

Введение в спинтронику

О.С. Трушин

Ярославль, 2010

План

- ▶ Введение (спиновый транспорт - новая парадигма в технике)
- ▶ Физика AMR, GMR эффектов
- ▶ Спиновый вентиль
- ▶ Спин-туннельная структура
- ▶ Обзор работ в области MRAM
- ▶ Технология получения GMR структур
- ▶ Микромагнитное моделирование
- ▶ Вопросы на экзамен

Спиновая поляризация

Spin Polarization

Spintronics and **magnetoelectronics** make use of the **spin degree of freedom** of the electron in addition to its charge.

An imbalance of spin-up and spin-down electrons (*e.g.* in a ferromagnet) can give rise to a spin-polarized current \Rightarrow **Spin-transport**.

The **spin polarization** $P_{current}$ of a current is defined as

$$P_{current} = \frac{J^{\uparrow} - J^{\downarrow}}{J^{\uparrow} + J^{\downarrow}} \quad ; \quad |P_{current}| \leq 1 \quad ; \quad J^{\uparrow, \downarrow}: \text{current densities}$$

Переворот спина

Spin-Flip Länge

The spin orientation of an electron in a solid-state environment is not conserved due to **spin-flip scattering** (e.g. e^-e^- , impurities).

The characteristic length scale is the **spin-flip length λ** . The polarization relaxes to the equilibrium like

$$P(x) = P_0 \exp\left(-\frac{x}{\lambda}\right)$$

λ depends on the material and its quality (e.g. purity, crystallinity)

$\lambda \approx 1-10$ nm for Py (NiFe alloy)

50 nm for Co

100 nm for Cu

(100 μm for 2DEG GaAs/GaAlAs)

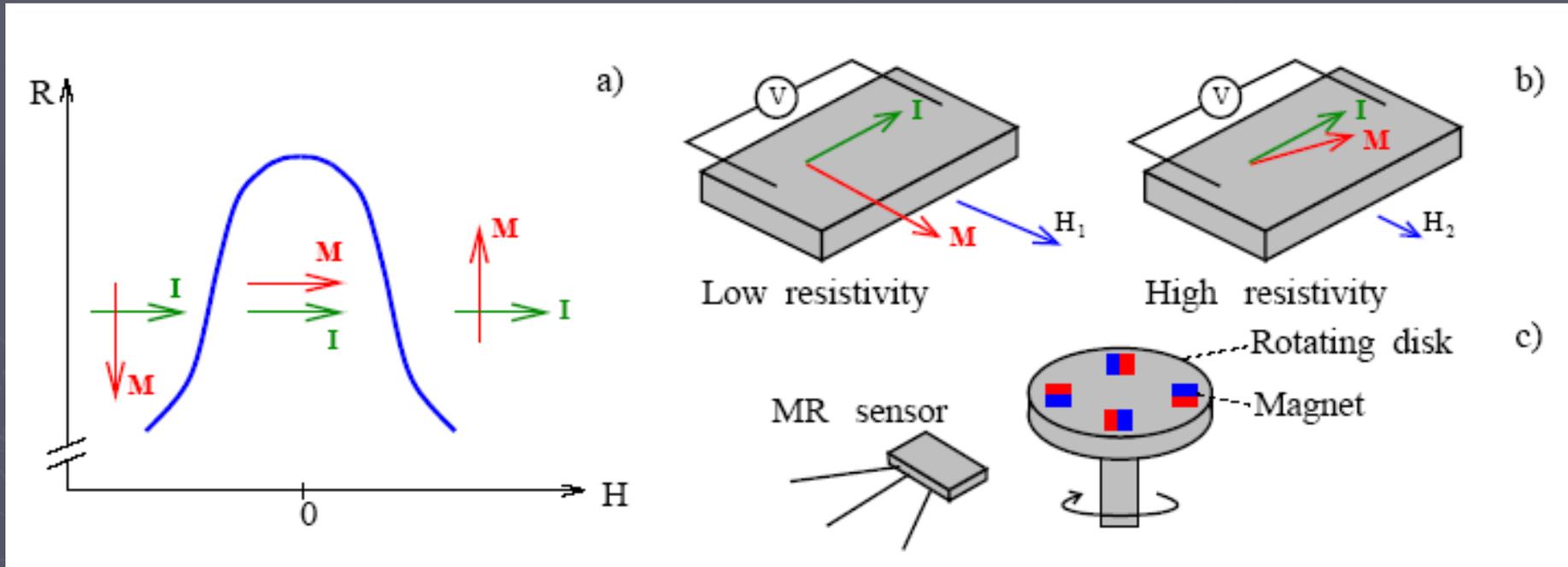
\Rightarrow **Layered systems** with individual layer thickness of a few nm

Новая парадигма в технике

- ▶ Электроника – техника хранения и передачи заряда
- ▶ Спинтроника - техника хранения и передачи СПИНА

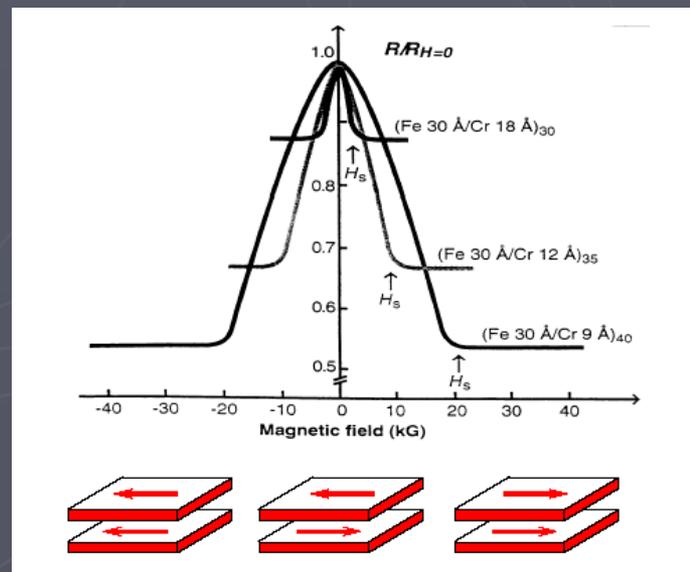
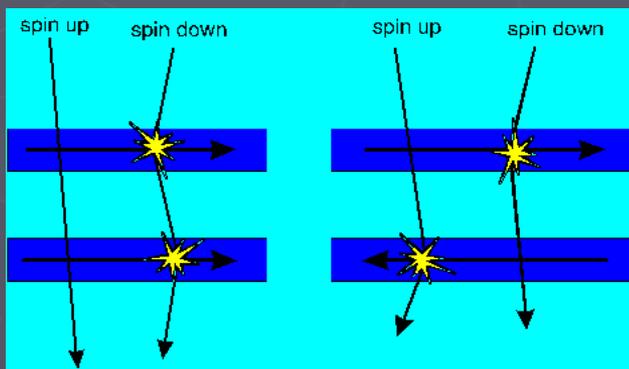
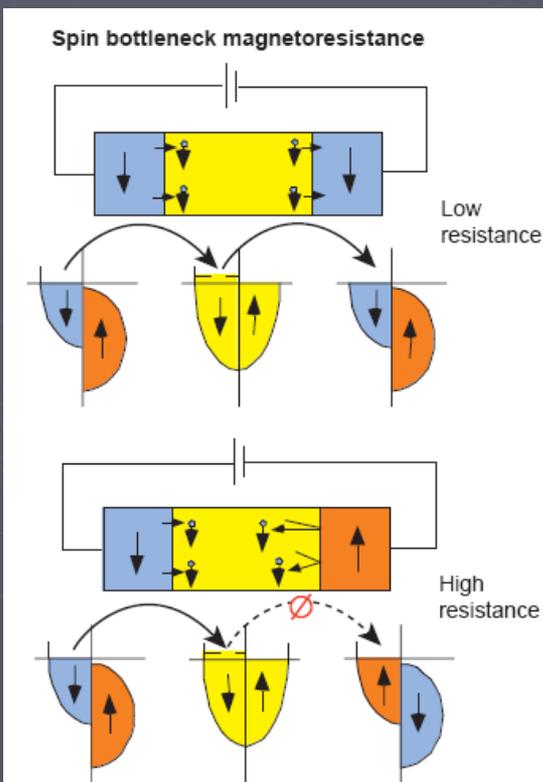
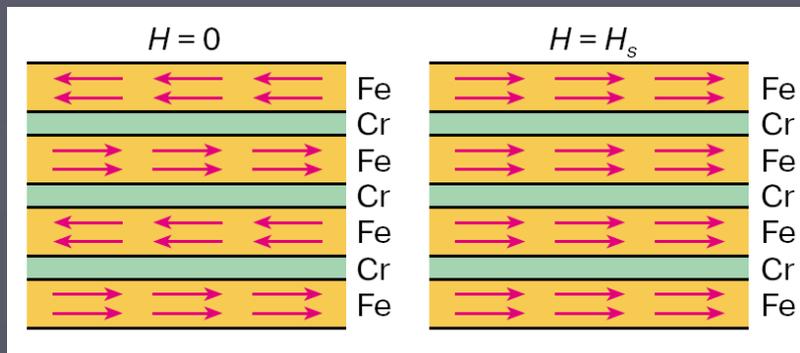
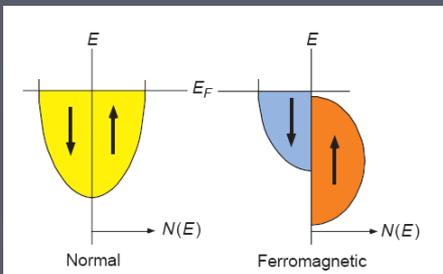
AMR эффект

Применения в технологии



$$R = R_0 + R_{AMR} \cos 2\theta$$

GMR эффeкT



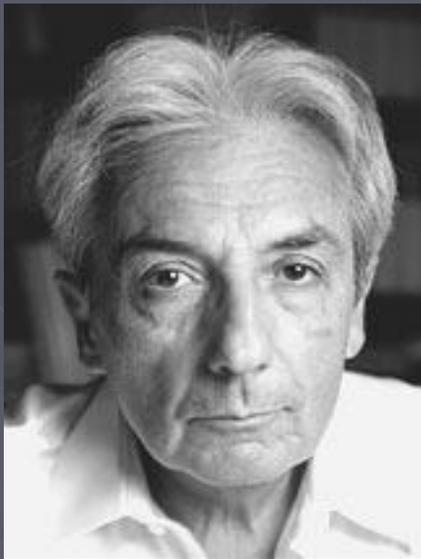
T=4.2 K

$$R = R_P + \frac{\Delta R_{GMR}}{2} (1 - \cos \theta)$$

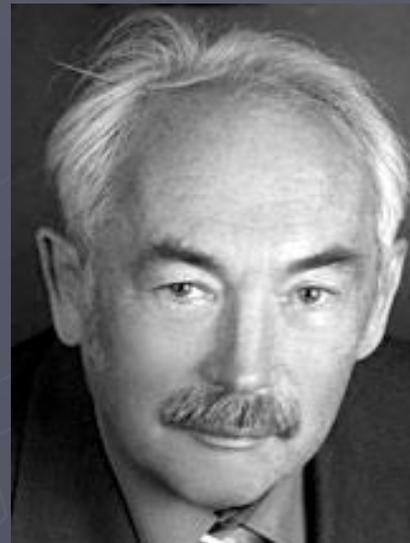
M.N. Baibich et al, and A. Fert
Phys.Rev.Lett. v61, p.2472 (1988)

Нобелевская премия по физике за 2007

Открытие GMR эффекта

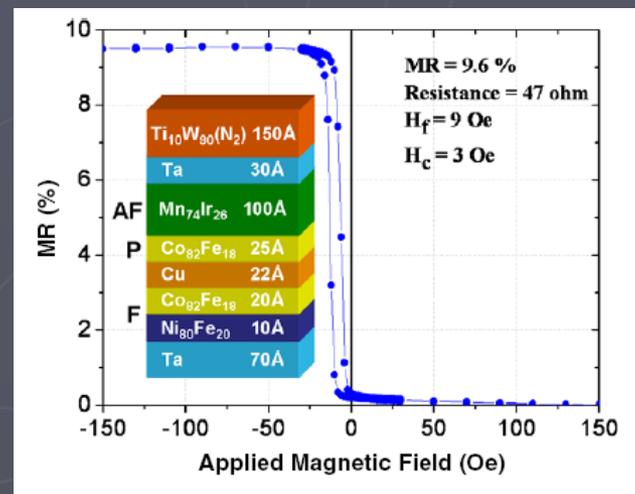
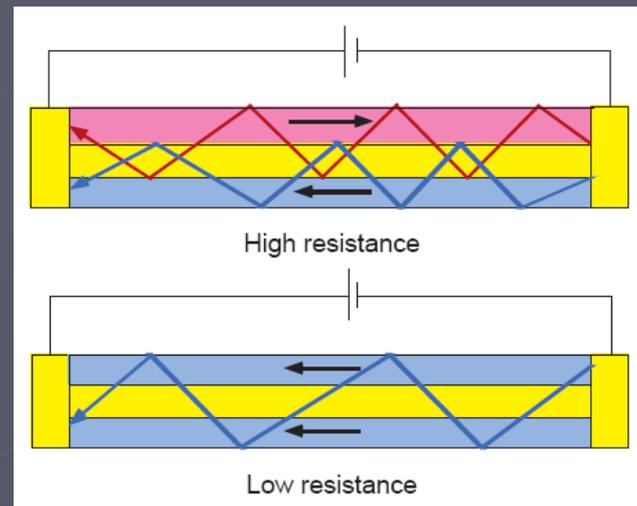
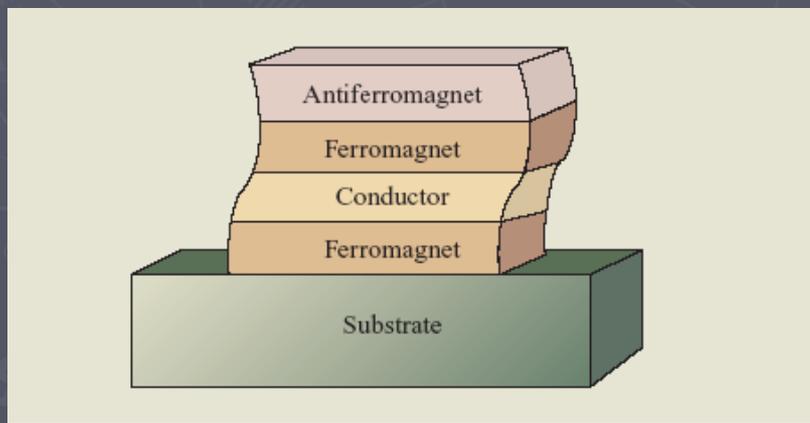
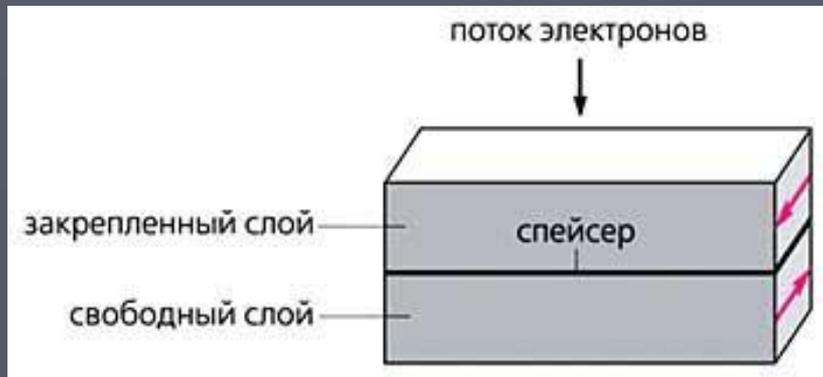


Albert Fert
University Paris-Sud;
Unity Mixte de Physique
CNRS/THALES
Orsay, France



Peter Grunberg
Forschungszentrum Julich
Julich, Germany

Спиновый вентиль



Maximal MR effect < 20%

Сравнение CIP и CPP геометрии

CIP vs. CPP

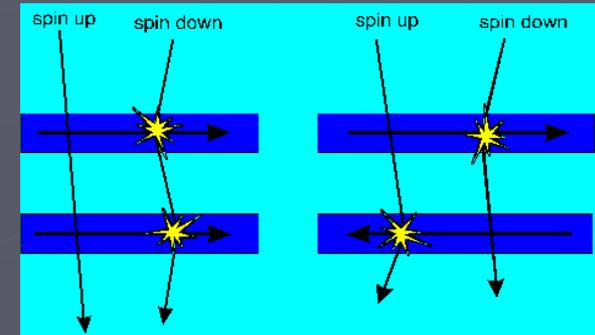
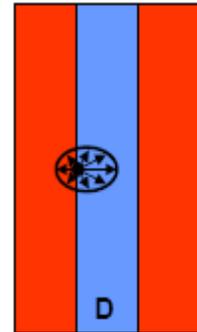
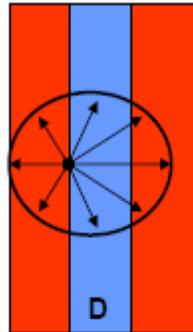
CPP

Current perpendicular to plane

CPP-GMR requirement:
Spin-flip length $< D$

Cu : 100 nm

most electrons feel both interfaces



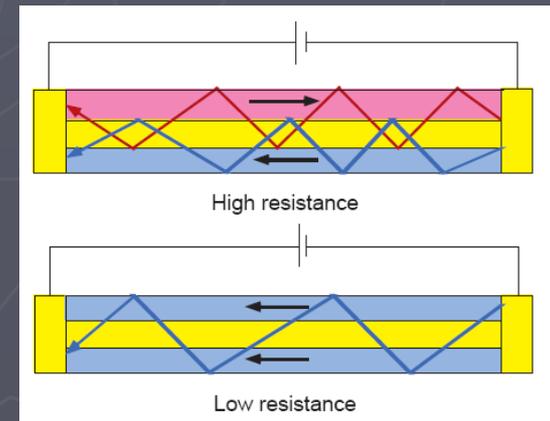
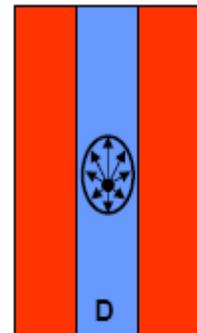
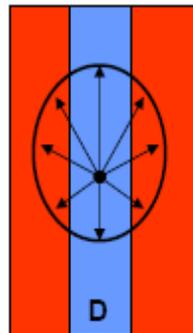
CIP

Current in plane

CIP-GMR requirement:
Mean free path $< D$

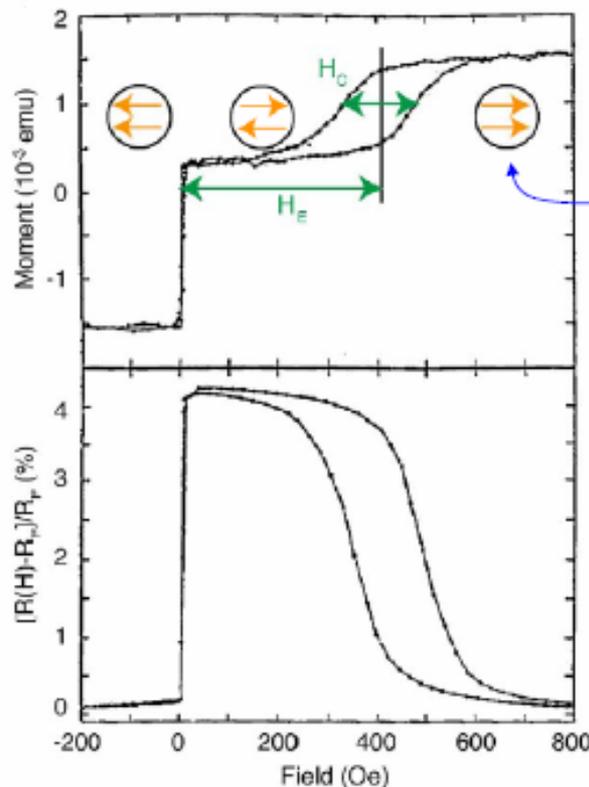
Cu @ RT: 40 nm

most of current carried
by electrons which scatter at interfaces



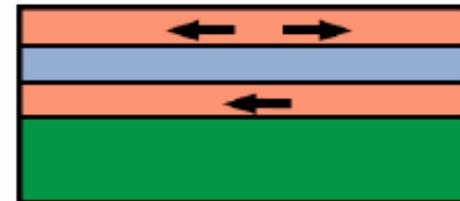
СПИНОВЫЙ ВЕНТИЛЬ

Spin Valve



Need extra field to pull the bottom layer in this direction (exchange bias field)

6 nm Ni₈₀Fe₂₀
2.2 nm Cu
4 nm Ni₈₀Fe₂₀
7 nm FeMn



The steep slope at zero field makes spin-valves sensitive field sensors.

Первая публикация о SV

RAPID COMMUNICATIONS

PHYSICAL REVIEW B

VOLUME 43, NUMBER 1

1 JANUARY 1991

Giant magnetoresistance in soft ferromagnetic multilayers

B. Dieny,* V. S. Speriosu, S. S. P. Parkin, B. A. Gurney, D. R. Wilhoit, and D. Mauri†
 IBM Research Division, Almaden Research Center, 650 Harry Road, San Jose, California 95120-6099
 (Received 25 July 1990; revised manuscript received 21 September 1990)

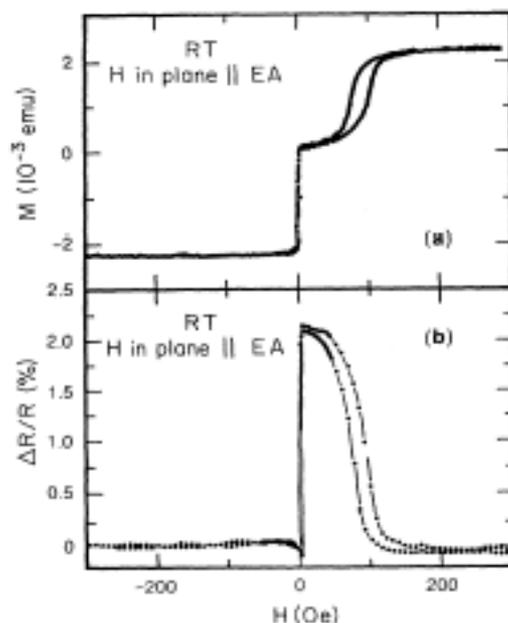


FIG. 1. Magnetization curve (a) and relative change in resistance (b) for Si/(150-Å NiFe)/(26-Å Cu)/(150-Å NiFe)/(100-Å FeMn)/(20-Å Ag). The field is applied parallel to the exchange anisotropy field created by FeMn (EA). The current is flowing anisotropic to this direction.

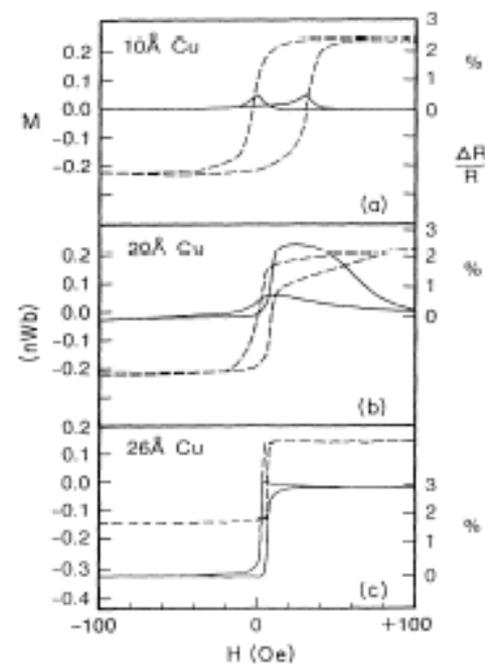


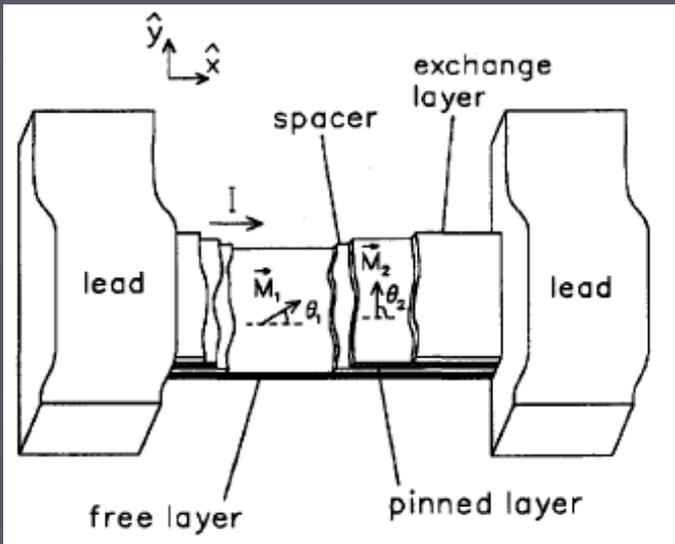
FIG. 3. Evolution of magnetization (dashed) and magneto-resistance (solid) curves for Si/(50-Å NiFe)/(x Cu)/(30-Å NiFe)/(60-Å FeMn)/(20-Å Ag) with Cu layer thickness $x = 10, 20, \text{ and } 26 \text{ \AA}$. In (c), only the soft film reverses its magnetization direction in the field range $\pm 100 \text{ Oe}$.

Магнетрон,
комнатная
температура,
Р базовое
 10^{-7} мм.рт.ст.,
скорость роста
0.5-2.0 A/s,

4x-зондовый

Поперечный
эффект

Первый прототип датчика на SV



$$\Delta R \approx \frac{\Delta R}{R} R_{\square} \frac{W}{h} \frac{\langle \cos(\theta_1 - \theta_2) \rangle}{2}$$

$$\Delta R/R = (R_{\uparrow\uparrow} - R_{\uparrow\downarrow})/R_{\uparrow\uparrow}$$

(Ni₈₀Fe₂₀ 60 Å) / (Cu 25 Å) / (Co 50 Å)

($\Delta R/R$, H_F, R_□)

7.6%, 12 Oe, and 15.3 Ω/□

5.8%, 10 Oe, and 14.7 Ω/□

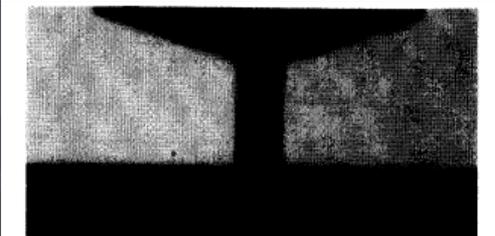


Fig. 3. Photomicrograph of an unshielded spin valve sensor. The sensor dimensions are 2 μm x 10 μm.

IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 30, NO. 2, MARCH 1994

DESIGN AND OPERATION OF SPIN VALVE SENSORS

D. E. Heim

IBM Storage Systems Division, 5600 Cottle Rd., San Jose, CA 95193

R. E. Fontana, Jr., C. Tsang, V. S. Speriosu, B. A. Gurney, M. L. Williams

IBM Research Division, Almaden Research Center, 650 Harry Rd., San Jose, CA 95120

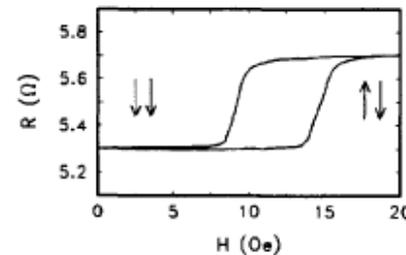


Fig. 4. Coupon measurement of the magnetoresistance of the nano-layered spin valve (Ni₈₀Fe₂₀ 60 Å) / (Co 10 Å) / (Cu 25 Å) / (Co 10 Å) / (Ni₈₀Fe₂₀ 30 Å). $\Delta R/R = 7.6\%$, R_□ = 15.3 Ω/□, and the ferromagnetic coupling field is H_F = 12 Oe. The relative orientations of the free and pinned layers is indicated by the parallel arrows.

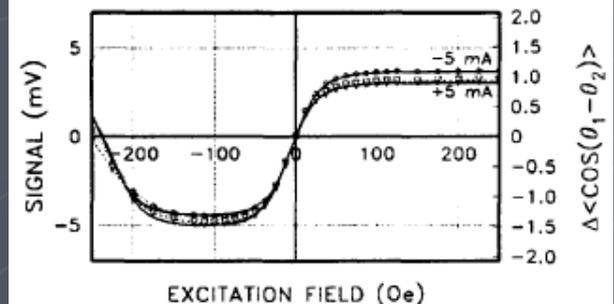


Fig. 7. Experimental transfer curve for the 6 μm high nano-layered spin valve sensor for +5 mA and -5 mA sense current. The solid lines are the computed transfer curves.

Влияние качества интерфейса

JOURNAL OF APPLIED PHYSICS

VOLUME 91, NUMBER 6

15 MARCH 2002

Improved interfaces and magnetic properties in spin valves using $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ seed layer

Edward J. Repetski, David X. Yang, and Harsh Deep Chopra^{a)}

Department of Thin Films & Nanosynthesis Laboratory, Materials Program, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, State University of New York, Buffalo, New York 14260

P. J. Chen and W. F. Egelhoff, Jr.

Magnetic Materials Group, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland 20899

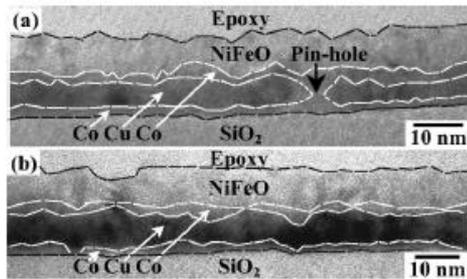


FIG. 4. (a), (b) Typical cross-section TEM micrographs of seedless top spin valve. See text for explanation. In (a) and (b), the dashed lines indicating the Co-Cu and Co-($\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$)O interfaces are approximate lines since the interfaces are rough along the beam direction, which makes their projections broad.

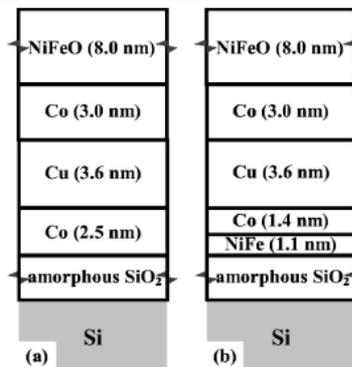


FIG. 1. (a) Schematic of the ($\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$)O-Co-Cu-based top spin valve without $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ as the seed layer. (b) Schematic of the ($\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$)O-Co-Cu-based top spin valve with $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ as the seed layer.

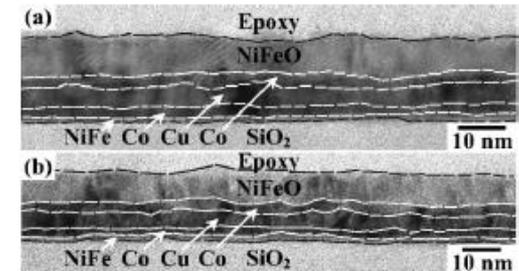


FIG. 5. (a), (b) Typical cross-section TEM micrographs of top spin valve with $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ as the seed layer.

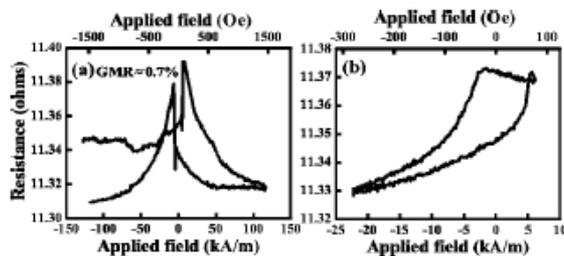


FIG. 2. (a), (b) High-field and low-field GMR loops of the seedless top spin valve, respectively.

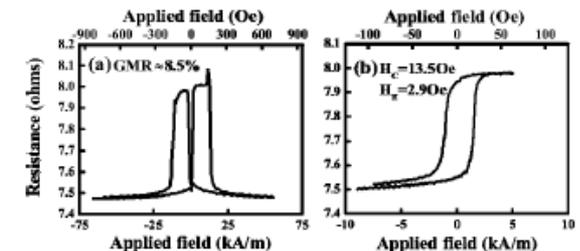
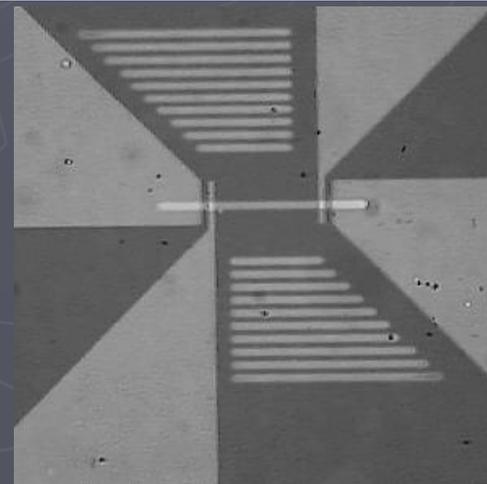
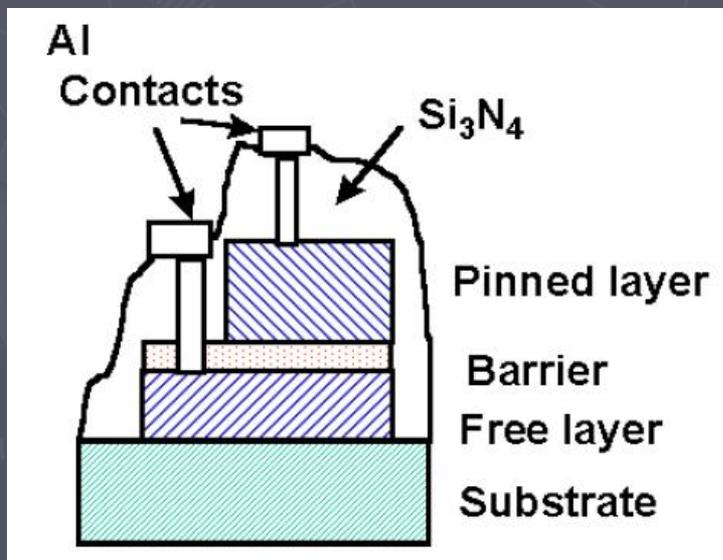
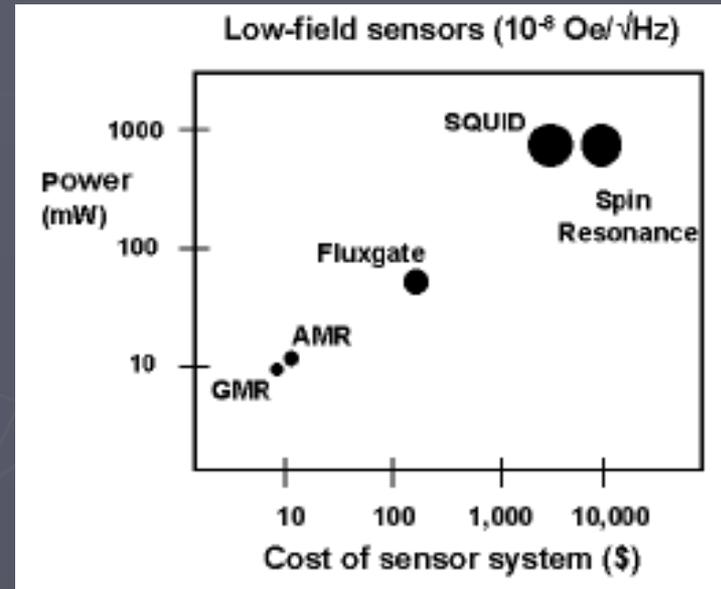
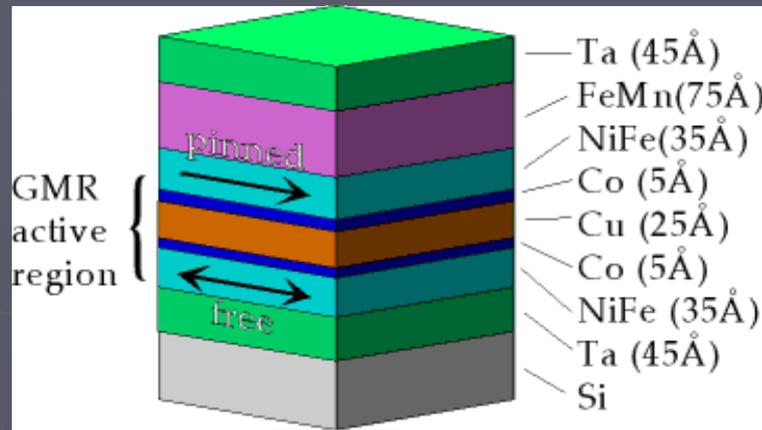
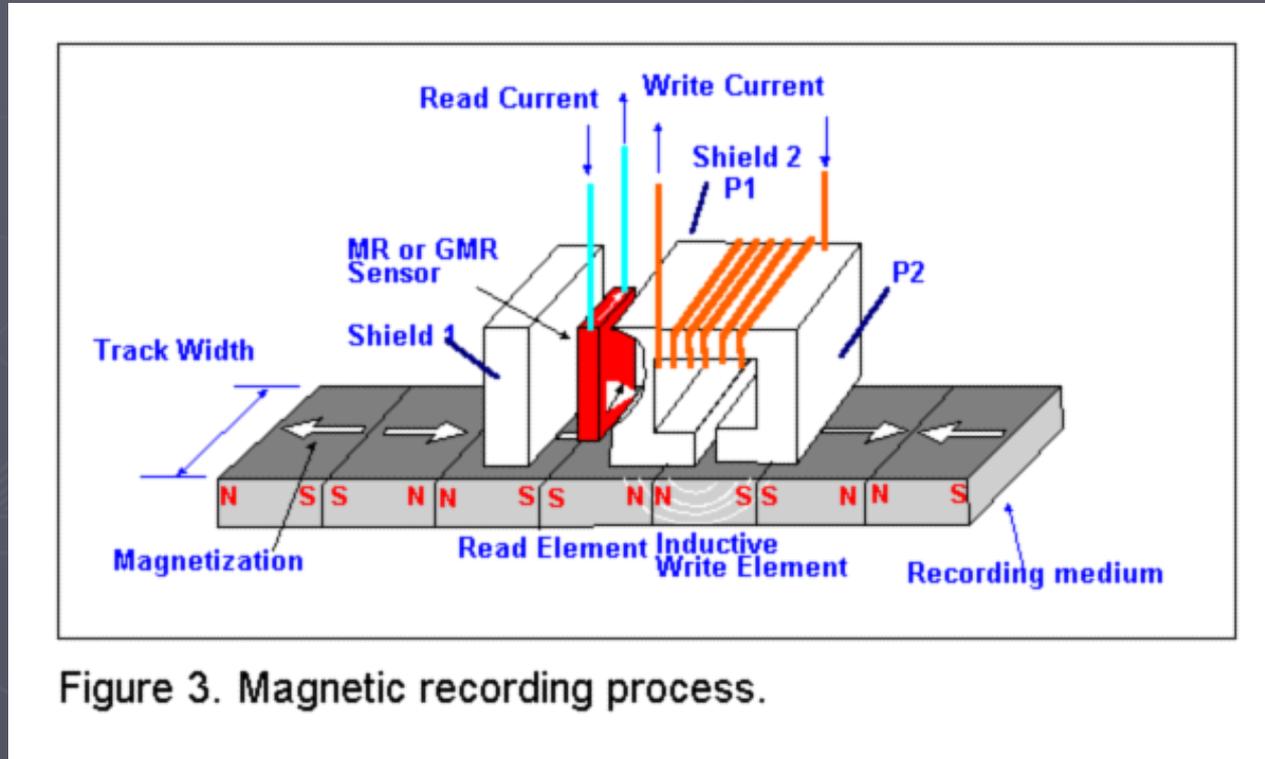


FIG. 3. (a), (b) High-field and low-field GMR loops of top spin valve, respectively, with $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ as the seed layer.

Магнитные сенсоры на GMR эффekte

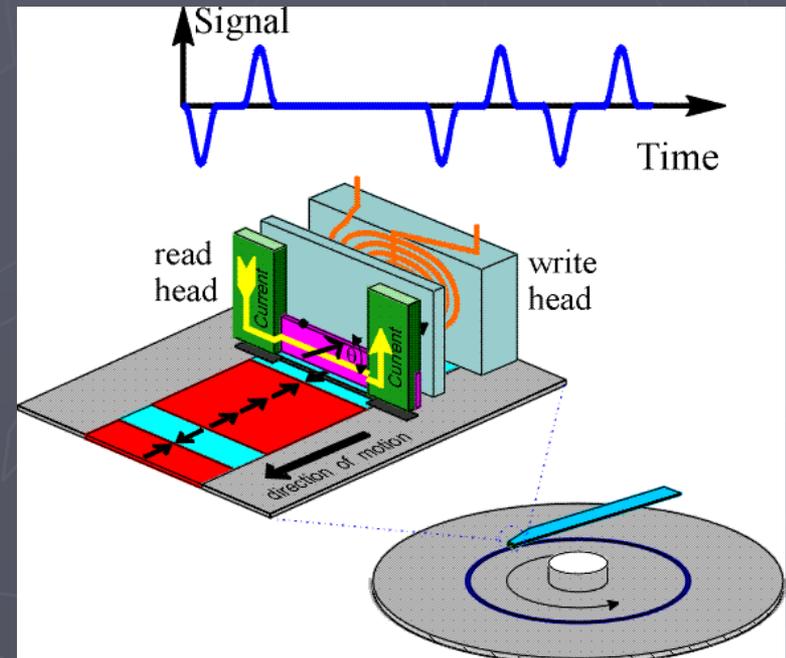
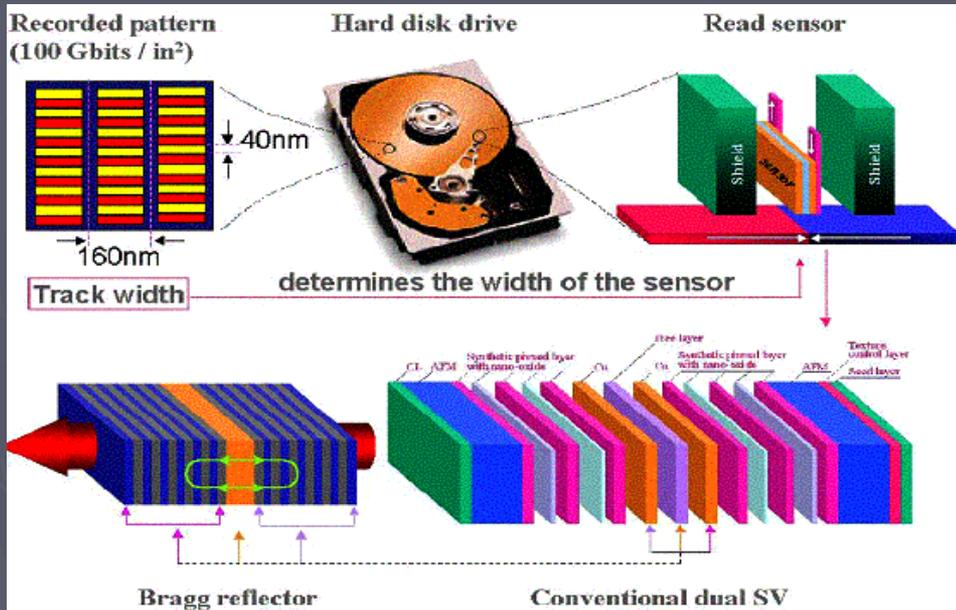


Использование GMR сенсора для чтения жесткого диска

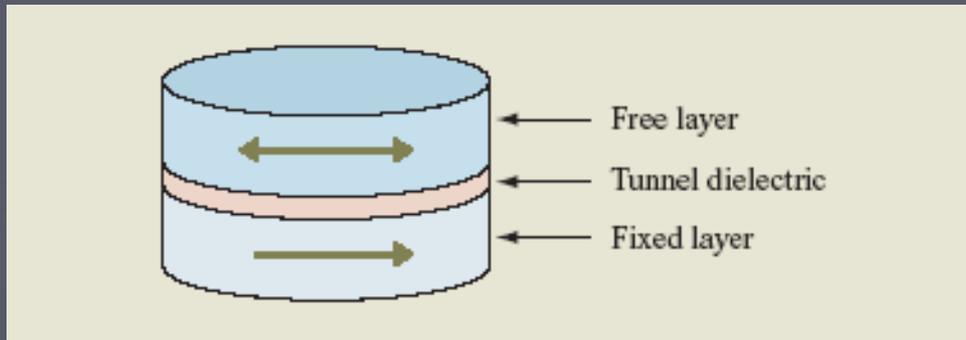


<http://www.storage.ibm.com/hardsoft/diskdrdl/technolo/gmr/gmr.htm>

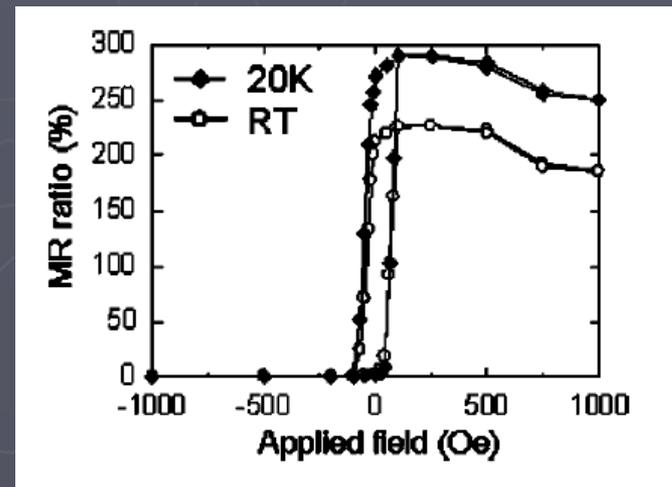
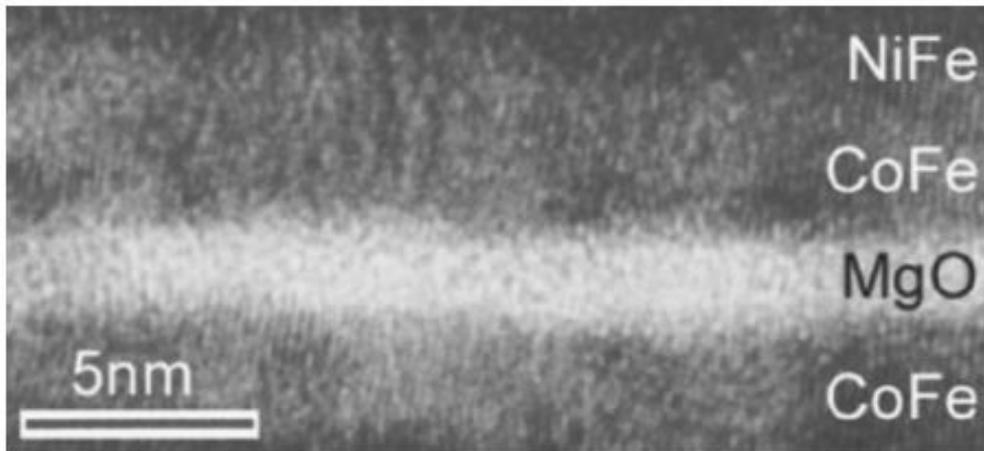
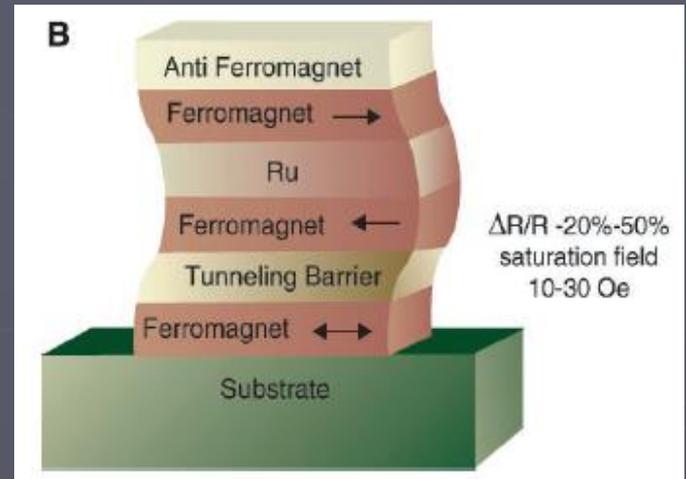
Головка чтения для жесткого диска на ГМР эффекте



Спин-туннельная структура

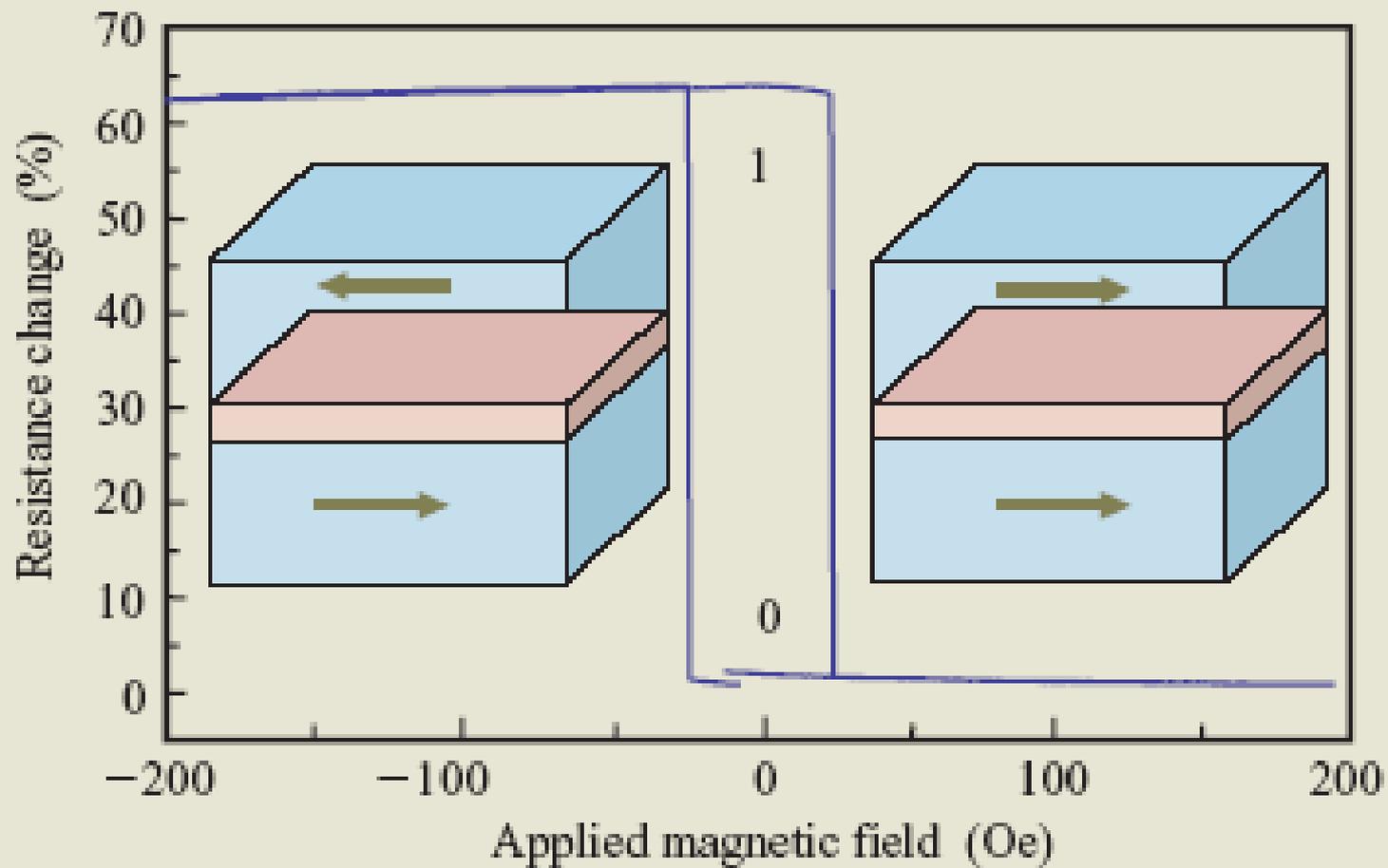


David D. Djayaprawira, et al,
APPL. PHYS. LET. 86, 092502 (2005)

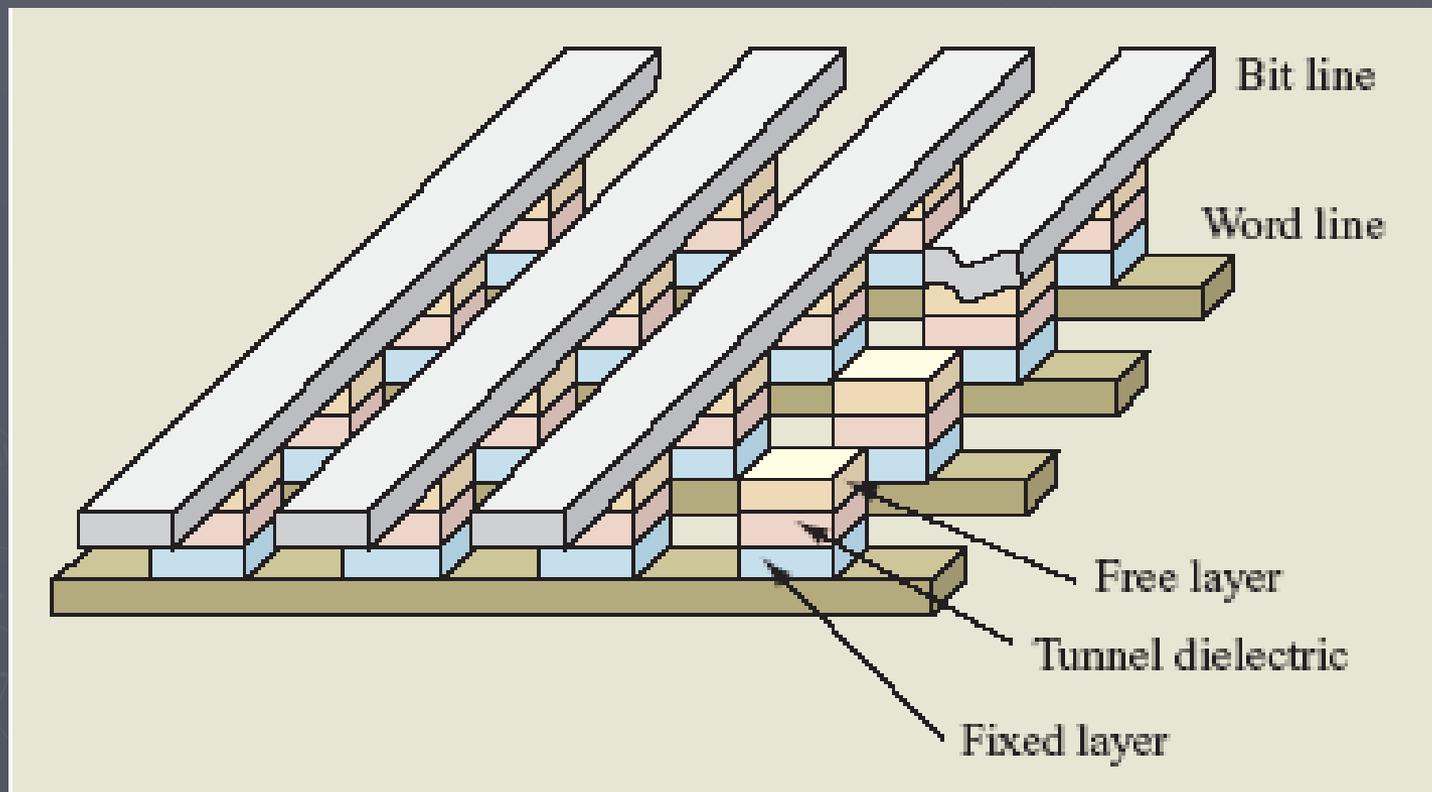


Maximal GMR effect up to 350%

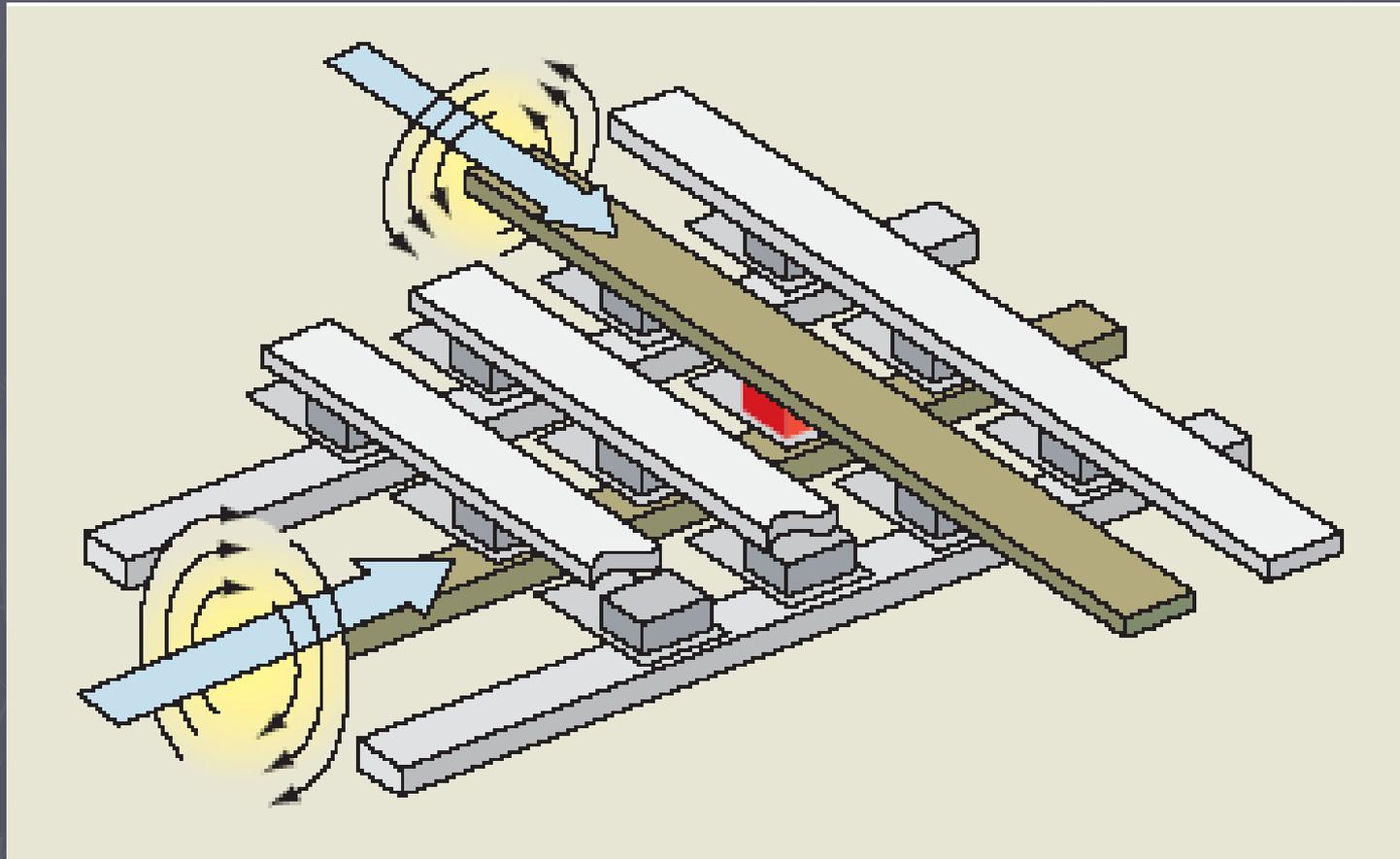
MRAM на GMR эффeкте



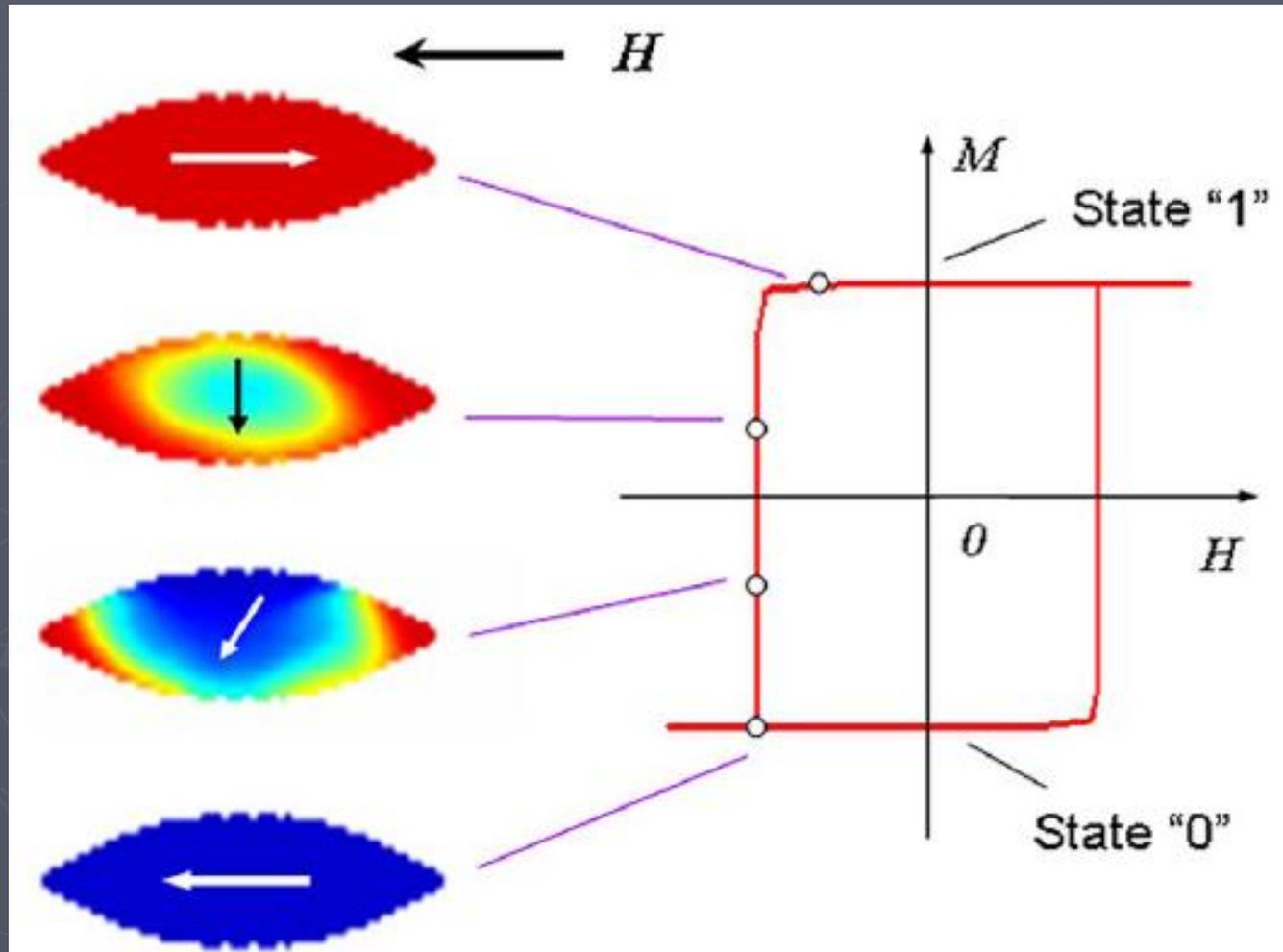
Топология матрицы памяти



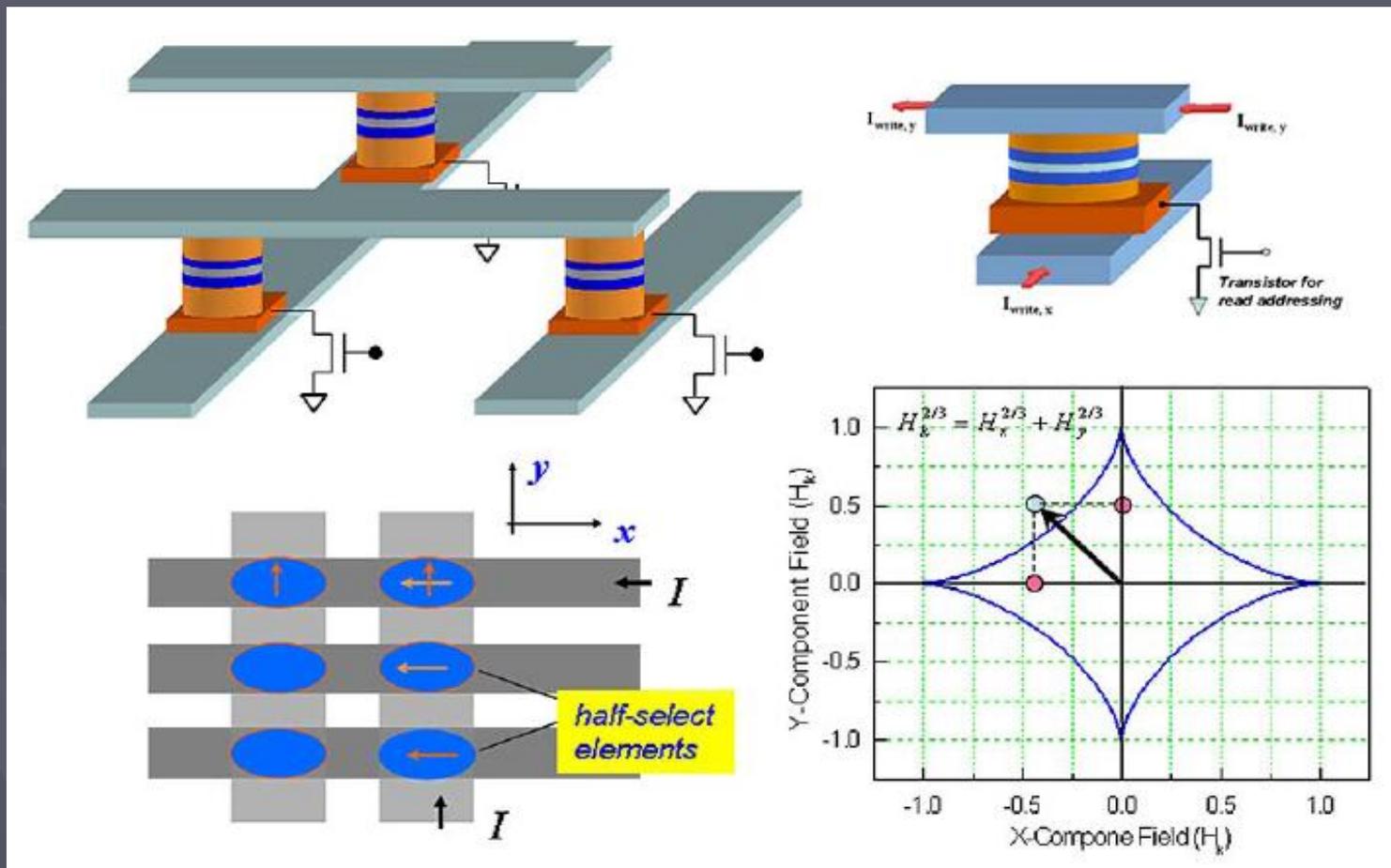
Переключение GMR структуры МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ ТОКОВ



Анизотропия формы МТJ элемента



Топология матрицы памяти на МТJ элементах

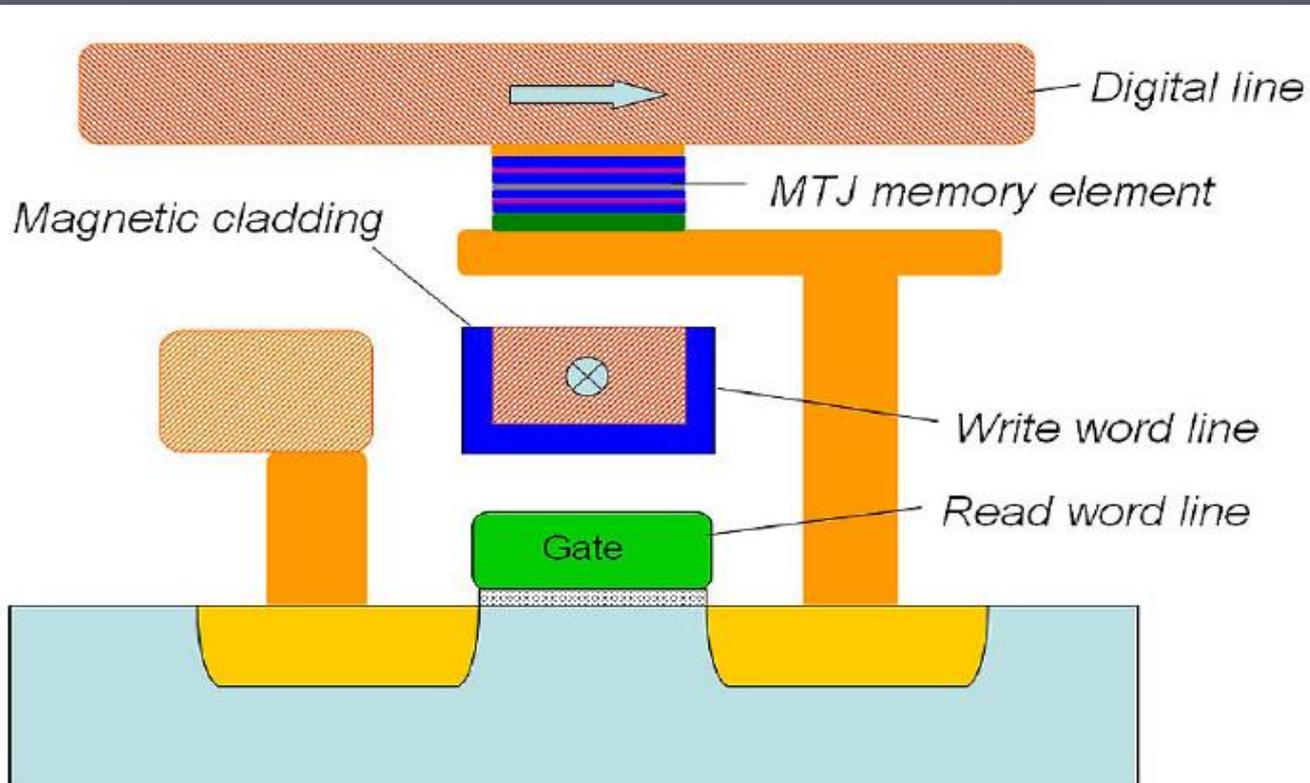


Пороговое поле
переключения

$$H_x^{2/3} + H_y^{2/3} = H_k^{2/3}$$

Поле анизотропии

Конструкция элемента Toggle Mode интегрированного с транзистором для адресации чтения



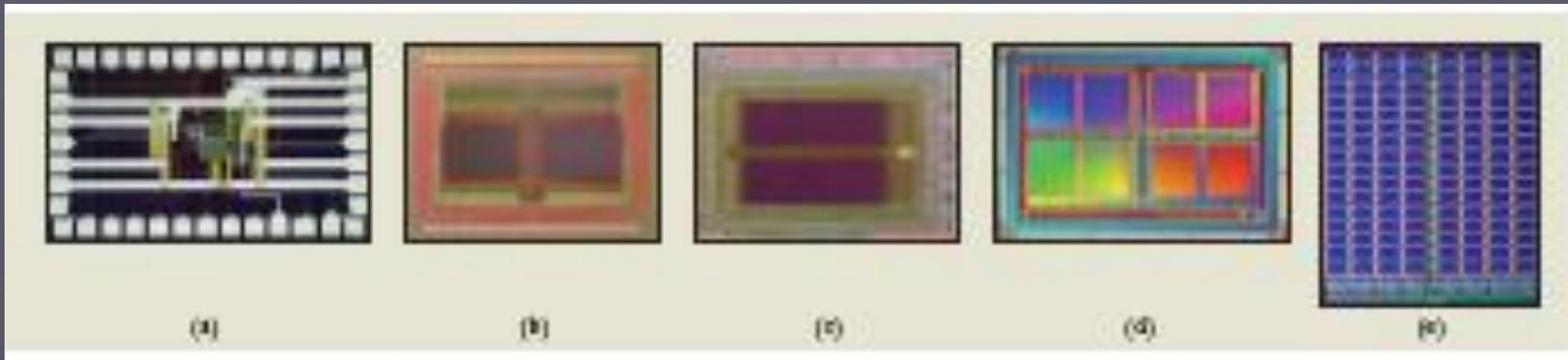
Главная проблема
-большой ток записи
(10 mA)

Достигнуто 4 Mb

Однако затруднено
дальнейшее увеличение
плотности записи !!!

Концентрация магнитного потока словарной линии за счет магнитного экранирования

История развития MRAM



Photomicrographs (not to scale) showing the increasing density of prototype MRAM chips: (a) IBM 1-mm \times 1.5-mm 1-Kb chip with a $5.4\text{-}\mu\text{m}^2$ twin cell in $0.25\text{-}\mu\text{m}$ technology with approximately 3–10-ns access time. From [22], with permission; ©2000 IEEE. (b) Motorola 3.9-mm \times 3.2-mm 256-Kb chip with $7.1\text{-}\mu\text{m}^2$ cell in $0.6\text{-}\mu\text{m}$ technology with 35-ns access time. From [23], with permission; ©2001 IEEE. (c) Motorola 4.25-mm \times 5.89-mm 1-Mb chip with $7.1\text{-}\mu\text{m}^2$ cell in $0.6\text{-}\mu\text{m}$ technology with 50-ns access time. From [24], with permission; ©2002 IEEE. (d) Motorola 4.5-mm \times 6.3-mm 4-Mb chip with $1.55\text{-}\mu\text{m}^2$ cell in 180-nm technology with 25-ns access time. From [17], with permission; ©2003 IEEE. (e) IBM 7.9-mm \times 10-mm 16-Mb chip with $1.42\text{-}\mu\text{m}^2$ cell in 180-nm technology with 30-ns access time. Adapted from [21], with permission; ©2004 IEEE.

Основные преимущества MRAM

- ▶ Высокая скорость доступа (как у SRAM)
- ▶ Высокая плотность записи (как у DRAM)
- ▶ Энергонезависимость (как у FLASH)
- ▶ Радиационная стойкость

“DREAM MEMORY”

Может заменить все виды памяти в компьютере

Сравнение современных технологий RAM

	<i>Standard MRAM</i> (90 nm)*	<i>DRAM</i> (90 nm)†	<i>SRAM</i> (90 nm)†	<i>SMT-MRAM</i> (90 nm)*	<i>FLASH</i> (90 nm)†	<i>FLASH</i> (32 nm)†	<i>SMT-MRAM</i> (32 nm)*
<i>Cell size</i> (μm^2)	0.25 256 Mb/cm	0.25 256 Mb/cm	1–1.3 64 Mb/cm	0.12 512 Mb/cm	0.1 512 Mb/cm	0.02 2.5 Gb/cm	0.01 5 Gb/cm
<i>Read time</i>	10 ns	10 ns	1.1 ns	10 ns	10–50 ns	10–50 ns	1 ns
<i>Program time</i>	5–20 ns	10 ns	1.1 ns	10 ns	0.1–100 ms	0.1–100 ms	1 ns
<i>Program energy per bit</i>	120 pJ	5 pJ Needs refresh	5 pJ	0.4 pJ	30–120 nJ	10 nJ	0.02 pJ
<i>Endurance</i>	$>10^{15}$	$>10^{15}$	$>10^{15}$	$>10^{15}$	$>10^{15}$ read, $>10^6$ write	$>10^{15}$ read, $>10^6$ write	$>10^{15}$
<i>Nonvolatility</i>	yes	no	no	yes	yes	yes	yes

Проблемы коммерциализации

- ▶ Уже имеются на рынке MRAM 4 Мб (Freescale Semiconductor)

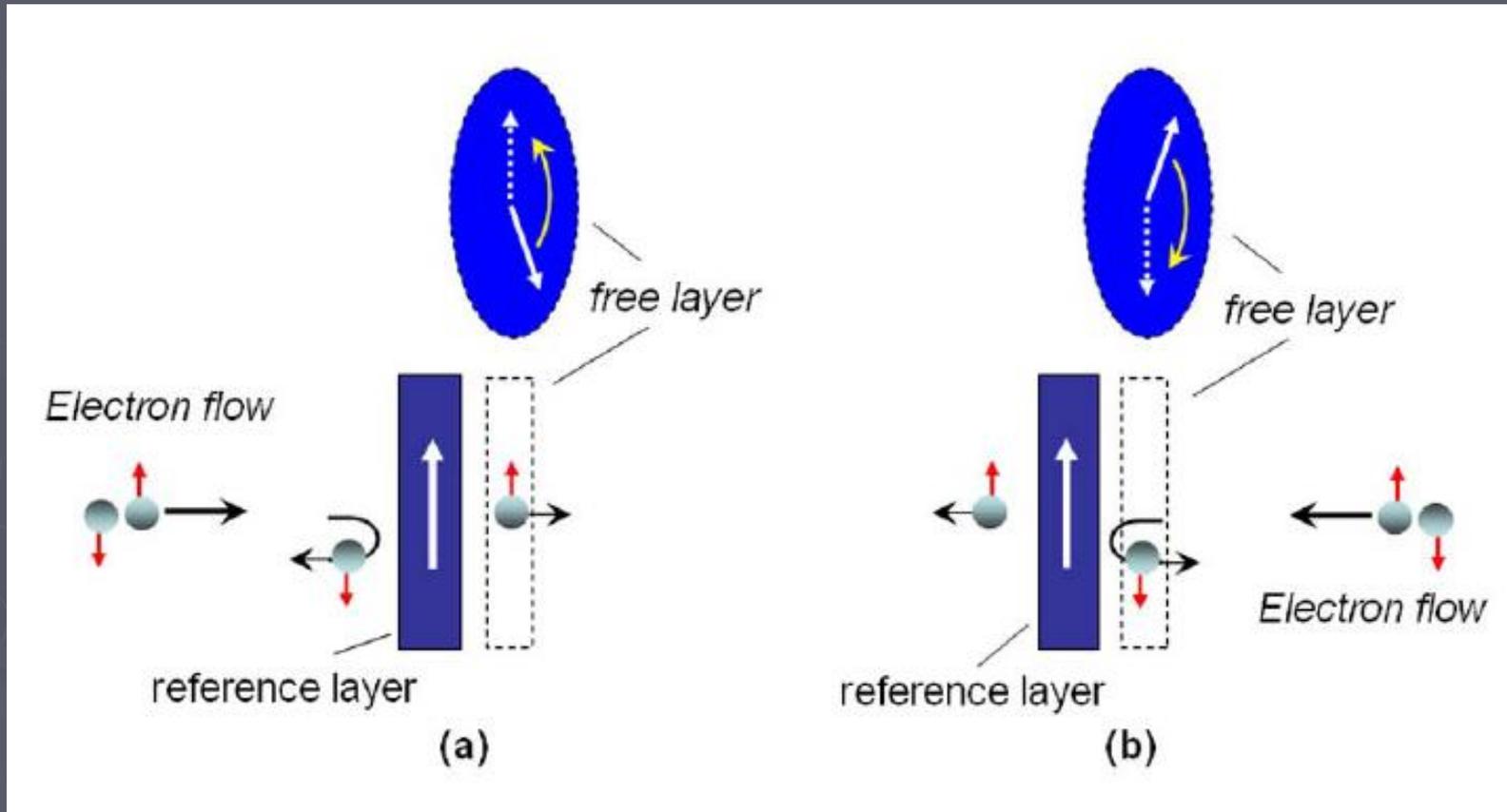
Однако ограниченный коммерческий успех

Другие виды памяти имеют преимущества перед существующей технологией MRAM

(переключение магнитным полем токов адресных линий)

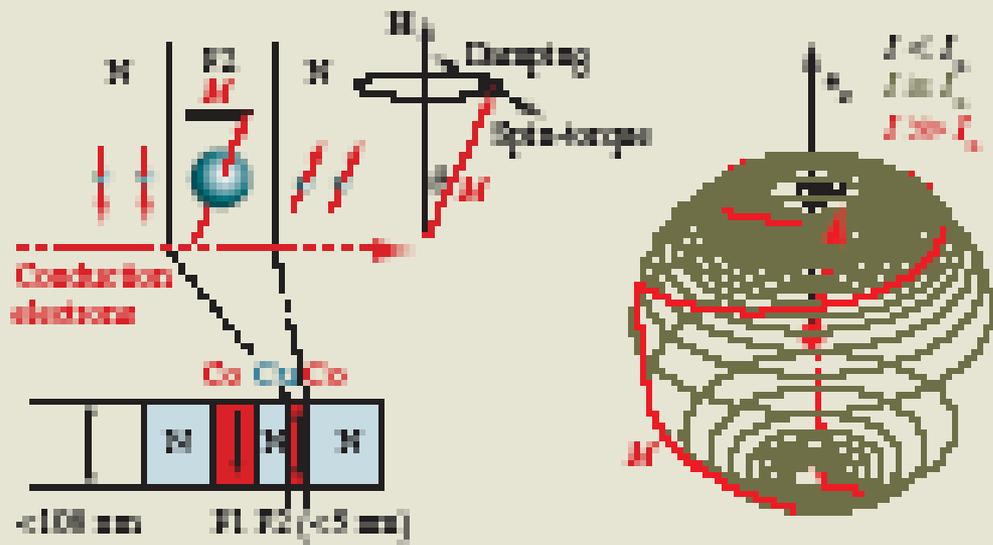
Новые надежды – эффект СПИНОВОГО РЫЧАГА - STT MRAM (spin torque transfer)

Эффект передачи спинового момента («спиновый рычаг»)

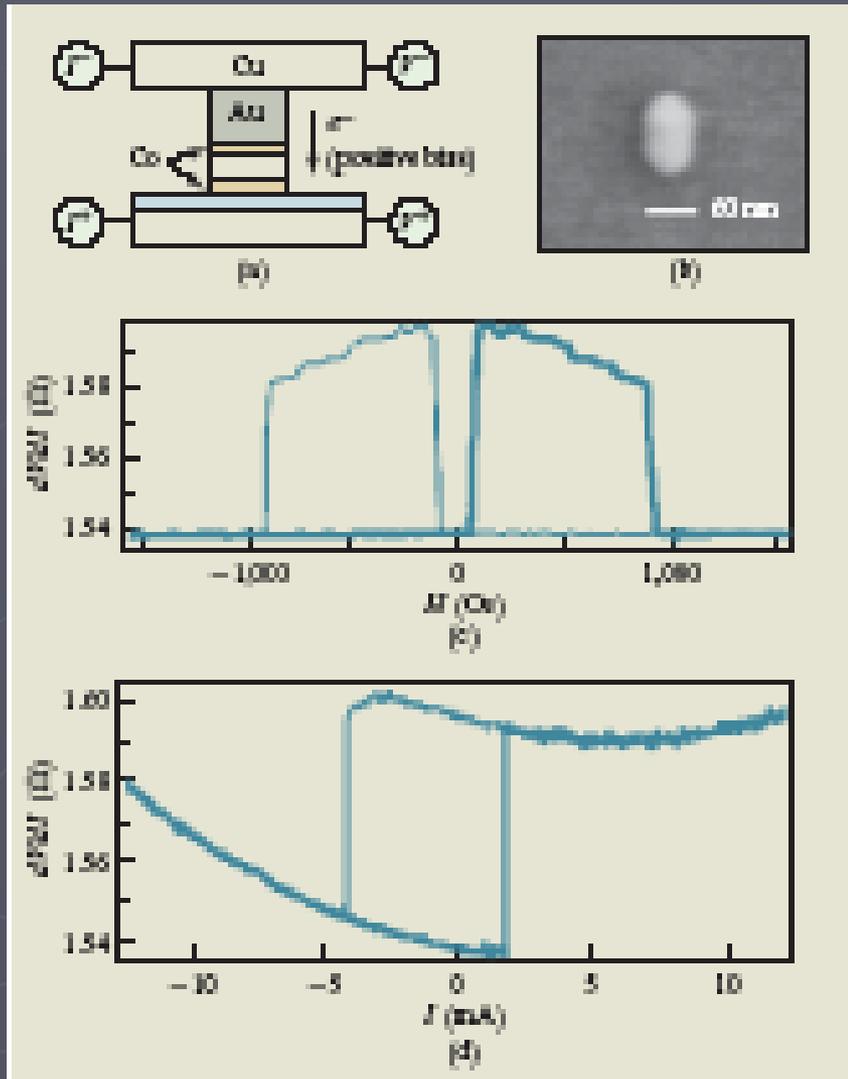


$$J_{CO} = \left(\frac{\alpha}{\eta}\right) \left(\frac{2e}{\hbar}\right) (M_{StF})(H_k + 2\pi M_S)$$

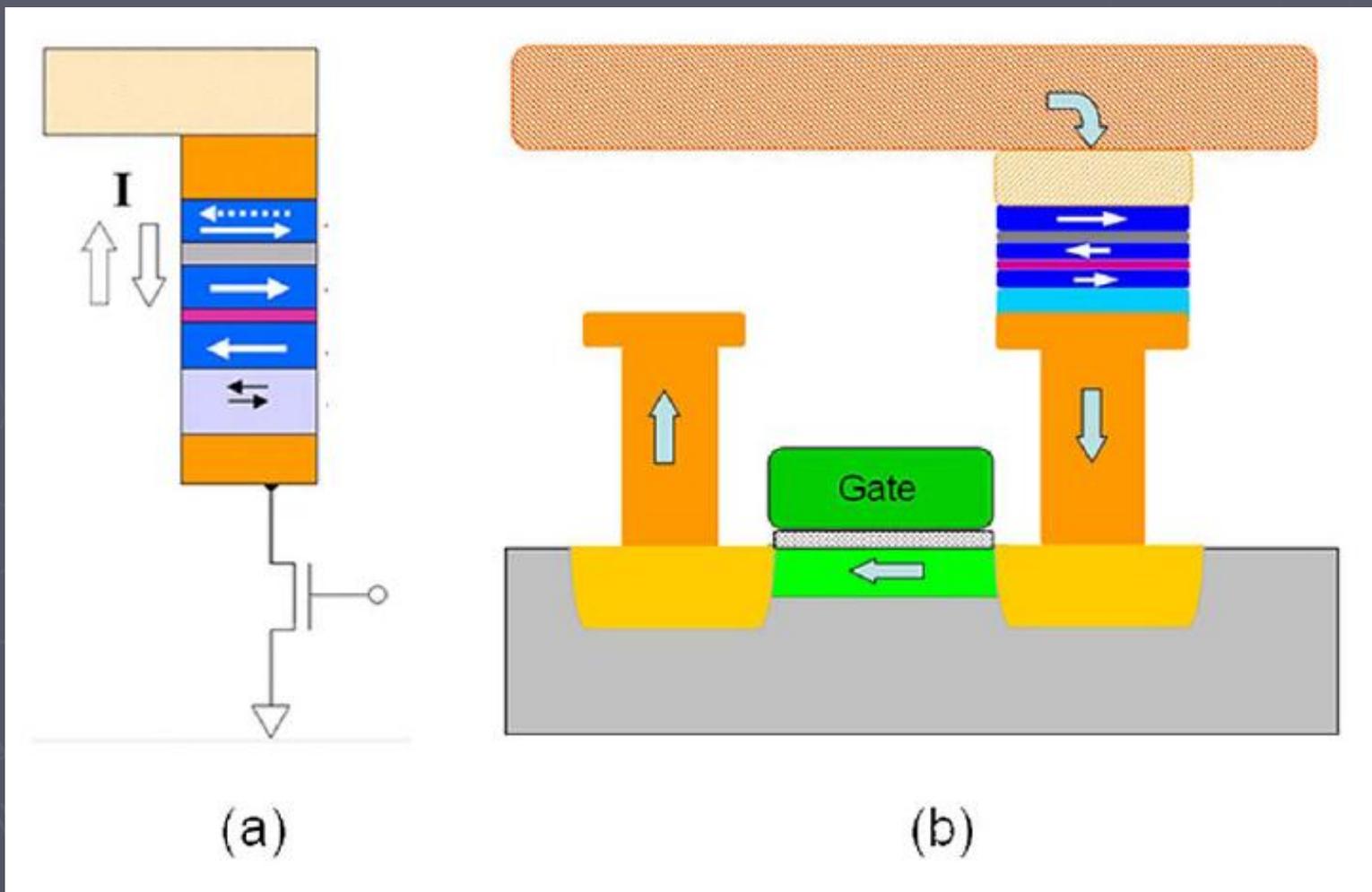
Переключение с помощью SPIN TORQUE эффекта



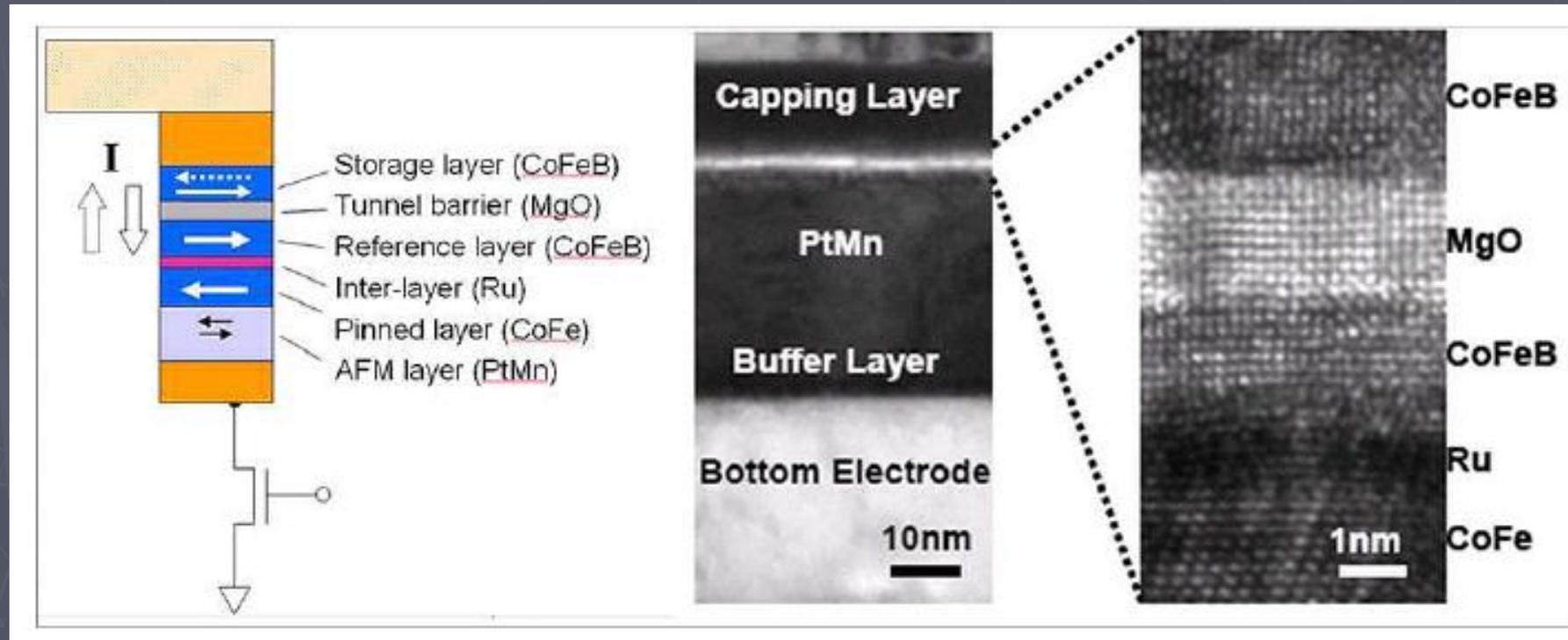
Первое убедительное свидетельство переключения спинполяризованным током (Katine et al, 1999)



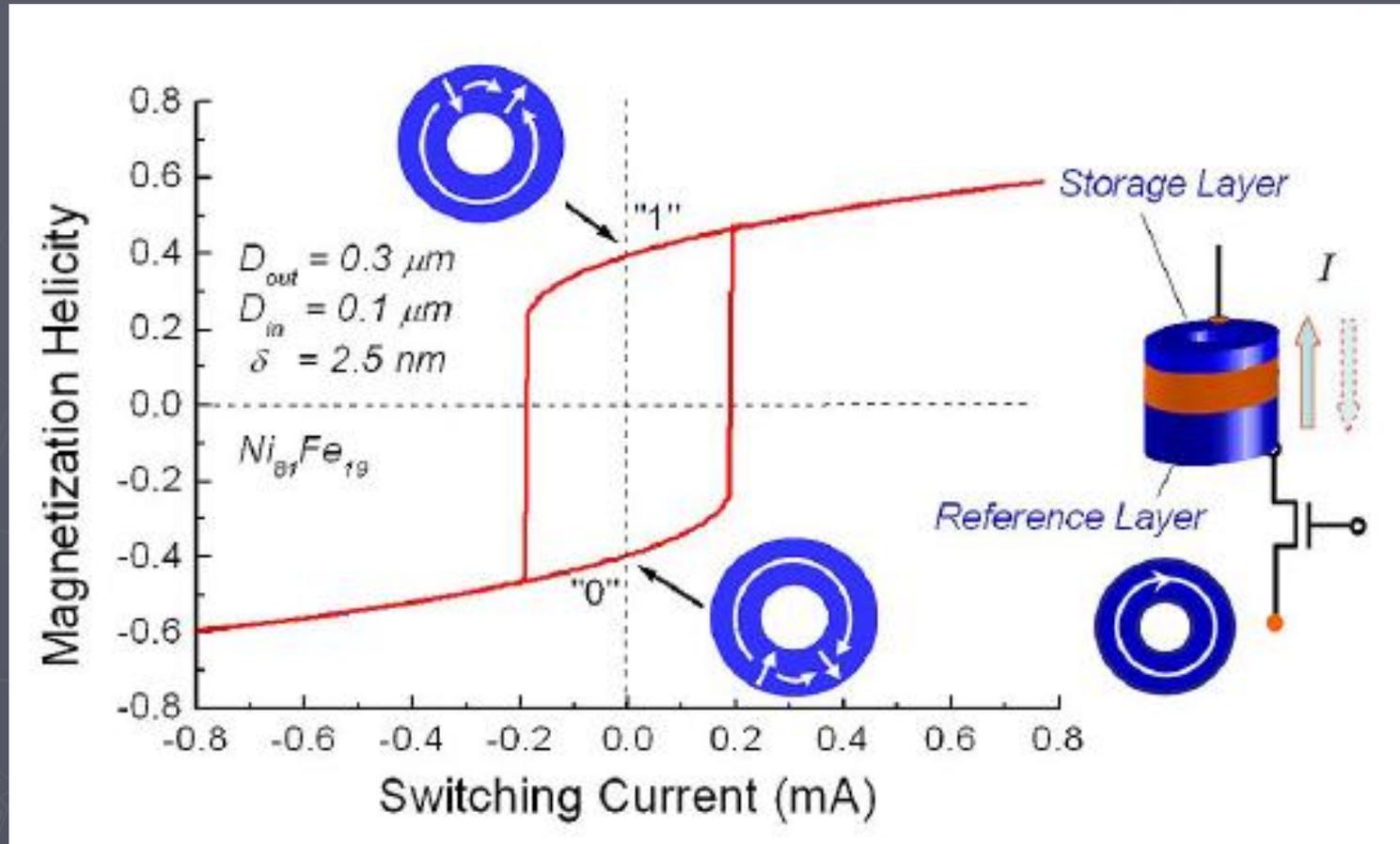
Конструкция ячейки памяти на эффекте «спинового рычага»



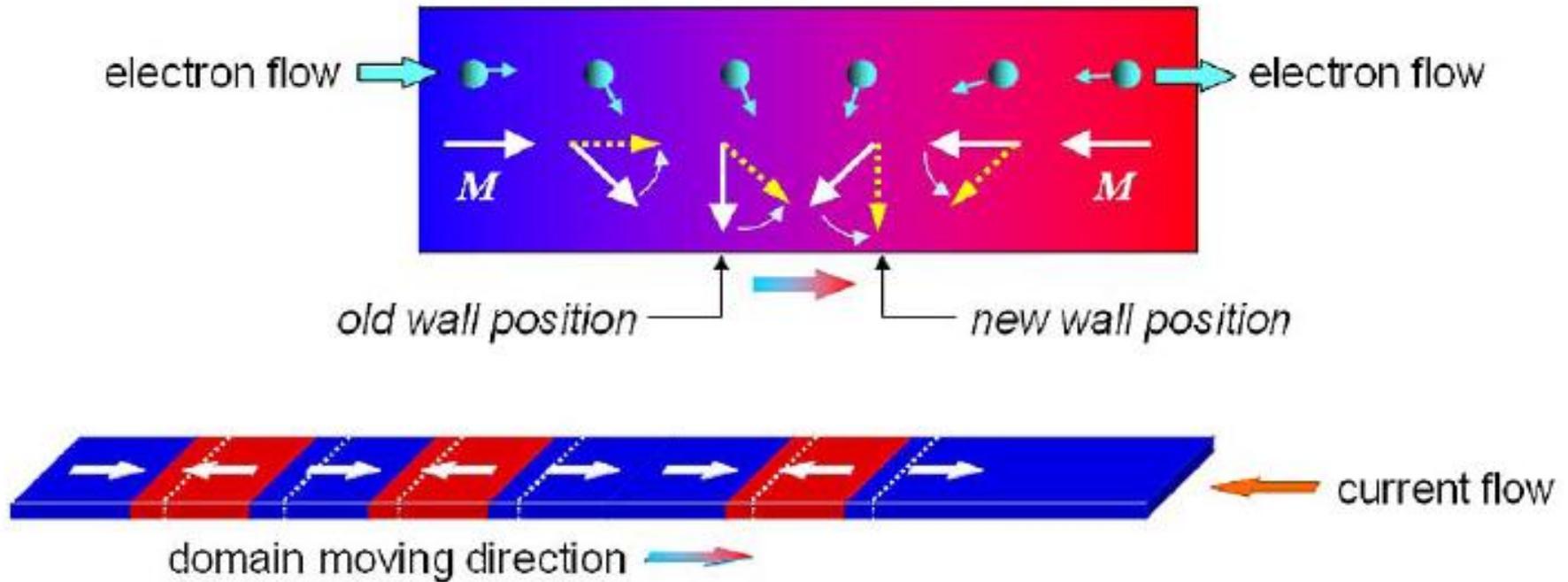
Первый демонстрационный чип от компании Sony на 4 kb Spin-RAM



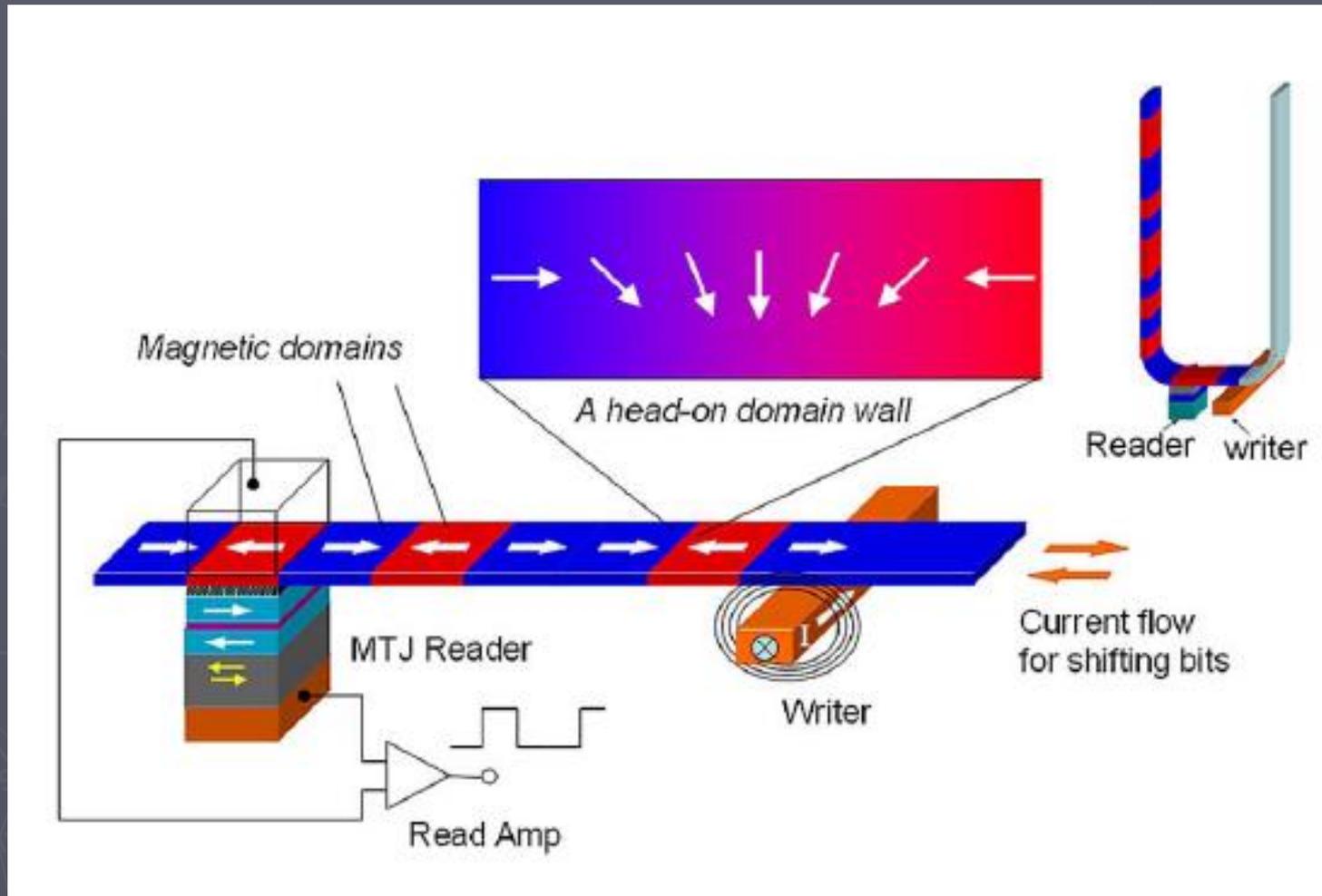
Кольцевые элементы STT MRAM



Смещение доменной стенки за счет спинового рычага



“Рельсовая” (Racetrack) память



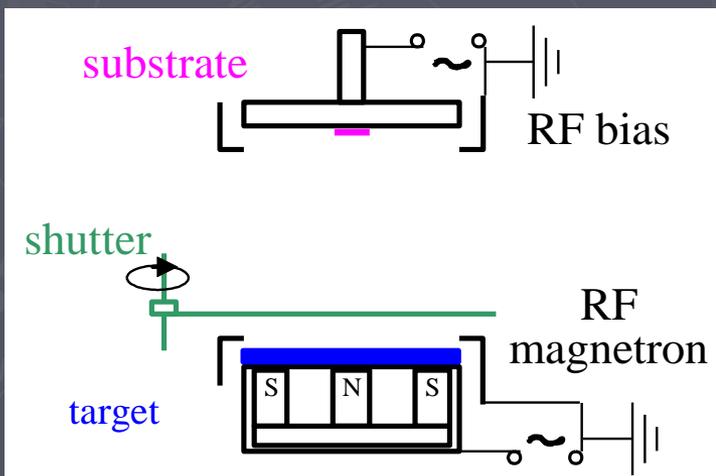
Технология получения GMR структур

- ▶ Напыление пленок в вакууме в едином цикле
- ▶ Контроль толщины
- ▶ Контроль магнитных характеристик
- ▶ Контроль магнетосопротивления

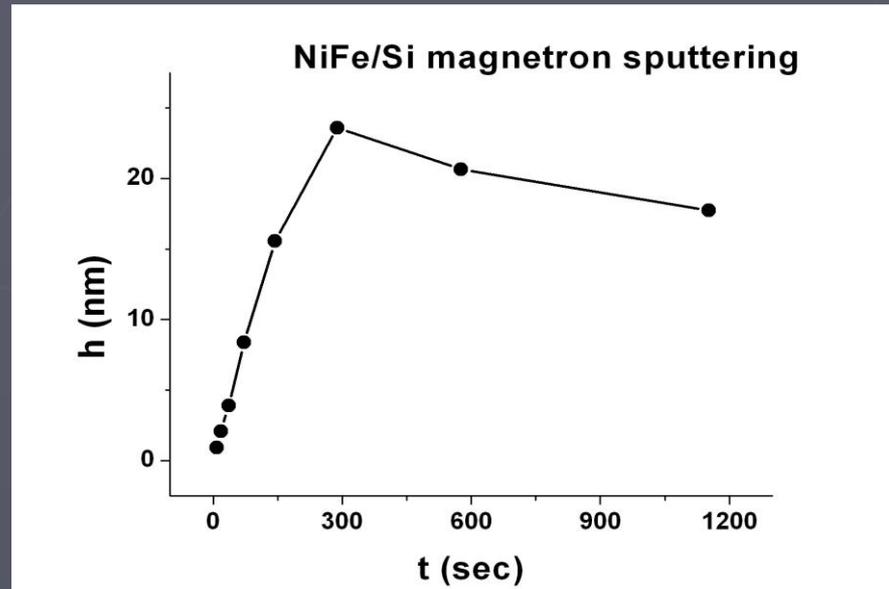
Получение GMR структур методом магнетронного распыления



SCR 650 "TETRA" Alcatel

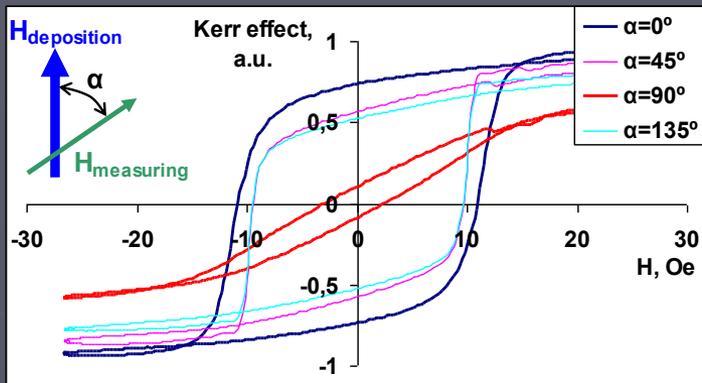


КОНТРОЛЬ ТОЛЩИНЫ ПЛЕНОК МЕТОДОМ ФОТОМЕТРИИ

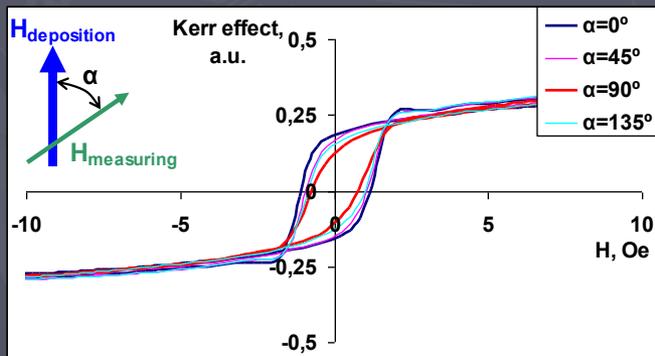


Thickness of FeNi film, interpolated from profilometer measurements, nm	1	2	4	8	16	32	64	128
Thickness of FeNi film i , measured by spectrophotometer Leitz, nm.	0.93	2.09	3.89	8.37	15,56	23.61	20,66	17,73
Standard deviation, nm	0,09	0,16	0,07	0,21	0,21			

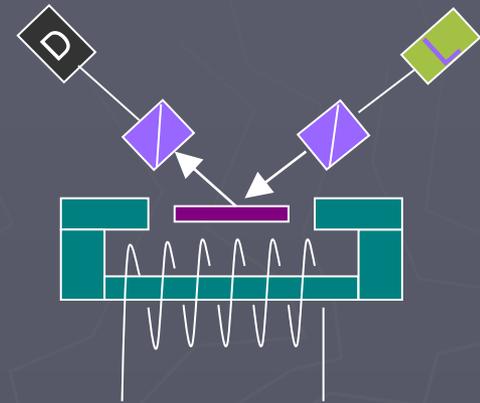
Контроль магнитных характеристик магнитооптическим методом (Kerr effect)



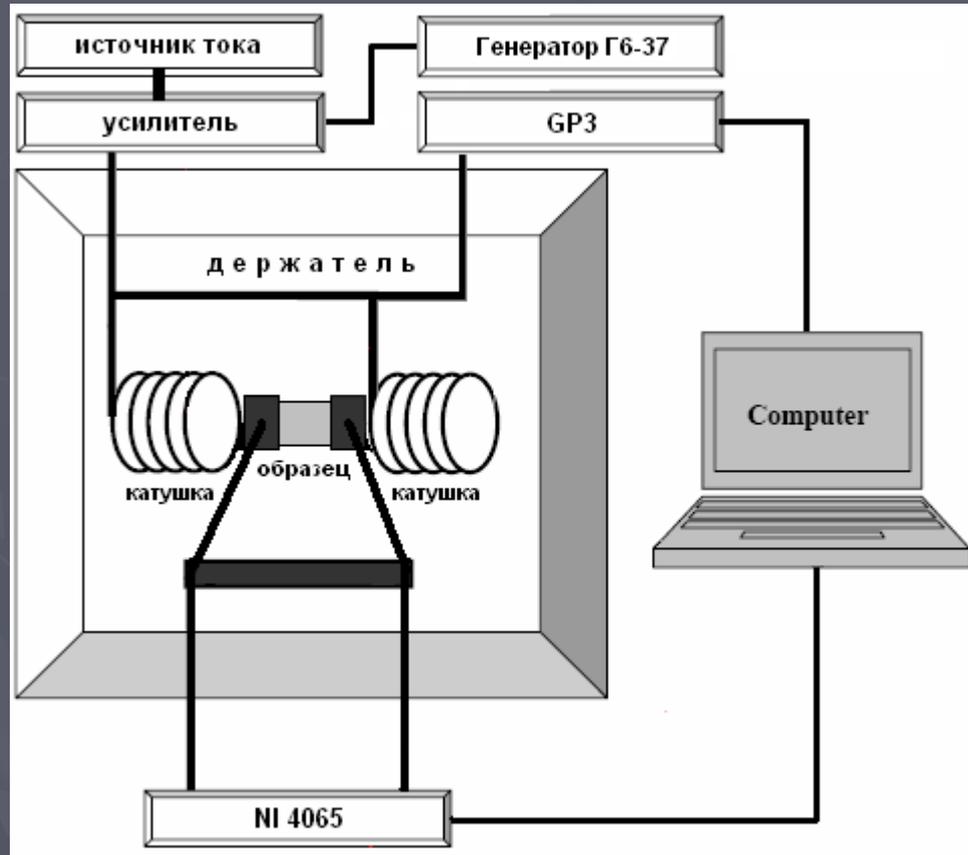
$\text{Co}(1 \text{ nm})/\text{Ta}(5 \text{ nm})$ /ситалл,
нанесенной в магн. поле 1500 Oe.



$\text{Co}(0,6 \text{ nm})/\text{Ta}(5 \text{ nm})$ /ситалл,
нанесенной в магн. поле 1500 Oe.



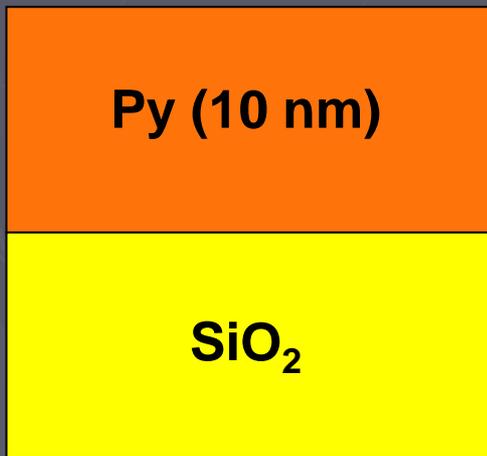
Стенд для экспресс диагностики магниторезистивных структур



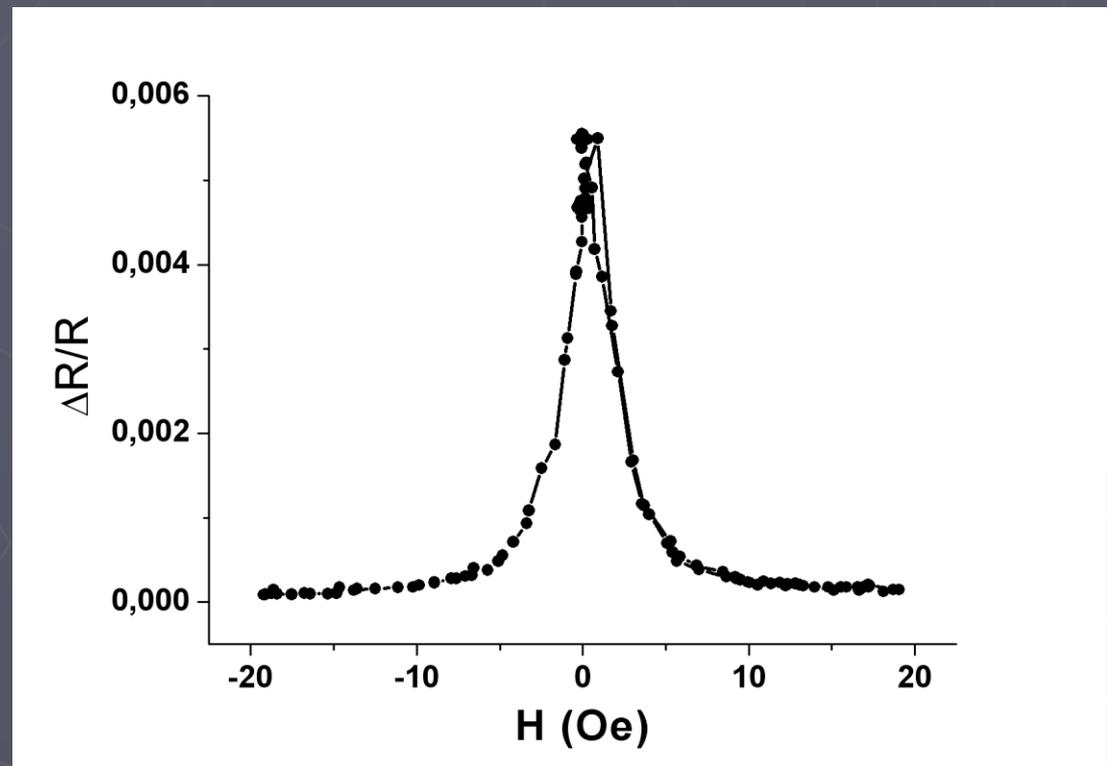
- ▶ Для измерения сопротивления используется 22 разрядная плата NI4065 (цифровой мультиметр) фирмы National Instruments, позволяющая производить измерения с точностью до одной десятитысячной Ома.
- ▶ Величина магнитного поля в катушке Гельмгольца вычисляется по напряжению на катушке, измеряемому 10 разрядной платой GP3, фирмы АWC

$R_{\text{структуры}}$	ТОЧНОСТЬ	Скорость измерения	Время Измерения	$H_{\text{поля в катушке}}$	Размер образцов	$t_{\text{съемки}}$
1 Ом-1 МОм	5 знач. цифр	100мс	1с	До 10^2 Оэ	2x2 см	Комнатная температура

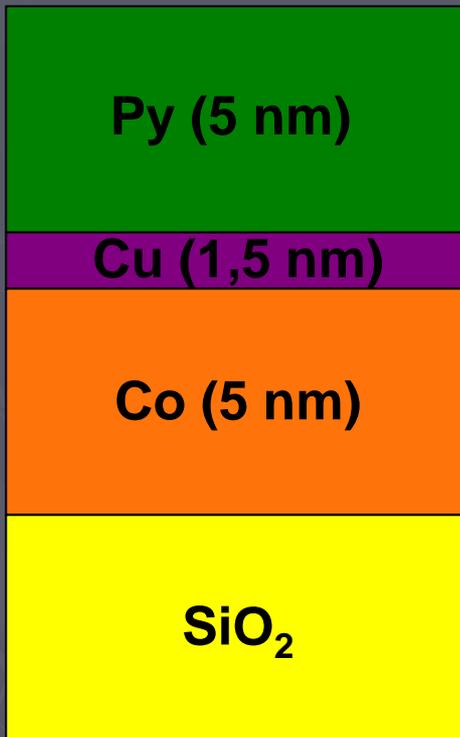
Тест 1: Однослойная пленка пермаллоя



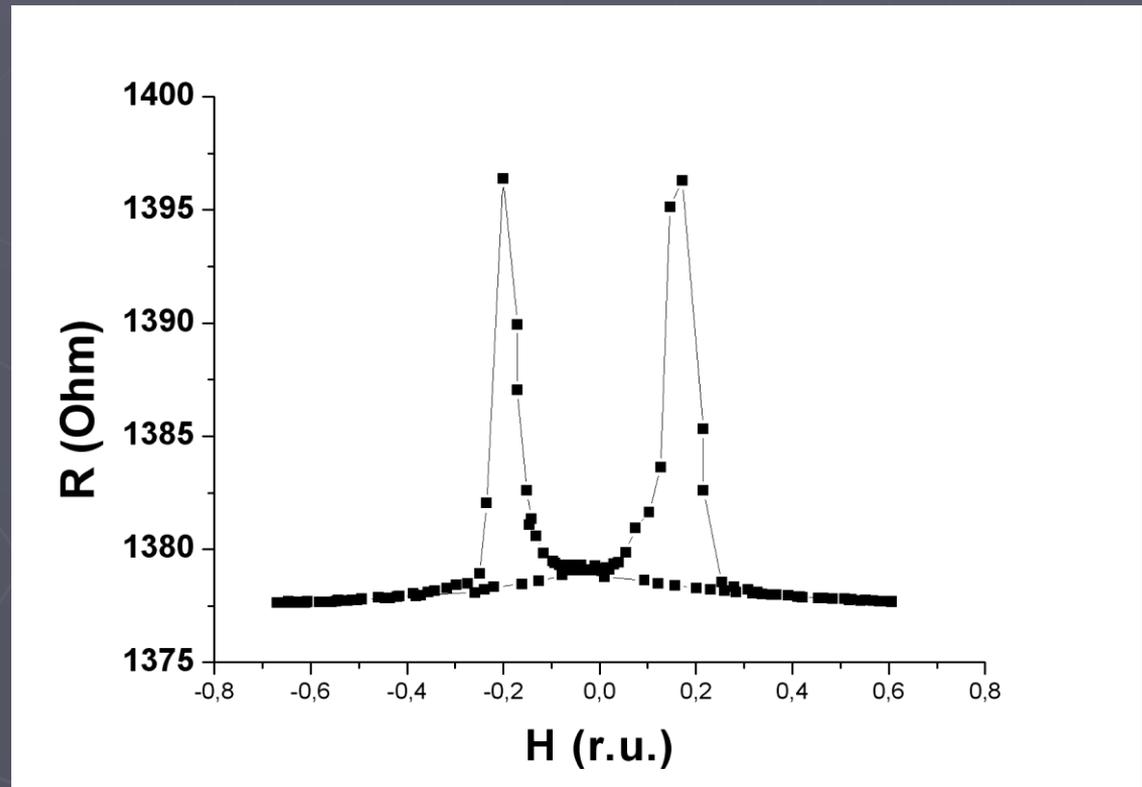
Spin Tunnel Junction



Тест 2: Многослойная магниторезистивная структура



Spin Tunnel Junction



Контрольные вопросы

- ▶ В чем заключается новая парадигма СПИНТРОНИКИ ?
- ▶ В чем заключается AMR эффект ?
- ▶ В чем заключается GMR эффект ?
- ▶ Описать конструкцию спинового вентиля
- ▶ Описать конструкцию спинтуннельной структуры
- ▶ Описать топологию матрицы памяти на GMR эффекте
- ▶ В чем заключается эффект «СПИНОВОГО РЫЧАГА» ?
- ▶ Методы получения магниторезистивных структур
- ▶ Методы диагностики магниторезистивных структур

Вопросы на зачет

- ▶ 1) Магнитосопротивление. AMR и GMR эффекты. Их природа и технические применения.
- ▶ 2) Спин-вентильные и спин-туннельные структуры. Датчики магнитного поля.
- ▶ 3) Концепция MRAM на GMR эффекте. Способы чтения и записи информации.
- ▶ 4) Эффект спинового рычага и перспективы STT MRAM.
- ▶ 5) Микромагнитная модель.