

# СПИНТРОНИКА: ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И УСТРОЙСТВА

Фетисов Ю.К., Сигов А.С.

МИРЭА - Российский технологический университет



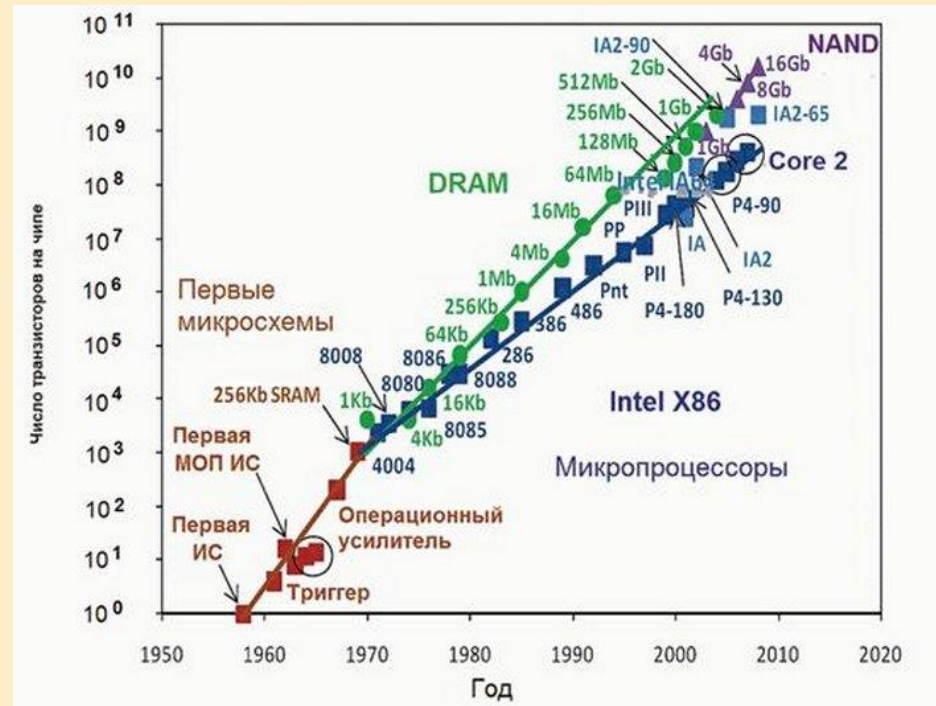
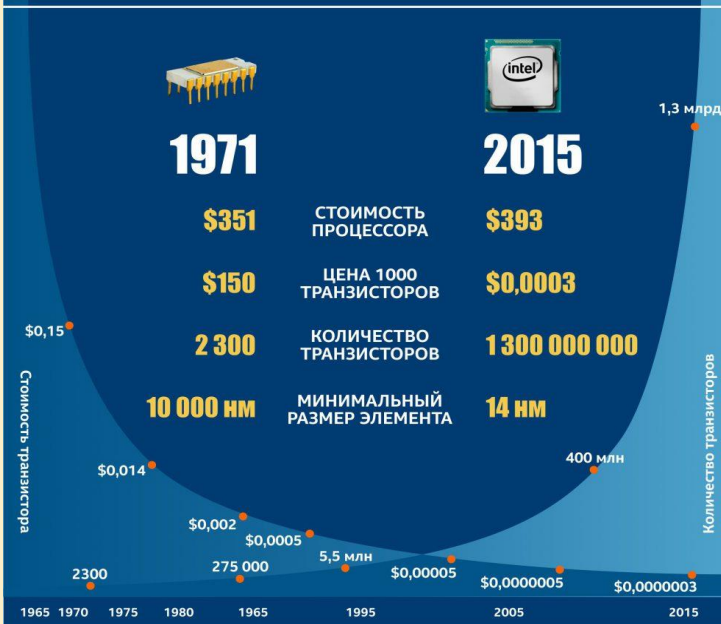
# ВВЕДЕНИЕ

## Закон Мура

Количество транзисторов, размещаемых на кристалле интегральной схемы, удваивается каждые 24 месяца.

FISHKI.NET

## ЗАКОН МУРА В ДЕЙСТВИИ



Уменьшение размера элементов 10 нм ↓

Снижение времени переключения 0.1 нс ↓

Снижение энергии переключения 1 нДж ↓

Новые физические принципы !

## СПИНТРОНИКА: ОПРЕДЕЛЕНИЯ

***В широком смысле:*** Область науки и техники, изучающая магнитные явления в твердых телах, обусловленные наличием собственного и орбитального магнитных моментов электронов, и создание устройств обработки информации на их основе.

Доменные структуры, спиновые волны, спин- поляризованный ток и т.д.

***В узком смысле:*** Область науки и техники, изучающая эффекты взаимодействия собственных магнитных моментов электронов в твердом теле с электрическими и магнитными полями и создание устройств обработки информации на их основе.

Спин- поляризованный ток, ГМС, ТМС, MRAM и т.д.

1. Введение
2. Электроника и спинтроника
3. Физические основы спинтроники
  - 3.1. Магнитные структуры и спиновые волны
  - 3.2. Управление намагниченностью
  - 3.3. Спин-поляризованный ток
4. Устройства спинтроники
5. Центры исследований по спинтронике
6. Публикации по спинтронике
7. Заключение

# ЭЛЕКТРОНИКА И СПИНТРОНИКА

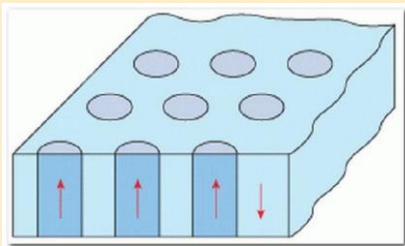


Носитель информации электрон	Заряд электрона $q = 1.6 \cdot 10^{-19}$ Дж $m = 9.1 \cdot 10^{-31}$ кг	Спин и магнитный момент электрона $s = 1.054 \cdot 10^{-34}$ Дж·сек $\mu_B = 9.27 \cdot 10^{-24}$ Дж/Тл	Характеристики элемента памяти
Энергия электрона	$W_k \sim kT \sim 4 \cdot 10^{-21}$ Дж при $T = 300$ К	$W = -\mu_B B \sim 10^{-23}$ Дж при $B \sim 1$ Тл	Энергия записи на 1 бит
Область локализации	$L \sim 10 \dots 100$ нм	$L \sim 10 \dots 100$ нм	Размер элемента
Характерное время	$W_k = mV^2/2 \sim kT$ , $T \sim 300$ К $V \sim (2kT/m)^{1/2} \sim 10^5$ м/сек $\tau \sim L/V \sim 10^{-12}$ сек	Вращение момента $f = \gamma B$ , $\gamma = 3 \cdot 10^{10}$ Гц/Тл $\tau = 1/2f \sim 10^{-11}$ сек	Время переключения элемента
Характерная частота	$f \sim 1/\tau \sim 10^{12}$ Гц (достигнуто $\sim 10^{10}$ Гц)	$f \sim 10^{11}$ Гц (возможно $\sim 10^{12}$ Гц)	Рабочая частота
		Энергонезависимость Радиационная стойкость и т.д.	Преимущества

# МАГНИТНЫЕ СТРУКТУРЫ И СПИНОВЫЕ ВОЛНЫ

Сложение собственных и орбитальных магнитных моментов электронов дает магнитный момент атома. Взаимодействие атомов приводит к появлению намагниченности вещества.

1. 1960-1980 гг - *Цилиндрические магнитные домены (ЦМД)* в пленках гранатов с анизотропией типа «легкая ось» толщиной 1-10 мкм состава  $Y_3Fe_5O_{12} + Ga, La, Sr, Sc, Bi$ .



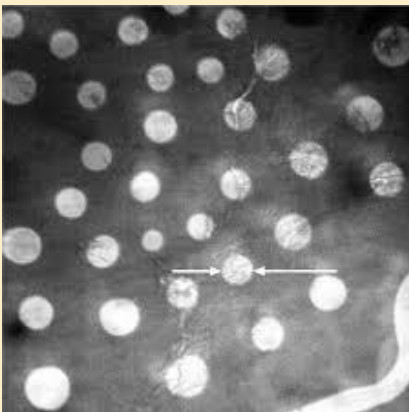
Фактор качества  $Q = K_u / 2\rho M_s$

$L \sim (AK_u)^{1/2} / (\pi M_s^2)$

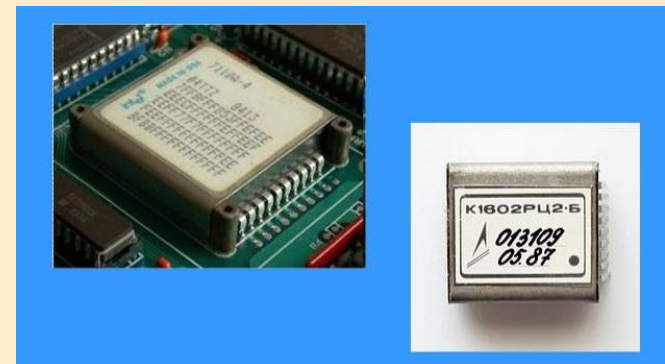
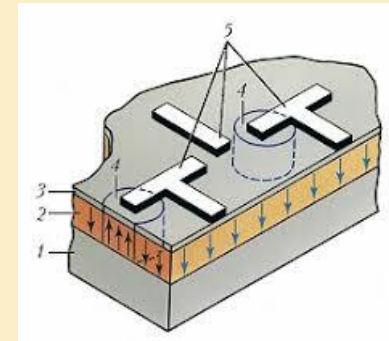
Диаметр  $d \sim 0.1-100 \mu\text{m}$

Скорость  $V \sim 1-10 \text{ м/сек}$

Управляющее поле  $\sim 1-10 \text{ Э}$



Предложены системы генерации, детектирования и управления движением ЦМД в пленках.

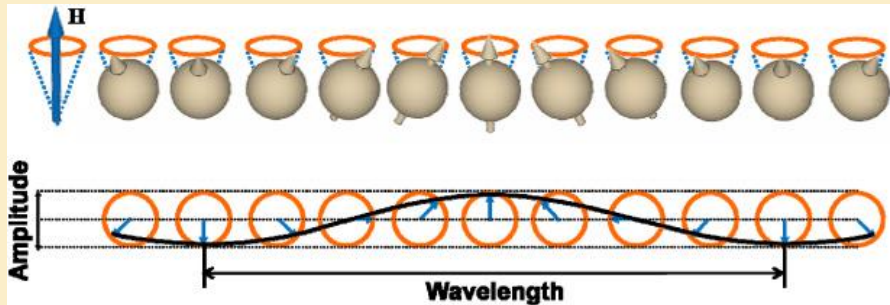


## Спиновые (магнитостатические) волны в пленках ЖИГ

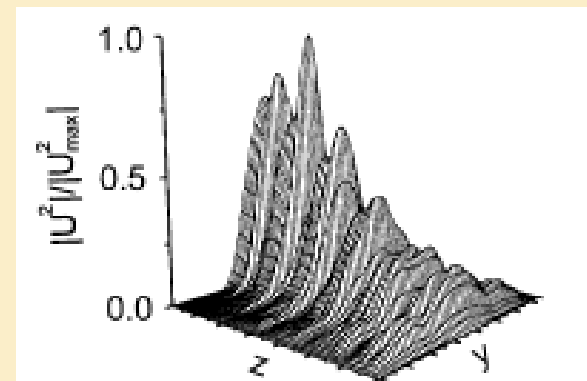
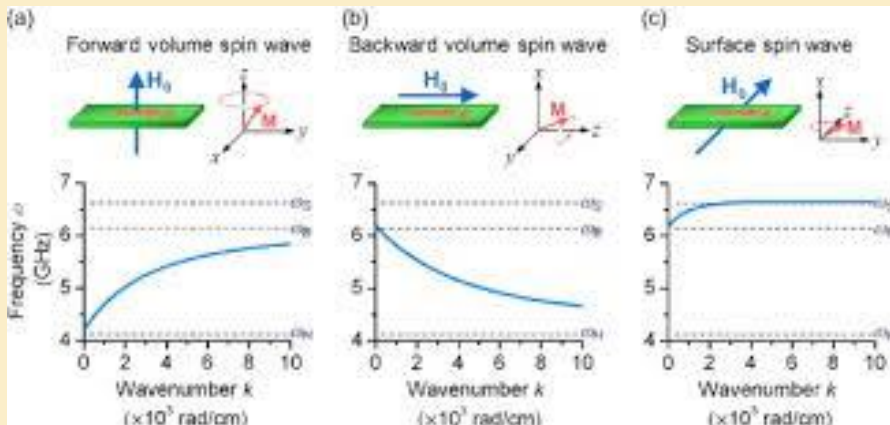
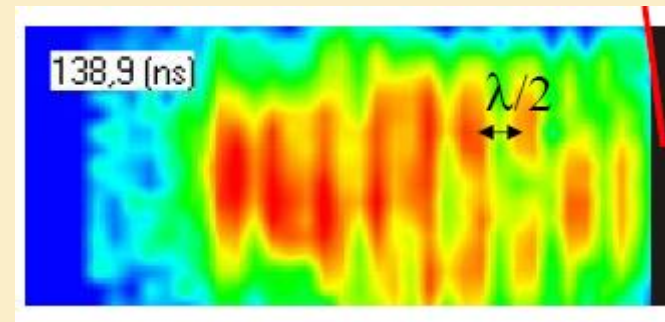
2. 1980-2000 гг – *Спиновые (магнитостатические) волны* (МСВ) в пленках ЖИГ состава  $Y_3Fe_5O_{12}\epsilon + Ga, Vi$  толщиной 5-100  $\mu m$  на подложках GGG толщиной  $\sim 0.5$  мм.

Ширина линии ФМР в пленках ЖИГ  $\Delta H \sim 0.2 - 1$  Э на частотах 0.3 - 30 ГГц,  $H \sim 0.1 - 10$  кЭ.

Скорость МСВ  $V \sim 10^5 - 10^7$  см/сек, длина волны  $\lambda \sim 10 - 10^3$   $\mu m$ , длина пробега  $L \sim 0.1 - 5$  см.



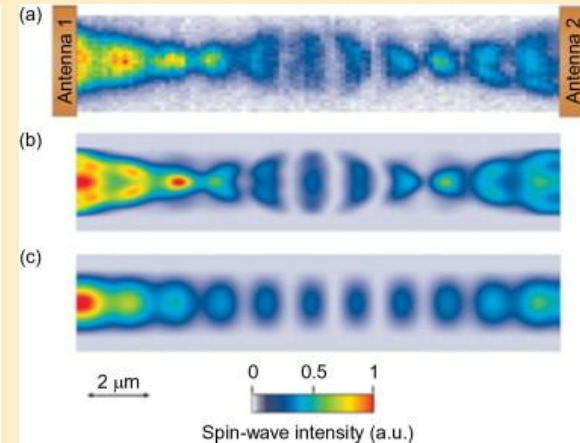
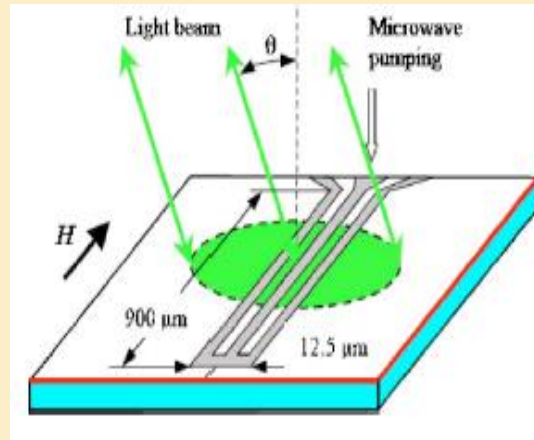
Визуализация волн BLS-методом



### 3. Спиновые волны в сверхтонких пленках

СВ в пленках металлов  
Fe, Ni, Co, Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub>  
толщиной 0.01- 1 μm  
λ ~ 1-10 μm, L ~ 10<sup>3</sup> μm.

СВ в тонких пленках ЖИГ  
толщиной 0.1- 1 μm.



### 4. Спиновые волны в антиферромагнетиках

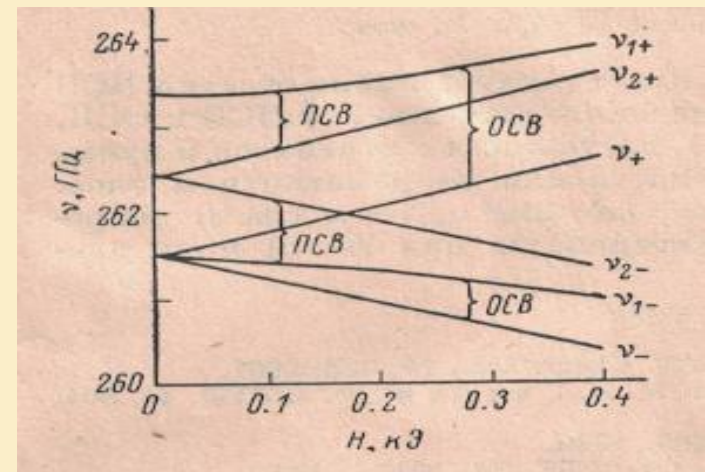
Для ферромагнитного слоя Y<sub>3</sub>Fe<sub>5</sub>O<sub>12</sub> частота резонанса  $f \sim \gamma \cdot H$ , где  $\gamma = 2.8$  ГГц/кЭ.

Для слоя антиферромагнетика с анизотропией типа «легкая ось» частота резонанса

$$f = \gamma \sqrt{(2H_E + H_A)H_A} \pm H$$

Типичные поля  $H_E \sim 10^5 - 10^6$  Э,  $H_A \sim 10^2 - 10^4$  Э

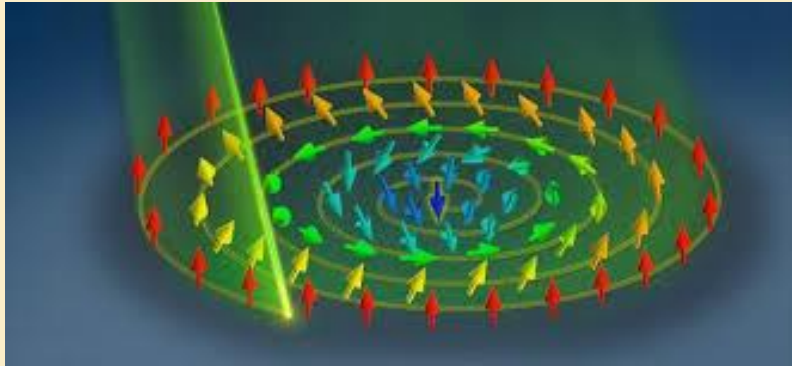
Для Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>  $f \sim 165$  ГГц, для MnF<sub>2</sub>  $f \sim 260$  ГГц



Области существования СВ в слое MnF<sub>2</sub>.



## 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 ?



ISSN 0304-8853

**journal of magnetism and magnetic materials**

Editor-in-Chief:  
S.D. BADER

Editors:  
RAMESH C. BUDHANI  
OKSANA FESENKO  
XUFENG HAN  
ATSUFUMI HIROHATA  
J. SAMUEL JIANG  
MARCELO KNOBEL  
RENAT SABIRANOV  
HAO ZENG

Recognized by the  
European Physical Society

NORTH-HOLLAND  
www.elsevier.com/locate/jmmm

Special Issue: Magnetic Skyrmions as Future Information Carriers  
**J. Magn. Magn. Mater. 455, 1-60 (2018)**

# ОПТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ НАМАГНИЧЕННОСТЬЮ

Спин-орбитальное взаимодействие приводит к появлению в тензоре  $\varepsilon$  следующих членов

$$\varepsilon^{(a)} = \alpha M + \beta M^3 + \dots \quad \varepsilon^{(s)} = \varepsilon^{(0)} + \gamma M_2 + \varphi M^4 + \dots$$

Циркулярно-поляризованный свет создает в ФМ эффективное магнитное поле  $H_{\text{eff}}$

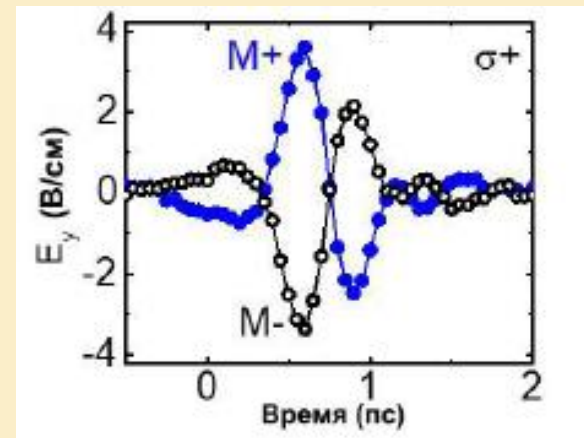
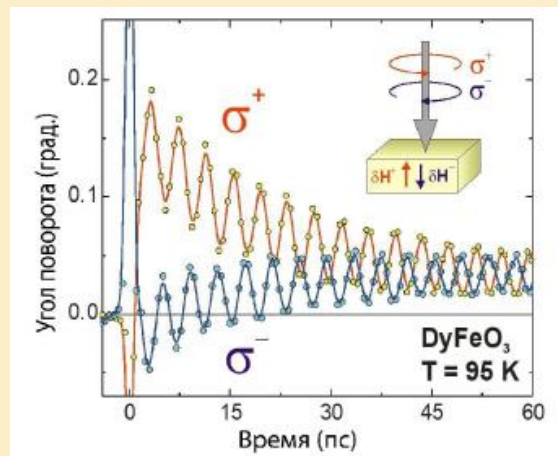
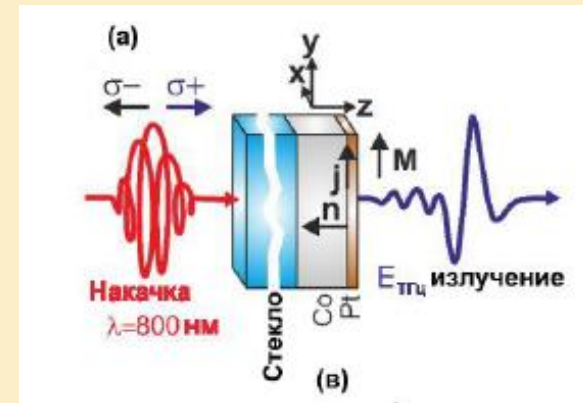
$$H_i^{\text{eff}} = -\alpha_{ijk} \frac{\varepsilon_0}{\mu_0} E_j(\omega) E_k^*(\omega) - \gamma_{ijkl} \frac{\varepsilon_0}{\mu_0} M_l(0) E_j(\omega) E_k^*(\omega)$$

Обратный эффект Фарадея и Коттона-Мутона

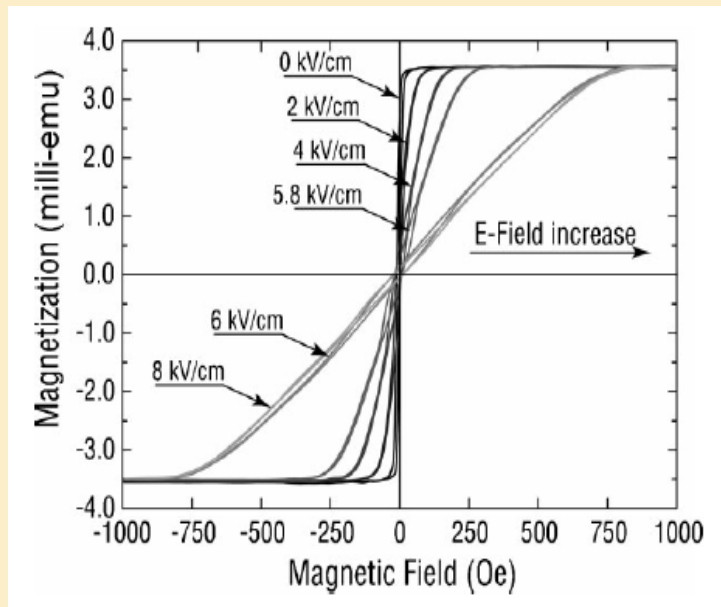
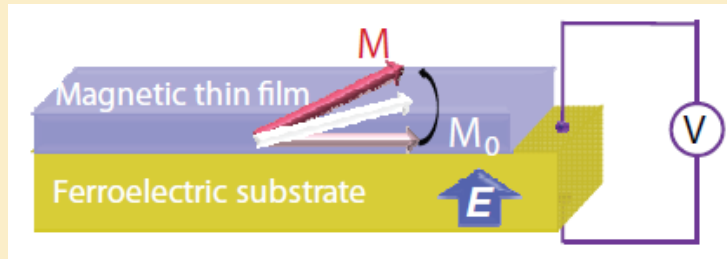
Импульс  $\tau=50$  фс,  $I = 1$  мДж/см<sup>2</sup> - поле  $H \sim 0.3$  Тл

Динамика намагниченности в  $\text{DyFeO}_3$   $f \sim 230$  ГГц

Генерация ТГц излучения в Co/Pt  
Импульс  $\tau=50$  фс,  $I = 1$  мДж/см<sup>2</sup>.  
Частота излучения  $\sim 2$  ТГц.

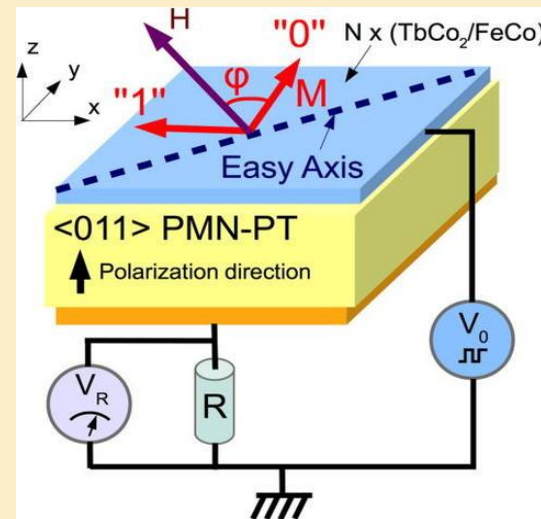


# МАГНИТНАЯ СТРЕЙНТРОНИКА



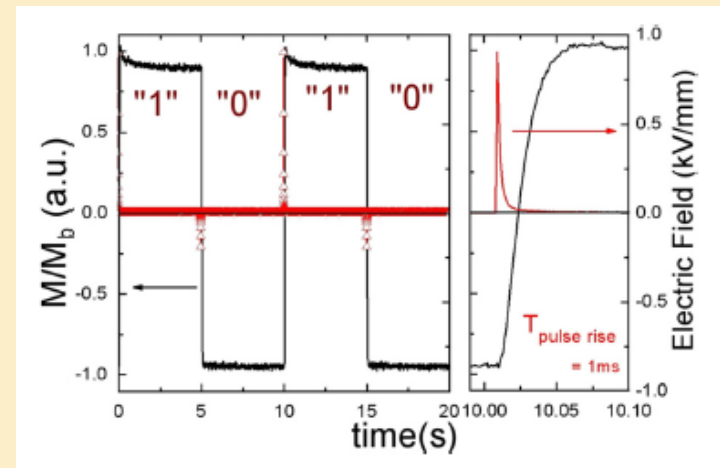
Влияние  $E$  на форму петли гистерезиса пленки FeGaV (100 нм) на PZN-PT.

## Магнитоэлектрическая память, 2011

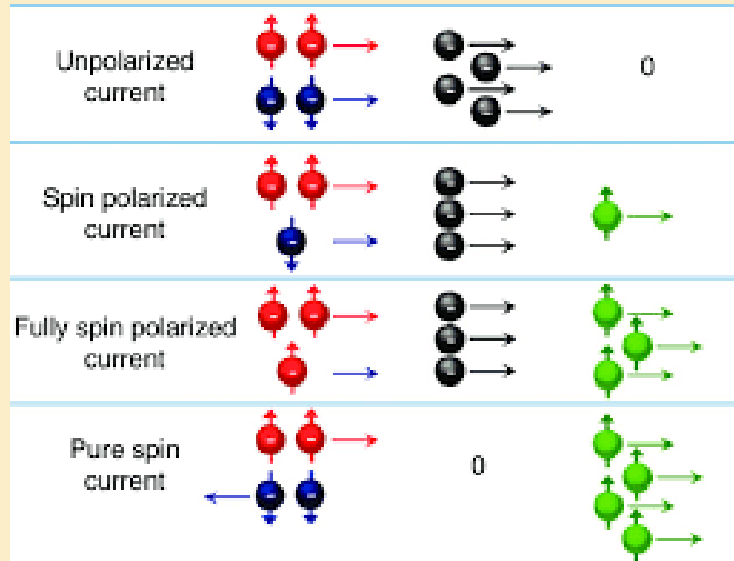


Запись:  
 $W \sim 10^{-14}$  Дж

Время записи  
 $\tau \sim 10^{-9}$  сек



## СПИН-ПОЛЯРИЗОВАННЫЙ ТОК



$$P = \frac{N_+ - N_-}{N_+ + N_-} \quad \text{- степень поляризации тока}$$

$N_+$  - число электронов со спином по полю,

$N_-$  - число электронов со спином против поля.

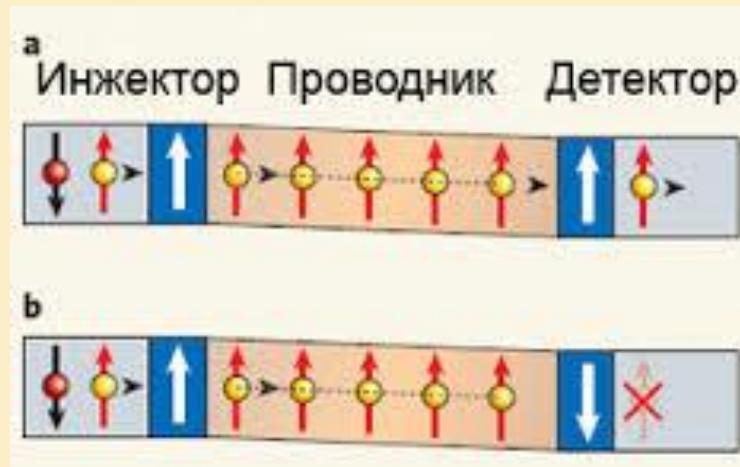
Метод создания спин-поляризованного тока – инжекция тока из ферромагнетика (Fe, Co, Ni) в проводник или полупроводник.

Из-за рассеяния степень поляризации тока достаточно быстро падает:

$$L \sim 1 \mu\text{m}, \quad \tau \sim 100 \text{ ns.}$$

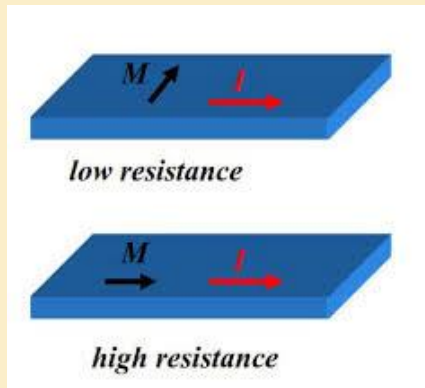
Детектирование спин-поляризованного тока:

- метод спин-разрешающей фотоэмиссии,
- метод магнитного туннельного перехода,
- магнетосопротивление точечного контакта,
- спиновый эффект Холла.

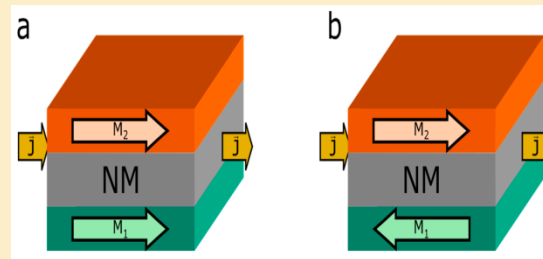


# ЭФФЕКТЫ СО СПИН-ПОЛЯРИЗОВАННЫМ ТОКОМ

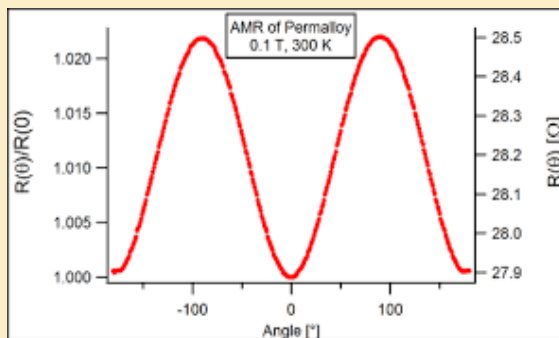
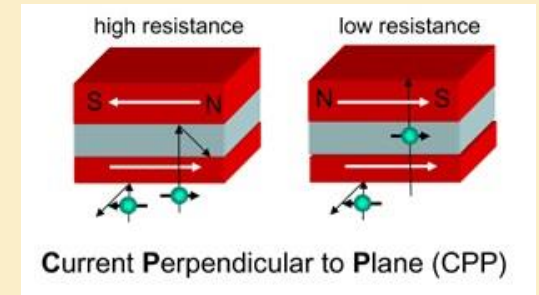
*Анизотропное  
магнетосопротивление*



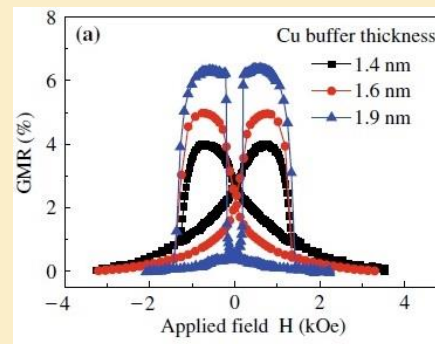
*Гигантское  
магнетосопротивление*



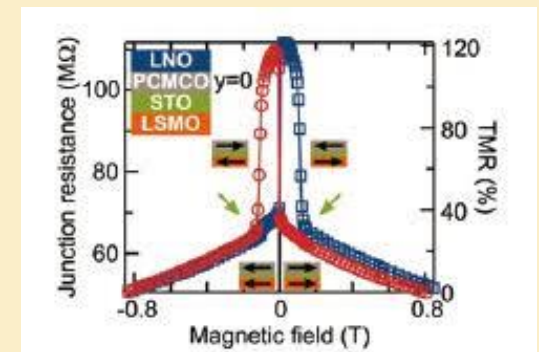
*Туннельное  
магнетосопротивление*



$$\frac{\Delta R}{R} \sim 0.1\%$$



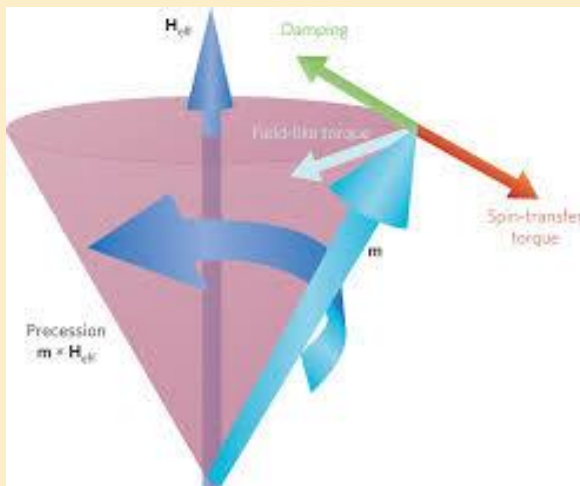
$$\frac{\Delta R}{R} \sim 10\%$$



$$\frac{\Delta R}{R} \sim 100\%$$

## ЭФФЕКТЫ СО СПИН-ПОЛЯРИЗОВАННЫМ ТОКОМ

### Спиновый перенос углового момента (STT)



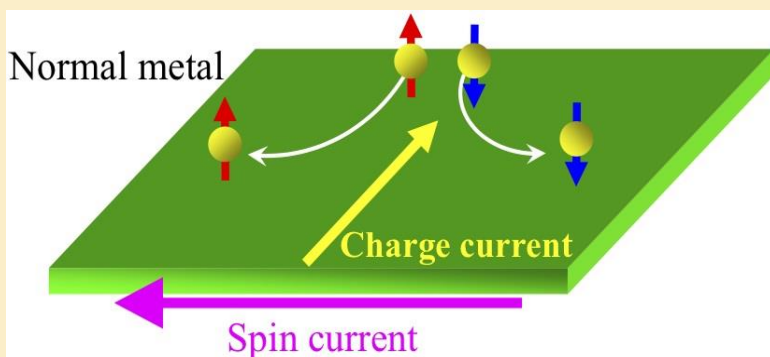
Эффект наблюдается при инжекции спин-поляризованного тока в ФМ слой и проявляется в изменении ориентации намагниченности  $M$  слоя.

Berger, Slonczewski, 1996.  $J \sim 10^{10}$  А/м<sup>2</sup>,  $I \sim 1-100$   $\mu$ А

Частота прецессии намагниченности зависит от внешнего поля и плотности тока.

Более эффективное управление намагниченностью, чем с помощью внешних магнитных полей.

### Спиновый эффект Холла



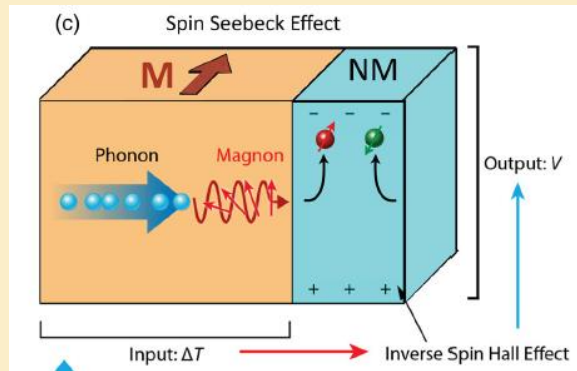
Эффект возникает из-за анизотропии рассеяния электронов с разными направлениями спинов на примесях немагнитного металла вследствие спин-орбитального взаимодействия.

Обратный спиновый эффект Холла. При пропускании спин-поляризованного тока регистрируют напряжение  $\sim 10$  нВ.

# ЭФФЕКТЫ СО СПИН-ПОЛЯРИЗОВАННЫМ ТОКОМ

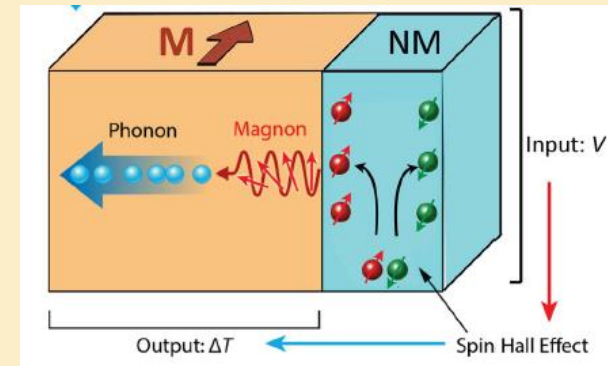
## Спиновый эффект Зеебека

Градиент температуры в ферромагнетике создает спиновый ток.

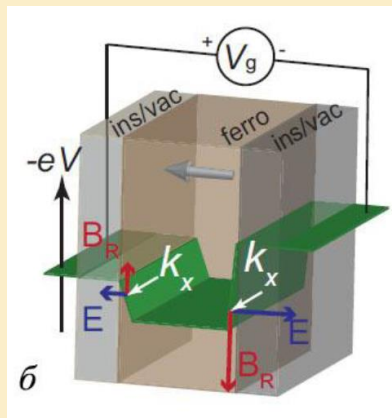


## Спиновый эффект Пельтье

При пропускании спинового тока через ферромагнетик появляется градиент  $T$ .



## Эффект Рашибы



В гетероструктурах поле  $E$  на границах раздела сред приводит к появлению эффективного магнитного поля анизотропии  $H_a \sim 30$  Тл. Прикладывая внешнее напряжение  $\sim 1$  В можно управлять намагниченностью  $M$ .

## Материалы спинтроники

Fe, Co, Ni,

GaAs:Mn<sup>2+</sup> или Cd<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>GeP<sub>2</sub>

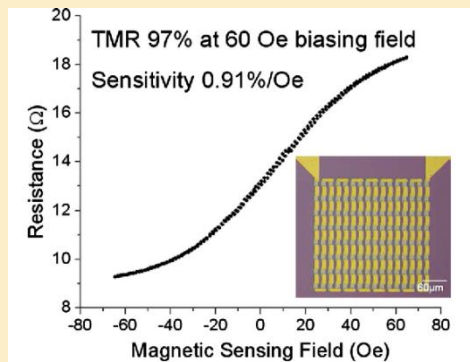
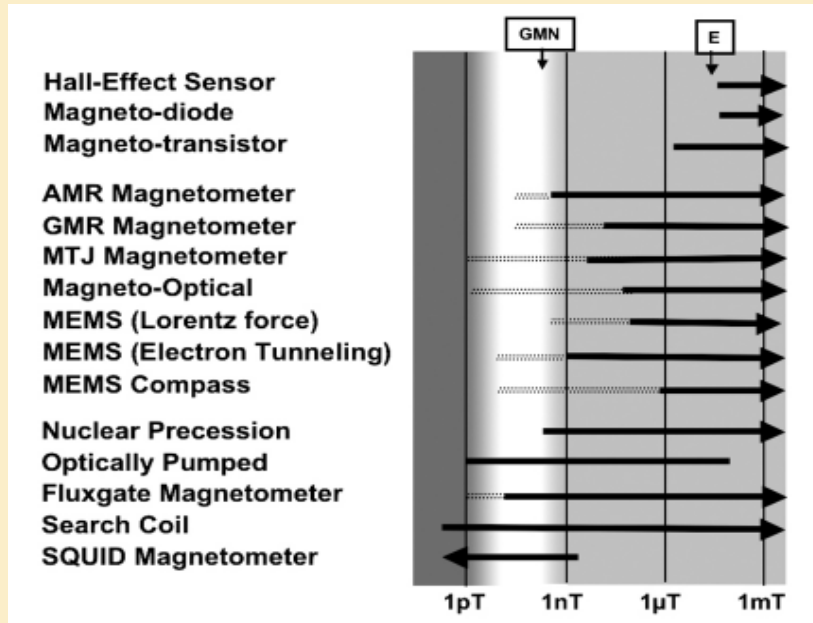
Полуметаллы CrO<sub>2</sub>, ZnO:Co, LaSrMnO

Сплавы Гейслера

NiMnSb, PtMnSb, CoMnSi, CoMnGe, ...

# УСТРОЙСТВА СПИНТРОНИКИ

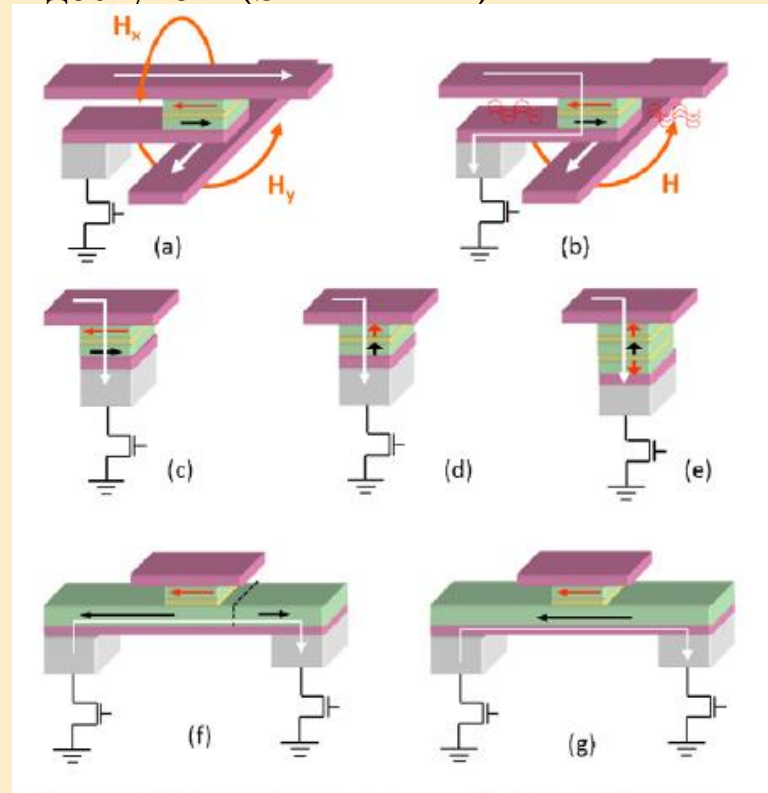
## Датчики магнитных полей



Характеристика  
TMR-датчика  
МАГНИТНОГО ПОЛЯ

1. (Color online) A typical TMR transfer curve of a single MTJ se

## 1. Магнитная память с произвольным доступом (STT-MRAM)



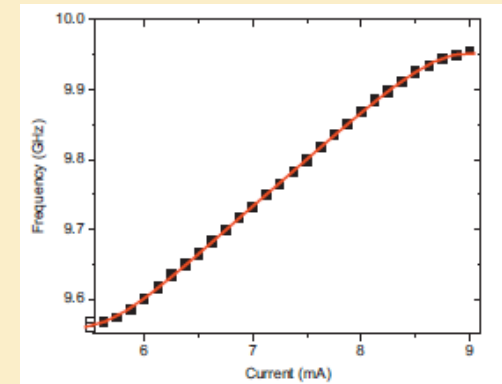
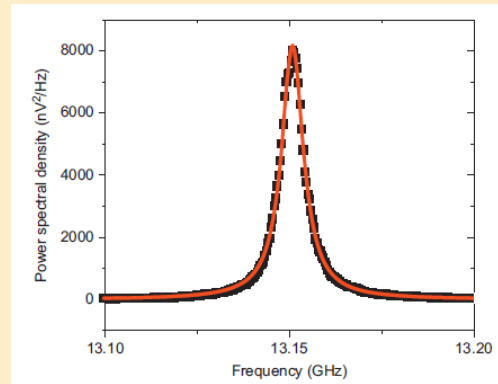
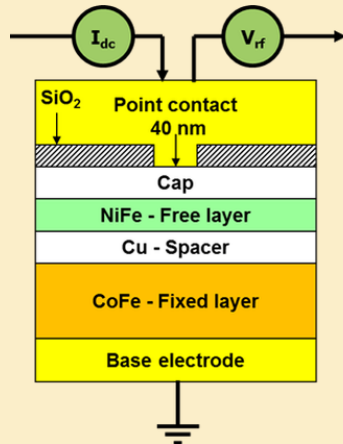
**Figure 18.** Various MRAM technologies: toggle (a), Thermally Assisted MRAM (b), in-plane (c) and (d) out-of-plane magnetized STTRAM, p-STTRAM with double barrier(e), three-terminal devices based on domain wall propagation (f) and SOT (g).

## 2. Магнитоэлектрическая память (ME-RAM)

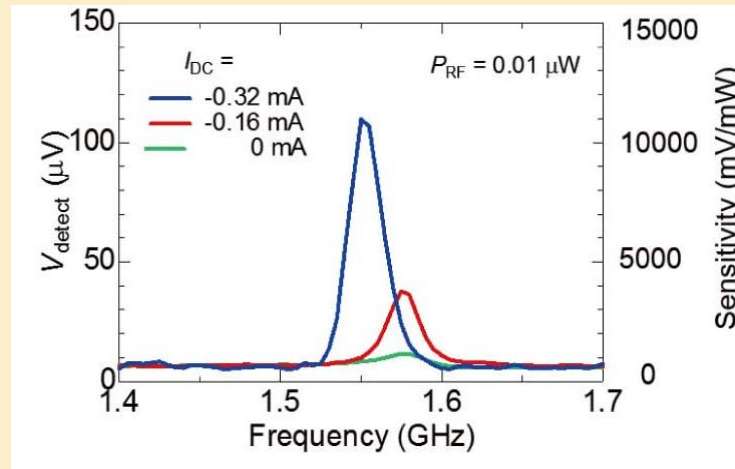
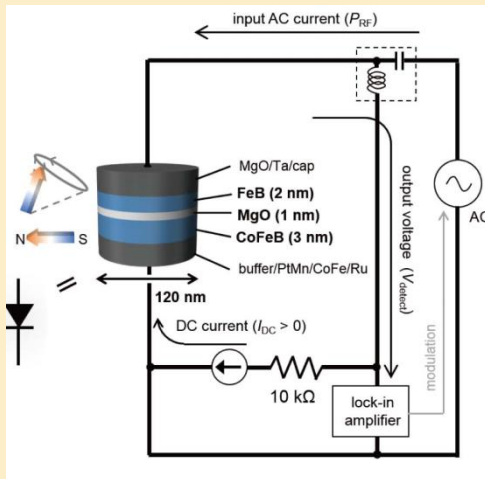


# УСТРОЙСТВА СПИНТРОНИКИ

## Спиновые наногенераторы и детекторы СВЧ-диапазона



Частота: от ~МГц до 32 ГГц, мощность ~10 нВт – 1 мВт, параметры зависят от  $H$  и  $I$ .

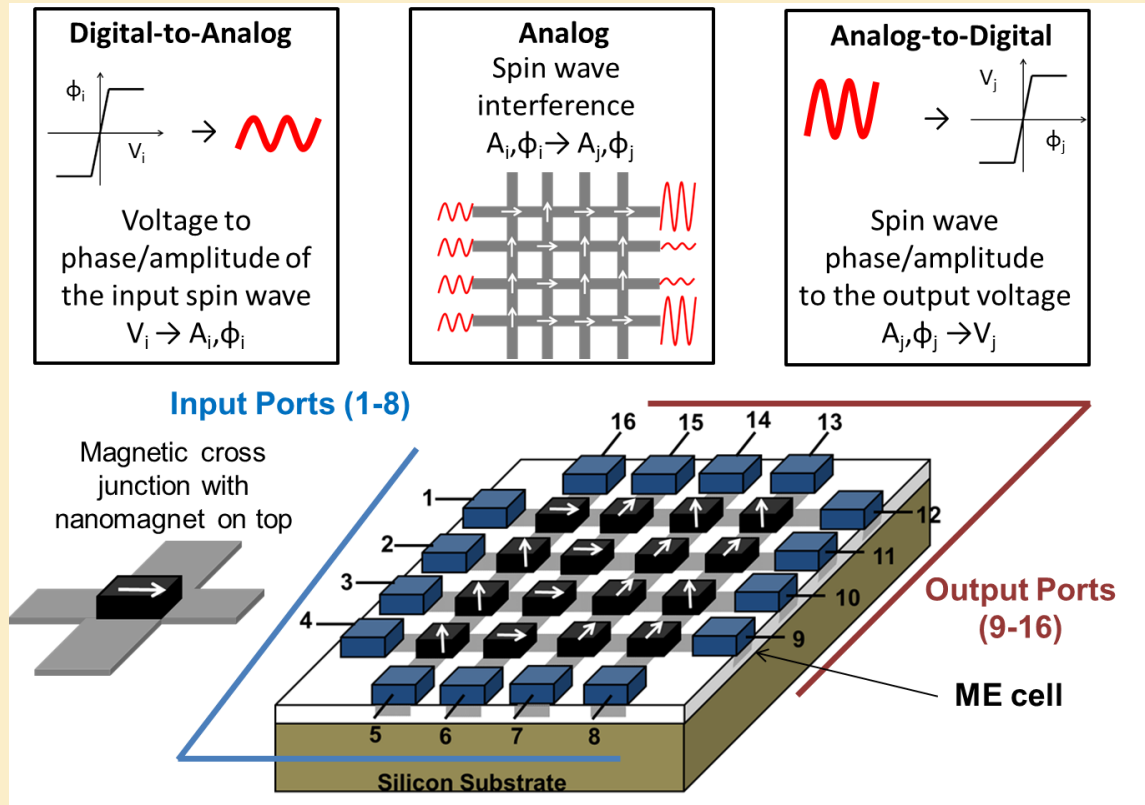


Эффективность  
детектирования  
до ~ 25000 В/Вт

Полупроводник:  
до ~ 3800 В/Вт

# УСТРОЙСТВА СПИНТРОНИКИ

## 1. Спиновый голографический процессор



## 2. Спиновый квантовый компьютер (фирма Intel)

## ЦЕНТРЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО СПИНТРОНИКЕ В США

**C-SPIN (Миннесота, США)** — Центр спинтроники материалов, интерфейсов и новой архитектуры. Многопрофильный университет и промышленный научно-исследовательский центр.

**CSEQuIN** — Центр спиновых эффектов и квантовой информации в наноструктурах. Находится в Университете Баффало, США..

**CSQC (Калифорния, США)** — Центр спинтроники и квантовых компьютеров, Калифорнийский Университет Санта Барбара, США.

### *Финансирование:*

Оборонное агентство перспективных исследовательских проектов (DARPA), Департамент обороны США (DOD), Военно-морская исследовательская лаборатория (NRL), Национальный научный фонд (NSF), фирмы IBM, Honeywell, Motorola, Infineon, Cypress Semiconductor, NEC, Toshiba, Federal Products Inc., Nonvolatile Electronics, и другие.

Исследования в рамках национальных или ведомственных программ: “Technology Reinvestments Program”, “Magnetic Materials and Devices Program”, “Spintronics”, “SPns IN Semiconductor Project”, “Quantum Information Science and Technology”.

## ЦЕНТРЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО СПИНТРОНИКЕ В ЕВРОПЕ

**NANOSPIN** - проект Еврокомиссии. Объединяет 8 академических и промышленных партнеров из 6 стран Евросоюза на основе интереса к спинтронным материалам и устройствам.

**Spintec** - исследовательская лаборатория, где пытаются перебросить мостик от фундаментальных исследований к перспективным технологиям для производства спинтронных устройств/ Гренобль, Франция.. Финансируется Комиссариатом по атомной энергии (CEA) и CNRS Франции.

**Французские университеты:** Universite Paris-Sud, Universite Paris-Saclay, Universite Paris 13, Universite de Lorraine и др. - занимаются как фундаментальными проблемами спинтроники, так и разработкой устройств.

**Германия:** *Около 20 научных групп* из различных университетов вовлечены в исследования по спинтронике.

**Приоритетные программы:** «Ультрабыстрая магнитная динамика» и «Спин-тепловой транспорт»

**Специальные исследовательские программы:** ~10 групп из разных университетов работают в течение 12 лет. Сейчас 9 программ имеют отношение к спинтронике.

## ЦЕНТРЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО СПИНТРОНИКЕ В РОССИИ

### *Институты РАН*

Институт радиотехники и электроники РАН,      Институт общей физики РАН,  
 Институт физики микроструктур РАН,      Институт физики СО РАН,  
 Институт физики металлов УрО РАН,      Институт неорганич. химии РАН  
 Физико-технический институт РАН  
 и так далее.

### *Университеты*

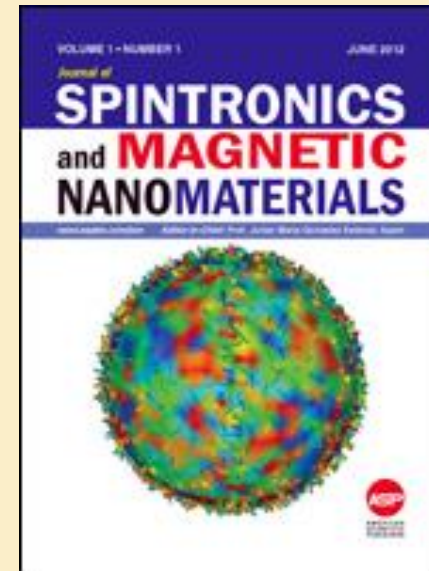
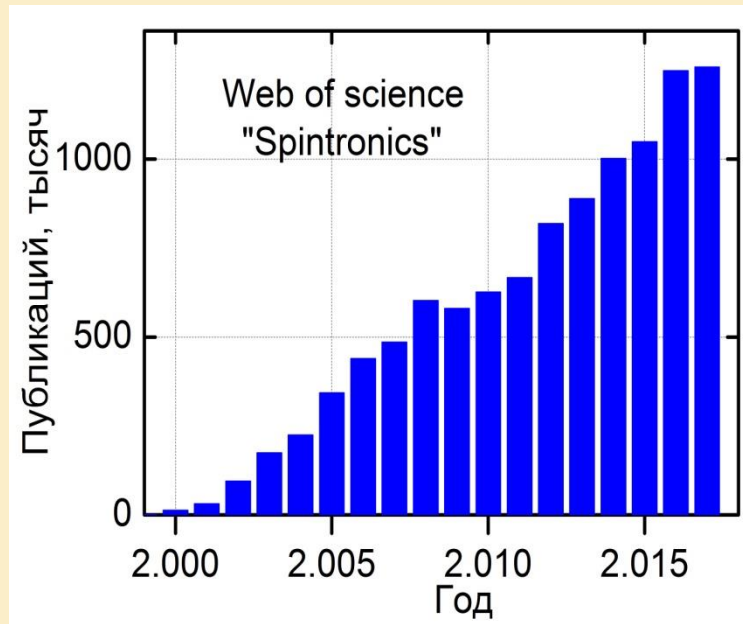
Санкт-Петербургский электротехнический университет (ЛЭТИ)  
 Российский технологический университет (МИРЭА)  
 Саратовский национальный исследовательский университет  
 Национальный исследовательский университет МИЭТ  
 Московский физико-технический институт (МФТИ)  
 Уральский федеральный университет  
 Дальневосточный федеральный университет      и так далее.  
 Российский квантовый центр (на базе Сколково)

*Компания* «Крокус Наноэлектроника»

*Финансирование* исследований: РАН, РФФИ, РНФ, Минобрнауки.

Государственные и межведомственные *программы отсутствуют.*

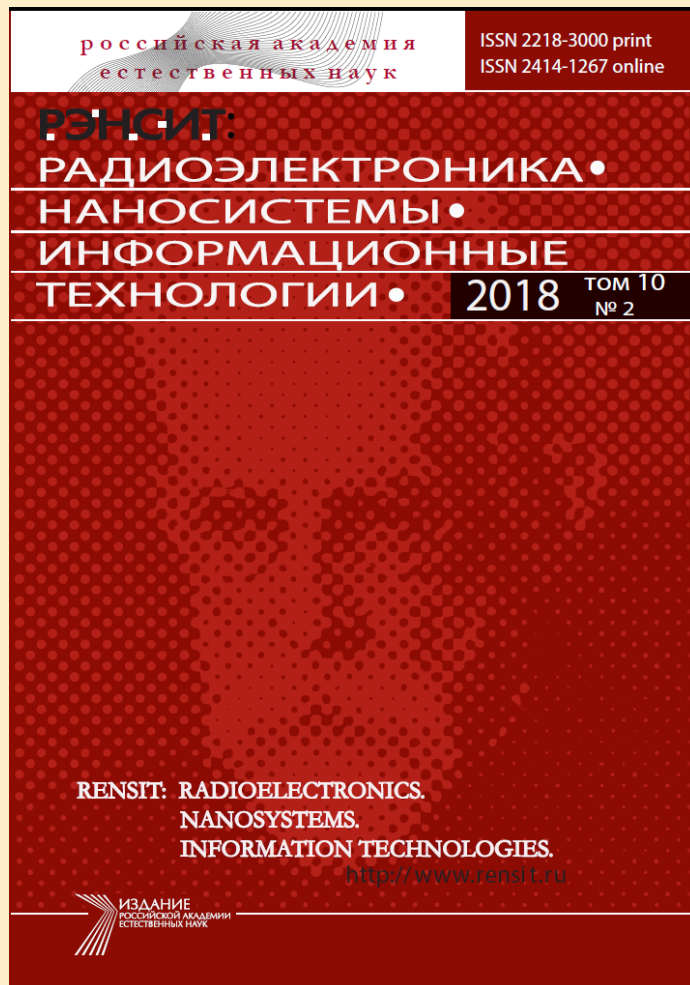
## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ «СПИНТРОНИКА»



Более 30-ти журналов

Interface induced phenomena in Magnetism, *Rev. of Mod. Physics*, 89, 2017  
 F. Hellman, A. Hoffman, Y. Tserkovnyak et al, 27 авторов, 79 стр. Все - США.

# Спинтроника: физические основы и устройства. Ю.К. Фетисов, А.С Сигов, Радиоэлектроника, Наносистемы. Информационные технологии, 2018, № 2.



## РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

107

## СПИНТРОНИКА: ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И УСТРОЙСТВА

Фетисов Ю.К., Сигов А.С.

МИРЭА-Российский технологический университет, <https://www.mirea.ru>

Москва 119454, Российская Федерация

Поступила в редакцию 19.03.2018

"Спинтроника" ("spintronics") представляет собой одно из наиболее быстро развивающихся направлений науки и техники, которое в настоящее время рассматривается как наиболее перспективная технология дальнейшего развития элементной базы информационных технологий. Спинтроника включает в себя физические эффекты, обусловленные спинами отдельных электронов и спин-поляризованными токами, протекающими в тонких магнитных и полупроводниковых пленках и гетероструктурах, и устройства обработки информации на их основе. В обзоре приведены качественные оценки, демонстрирующие потенциальные преимущества спинтронники по сравнению с полупроводниковой микро- и нанозлектроникой. Рассмотрены физические явления, формирующие научную основу спинтронники, такие как доменные микроструктуры, скирмионы, спиновые волны, спин-поляризованный ток, гигантское и туннельное магнетосопротивление, спиновый перенос углового момента. Перечислены перспективные материалы спинтронники, включая ферромагнитные металлы и полупроводники, полуметаллические ферромагнитные оксиды, сплавы Гейслера. Показаны возможности управления спиновыми токами с помощью магнитных полей, механических деформаций в мультиферроичных структурах и сверхкоротких оптических импульсов. Описаны реализованные и находящиеся в стадии создания устройства на принципах спинтронники, такие как высокочувствительные датчики магнитных полей, элементы магнитной памяти с произвольным доступом, наногенераторы сверхвысокочастотного диапазона, спиновые диоды и спиновые транзисторы, спиновый голографический процессор. В заключительной части перечислены основные центры исследований по спинтронике за рубежом и в России, приведен список обзорных публикаций по теме.

**Ключевые слова:** спинтроника, магнитные гетероструктуры, спин-поляризованный ток, спиновые волны, скирмион, магнетосопротивление, туннельный эффект, датчики магнитных полей, спиновый транзистор, спиновый генератор, спиновый процессор

PACS: 67.57.Lm, 72.25.Ba, 75.70.-i, 75.76.+j

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (107)
2. ЭЛЕКТРОНИКА И СПИНТРОНИКА (108)
3. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СПИНТРОНИКИ (109)
  - 3.1. Магнитные структуры и спиновые волны (109)
  - 3.2. Спин-поляризованный ток (111)
  - 3.3. Материалы спинтронники (113)
  - 3.4. Управление эффектами (113)
4. УСТРОЙСТВА СПИНТРОНИКИ (115)
5. ЦЕНТРЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО СПИНТРОНИКЕ (117)
6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (118)
- ЛИТЕРАТУРА (119)

## 1. ВВЕДЕНИЕ

"Спинтроника" ("Spintronics") представляет собой одно из наиболее быстро развивающихся направлений науки и техники, которое, по-

видимому, внесет существенный вклад в развитие электроники и информационных технологий в 21 веке. Практически вся существующая в настоящее время электроника основана на использовании процесса переноса заряда электрона – электрическом токе. Попытка использовать вторую фундаментальную характеристику электрона, его собственный магнитный момент – "спин", открывает новые возможности улучшения характеристик существующих устройств электроники и создания принципиально новых устройств, в том числе: разработку высокочувствительных датчиков магнитных полей, элементов хранения информации с более высокой плотностью записи и большей скоростью переключений, управляемых наногенераторов

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Спинтроника – перспективная технология создания устройств обработки информации следующего поколения с улучшенными характеристиками.
2. В последние ~ 20-30 лет во всех технологически развитых странах мира проводятся интенсивные фундаментальные и прикладные исследования в области спинтроники.
3. На сегодняшний день производятся в массовых масштабах такие устройства спинтроники как МТJ датчики магнитных полей, STT-MRAM элементы памяти. Еще больше устройств находятся в стадии разработки.
4. В России масштаб фундаментальных и особенно прикладных исследований в области спинтроники существенно меньше, чем на Западе.

Причины отставания: отсутствие государственных и целевых программ и ограниченные объемы финансирования.



# СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ

