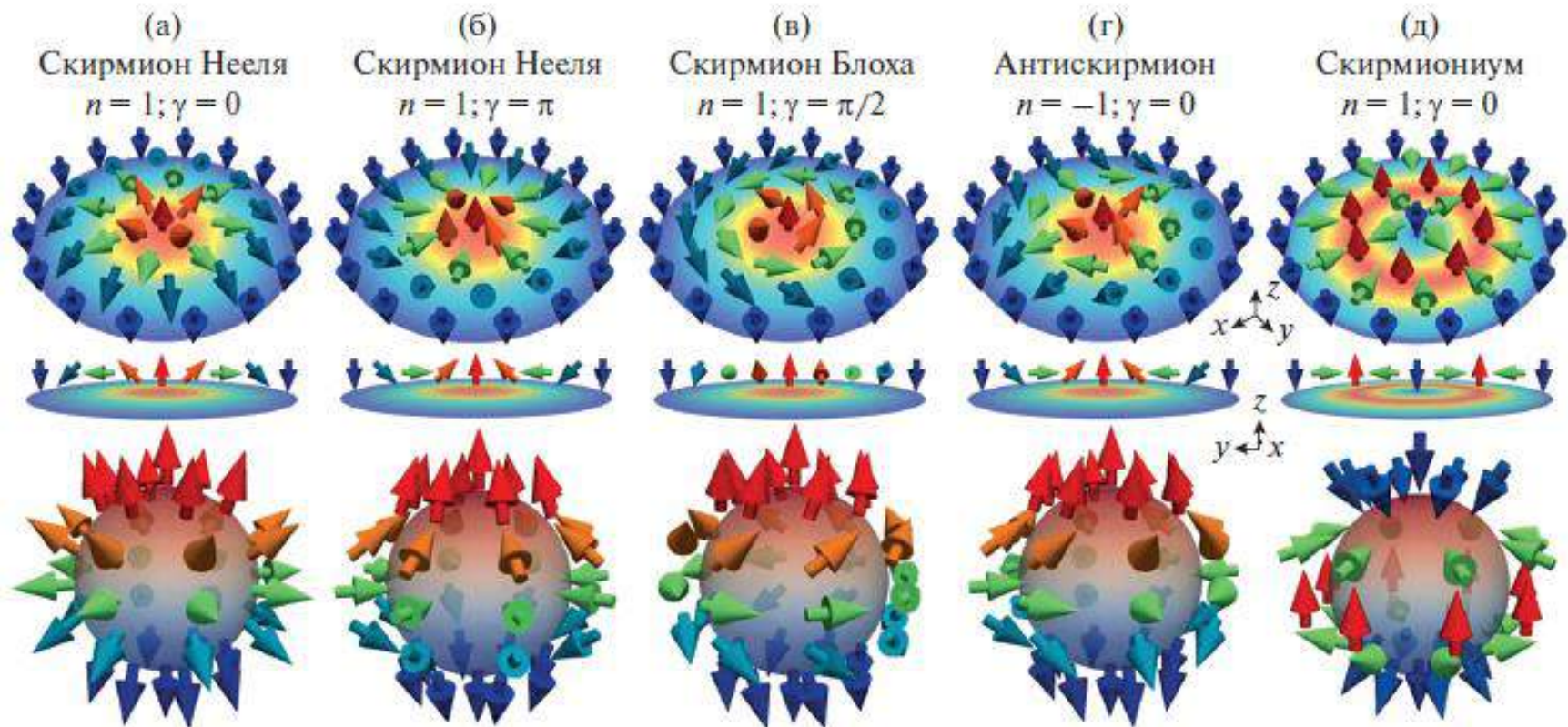


Рис. 3. Скинрионные спиновые структуры при различных значениях топологических чисел. Первый ряд – структуры полученные с помощью модели (1). Второй ряд – спиновая структура вышеприведенных состояний на срезе xz . Третий ряд – проекция описанных состояний на единичную сферу. Верхний полюс – центр скирмиона, нижний полюс – однородная область периферии.



Актуальность

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

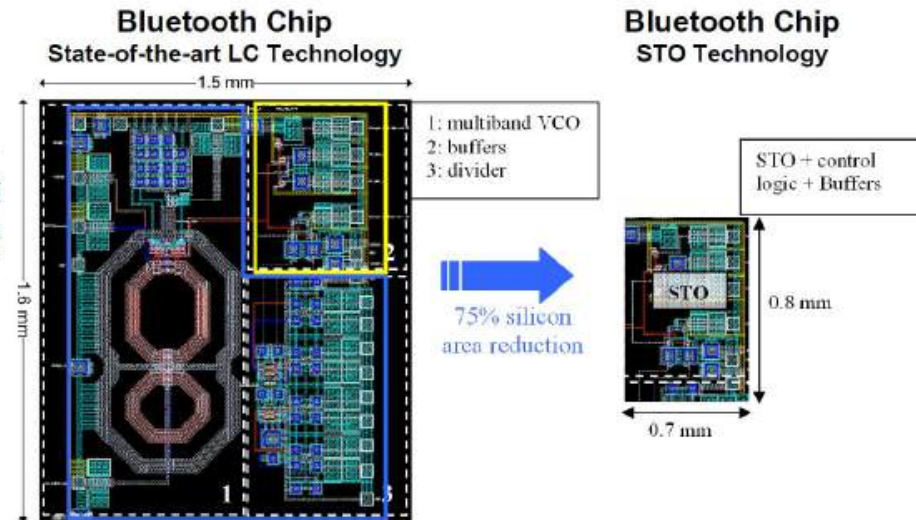


Спин-трансферные наноосцилляторы
(колебательная система, управитель частоты и активный элемент)

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.



КОНСТРУКЦИИ СТНО

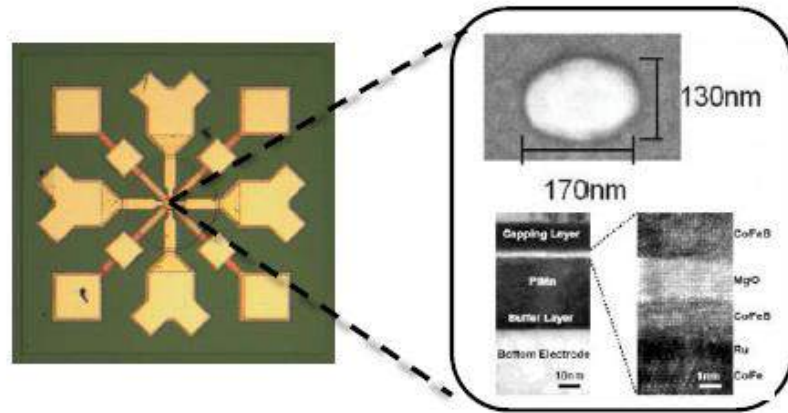


Рис.1. Микрофотография СТНО

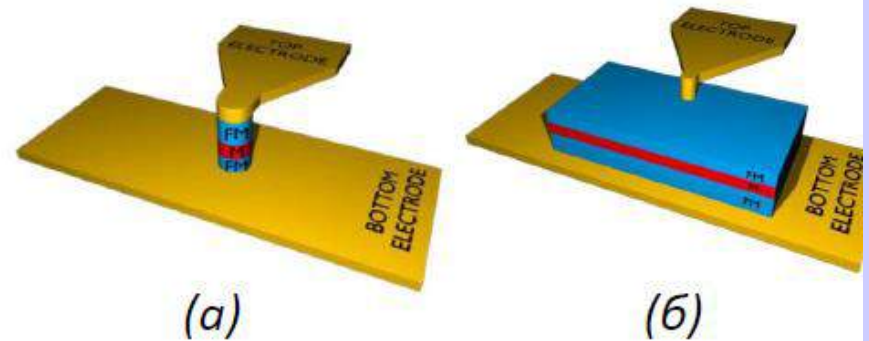


Рис.2. Конструкция СТНО: наностолб (а) и наноконтакт (б)

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

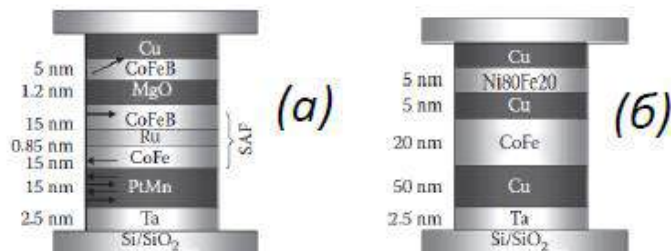


Рис.3. Структура слоев СТНО

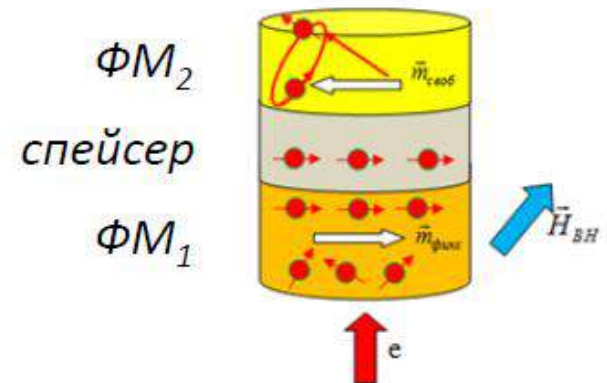


Рис.4. Типовая структура слоев простейших СТНО

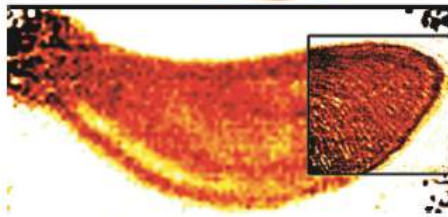
Спиновые эмиттеры терагерцового излучения

Актуальность



Преимущества ТГц:

- Субмиллиметровое пространственное разрешение.
- Высокая проникающая способность.
- Неионизирующее излучение.
- Резонансное поглощение в органических веществах.
- Высокая скорость передачи данных



ТГц визуализация биоматериалов¹



ТГц коммуникация²



ТГц сканирование для обеспечения безопасности³

Недостатки:

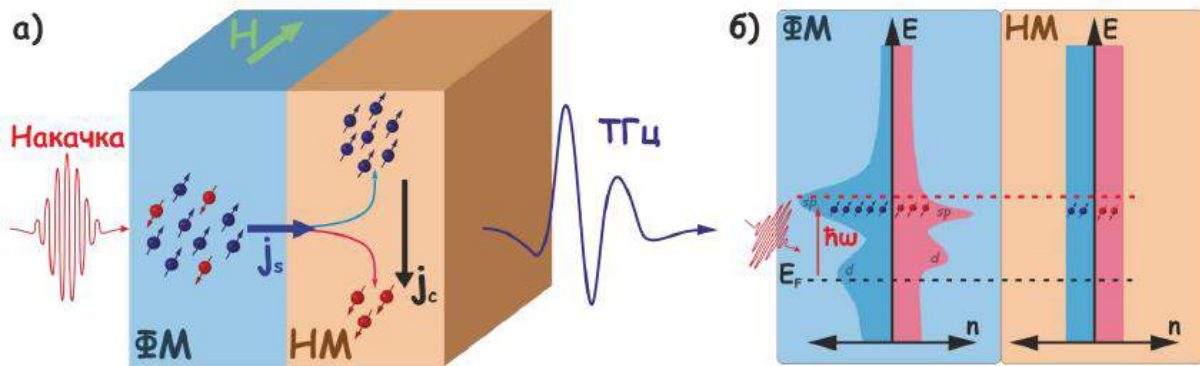
- Высокое поглощение в атмосфере.
- Отсутствие эффективных широкополосных источников.

¹ <https://longwavephotonics.com/applications.html>

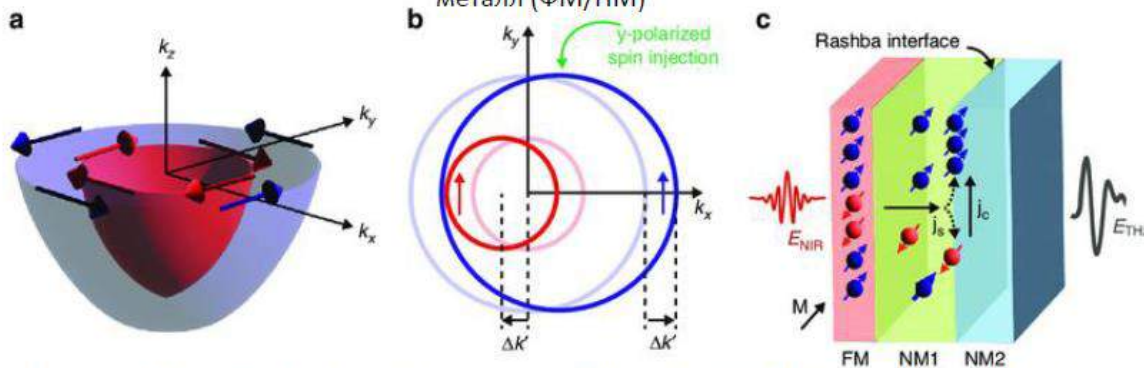
² <https://www.whatech.com/og/markets-research/it/812412-terahertz-thz-communication-market-outlook-experts-forecast-unprecedented-growth-opportunities-through-2024-2032>

³ Pawar A.Y. et al. Terahertz technology and its applications // Drug Invent. Today. 2013. Vol. 5, № 2. P. 157-163.

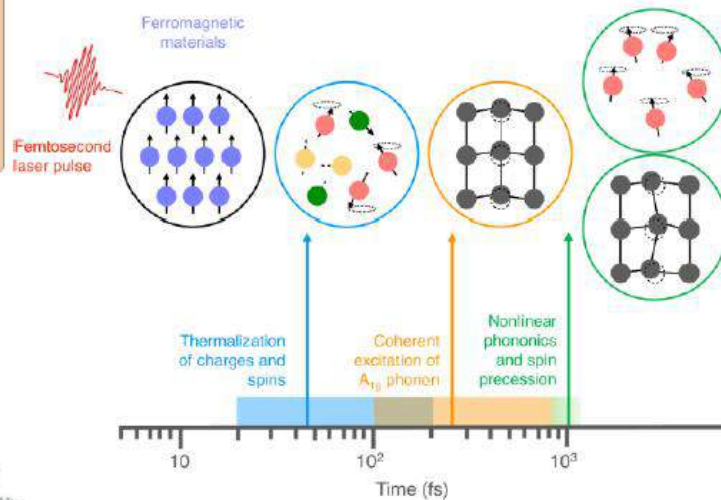
Механизмы генерации ТГц: спин-зарядовая конверсия и размагничивание



а) спинтронный ТГц эмиттер на основе обратного спинового эффекта Холла;
б) возникновение спин-зарядовой конверсии в структуре ферромагнитный/немагнитный металл (ФМ/НМ)



Спинтронный эмиттер на основе обратного эффекта Рашби-Эдельштейна, а) 3D-изображение энергетических зон на поверхности Рашба-интерфейса; б) расщепление энергетических зон Δk в результате спиновой инжекции; в) спин-зарядовая конверсия¹

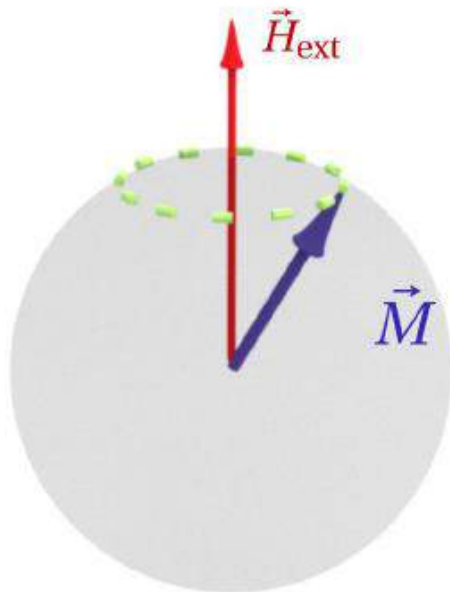


¹Pettine J. et al. Ultrafast terahertz emission from emerging symmetry-broken materials //Light: Science & Applications. – 2023. – Т. 12. – №. 1. – С. 133.

²Wu N. et al. Three-stage ultrafast demagnetization dynamics in a monolayer ferromagnet //Nature Communications. – 2024. – Т. 15. – №. 1. – С. 1-9.

Intense laser pulses can be used to demagnetize a magnetic material on an extremely short timescale. While this ultrafast demagnetization offers the potential for new magneto-optical devices, it poses challenges in capturing coupled spin-electron and spin-lattice dynamics. In this article, we study the photoinduced ultrafast demagnetization of a prototype monolayer ferromagnet Fe_3GeTe_2 and resolve the three-stage demagnetization process characterized by an ultrafast and substantial demagnetization on a timescale of 100 fs, followed by light-induced coherent A_{1g} phonon dynamics which is strongly coupled to the spin dynamics in the next 200–800 fs. In the third stage, chiral lattice vibrations driven by nonlinear phonon couplings, both in-plane and out-of-plane are produced, resulting in significant spin precession. Nonadiabatic effects are found to introduce considerable phonon hardening and suppress the spin-lattice couplings during demagnetization. Our results advance our understanding of dynamic charge-spin-lattice couplings in the ultrafast demagnetization and evidence angular momentum transfer between the phonon and spin degrees of freedom.

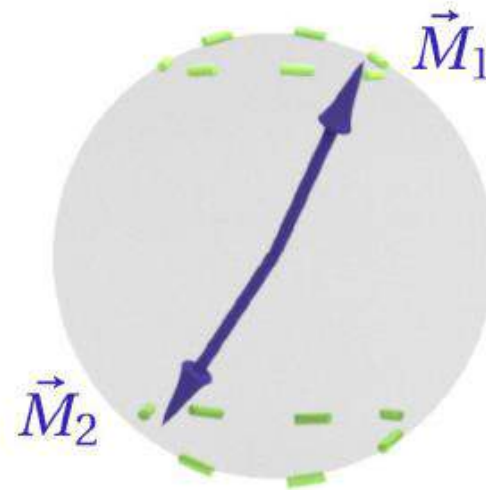
Резонансные частоты ФМ и АФМ



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

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

Ферромагнетики

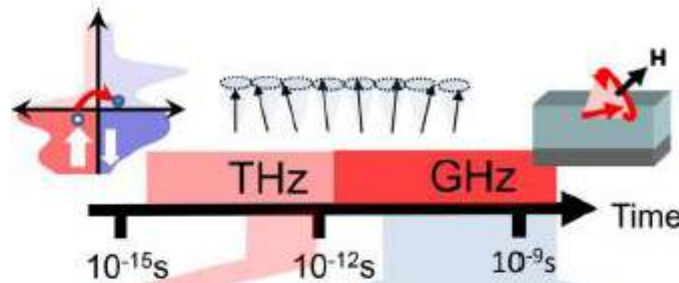


$$H_{\text{ex}} \approx 10^3 \text{ T}$$

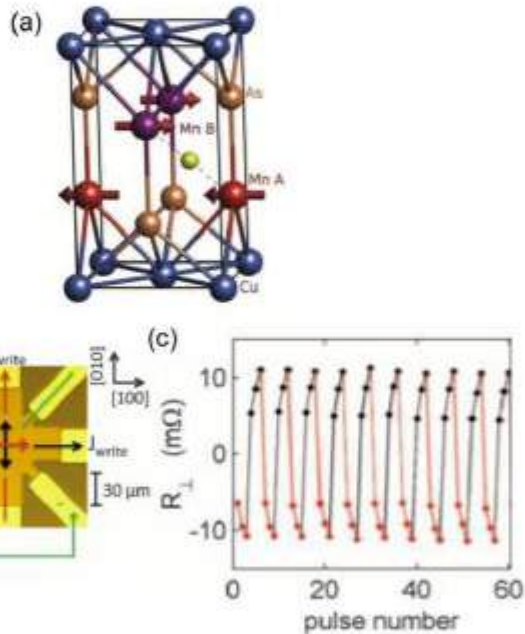
$$\omega_{\text{AFMR}} = \gamma \sqrt{H_{\text{ex}} H_a} \approx 500 \text{ GHz} - 1.5 \text{ THz}$$

Антиферромагнетики

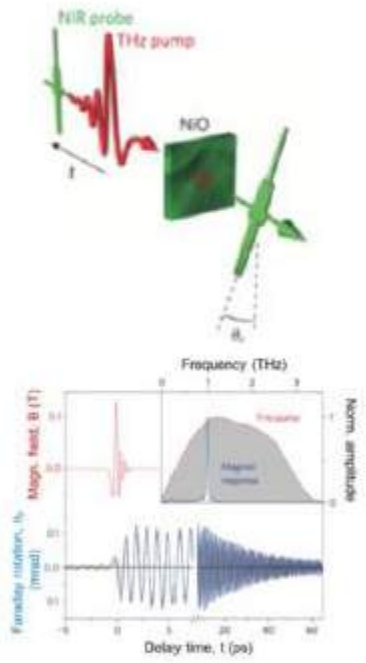
АФМ & ТГц спинтроника



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

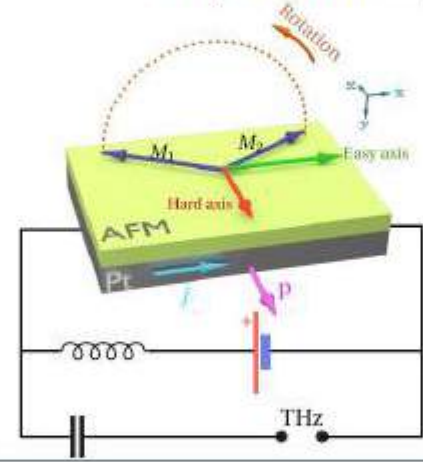


Электрическое переключение АФМ полупроводников
P. Wadley, et al. Science 2016

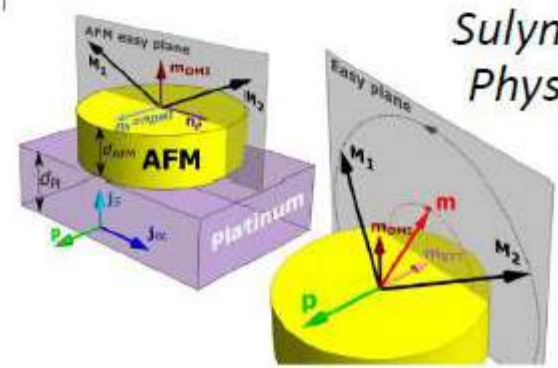


Сверхбыстрый ТГц спиновый резонанс
T. Kampfrath, et al. Nat. Phot. 2011

ТГц АФМ осцилляторы

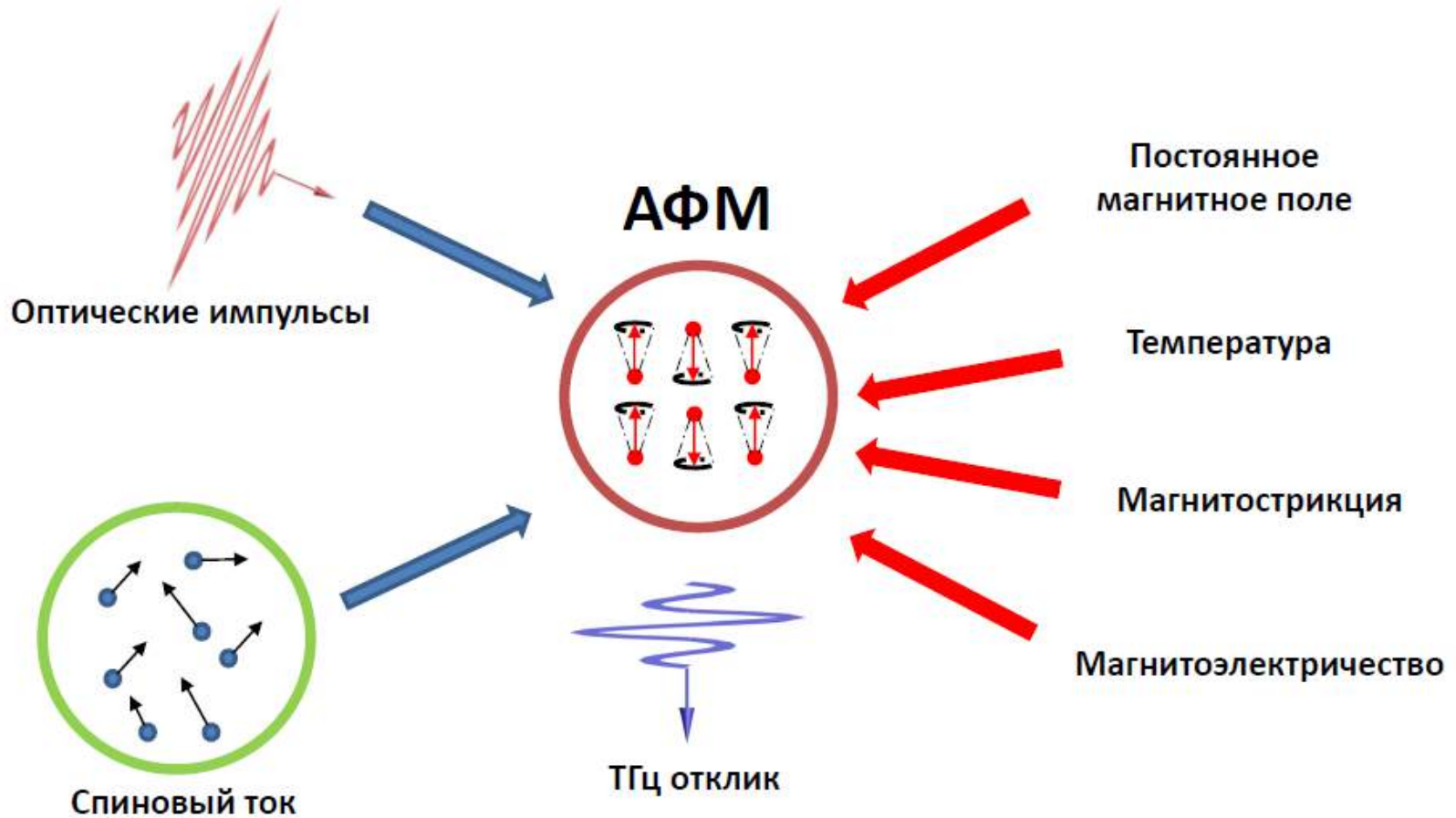


Khymyn et al. Sci. Rep. 2016



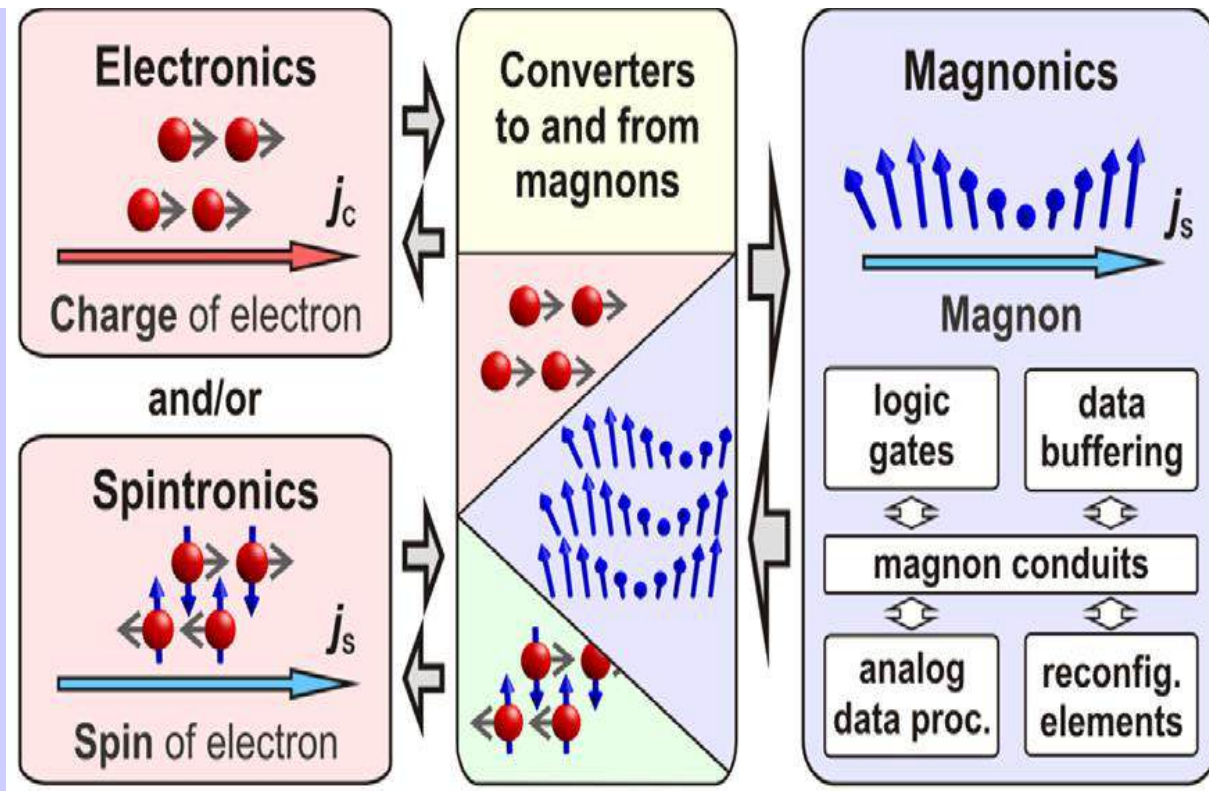
Sulymenko et al. Phys. Rev. App. 2017

Методы изменения критического тока и частоты резонанса

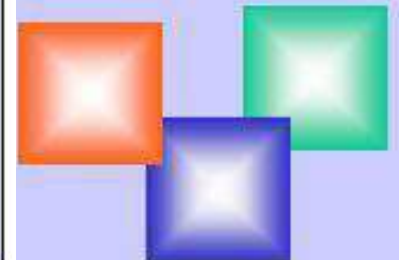


МАГНОНИКА

Nowadays, spin waves are considered as potential data carriers for computing devices, as they have **nanometre wavelengths**, can be in the low-**THz** frequency range, provide **Joule-heat-free** transfer of spin information over **macroscopic distances**, and access to **wave-based computing** concepts



YIG- 1956



Достоинства

1. Передача и обработка информации без перемещения каких-либо частиц
2. Длина свободного пробега много больше спин-диффузионной длины, что позволяет передавать информацию на макроскопические расстояния (100 мкм)
3. Волновая природа обеспечивает множество линейных и нелинейных свойств, перспективных для новых способов обработки сигналов

Основной недостаток - сильное затухание в большинстве материалов

Направления исследований

1. Возбуждение и манипуляция магновов с помощью зарядовых и спиновых токов (Spin pumping, inverse Hall effect, STT)
2. Поиск новых материалов- YIG=ЖИГ пленки, пермаллой, сплавы Гейслера и др
3. Искусственные магнитные материалы- магنونные кристаллы
4. Миниатюризация и увеличение частоты. Длина волны до параметра решетки, до THz
5. Обработка цифровых данных (амплитуда или фаза, магنونный транзистор)
6. Волновые свойства на наномасштабе – обработка не бита, а кластера информации
7. Манипуляция и генерация электрическим полем (мультиферроики, магнитная анизотропия, DMI)
8. Магنونные тепловые эффекты типа спинового Зеебека
9. Buffering = медленные магنونные моды (до мксек)
10. Бозе-Эйнштейновская конденсация

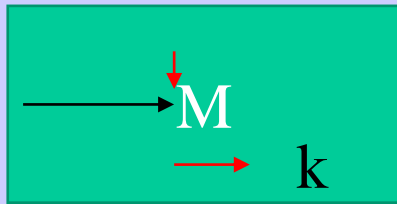


Магноны=Спиновые Волны

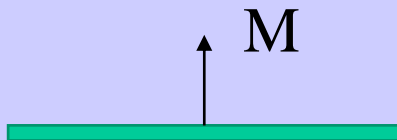
Обменные

Магнитостатические

Магнитостатические спиновые волны=MSW



M в плоскости и параллельно k BVMSW
 M в плоскости и перпендикулярно k =MSSW
или мода Деймона-Эшбаха (Damon-Eshbach)



FVMSW= Forward volume magnetostatic waves

Обычно используются FVMSW, так как они легко возбуждаются антеннами, но в связи с миниатюризацией – обменные волны

Pu (Ni₈₁Fe₁₉) и YIG (Y₃Fe₅O₁₂), CoFeB composites, Heusler alloys

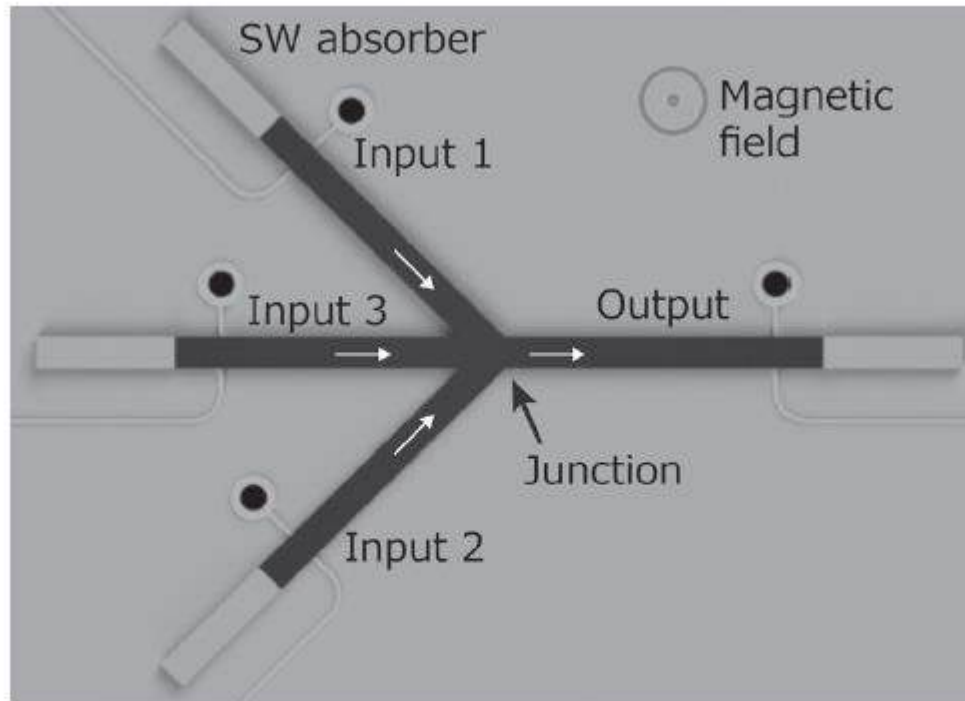
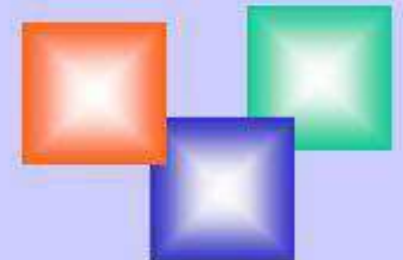


Figure 1. A four port spin wave logic gates. Forward volume spin waves interfere at the junction in this YIG waveguide.



Магنونные кристаллы

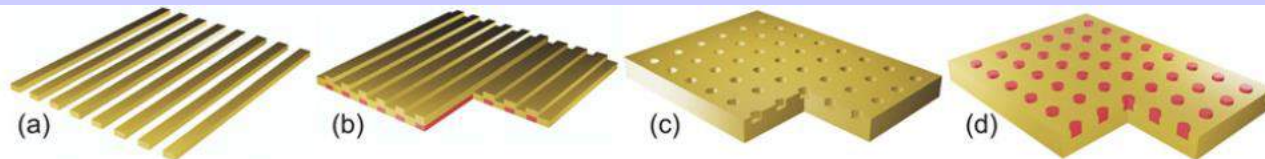
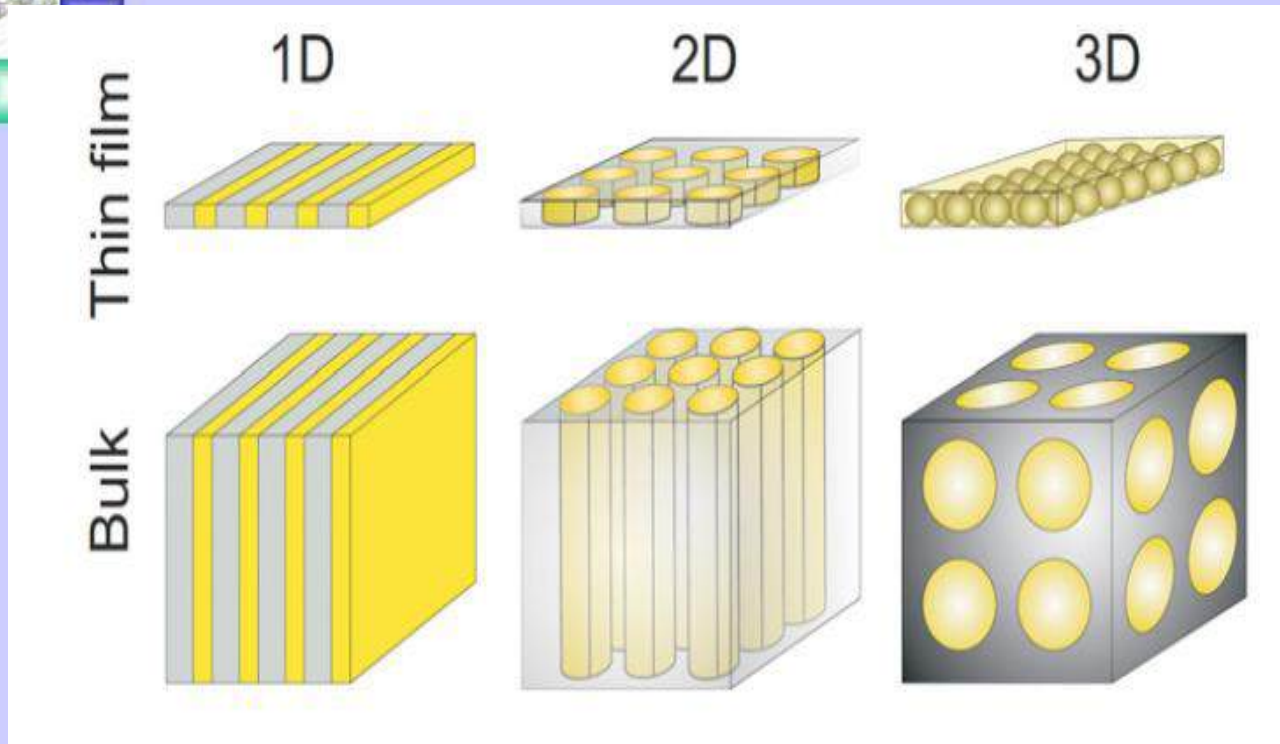
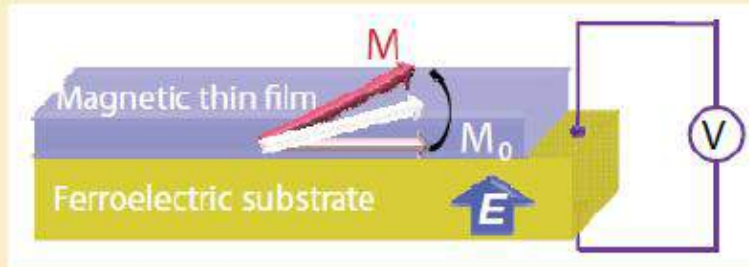
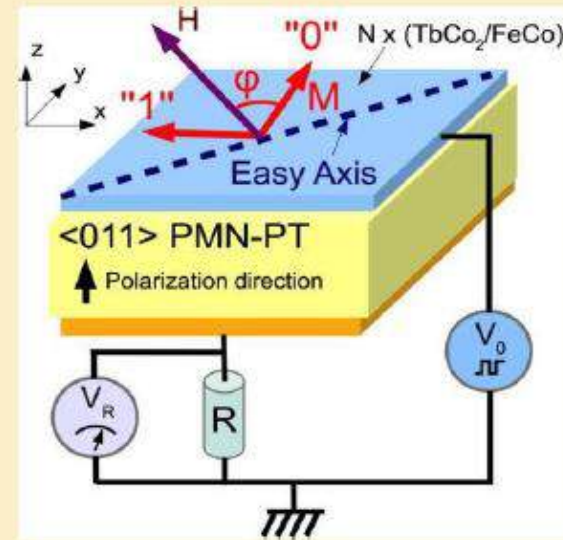


Figure 3. Sketches of thin-film magnonic crystals. (a) Array of ferromagnetic stripes to be coupled dipolarly via air gaps and (b) a continuous film with one or two corrugated surfaces (red stripes represent either the same material or a different magnetic or nonmagnetic template). (c) Arrays of empty holes forming a magnetic antidot lattice and (d) holes refilled by a different ferromagnet forming a bi-component MC. Here we depict square lattices, but other Bravais lattices have already been addressed as well.

МАГНИТНАЯ СТРЕЙНТРОНИКА

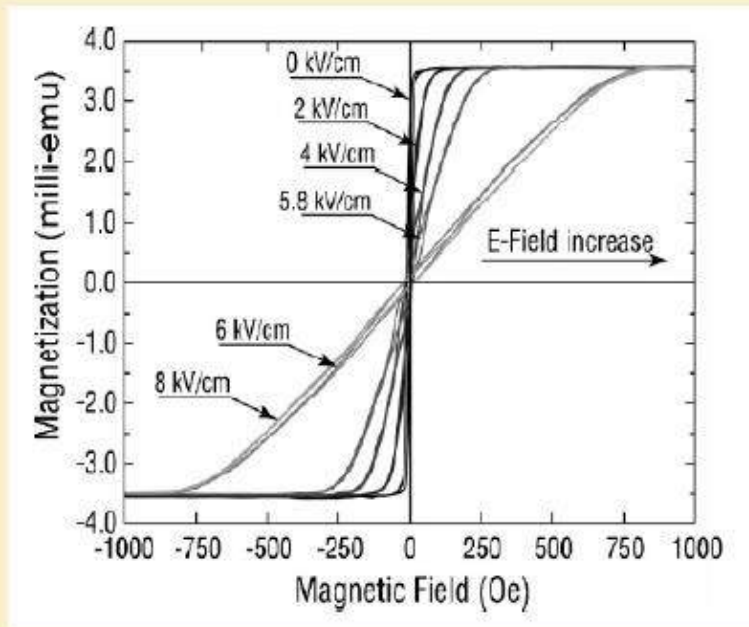


Магнитоэлектрическая память, 2011

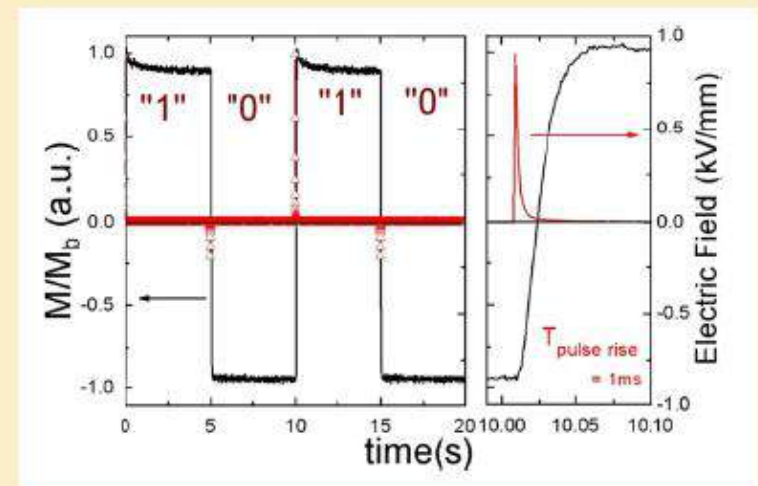


Запись:
 $W \sim 10^{-14}$ Дж

Время записи
 $\tau \sim 10^{-9}$ сек



Влияние E на форму петли гистерезиса пленки FeGaV (100 нм) на PZN-PT.



Key points

- When a spin travels through a chiral structure in which the reflection or inversion symmetry is broken, the moving spin can be polarized, thereby giving rise to spin currents. The key ingredient to produce such spin currents is spin-orbit interaction.
- The spin currents are central to the chiral spintronics. The chiral structures that generate the spin currents can be found not only in a real space but in a reciprocal space.
- The exemplary chiral structures in the real space are chiral molecules, chiral magnetic domain walls and chiral skyrmions, while what can be found in the reciprocal space are chiral topological materials.
- Chiral spintronics deals with not only the generation of the spin currents but the acting of spin currents on chiral structures, such as chiral spin-orbit torque.
- The spin currents from chiral structures such as chiral molecules and chiral topological materials can often be significantly larger than the achiral counterparts. Reversely, the spin currents acting on chiral structures, such as chiral spin-orbit torque, is much more efficient than achiral spin transfer torque.
- Chiral spintronics based on chiral magnetic structures are particularly useful for the potential development of devices that have better performances and new functionalities.

Chirality-induced spin selectivity –CISS ???

It is believed that the combination of a dipole electric field with exchange interaction may give rise to large spin and chirality dependent transmission/tunneling

In early 2010s large spin filtering started to be observed from the injection of unpolarized electron spins into chiral DNA or other molecules in which the spin polarization was found to be linearly proportional to the length of DNA molecules

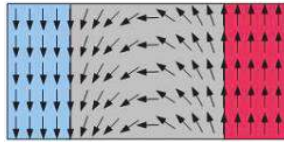
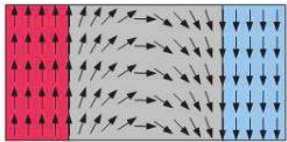
Chiral objects of spintronics



Chiral DNA molecules

Ron Naaman

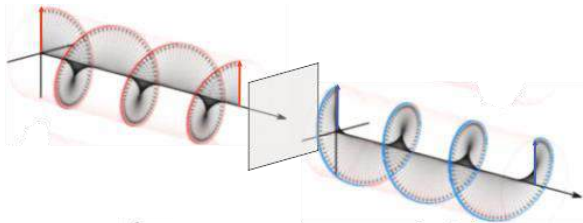
Weizmann Institute of Science, Rehovot, Israel



Chiral magnetic domain walls

Stuart S. P. Parkin

Max Planck Institute, Halle, Germany



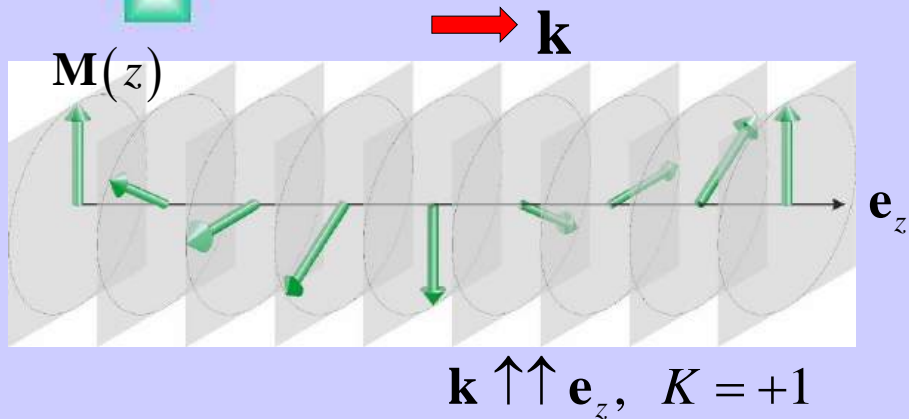
Conductive chiral helimagnets

Vladimir V. Ustinov

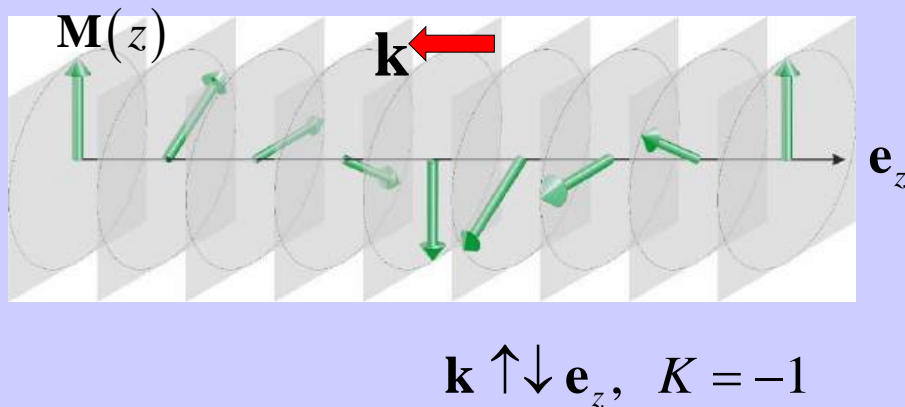
Institute of Metal Physics, Ekaterinburg



Spin chirality of helimagnet



(a) Right-handed helix:



(b) Left-handed helix:

Helimagnet magnetization:
 $\mathbf{M}(z) = M (\mathbf{e}_x \cos q_z z + \mathbf{e}_y \sin q_z z)$

Helix wave vector:
 $\mathbf{q} = [\mathbf{M} \times \partial \mathbf{M} / \partial z] / M^2$

Helicity vector:
 $\mathbf{k} = \mathbf{q} / |\mathbf{q}|$

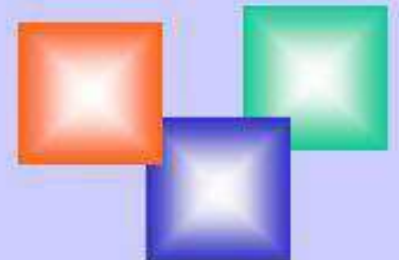
Helimagnet chirality:
 $K = \mathbf{k} \cdot \mathbf{e}_z$

The sense of the rotation known as spin helicity is a robust degree of freedom of helimagnet



О чем я не говорил

Нейроморфная спинтроника
Сверхпроводящая спинтроника
Спин-фотоника



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



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}

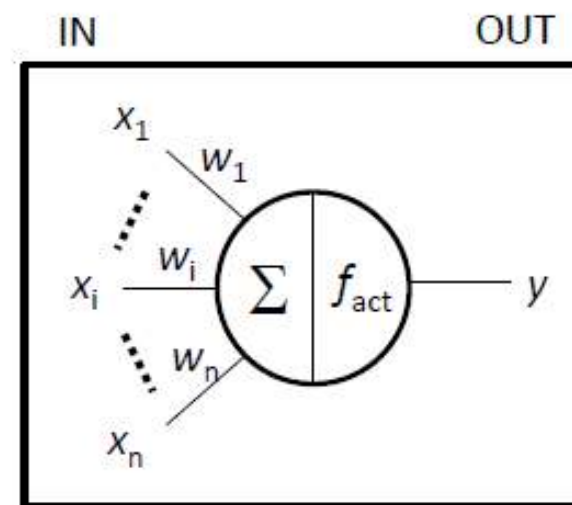
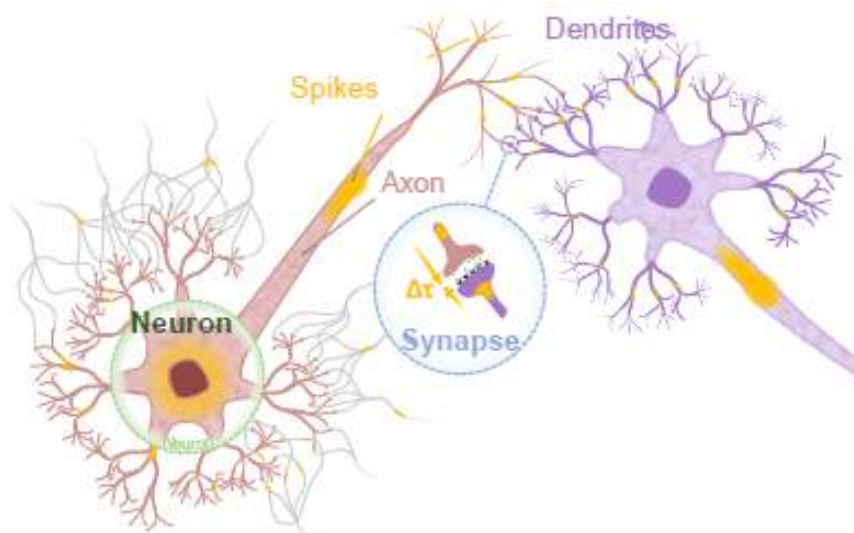
Количество атомов во Вселенной $\sim 10^{80}$

The brain has two primary elemental units, synapses and neurons. In their simplest abstraction, synapses connect neurons with a connection strength, called a weight, which provides the memory function. Neurons receive inputs from many other neurons, integrate those responses, and emit spikes, called action potentials, which provide the input for subsequent neurons.



Fundamental units – neuron and synapse

Statically ... Product-sum operation



$$y = f_{\text{act}} \left(\sum_{i=1}^n x_i w_i \right)$$

f_{act} : signum or sigmoidal function

Basis for Deep Neural Network (DNN), Convolutional Neural Network (CNN)

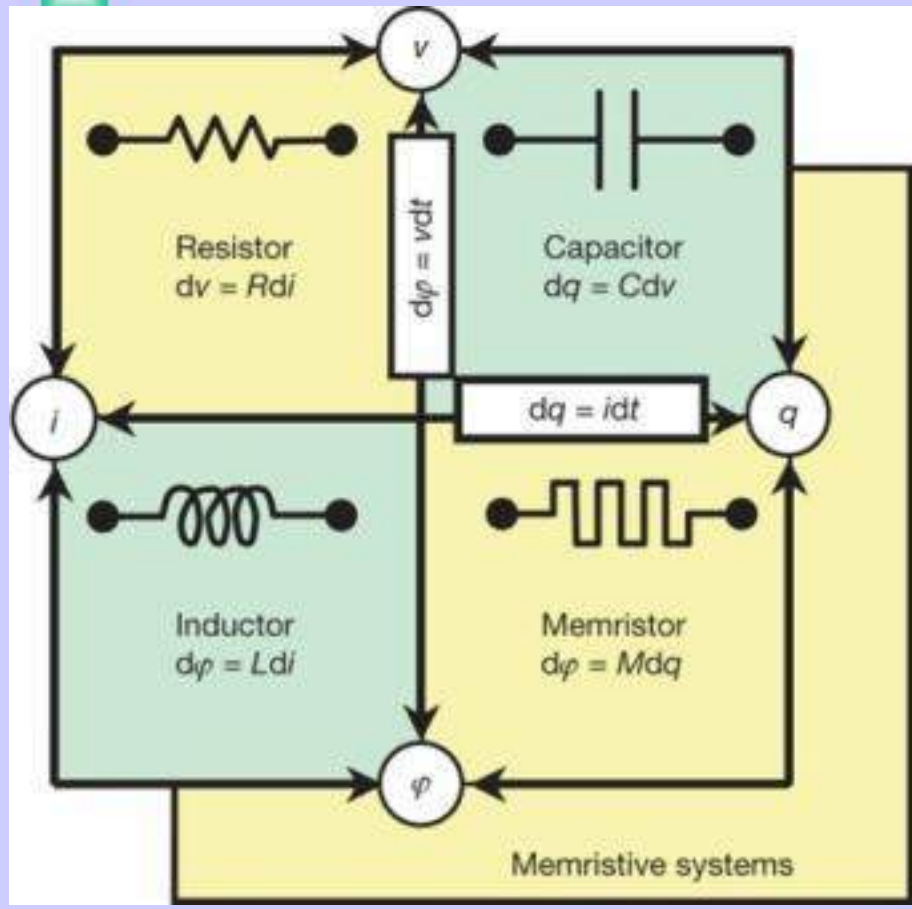


Among the variety of spintronic devices that have been used, magnetic tunnel junctions play a prominent role because of their established compatibility with standard integrated circuits and their multifunctionality. Magnetic tunnel junctions can serve as synapses, storing connection weights, functioning as local, nonvolatile digital memory or as continuously varying resistances. As nano-oscillators, they can serve as neurons, emulating the oscillatory behavior of sets of biological neurons. As superparamagnets, they can do so by emulating the random spiking of biological neurons. Magnetic textures like domain walls or skyrmions can be configured to function as neurons through their non-linear dynamics.

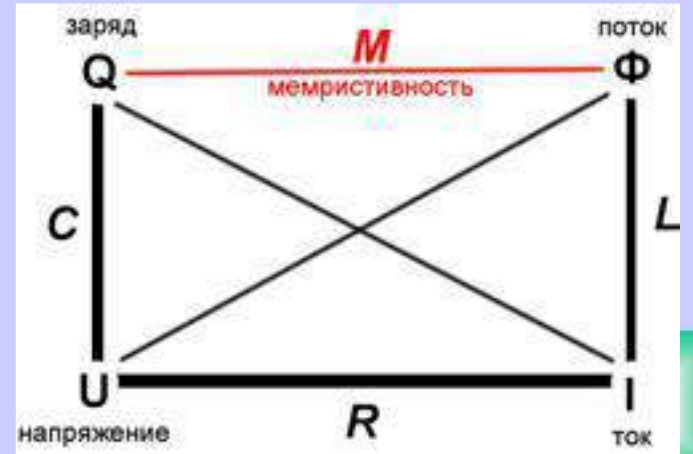


Memristor

Chua, Leon O (Sep 1971), "Memristor — The Missing Circuit Element", IEEE Transactions on Circuit Theory



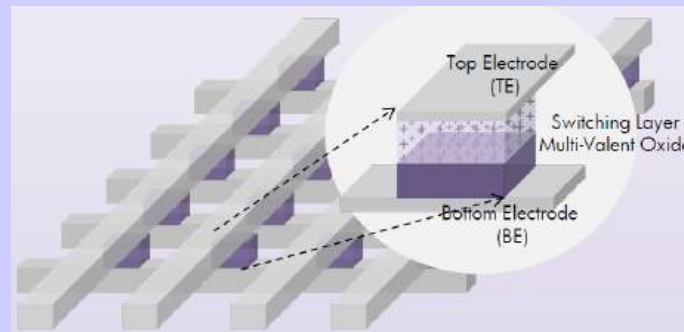
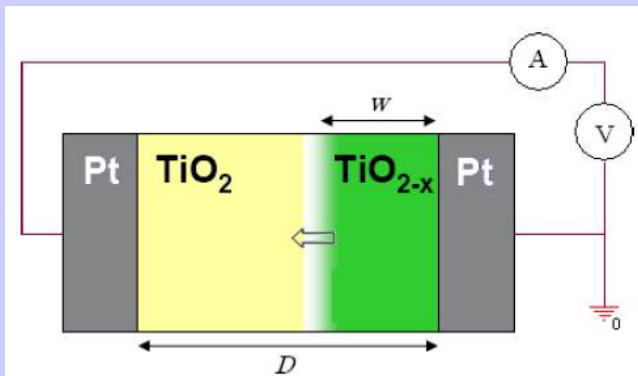
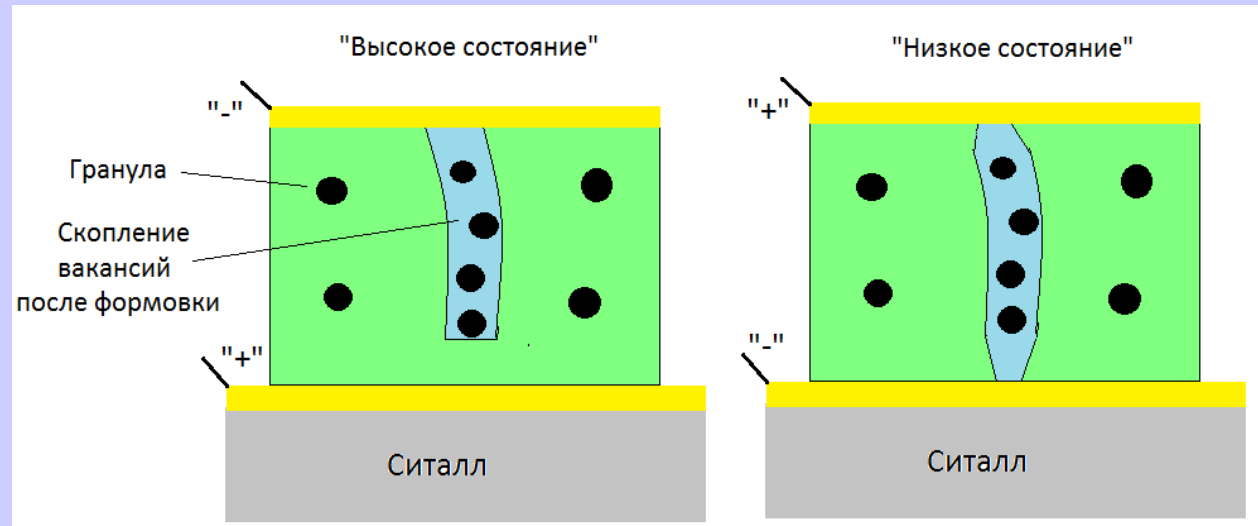
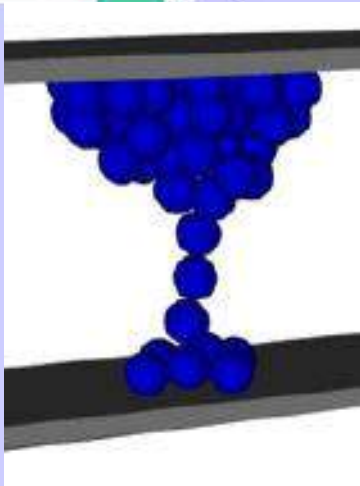
DAPRA 2008
SyNAPSE (Systems of Neuromorphic Adaptive Plastic Scalable Electronics)



$$d\phi = v \cdot dt \quad \text{и} \quad dq = i \cdot dt$$

$$v = M(q) \cdot i.$$

Memristor



Reliability, endurance, cyclability





“IN THE THEORY THERE IS NO DIFFERENCE
BETWEEN PRACTICE AND THEORY.
BUT IN PRACTICE THERE IS.”

Conference on Symbolic Logic

THANK YOU!!!

