

Магнитные состояния и транспортные
свойства ферромагнитных наноструктур:
эффект туннельного
магнитосопротивления и его применения

А.А.Фраерман

Институт физики микроструктур РАН



*Семинар «Исследования в области спинтроники и перспективы создания
элементной базы на ее основе»*

ИРЭ РАН, 26.06.2018

План

1. Эффект туннельного магнитосопротивления
2. Туннельный элемент как ячейка магнитной памяти и датчик магнитного поля
3. Создание туннельных магнитных контактов в ИФМ РАН
 - 3.1 Методы создания магнитных туннельных элементов
 - 3.2 Магнитосопротивление двух последовательных туннельных контактов
 - 3.3 Создание цепочек туннельных контактов как основы датчиков магнитного поля
 - 3.4 Магнитные логические ячейки
4. Проблемы и перспективы

Открытие эффекта туннельного магнитосопротивления

M. Julliere, Tunneling between ferromagnetic films. Phys. Lett., 1975, (Fe/Ge/Co)

J. S. Moodera et al, Phys. Rev. Lett. , 1995 (CoFe/Al₂O₃/Co)

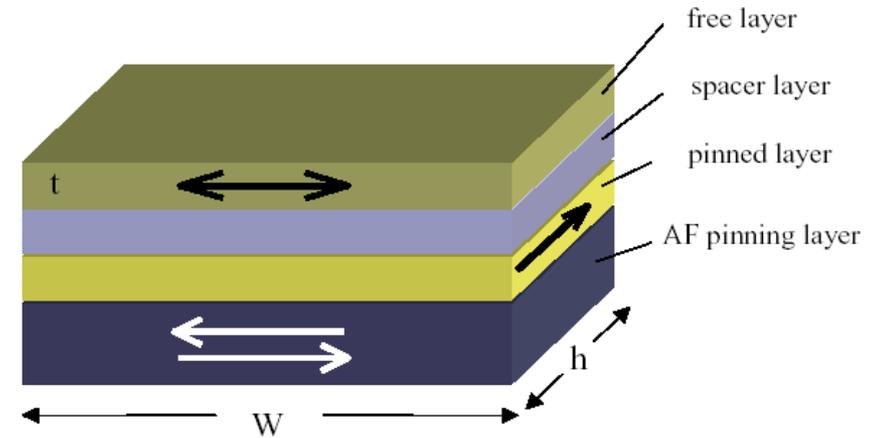
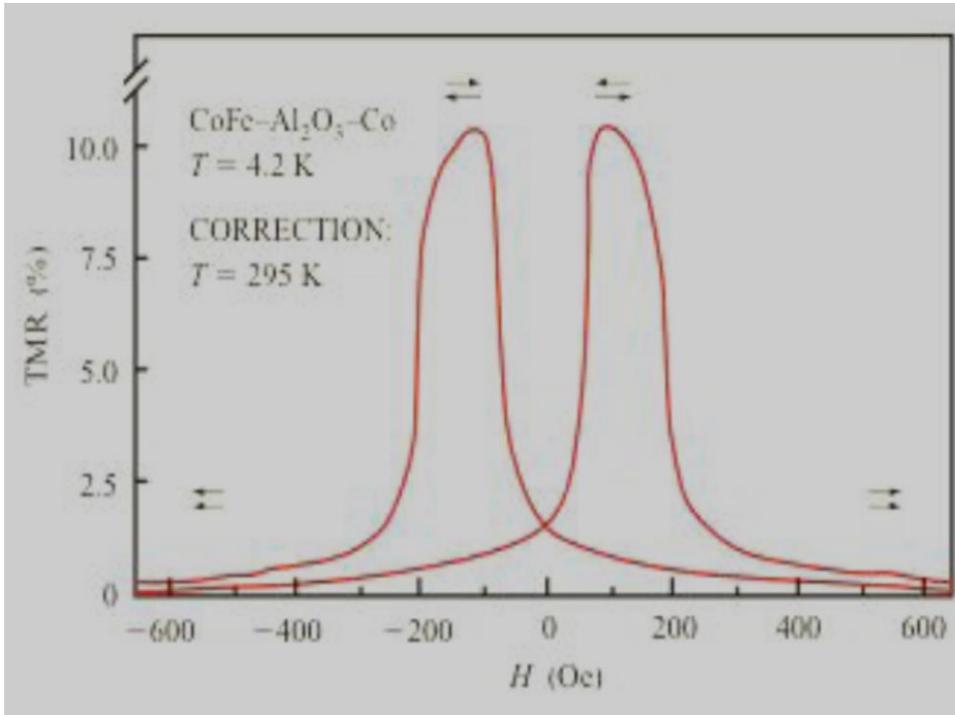


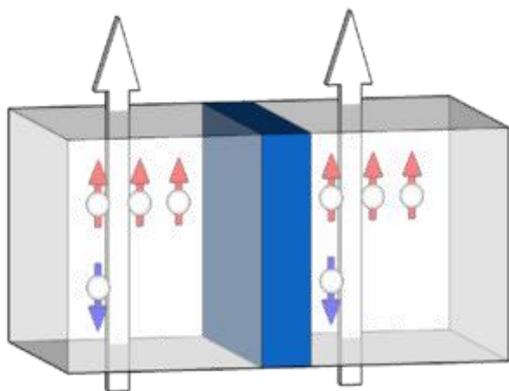
Схема туннельного элемента:

- "жесткий слой" (желтый)
- «туннельный барьер» (голубой)
- "мягкий слой" (серый)

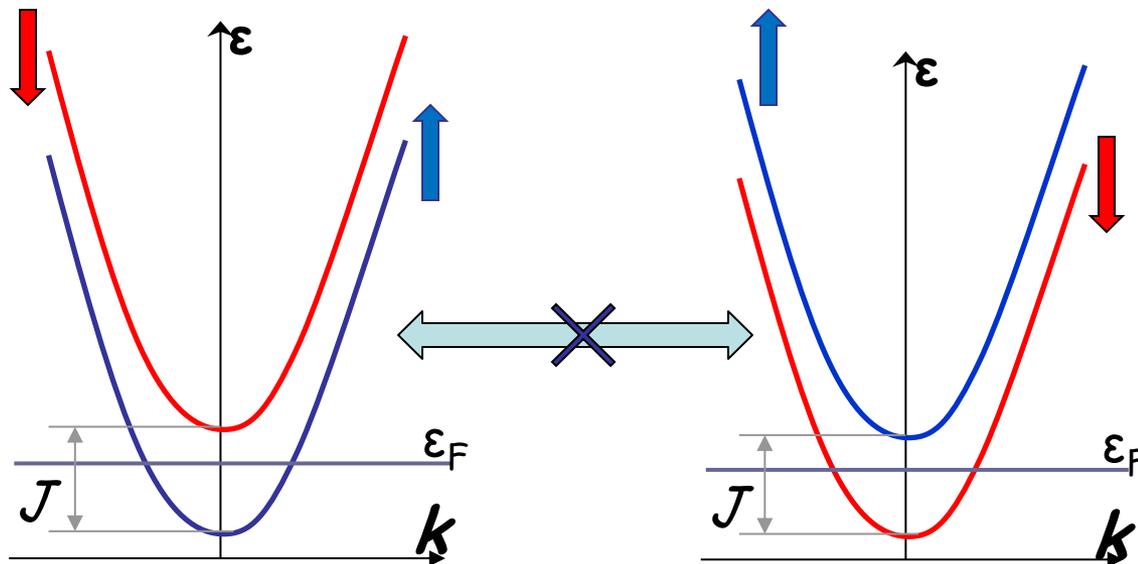
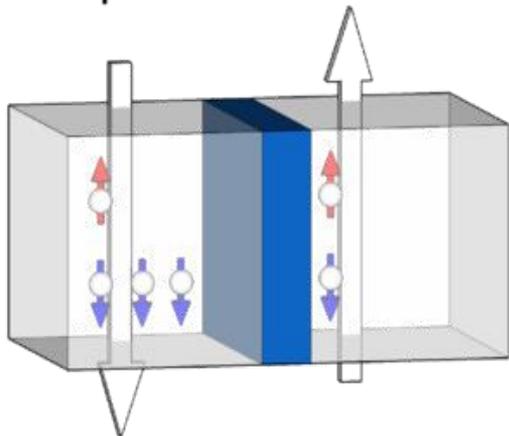
Первое наблюдение эффекта туннельного магнитосопротивления при комнатной температуре. Зависимость сопротивления от приложенного магнитного поля.

Описание и свойства эффекта туннельного магнитосопротивления

Parallel state

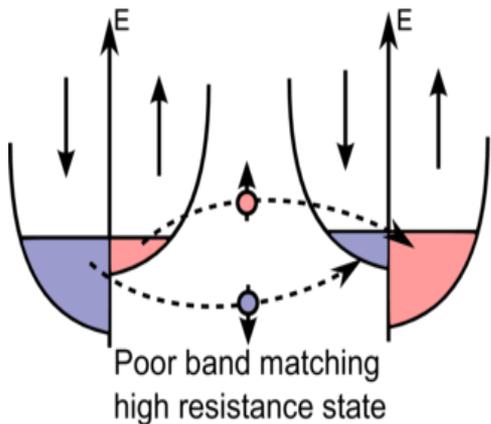
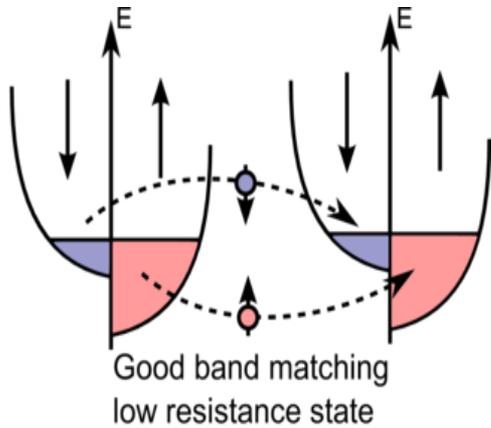


Anti-parallel state

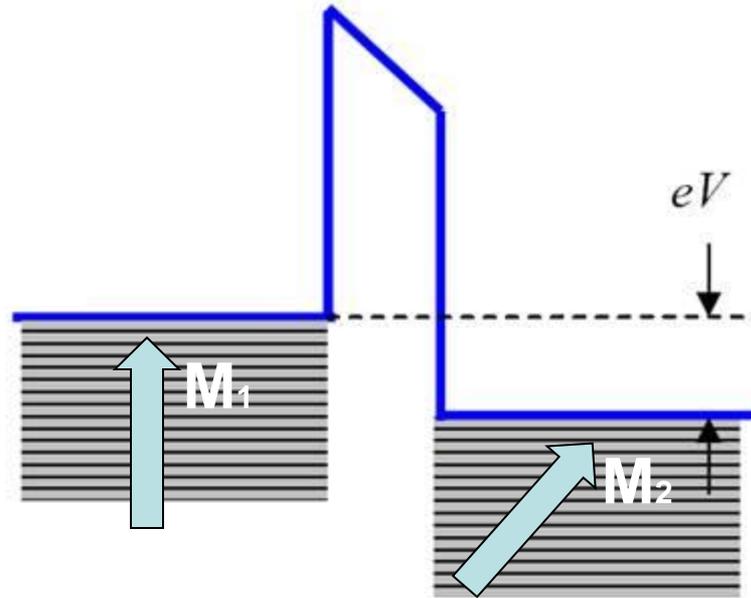


$$P = \frac{n_{\uparrow} - n_{\downarrow}}{n_{\uparrow} + n_{\downarrow}} = 1$$

Свойства спинового вентиля



$$\left(\frac{\hat{p}^2}{2m} + U(z) \right) \hat{\Psi} + J \vec{\sigma} \vec{M}(z) \hat{\Psi} = \varepsilon \hat{\Psi}$$

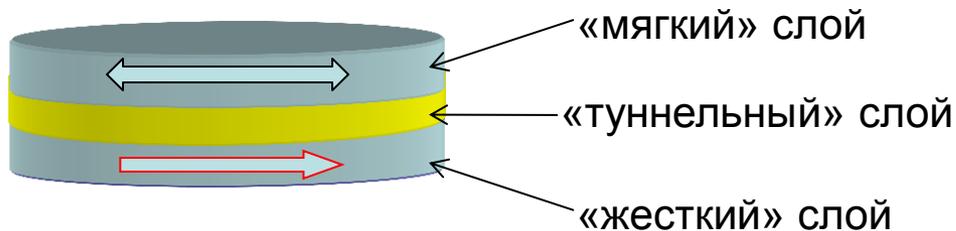


$$G = \frac{G_{\uparrow\uparrow} + G_{\uparrow\downarrow}}{2} + \frac{G_{\uparrow\uparrow} - G_{\uparrow\downarrow}}{2} (\vec{M}_1 \vec{M}_2)$$

$$\frac{G_{\uparrow\uparrow} - G_{\uparrow\downarrow}}{G_{\uparrow\uparrow} + G_{\uparrow\downarrow}} \approx \left(\frac{J}{\varepsilon_F} \right)^2$$

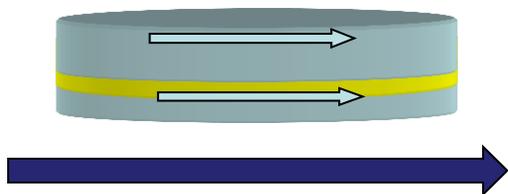
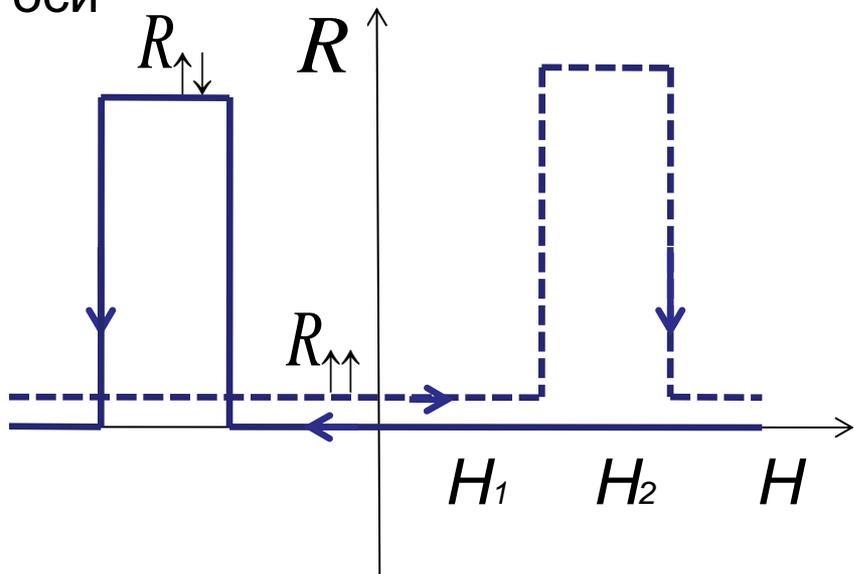
J.C. Slonczewski,
PRB, 1989

Зависимость сопротивления «спинового» вентиля от внешнего магнитного поля

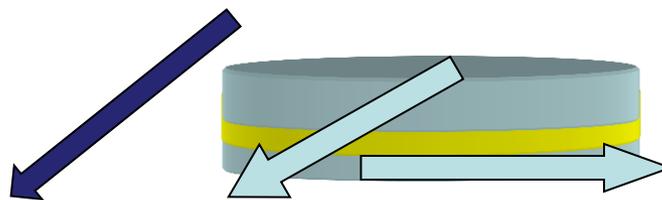
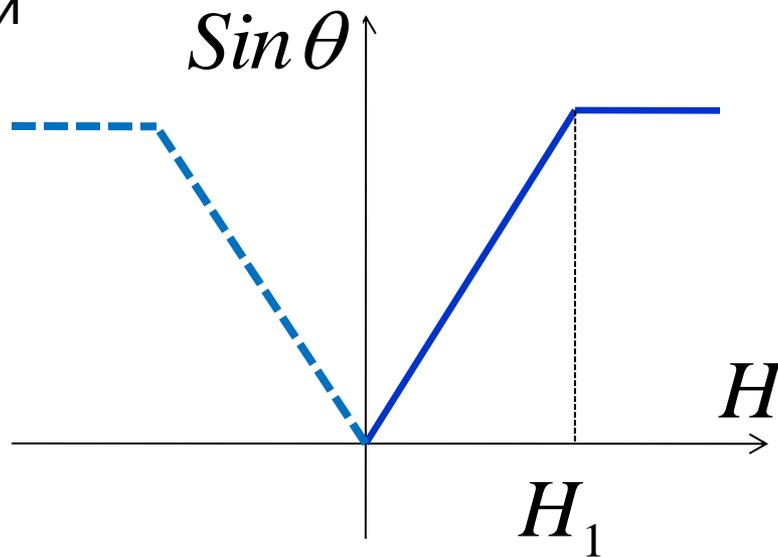


$$G \sim (\vec{M}_1 \vec{M}_2) \sim \text{Cos} \theta$$

1. Намагничивание вдоль «легкой» оси



2. Намагничивание вдоль «трудной» оси



Магнитная память с произвольным доступом (MRAM)

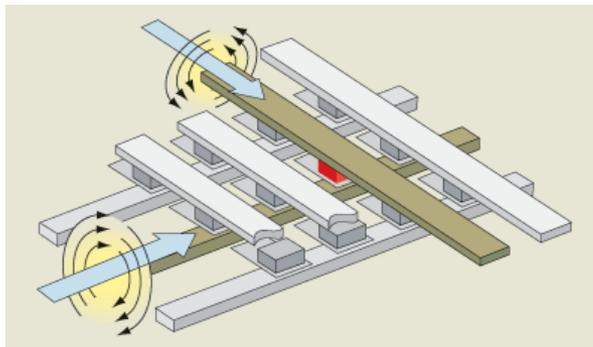
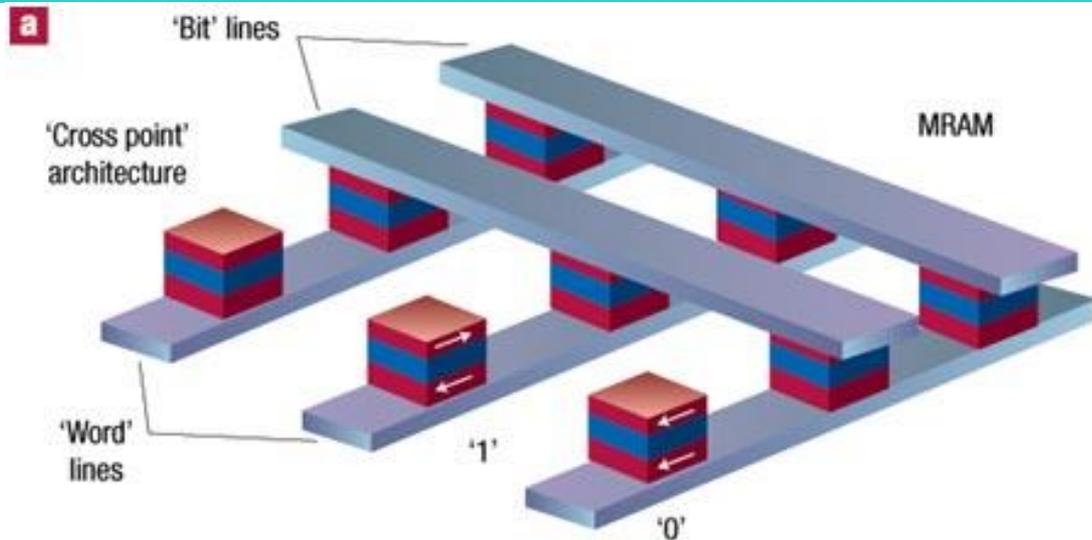
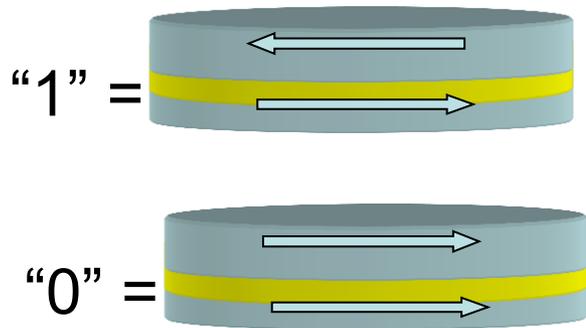
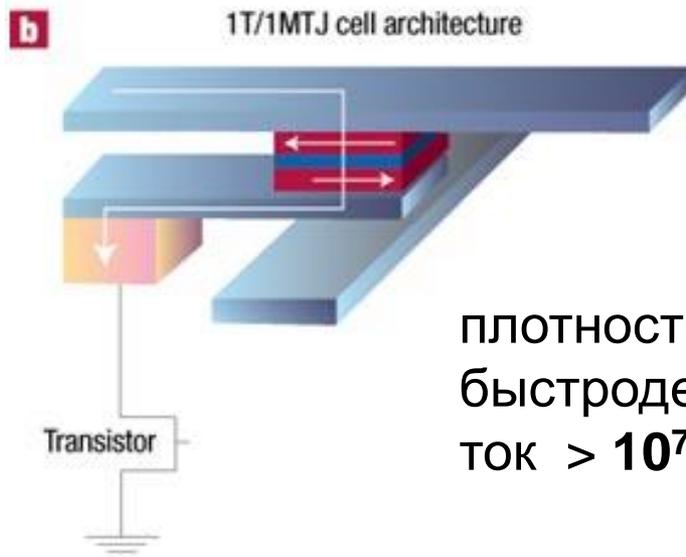


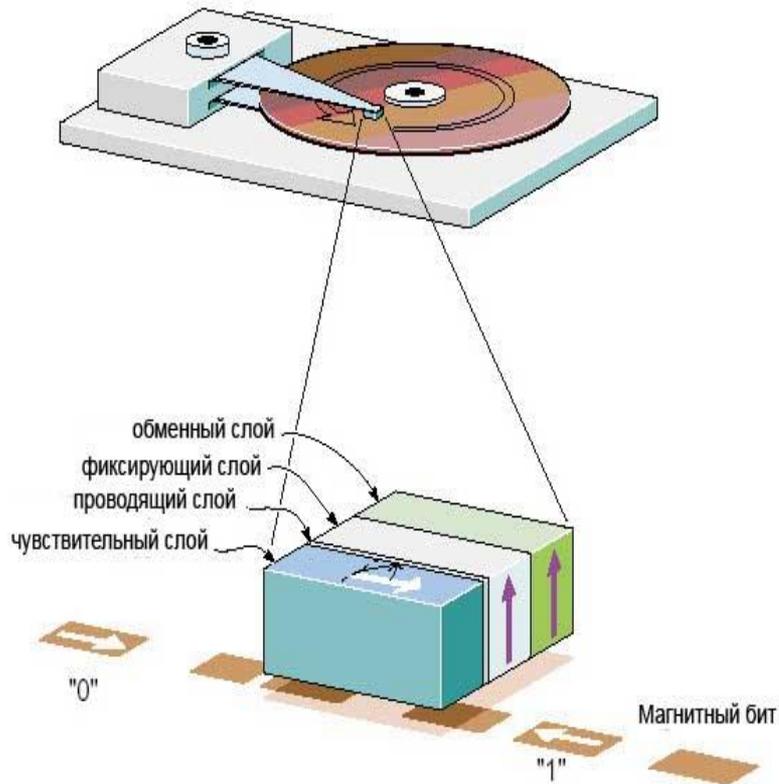
Схема устройства MRAM:
запись с помощью
токоведущих шин



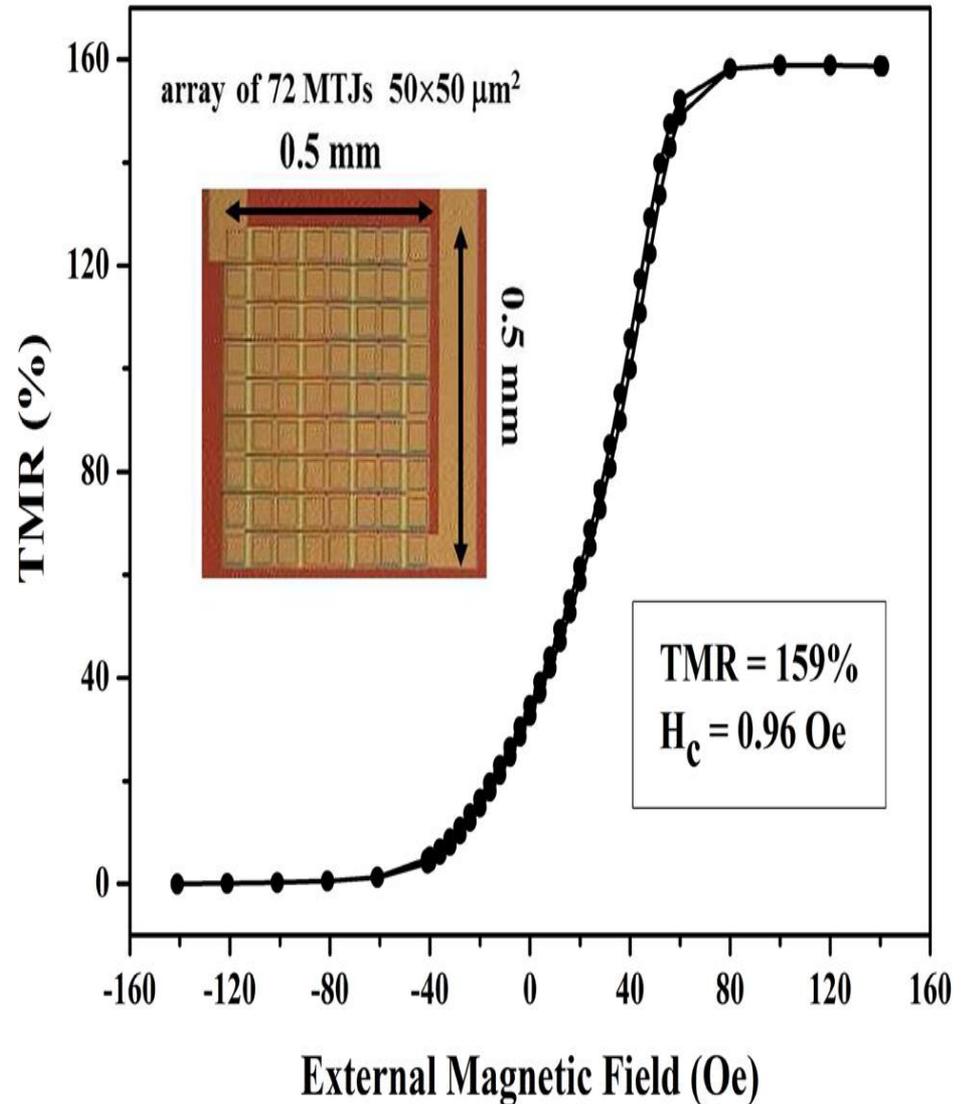
плотность $\sim 10^{10}$ бит/см²
быстродействие ~ 1 нс
ток $> 10^7$ А/см²

Датчики магнитного поля

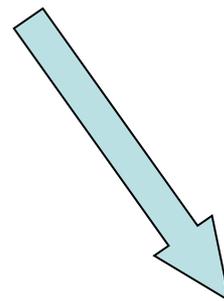
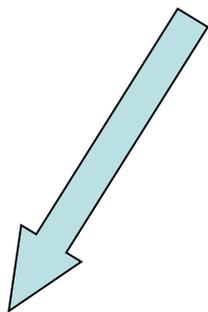
чувствительность $\sim 2.9\%/э$, шумы для 1кГц ~ 170 пТл/Гц^{1/2}



D.W. Guo et al, JAP, 2014



Магнитная память произвольного доступа (MRAM)



Устройства
сверхплотной ($\sim 10^{12}$
бит/см²) памяти

CROCUS 
NANO 
ELECTRONICS

основана в 2011 г.

Радиационно-стойкие
устройства памяти:

- 10^6 бит/см²

Доза гамма – квантов

- 5×10^5 рад

Поток нейтронов

$J \sim 5 \times 10^{14}$ 1/см²,

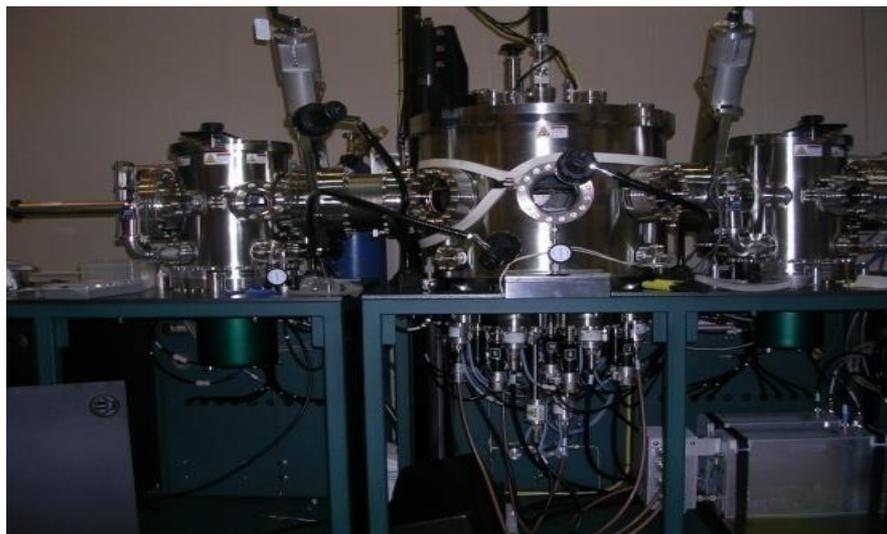
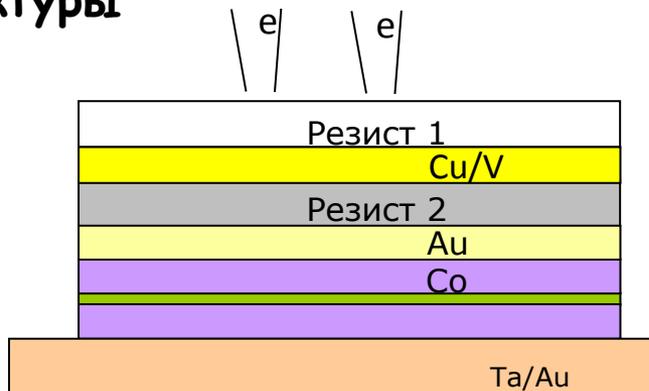
$\tau \sim 3 \times 10^{-3}$ с

$E \sim 0.1$ Мэв

НИИИС им. Седакова,
Нижний Новгород...

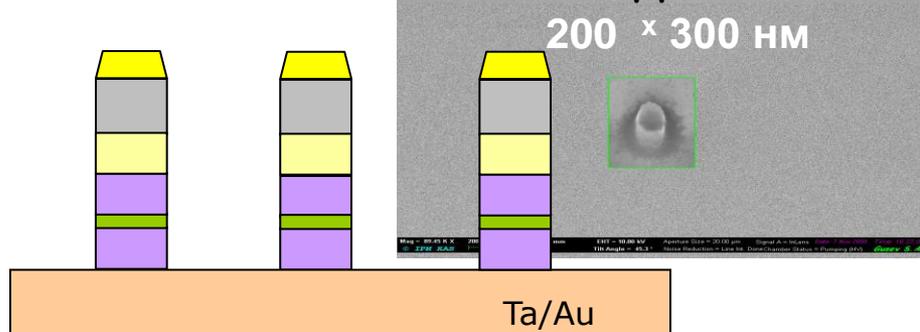
Методы изготовления магнитных туннельных контактов

1. Изготовление многослойной структуры



Многокамерная установка магнетронного напыления **AJA**

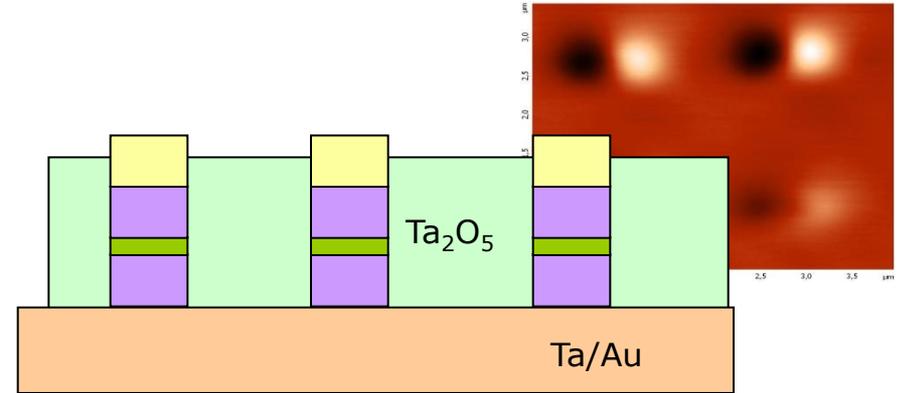
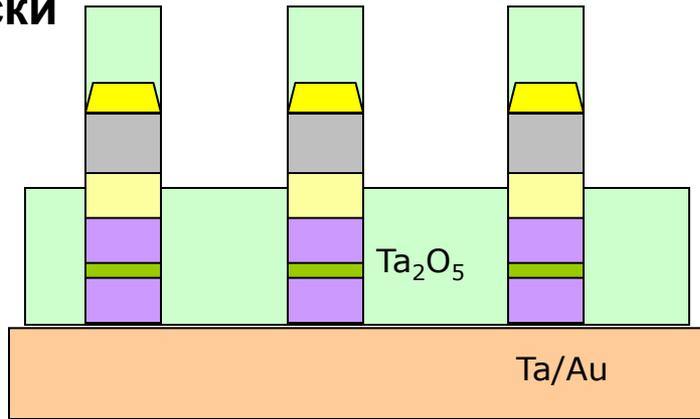
2. Травление (ионное (Ar)+плазмохимическое (фреон))



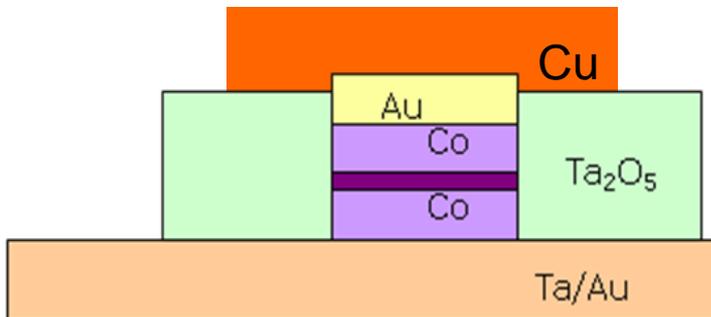
Система е-литографии **ELPHY PLUS** на основе микроскопа **SUPRA 50VP**

II. Методы изготовления магнитных туннельных контактов

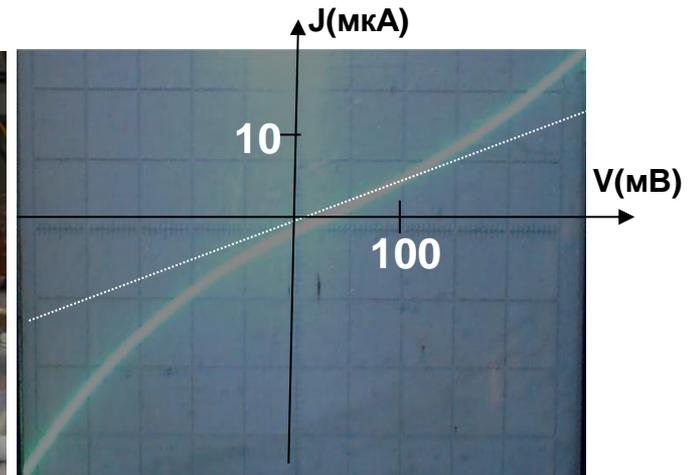
3. Нанесение диэлектрического слоя и взрывное удаление остатков маски



4. Нанесение верхнего электрода (фотолитография)

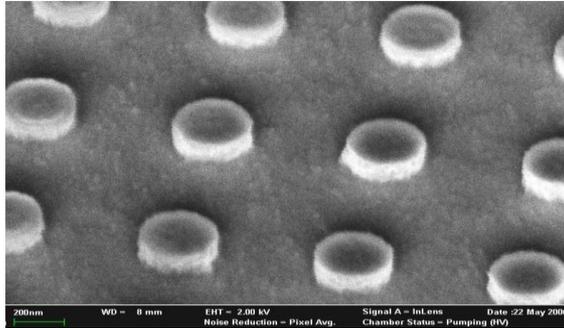


5. Автоматизированный стенд для измерения ВАХ

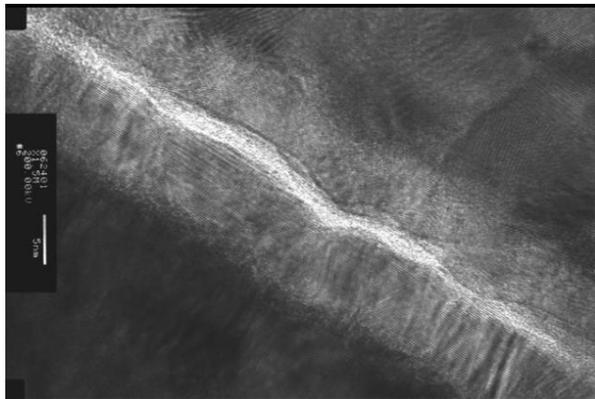


Структурные и магнитные свойства контактов

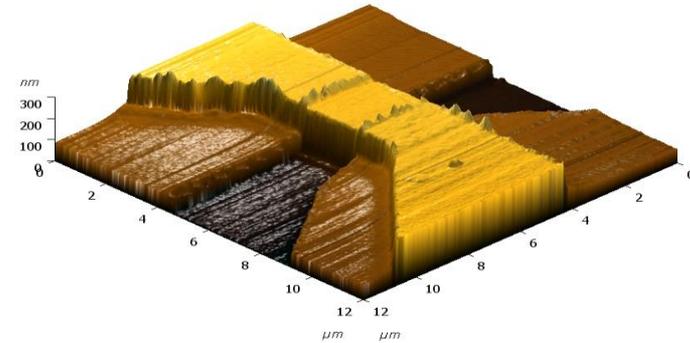
1. Размеры частиц 200*100 нм, CoFe(10нм)/ AlOx (2 нм)/CoFe(5нм)



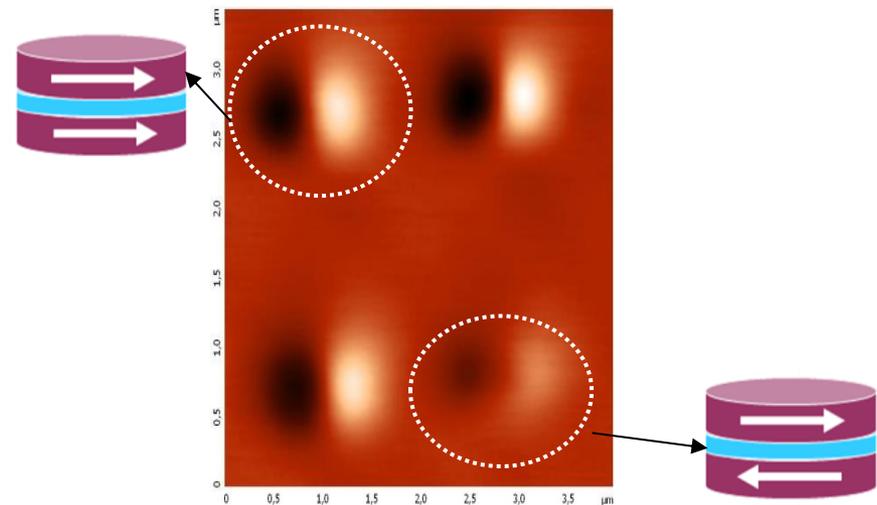
2. Поперечное сечение



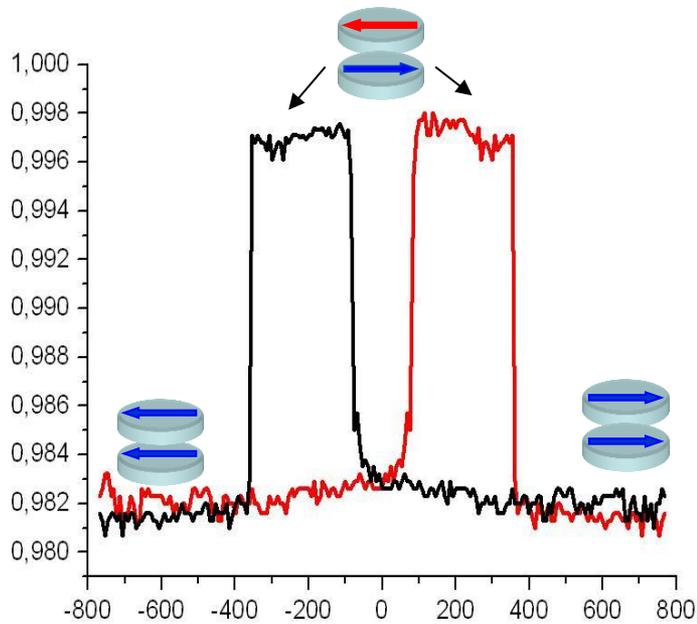
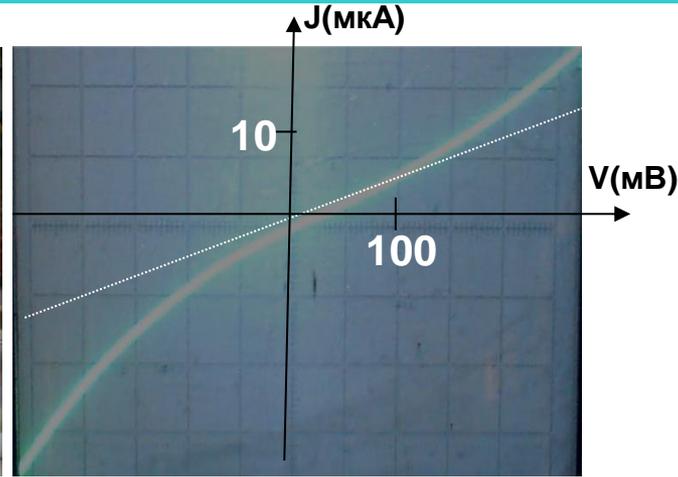
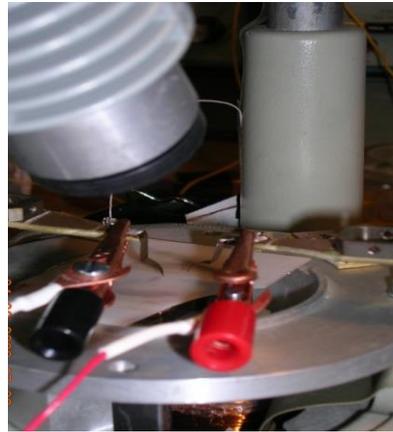
3. ACM - изображение



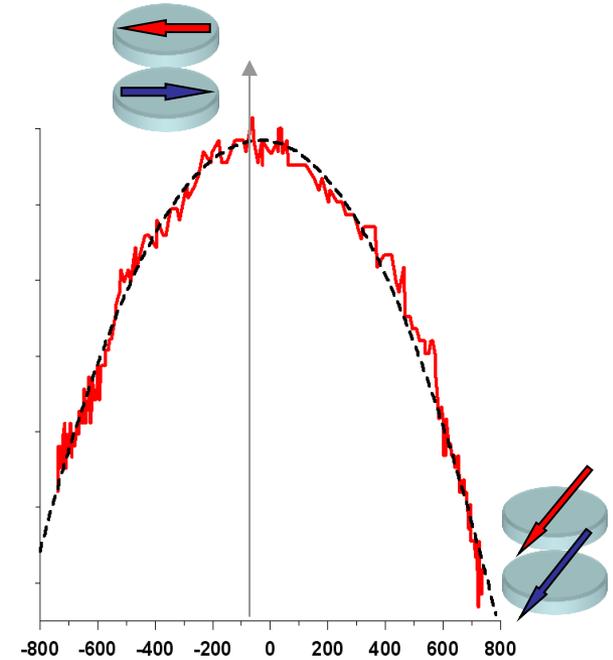
4. MCM - изображение



Магнитосопротивление многослойных ферромагнитных наночастиц

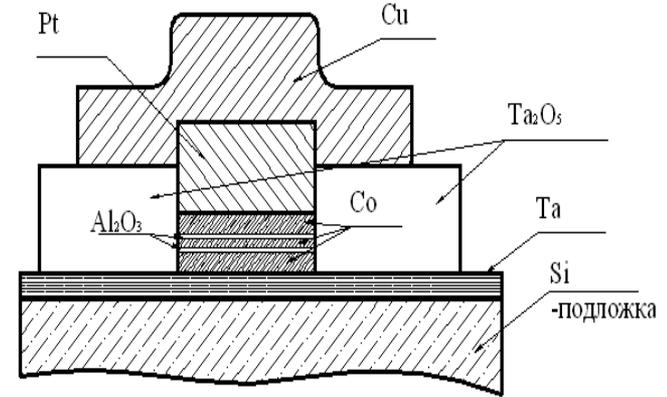
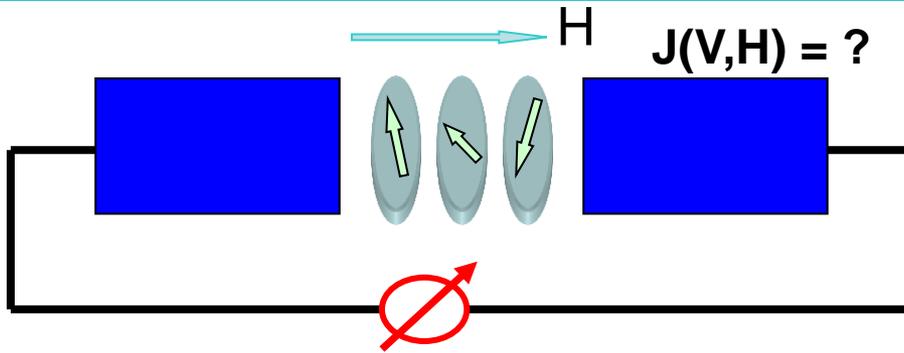


1. Поле вдоль длинной оси частицы



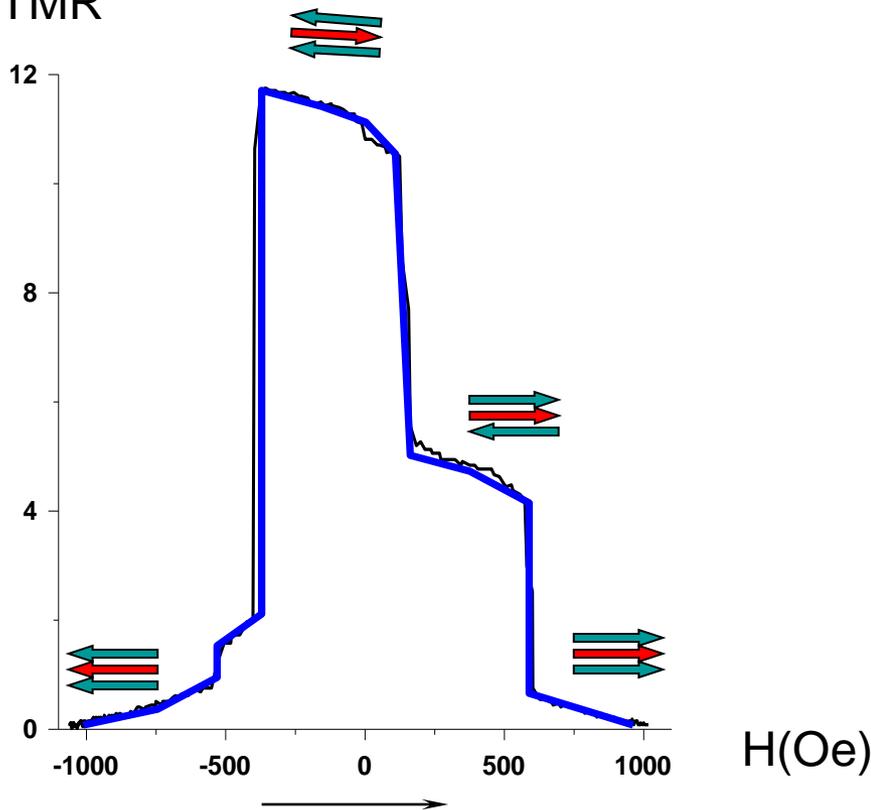
2. Поле вдоль короткой оси частицы

Магнитосопротивление тройной частицы

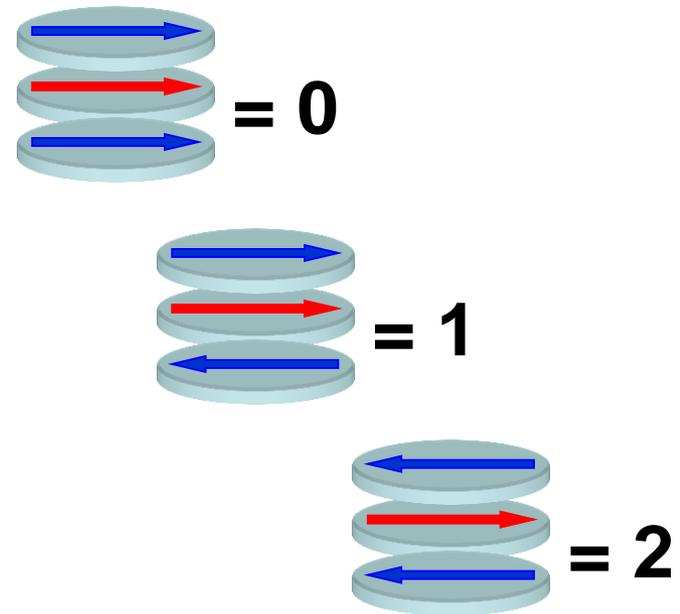


$Co(10nm) / AlOx(2nm) / Co(5nm) / AlOx(2nm) / Co(10nm)$.

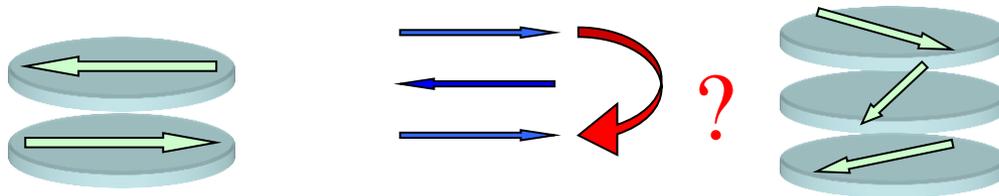
TMR



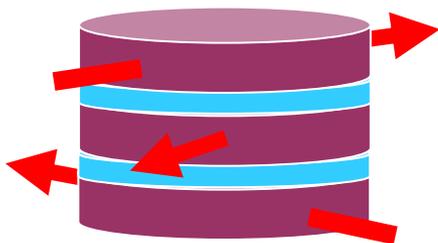
Троичная логика:



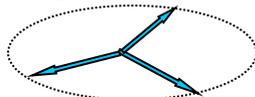
Неколлинеарные состояния в тройной частице



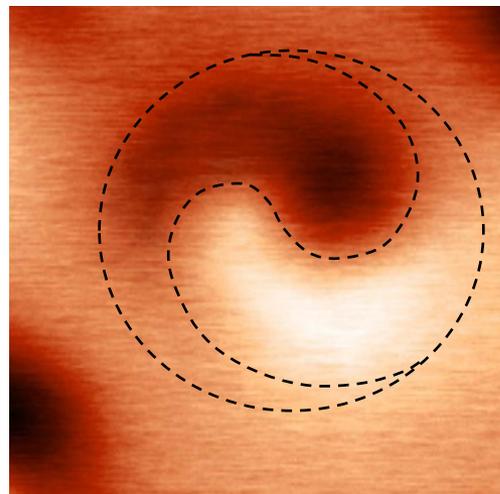
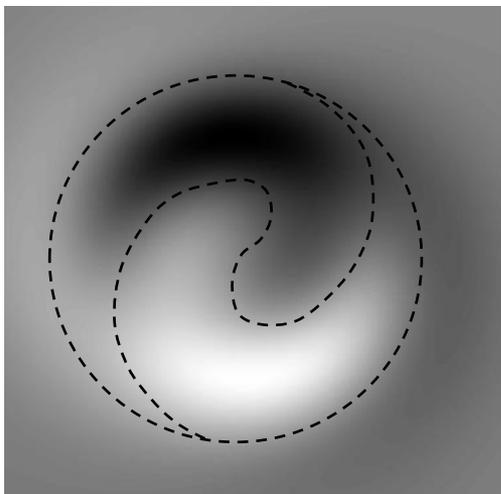
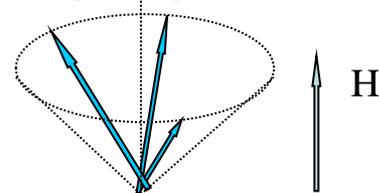
Изотропные частицы: искусственный геликоидальный магнетик,
A. Fraerman et al, J.Appl.Phys.,2008



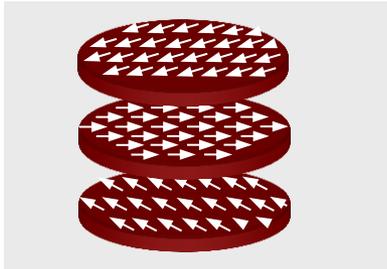
Спиральное
распределение



Некомпланарное
распределение



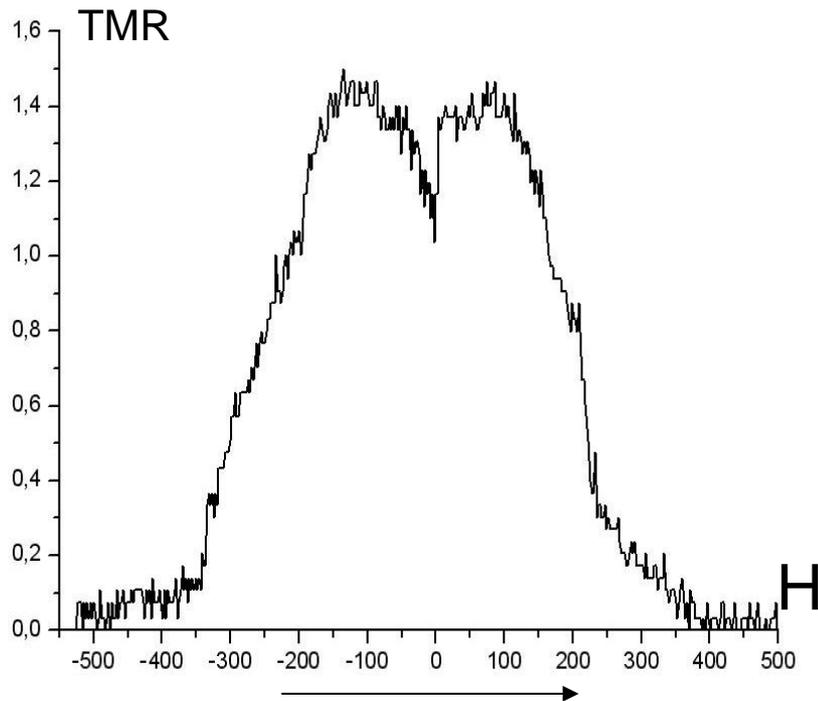
Магнитосопротивление спирального состояния



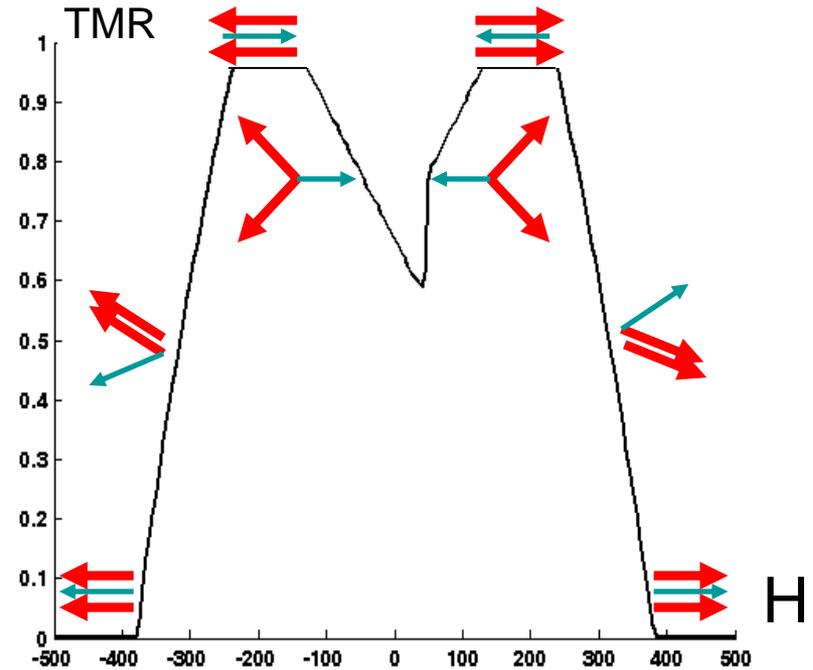
$$R = R_{01} + R_{02} - R_1 \cos \theta_{12} - R_2 \cos \theta_{23}$$

$$TMR(H) = (R(H) - R(H \rightarrow \infty)) / R(H \rightarrow \infty)$$

Experiment



Theory

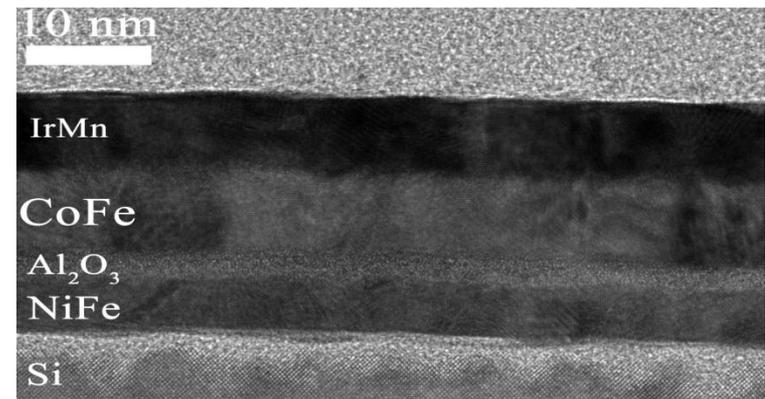
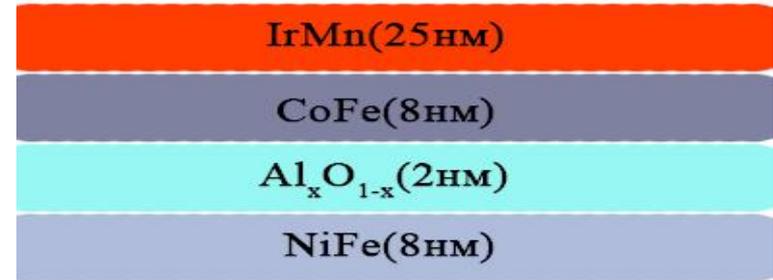
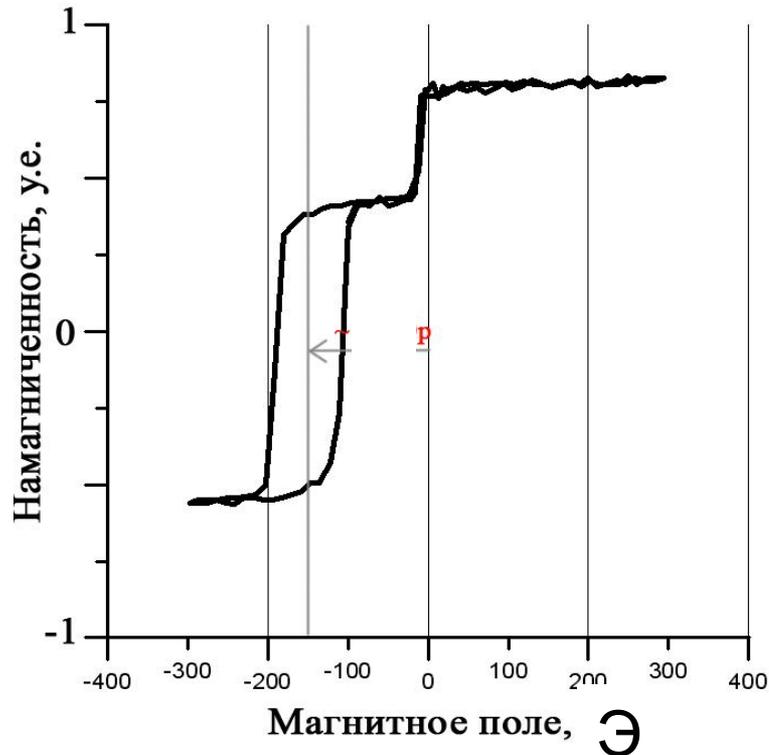


Создание цепочек магнитных контактов

Мотивация:

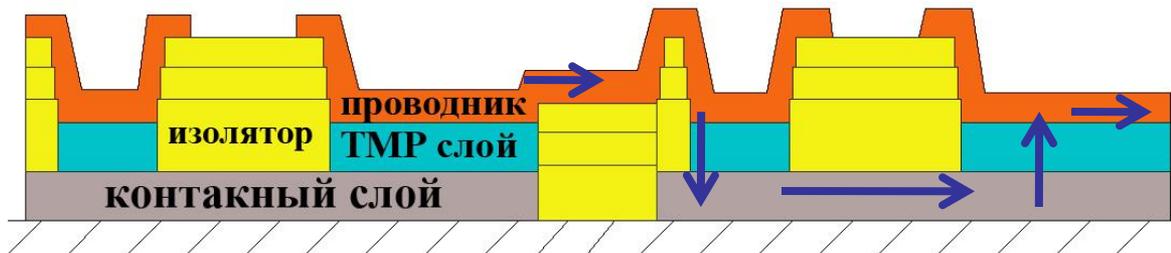
1. Переход к микронным размерам контактов
2. Статический пробой, трудности с созданием разностной схемы ...
3. Необходимость работы со стандартным напряжением 5V

1. Пиннинг с использованием антиферромагнитного слоя

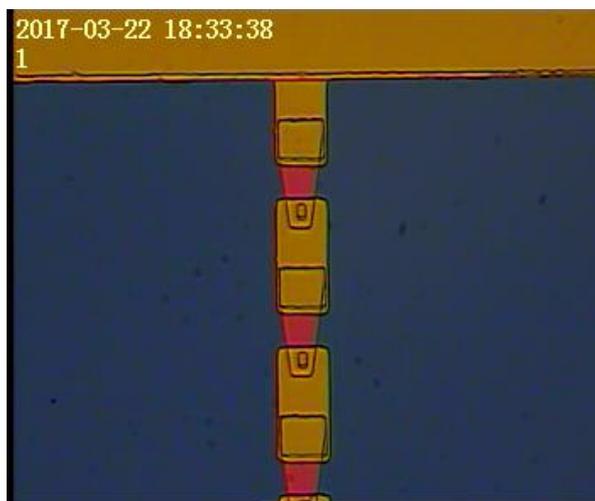


Магнитосопротивление цепочки магнитных контактов

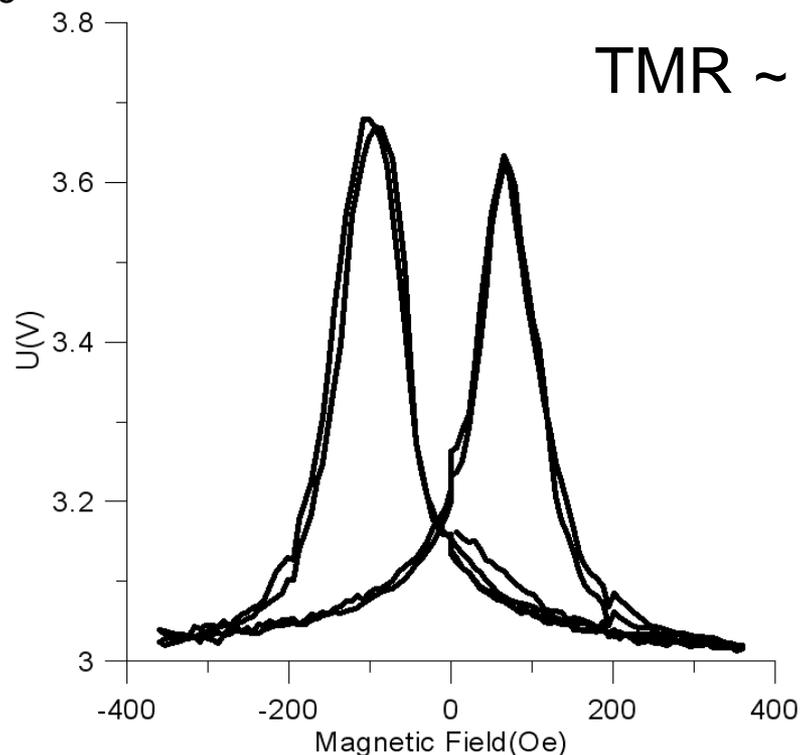
Многостадийная фотолитография



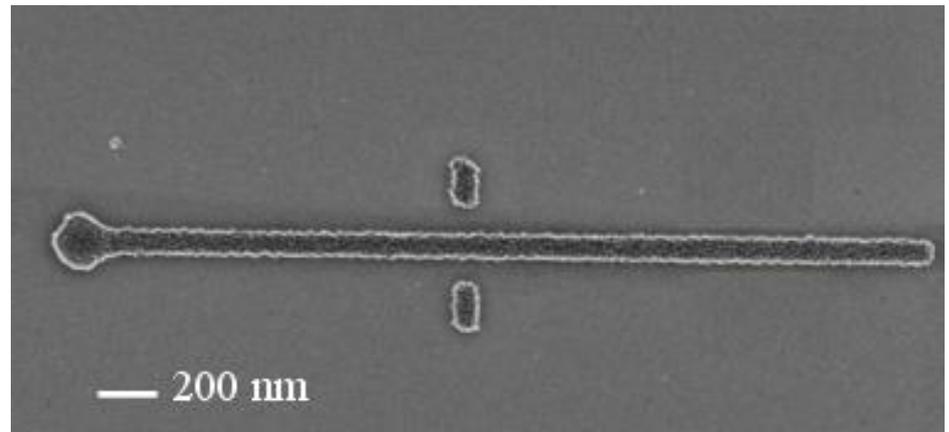
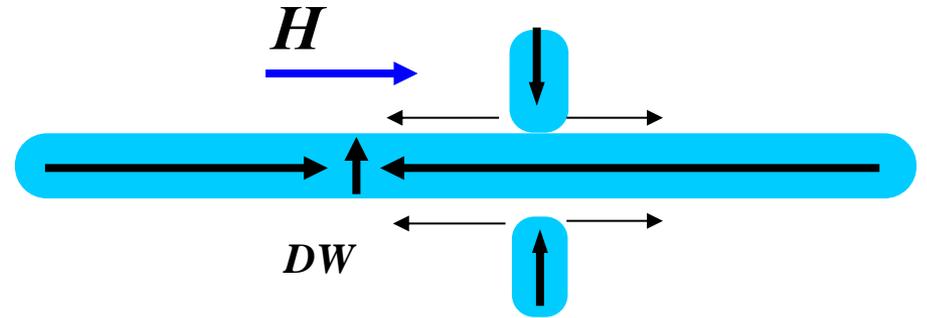
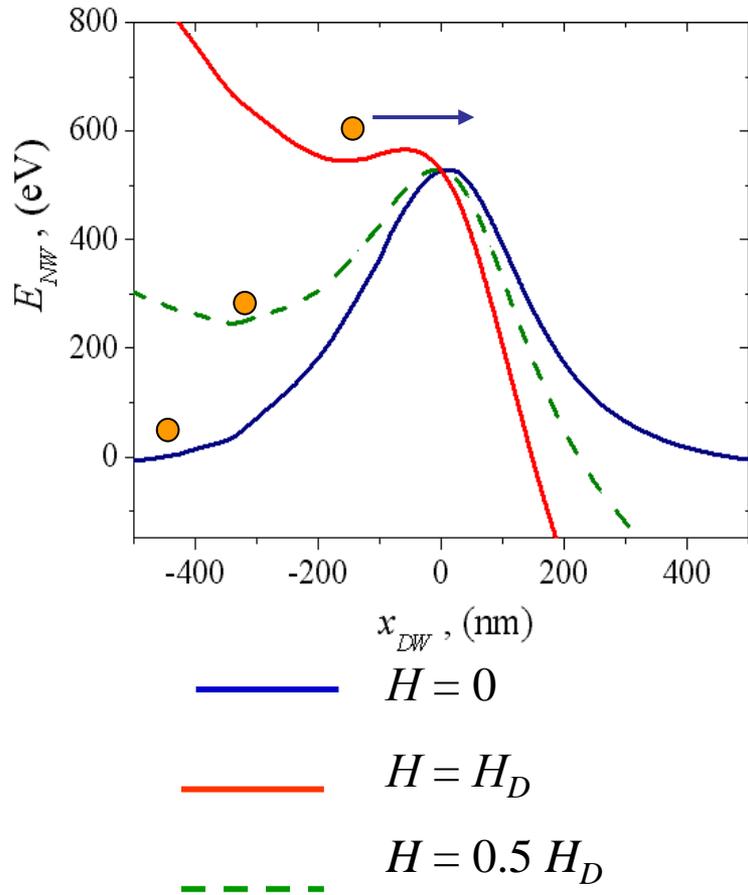
Два соседних элемента в цепочке (вид сбоку).
Изолятор – окись тантала, проводник – золото



Фотография чипа, приведен контакт цепочки с первой (верхней) контактной площадкой для включения в электрическую цепь



Магнитные логические ячейки: пиннинг доменной стенки вблизи частиц



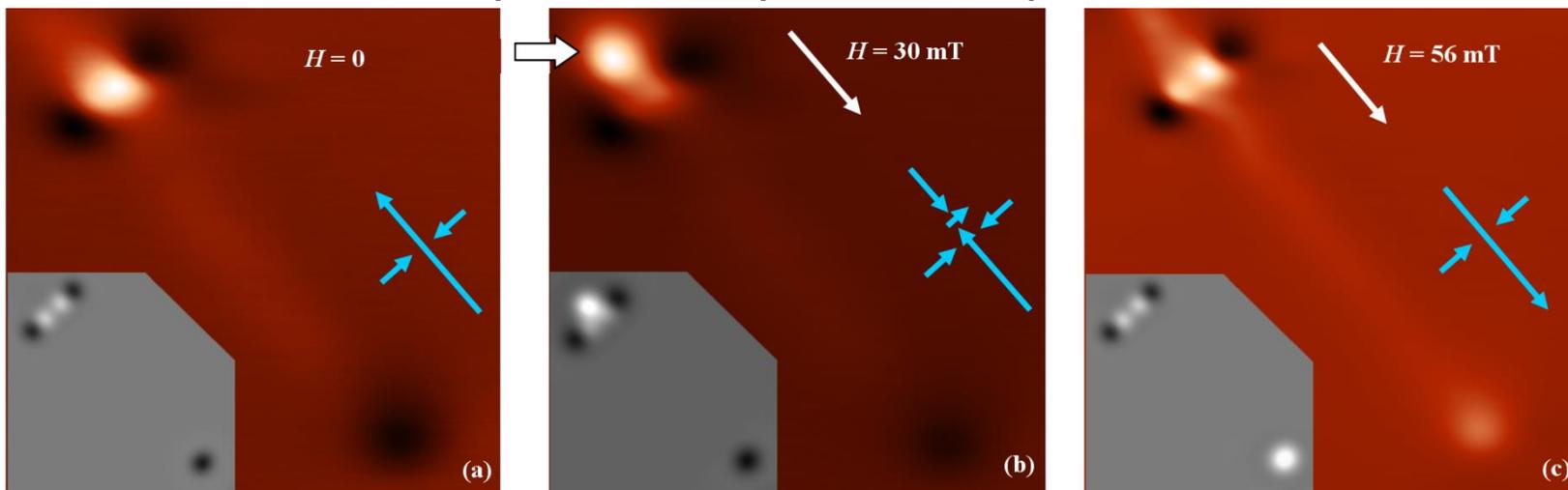
$\text{Co}_{60}\text{Fe}_{40}$ нанопроволока $20 \times 100 \times 3000$ nm^3 ; наночастицы $20 \times 100 \times 200$ nm^3

Профили потенциальной энергии для различных внешних полей

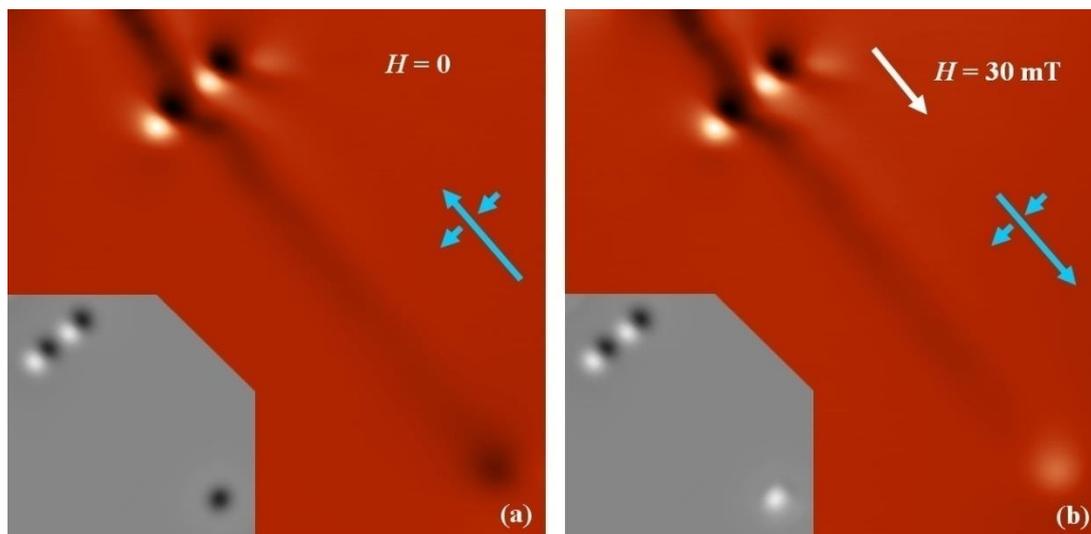
V.L. Mironov et al, *PRB*, 2012

Экспериментальные результаты

1. Моменты частиц направлены в разные стороны



2. Моменты частиц параллельны



Вход 1	Вход 2	Выход
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

“Исключающее ИЛИ”
“XOR”

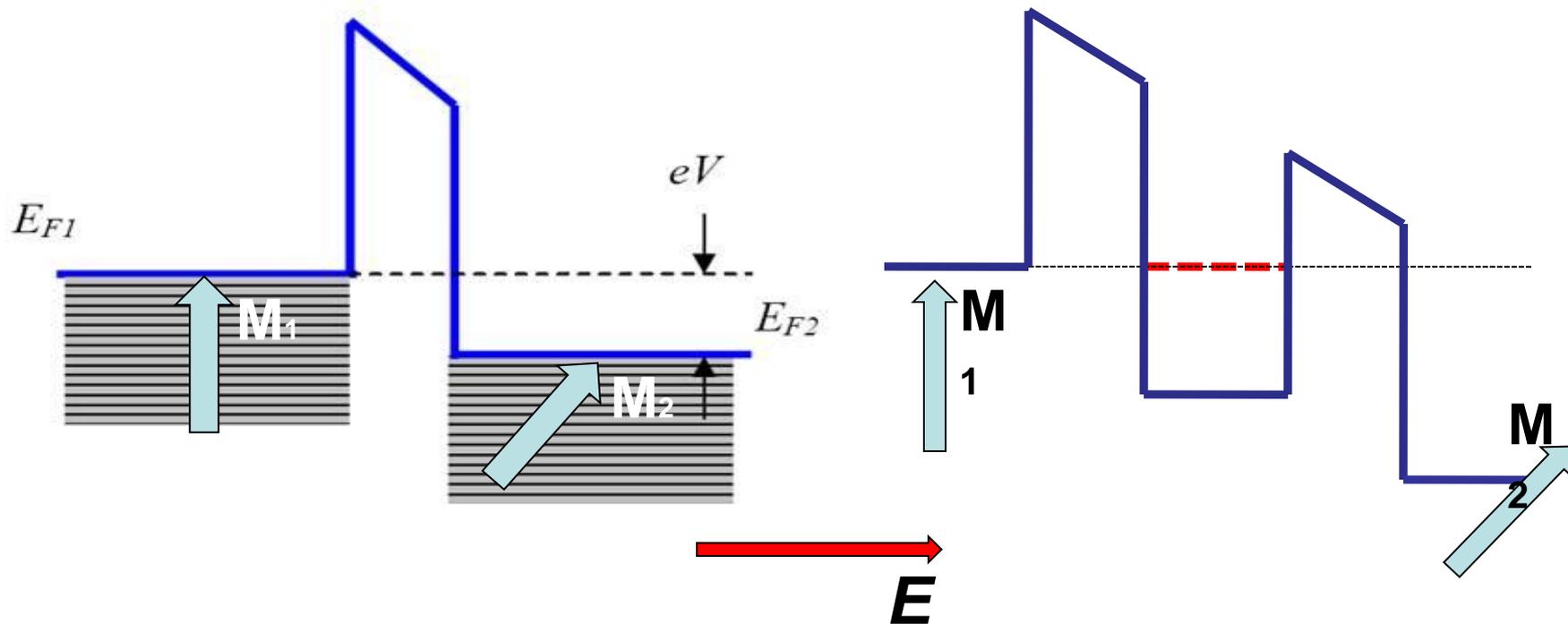
Проблемы и перспективы

1. Управление формой $R(H)$: контроль анизотропии магнитомягкого слоя
2. Увеличение TMR: переход на туннельные прослойки MgO
3. Уменьшение потерь энергии при перемагничивании элементов: магнитоэлектрический эффект
 - гибридные структуры ферромагнетик/сегнетоэлектрик
 - управление обменным взаимодействием в структурах F/I/F

Управление межслойным взаимодействием

$$F = \beta(\vec{E}) \vec{M}_1 \cdot \vec{M}_2$$

$$\beta(\vec{E}) = \beta_1 \vec{n} \vec{E} + \beta_2 E^2$$



Interlayer exchange \sim tunnel transmittance



Отдел магнитных наноструктур

Перемагничивание электрическим током

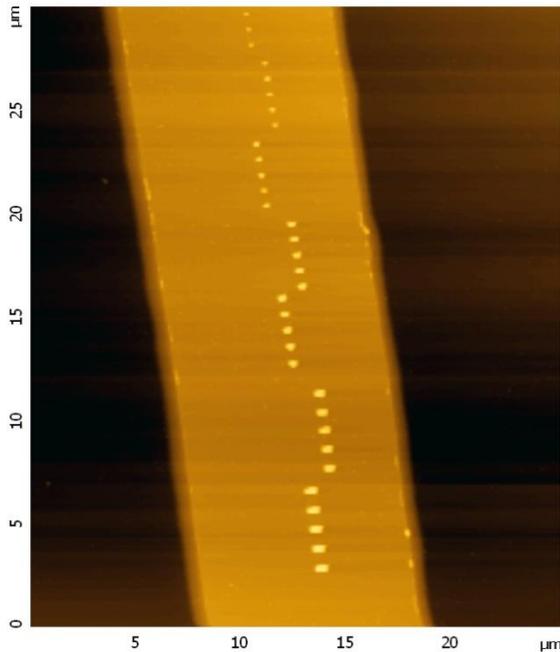
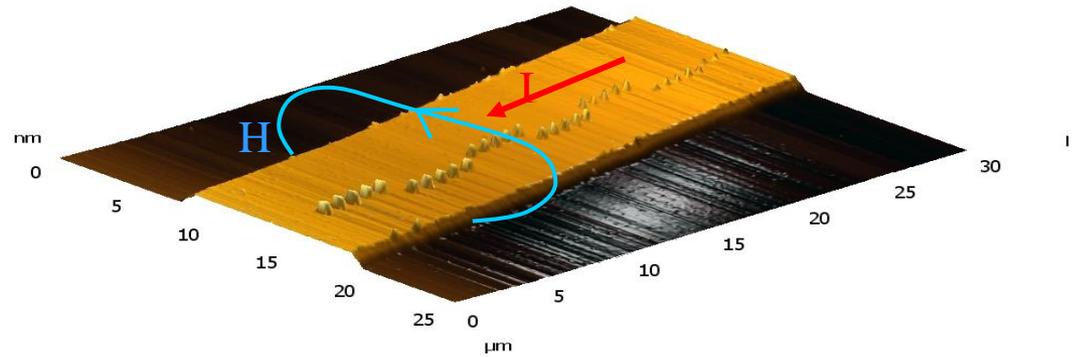
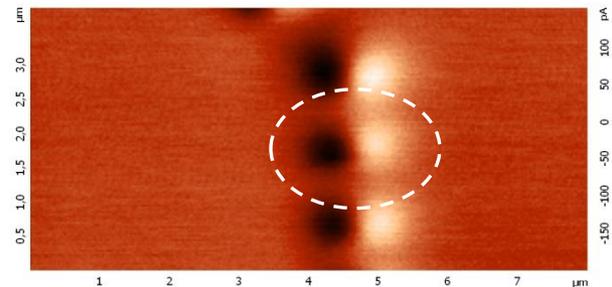
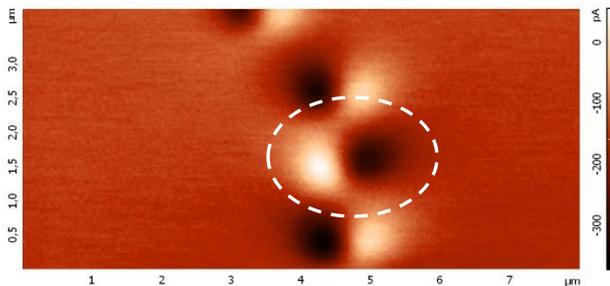


Рис. АСМ изображение прямоугольного провода с расположенными на нем ферромагнитными наночастицами. Красным показано направление тока, синим – направление магнитного поля.



Центральная частица перемагничена током ($J \sim 10^7 \text{A}/\text{cm}^2$) в подмагничивающем магнитном поле $\sim 50 \text{Э}$



Проведение испытаний на радиационную стойкость: стойкость магнитных состояний

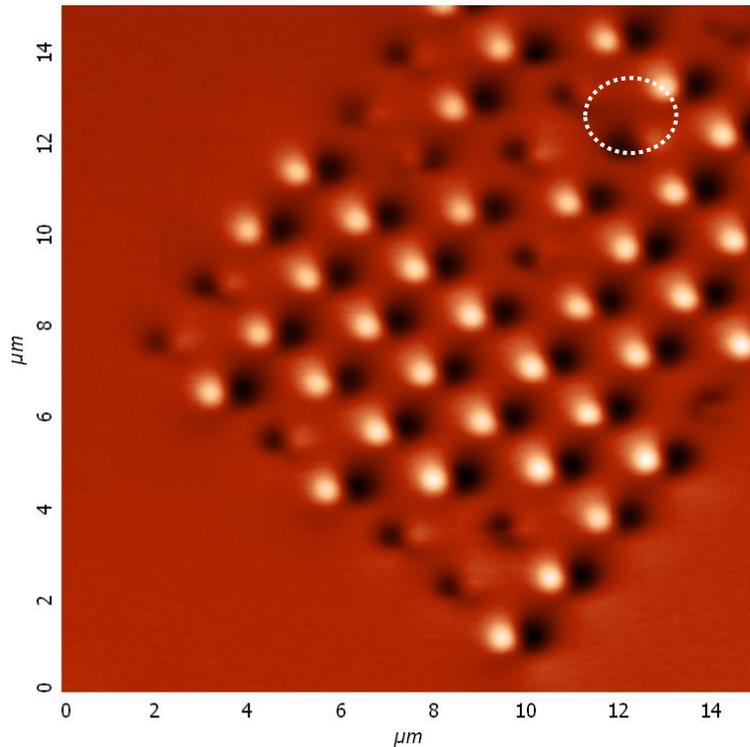


Рис.1 Магнитные состояния частиц массива на 27.02.2008

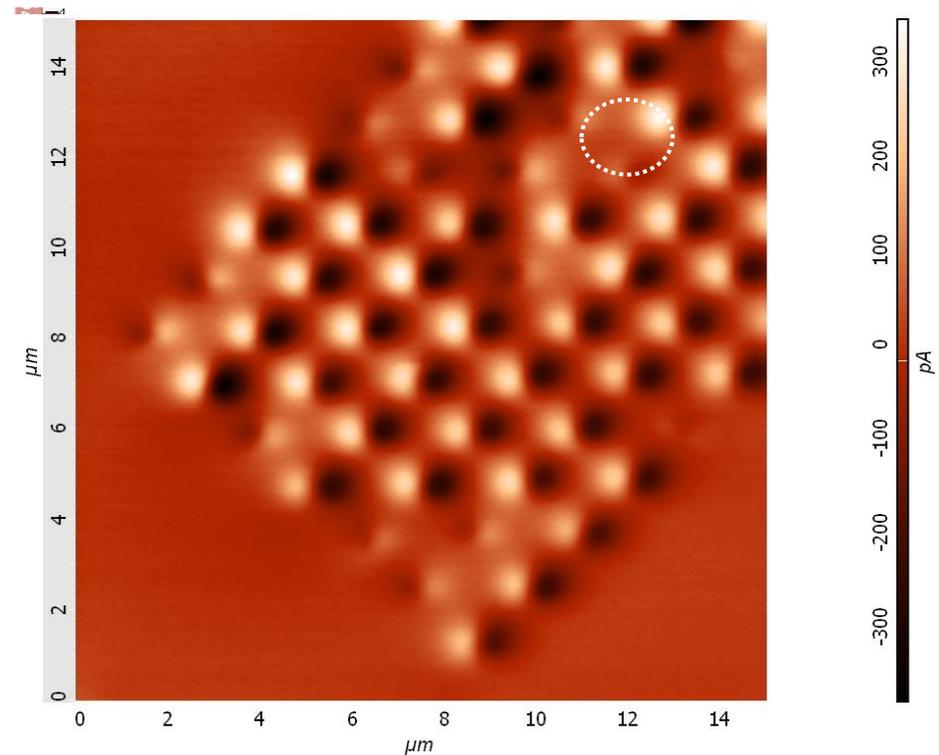


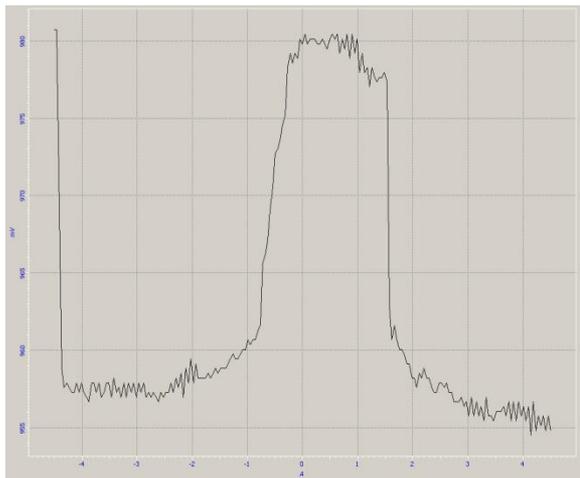
Рис.2 Магнитные состояния частиц массива на 03.04.2008 (после проведения испытаний).

Доза $\sim 5 \times 10^5$ рад

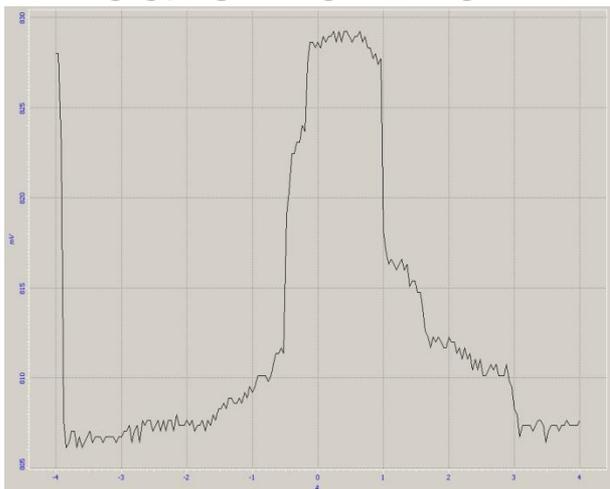
$J \sim 5 \times 10^{14}$ 1/см², т
 $\sim 3 \times 10^{-3}$ с

II. Проведение испытаний на радиационную стойкость: стойкость ВАХ

1. начальное состояние



2. после испытания



Номер элемента контрольной группы	Начальное состояние, ТМС ~ 2%	1 испытание, ТМС ~ 2%	2 испытание, ТМС ~ 2%	Стойкость ТМС элемента к ионизирующему излучению
1 (2.1)	Ok	Ok	Ok	стойкий
2 (2.7)	Ok	Ok	Ok	стойкий
3 (4.1)	Ok	Ok	Ok	стойкий
4 (4.2)	Ok	Ok	Ok	стойкий
5 (4.4)	Ok	Ok	Ok	стойкий
6 (4.5)	Ok	Ok	Ok	стойкий
7 (4.7)	Ok	Ok	Ok	стойкий
8 (4.8)	Ok	Ok	Ok	стойкий
9 (4.9)	Ok	Ok	Ok	стойкий
10 (4.10)	Ok	Ok	Ok	стойкий
11 (4.11)	Ok	Ok	Ok	стойкий
12 (4.12)	Ok	Ok	Ok	стойкий
13 (6.2)	Ok	Ok	Ok	стойкий
14 (6.4)	Ok	Ok	Ok	стойкий
15 (6.11)	Ok	Ok	Ok	стойкий