

ЛЕКЦИЯ 7

Магнитооптика магнитоупорядоченных сред

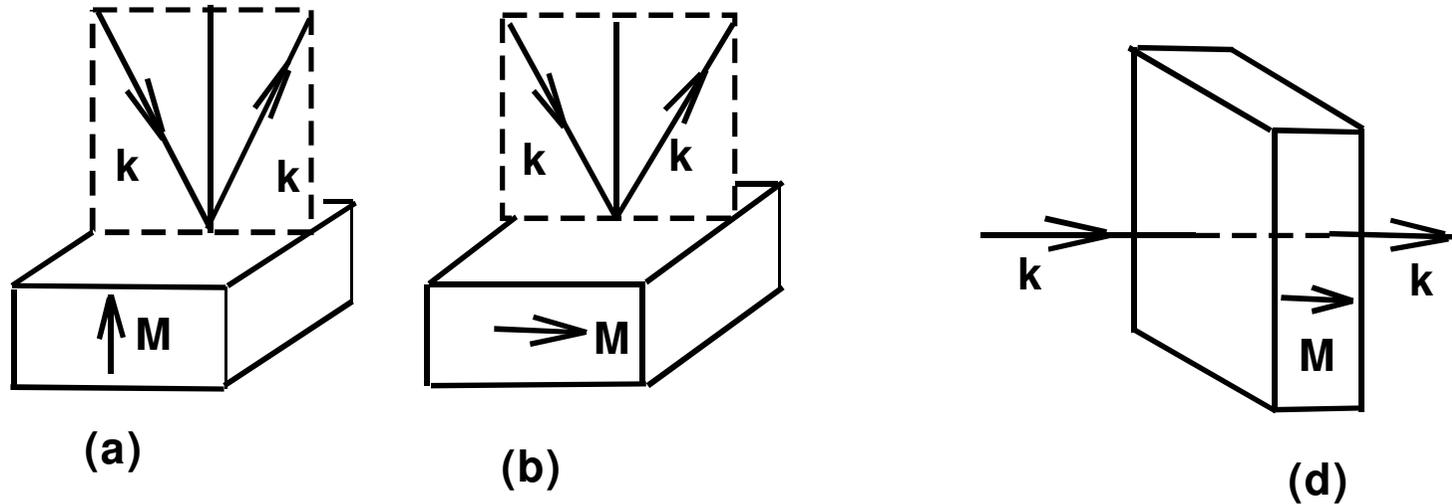
Е.Е. Шалыгина

*Кафедра магнетизма физического факультета МГУ им.
М.В.Ломоносова*

СОДЕРЖАНИЕ

- Магнитооптические методы при решении прикладных и фундаментальных задач физики магнитных явлений**
- Магнитооптическое исследование доменной структуры магнитных материалов**

Магнитооптические эффекты , применяемые для изучения доменных структур



Схематическое изображений взаимной ориентации вектора распространения k световой волны и намагниченности M при наблюдении различных магнитооптических эффектов: полярного и меридионального (a) и (b), соответственно.

Эффект Фарадей (d).

В соответствии с феноменологической теорией
магнитооптические эффекты в отраженном свете
определяются намагниченностью определенной толщины
ниже поверхности ферромагнетика,
соответствующей глубине проникновения света в среду t_{Pen} .
При $t = t_{\text{Pen}}$ амплитуда EH волны уменьшается в e раз, $e = 2.87$.

$$t_{\text{Pen}} = \lambda / 4\pi k,$$

где λ - длина волны
падающего света,
 k – коэффициент
поглощения среды

$$t_{\text{Pen}} \sim 10 - 20 \text{ нм}$$

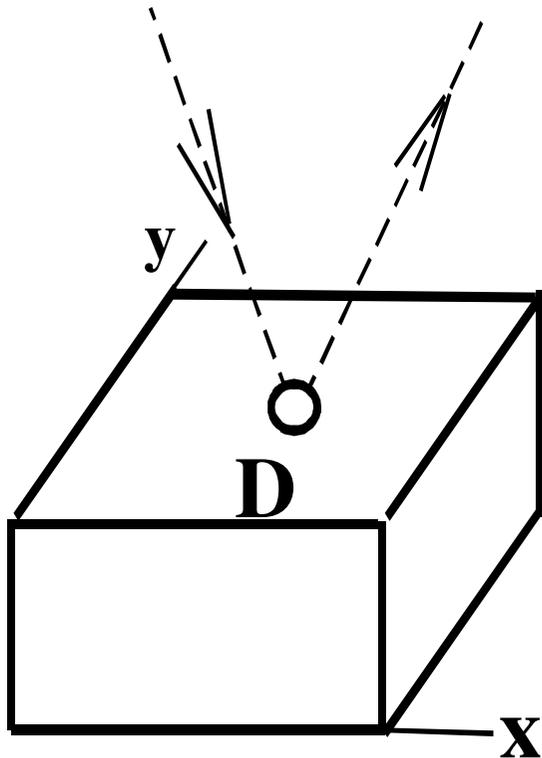
в области энергии
падающего света
 $0.5 < \hbar\omega < 6 \text{ эВ}$
(2480 – 200 нм).

Размер участка поверхности, от которого регистрируется магнитооптический сигнал, может быть уменьшен.

Это реализуется с помощью высокоразрешающего оптического микроскопа.



Сканирующая магнитооптическая микроскопия



Исследуемый микроучасток **D**
определяется размером диафрагмы,
помещенной в плоскости изображения
микроскопа

При увеличении микроскопа, равного
1000, диафрагма размером
 $1 \text{ мм}^2 = (0.3 \times 3) \text{ мм}^2$ позволяет изучать
магнитные свойства магнитных
материалов поверхностного участка
размером

$1 \text{ мкм}^2 = (0.3 \times 3) \text{ мкм}^2$

С линейным разрешением **0.3 мкм.**



**Возможно измерение магнитных свойств
образцов объемом порядка 10^{-13} см^3 (!!)**



Магнитооптический микромагнетометр

МАГНИТО-ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПРИ РЕШЕНИИ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

1. Магнитоэлектронные запоминающие устройства — электронные устройства, в которых используются электромагнитные процессы на доменном уровне.

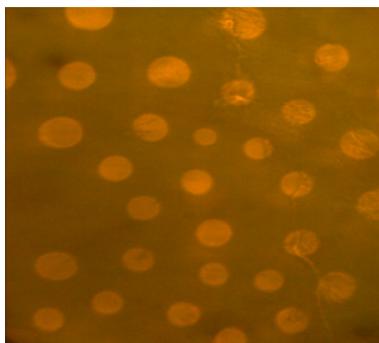
Для создания доменов применяют тонкие **магнитные пленки толщиной до 10 микрон**, напыляемые на подложку из немагнитного материала.

При $H = 0$ в пленке существует лабиринтная структура.

Если подложку поместить во внешнее магнитное поле, то возможно получение доменов цилиндрической формы (**ЦМД**).

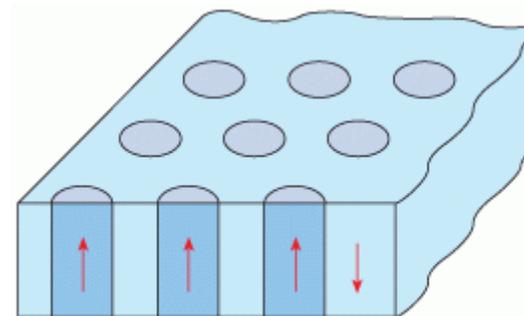
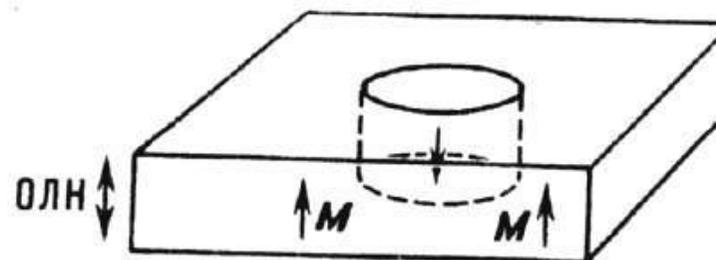


$H = 0$



$H_{\perp} \neq 0$

Вид сверху



*Схематическое изображение
цилиндрических магнитных доменов.*

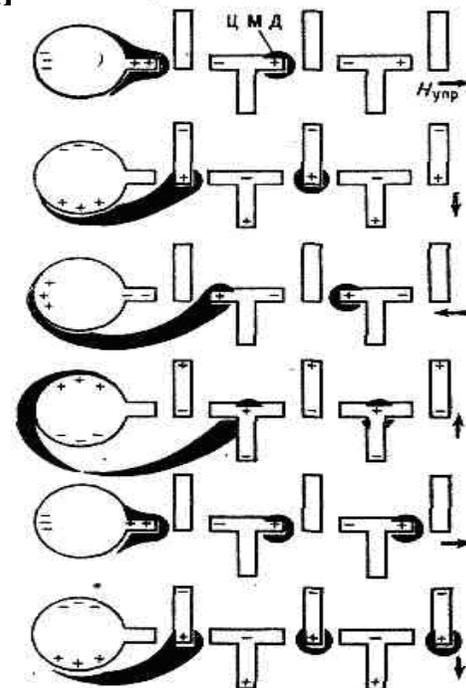
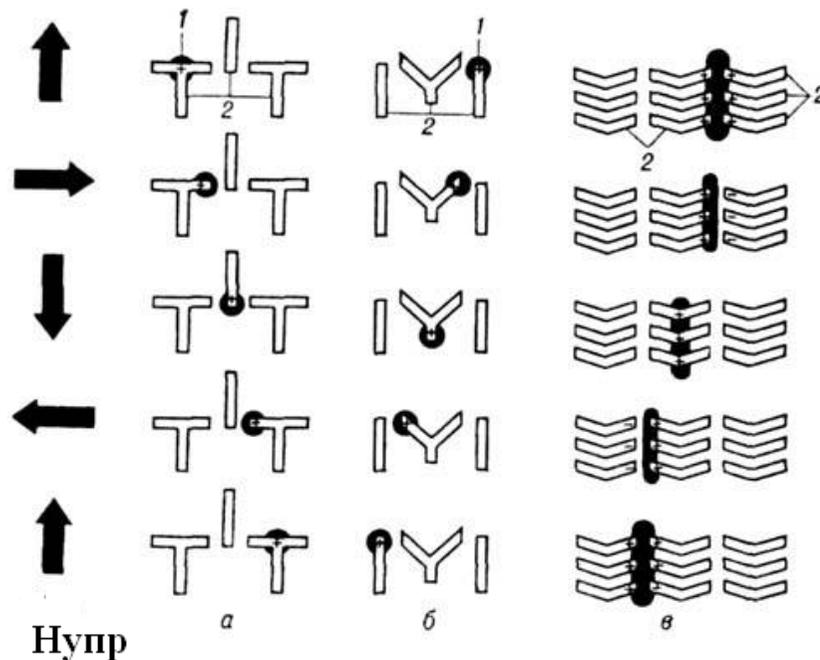
В качестве носителей информации для создания логических и запоминающих устройств используются **ЦМД**.

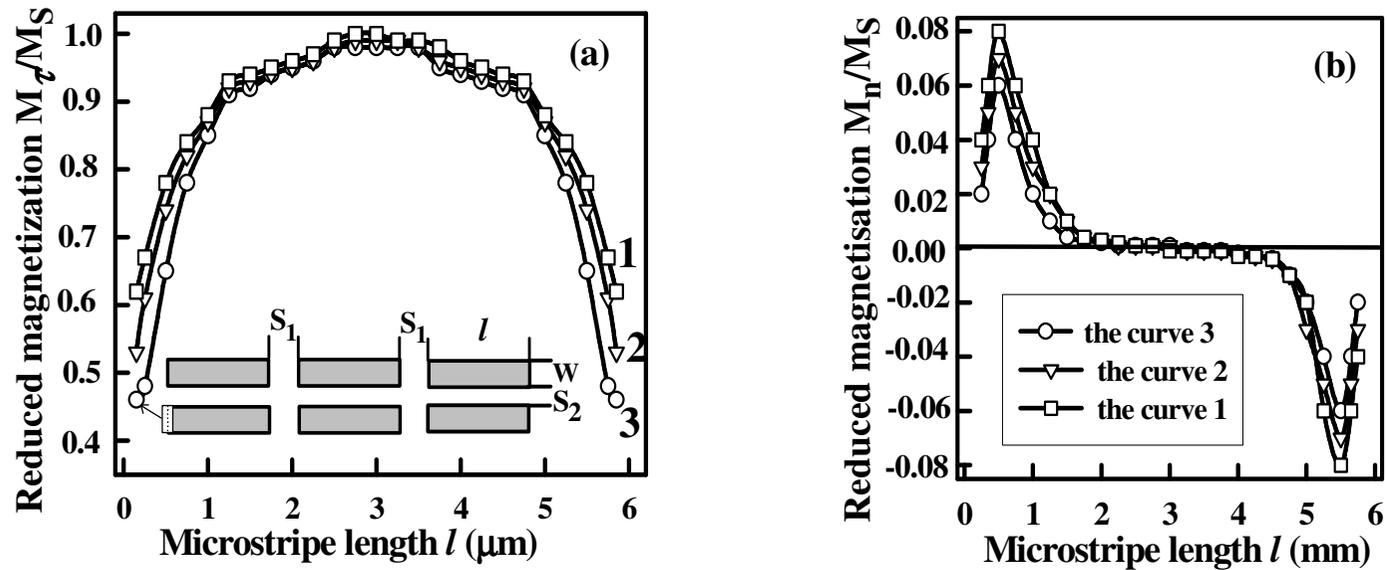
Логическим элементом 1 в этих устройствах является **ЦМД**, а элементом **0** — пространство между **ЦМД**

Важное место занимают **вопросы управления движением ЦМД**.

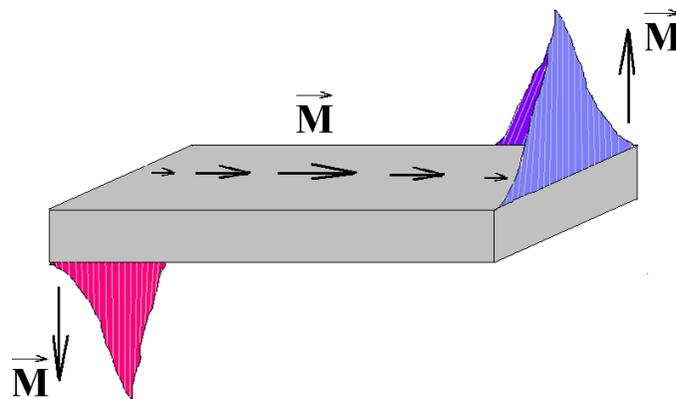
Для перемещения ЦМД в заданном направлении **используют аппликации типа Т-Т, Y-Т, X-X** из тонких пермалловых пленок, с помощью которых создают **локальные неоднородности магнитного поля**.

Перемещением ЦМД в такой системе управляют **с помощью плоского вращающегося магнитного поля**, которое изменяет направление намагниченности в пермалловой аппликаци





Распределение плоскостных (a) и перпендикулярных поверхности микрострайпов (b) компонент намагниченности. Кривые 1, 2 и 3 измерены для совокупностей микрострайпов размером $(2 \times 6 \times 0.015) \text{ мкм}^3$ с $S_1 = 0.25, 0.5$ and $1 \mu\text{m}$, соответственно при $H = 13 \text{ Э}$.



Область устойчивой работы таких устройств и скорость продвижения ЦМД вдоль этих структур зависят от формы и геометрических размеров этих аппликаций.

Запись и считывание информации в них осуществляются за счет движения ЦМД по магнитной пленке

Количество информации, равное 1 биту, можно получить в ответе на вопрос типа «да»/ «нет» (1 или 0).

Диаметр ЦМД может быть ≤ 1 мкм, что позволяет создать устройства с плотностью записи 0.1 Гбит/см².

1 байт = 8 бит

1 килобит 1 000 бит

1 килобайт (Кб) = 1024 байт

1 мегабайт (Мб) = 1024 килобайт

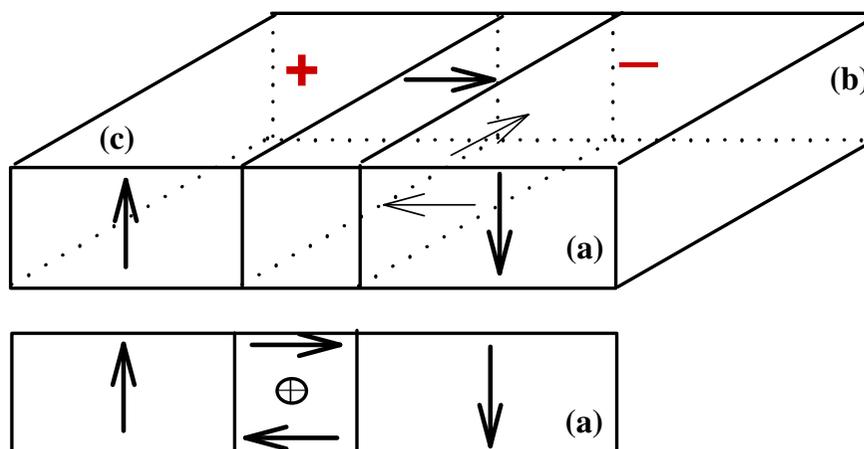
1 гигабайт (Гб) = 1024 мегабайт

1 терабайт (Тб) = 1024 гигабайт

Повышение скорости записи и считывания достигается, большой подвижностью ЦМД.

В устройствах с ЦМД нет механических частей.

Схематическое изображение доменной структуры (левая панель) и структура доменной границы (правая панель) в феррит-гранатовых пленках.



Доменная граница ФГ пленок имеет сложную структуру.



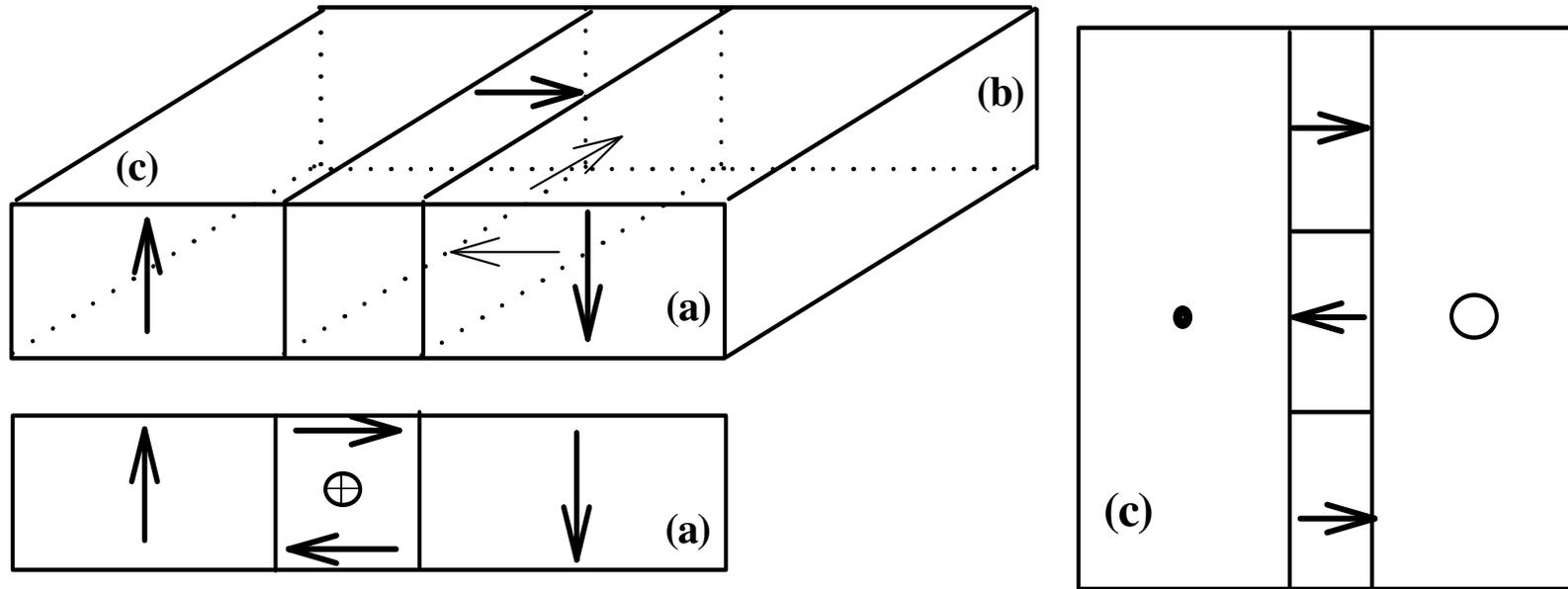
скрученной» («twisted» structure»)

С помощью меридионального эффекта Керра было доказано экспериментально, что ДГ в феррит-гранатовых пленках является «скрученной» («twisted» structure).



ДГ имеет неелевскую структуру на поверхности образца.

В доменной границе существуют субдомены, разделенные границами, называемыми вертикальными блоховскими линиями (ВБЛ).



Впервые визуализация ВБЛ в доменных границах феррит-гранатовых пленок и их магнитное поведение было осуществлено А. Thiaville

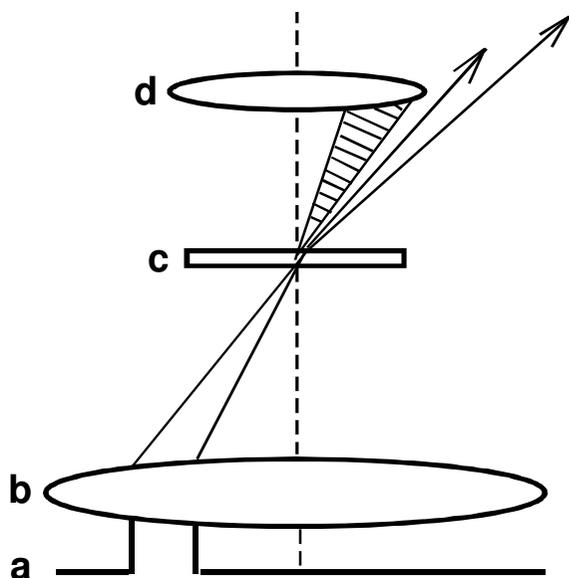
(A. Thiaville, et. al, IEEE Trans. Magn. MAG 24 (1988) 1722; IEEE Trans. Magn. MAG 26 (1990) 1530).

Метод поляризованного анизотропного темнопольного наблюдения ВБЛ.

Метод реализуется с применением высокоапертурного конденсора (b) и темнопольного кольца (a).

Только наклонные лучи могут попадать на образец (!).

При использовании объектива с численной апертурой меньше чем апертура конденсора условия темнопольного наблюдения могут реализоваться.



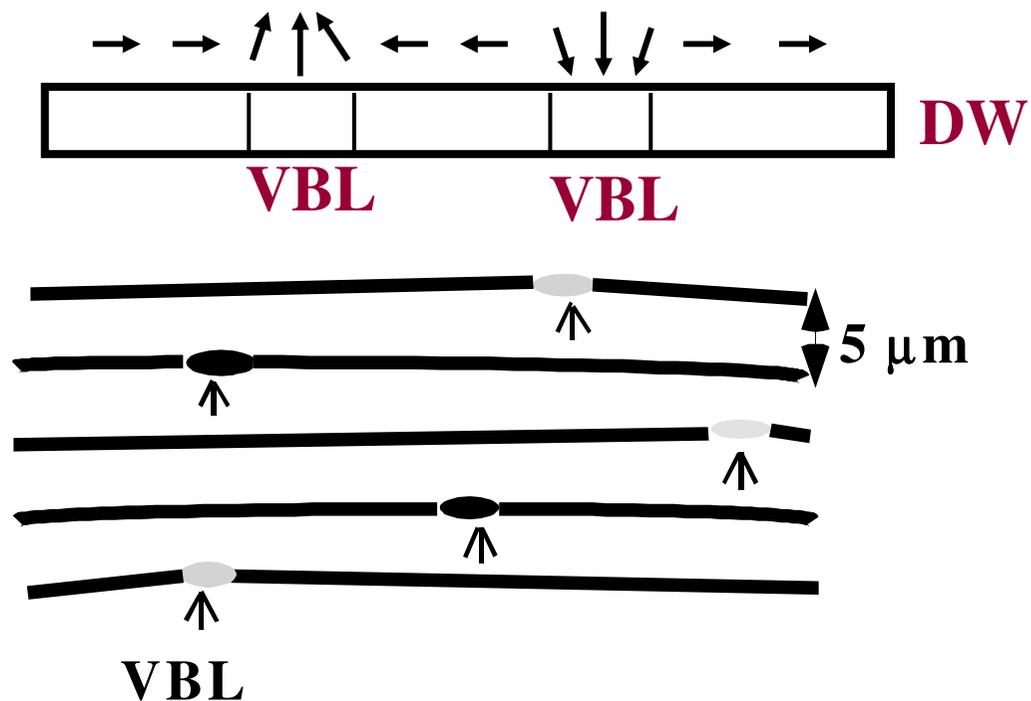
a: диафрагма,

b: конденсор,

c: образец,

d: объектив,

Типичная картина магнитооптического контраста, наблюдаемая для феррит-гранатовой пленки в помощью метода поляризованного анизотропного темнопольного наблюдения доменных структур.



Темные и светлые участки на этом рисунке соответствуют ВБЛ.

Были предложены и реализованы запоминающие устройства на ВБЛ.

Регистром хранения информации на ВБЛ служит полосовой домен феррит-гранатовой пленки.

Накопитель информации на ВБЛ содержит монокристаллическую подложку ,

на одну сторону которой нанесена магнитоодноосная феррит-гранатовая пленка с элементами стабилизации полосовых доменов в виде вытравленных на всю глубину пленки канавок,

ширина и расстояние между которыми равны полупериоду полосовой доменной структуры в пленке.

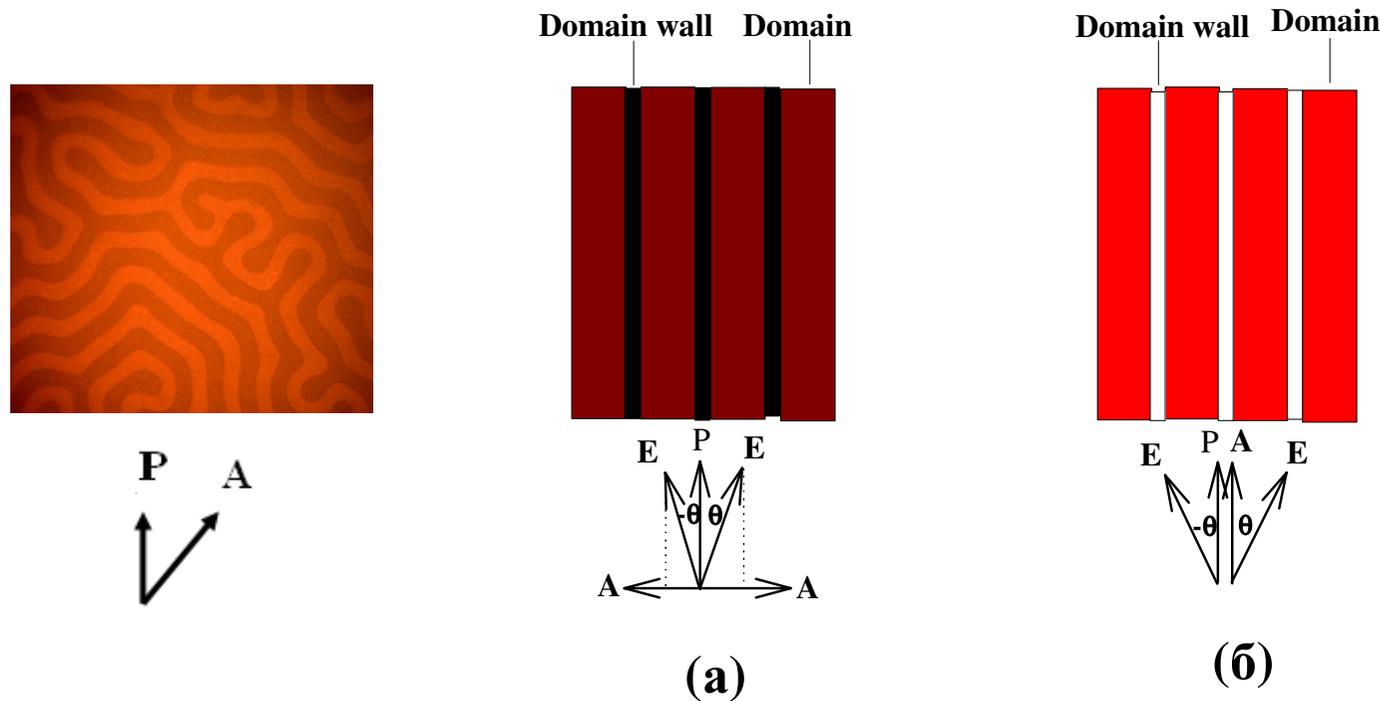
На поверхности пленки расположены также

элементы создания потенциального рельефа для стабилизации ВБЛ в виде параллельных друг другу и перпендикулярных канавкам тонкопленочных полос

Поступательное движение ВБЛ в доменной границе осуществляется импульсом поля смещения.

Доменные границы в прозрачных феррит-гранатовых пленках.

Когда угол между поляризатором и анализатором равен 90° или 0° , домены имеют одинаковый цвет, а доменные границы становятся темными (а) или светлыми (б).



Схематическое изображение условий эксперимента по наблюдению доменных границ в $(\text{BiTm})_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ ferrite-garnet феррит-гранатовой пленка с помощью эффекта Фарадея.

В случае (б) эффект Фарадея пропорционален намагниченности доменной границы и ее толщине t_{DW}

$$\Theta_F(M) \sim t_{DW}.$$

Простой расчет с учетом неоднородной намагниченности доменной границы позволили получить соотношение между

$$\Theta_F \text{ и } t_{DW}.$$

Оценки показали, что для $(\text{BiTm})_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ феррит-гранатовых пленок

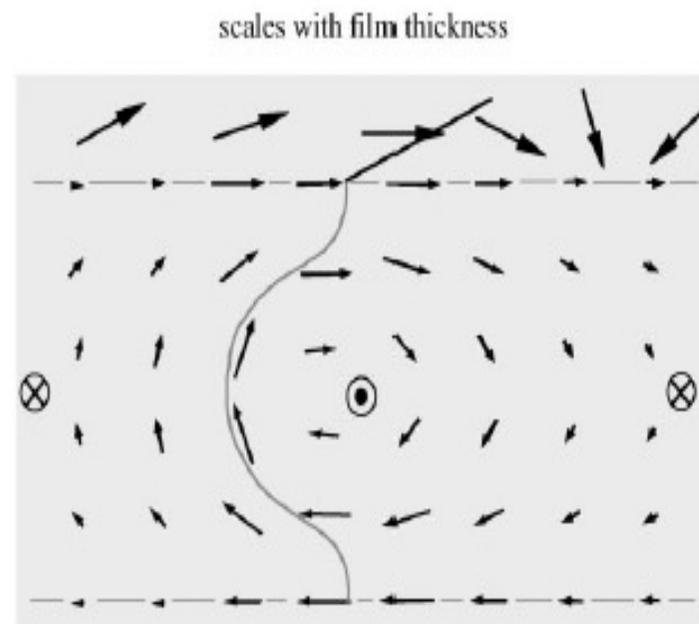
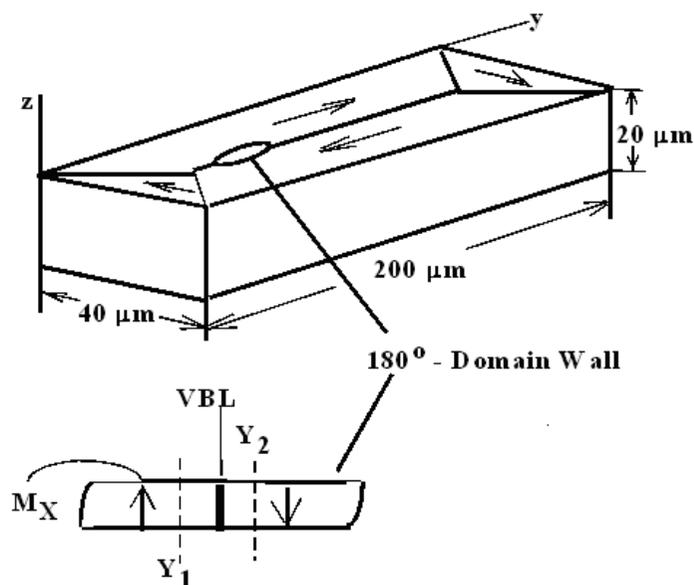
$$t_{DW}^{\text{Exp}} = 0.5 \text{ мкм} \text{ и } t_{DW}^{\text{Cal}} = 0.3 \text{ мкм}$$

Различие было объяснено тем, что не учитывалось изменение структуры доменной границы в приповерхностной области.

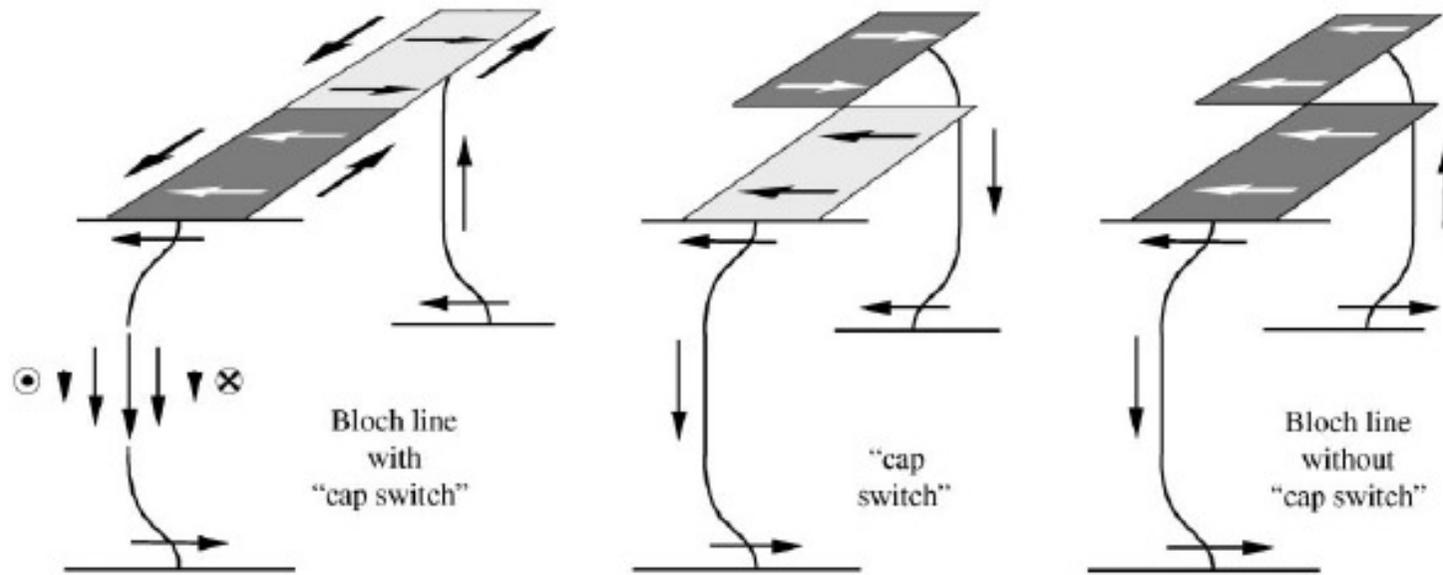
Магнитооптическое исследование структуры доменных границ ферромагнитных материалов

Установлено, что ДГ в объеме представляет собой **180°-границу блоховского типа**, а на поверхности **неелевского** (V.E. Zubov, G.S. Krinchik, et al., Sov. Phys. JETP 75, N1 (1992) 124).

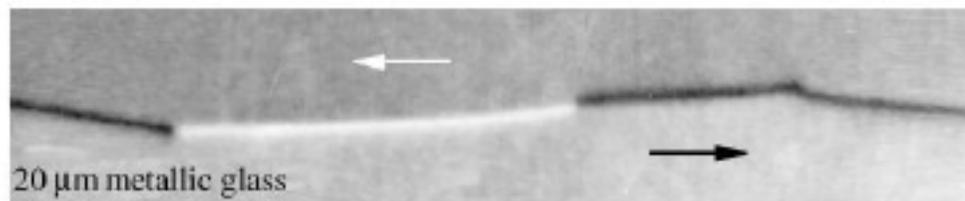
Обнаруженная структура ДГ совпадала с моделью, предложенной А. Хубертом (A. Hubert, Z. Angew. Phys. 32 (1971) 58).



Было обнаружено также, что 180° -ДГ имеет субструктурные элементы – вертикальные Блоховские линии (ВБЛ).



Доменная структура, наблюдаемая для вискеров железа.



2. Аморфные материалы (АММ)

Современные магнитомягкие АММ имеют следующие свойства:

- Высокую индукцию насыщения: $B_S = 4\pi M_S$.
- Малое значение коэрцитивной силы H_C .
- Высокое значение магнитной проницаемости μ .
- Высокое удельное сопротивление ρ .
- Высокую прочность и твердость при великолепной пластичности.

Дешевая технология получения, а также перечисленные выше особенности аморфных материалов, позволяют их эффективно внедрять в технику.

Они используются для изготовления

- магнитопроводов магнитных головок,
- магнитных экранов,
- сердечников трансформаторов,
- магнитных сенсоров.

2. Аморфные материалы имеют различную доменную структуру

Доменная структура зависит от магнитной анизотропии (МА).

Причины МА:

◆ Магнитоупругая энергия. Ее величина зависит от величины внешних упругих напряжений, приложенных в процессе приготовления образцов, σ , и значения магнитострикции λ_S : $E_{\text{МУ}} \sim \sigma \lambda_S$

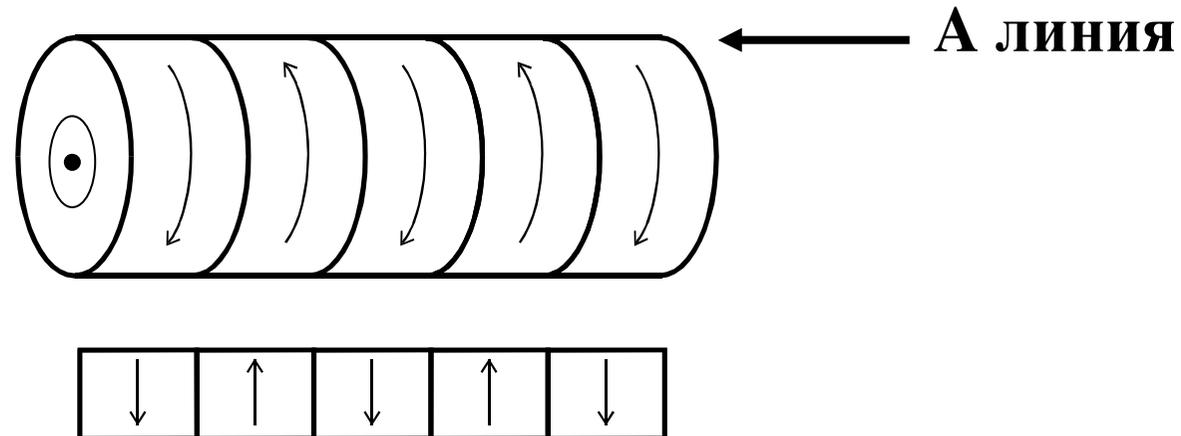
◆ Анизотропия формы

◆ Морфология поверхности образца

◆ Термическая обработка образца (с полем и без поля)

Кобальт-обогащенные микропровода

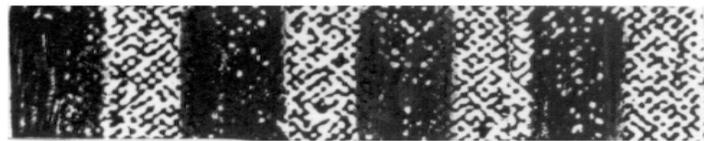
Предполагалось, что существуют приповерхностные круговые домены с ориентацией намагниченности в соседних доменах в противоположных направлениях ($\pm 90^\circ$ относительно длины микропровода).



Схематическое изображение приповерхностной доменной структуры, предложенное для кобальтообогащенных микропроводов при $H = 0$.

Нижний рисунок – доменная структура вдоль линии А.

Доменная структура, наблюдаемая с помощью магнитооптического контраста для микропроводов разного диаметра при $H = 0$.

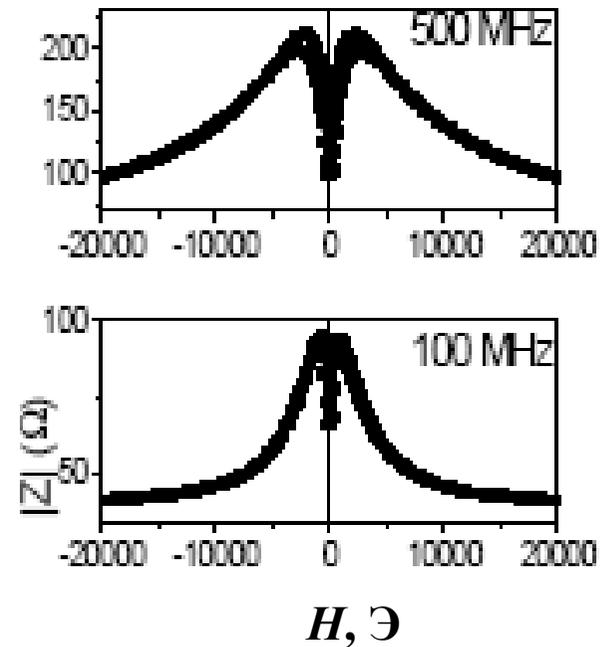
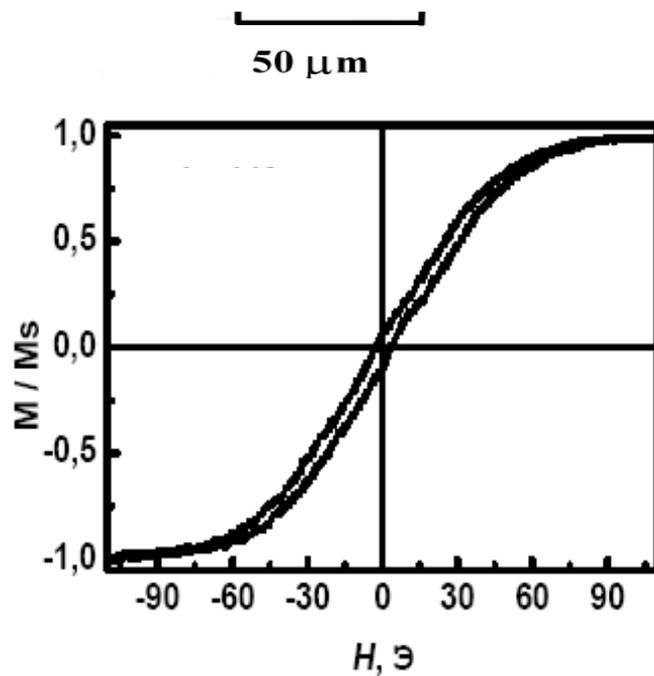


(a)

Ширина круговых доменов $d = 23$ и 9.5 мкм для микропроводов диаметром 50 мкм (a) и 20 мкм (b).



(b)



Типичная петля гистерезиса (слева) и магнитоимпеданс (справа), наблюдаемые для кобальт-обогащенных микропроводов

Магнитоимпеданс – изменение электросопротивление в переменном токе магнитомягкого микропровода при приложении магнитного поля.

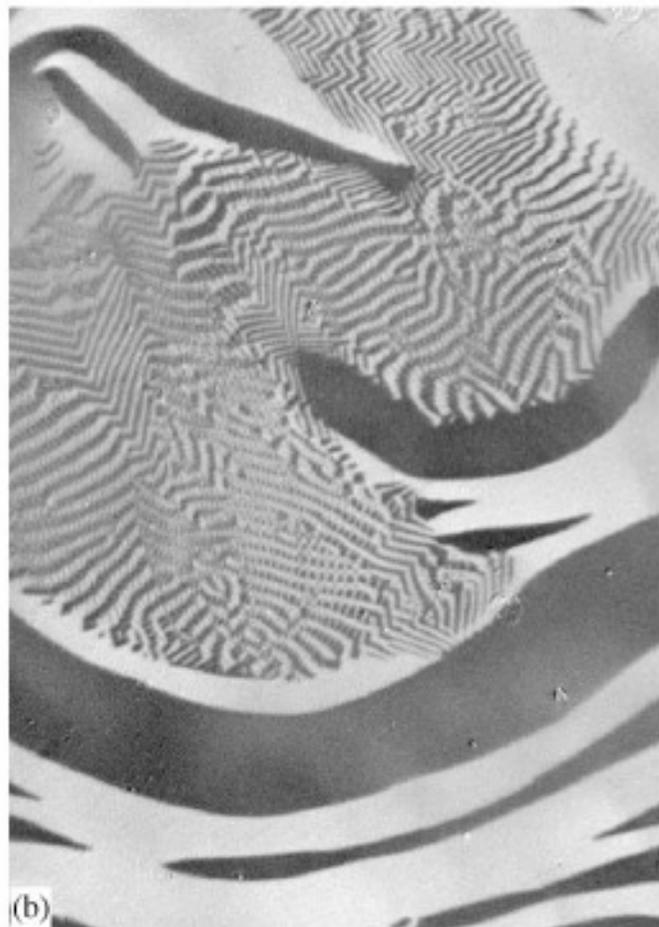
Электросопротивление в переменном токе магнитомягкого микропровода изменяется в 500–1000 раз при приложении слабого магнитного поля.

На основе эффекта ГМИ созданы датчики магнитных с чувствительностью (вплоть до 10^{-8} Э) и низкой стоимостью.

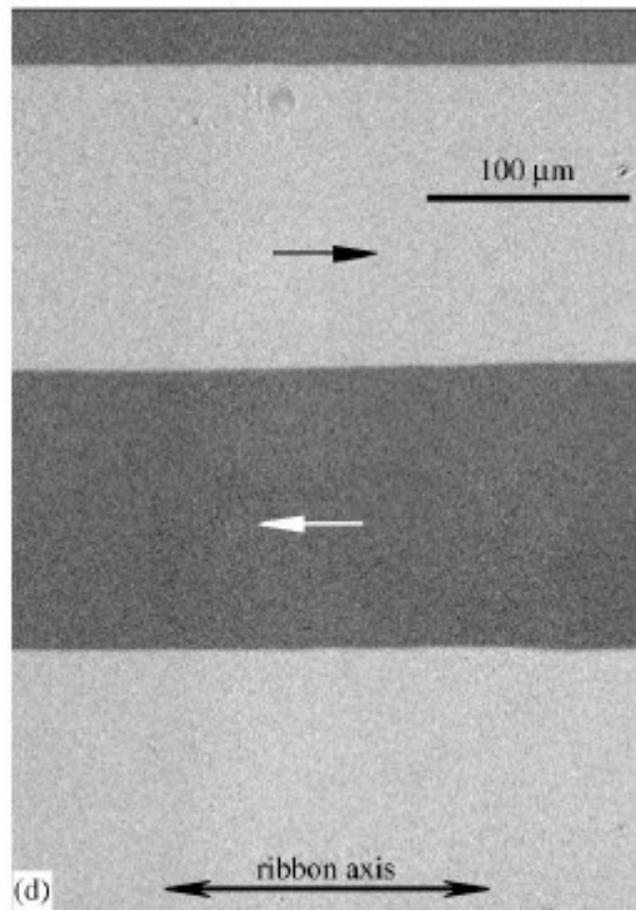
Источники магнитного поля в биологических системах, таких как мозг и тело человека, достаточно малы, и создаваемые магнитные поля лежат в диапазоне 10^{-10} – 10^{-5} Э.

Созданы миниатюрные датчики на основе эффекта ГМИ для медицинских приложений.

Типичная доменная структура аморфных лент с 20-микронной толщиной.

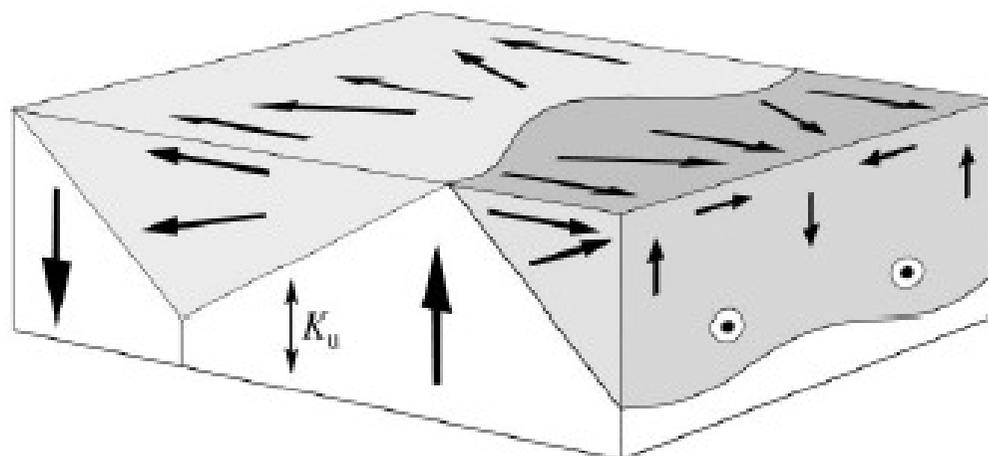
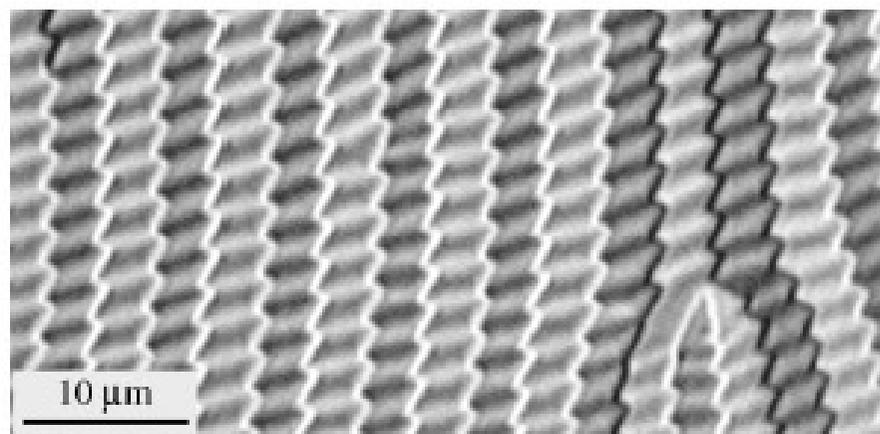


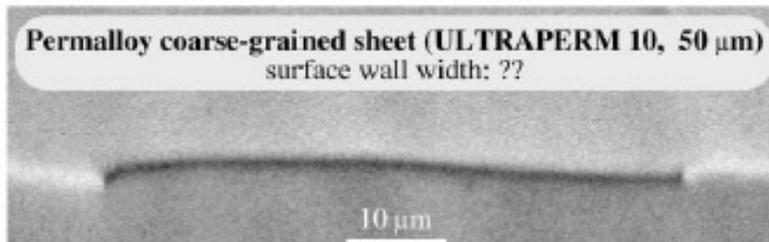
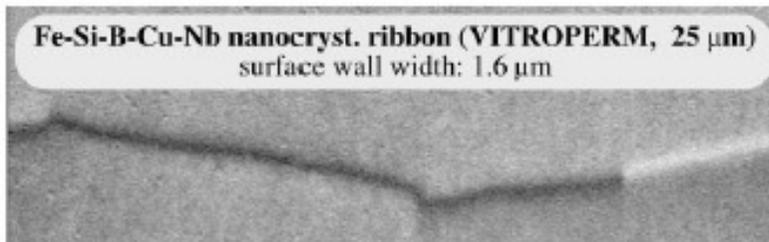
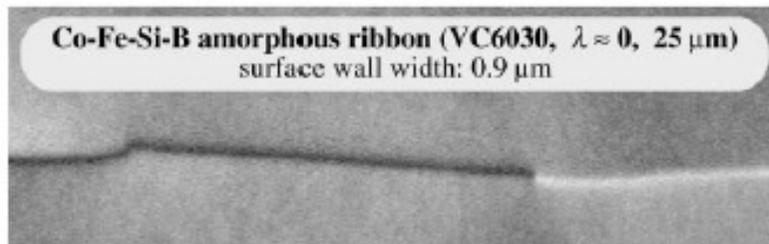
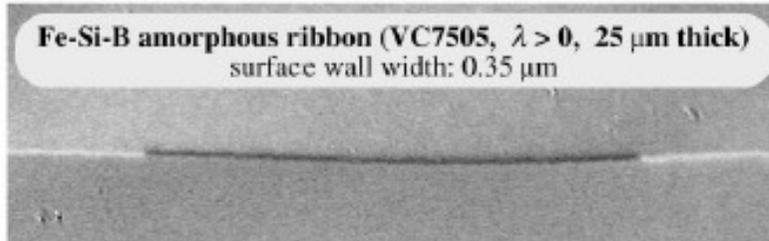
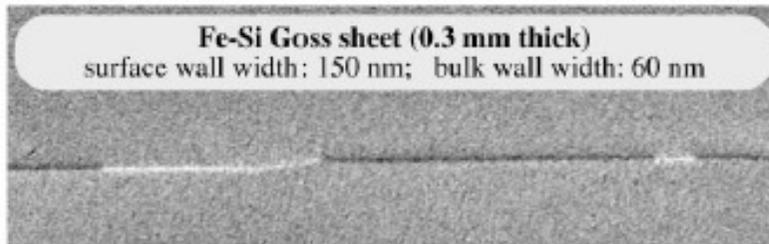
$\text{Fe}_{76}(\text{Si,B})_{24}$ [VC7505]
 $\lambda = +24 \cdot 10^{-6}$



$(\text{Co,Fe,}\dots)_{77}(\text{Si,B})_{23}$ [VC6030]
 $\lambda = <0.2 \cdot 10^{-6}$

Доменная структура аморфных лент с наведенной перпендикулярной магнитной анизотропией.

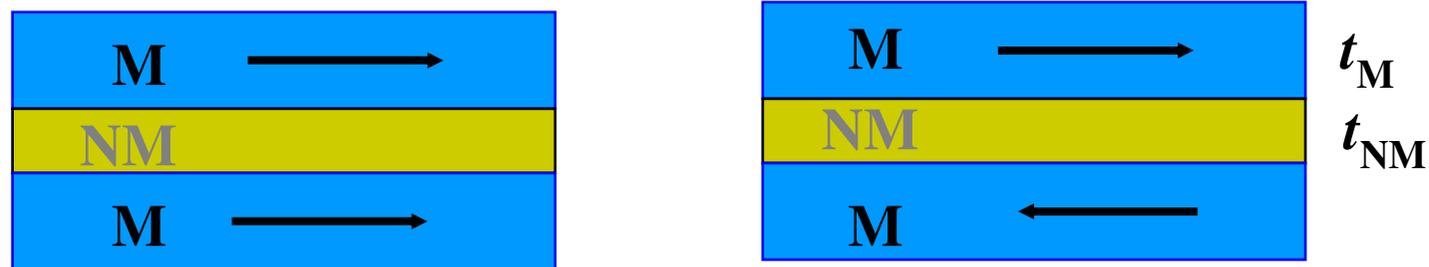




**Визуализация
доменных границ в
различных магнитных
материалах.**

3. Тонкопленочные многослойные системы, состоящие из магнитных и немагнитных слоев субмикронной (нанометровой) толщины

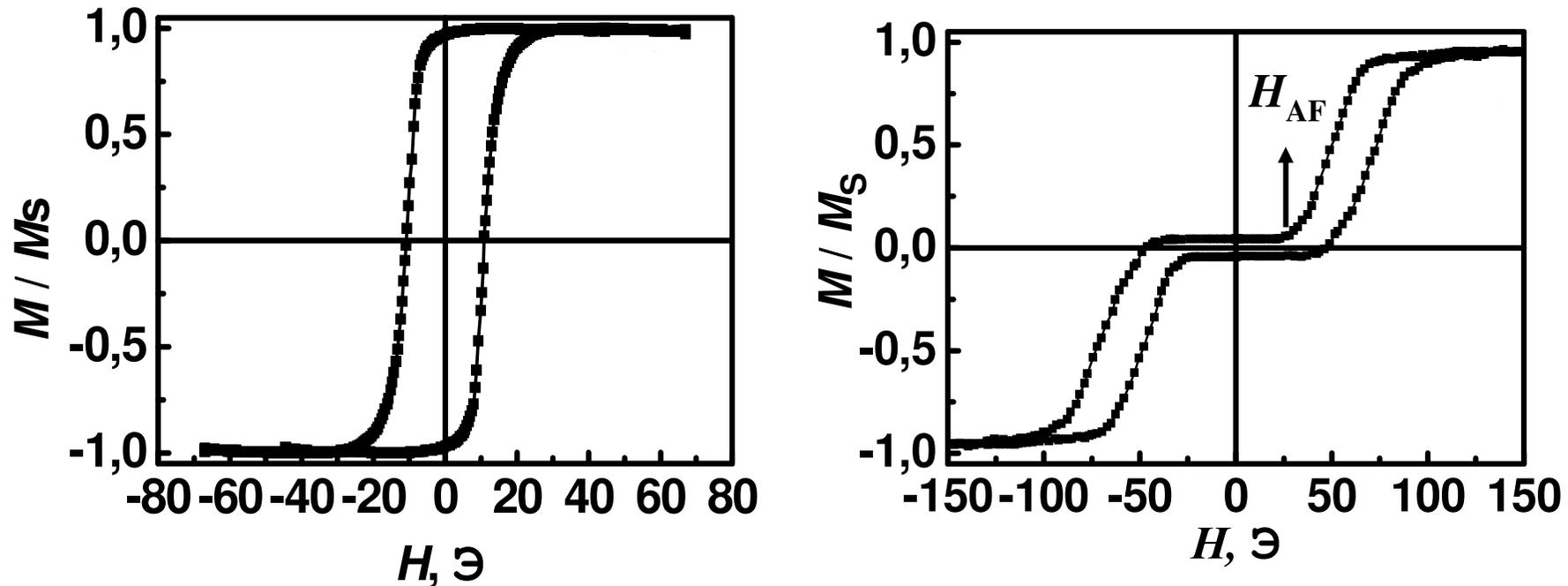
Трехслойные тонкопленочные системы



M (Fe, Co, Ni) , NM (Cu, Ag, Au – диамагнитные материалы, Ti, Mo, Ru, V, Nb – парамагнитные материалы, Cr, Mn – антиферромагнитные материалы).

Возможна разная ориентация намагниченности в соседних магнитных слоях в зависимости от толщины немагнитного слоя – параллельная (ферромагнитный обмен F) и антипараллельная (антиферромагнитный обмен AF).

Петли гистерезиса, наблюдаемые для 2.5 нм Fe/Pt/ 2.5 нм Fe с $t_{Pt} = 0.4$ нм (левая панель) и $t_{Pt} = 0.7$ нм (правая панель)



В образцах с АФ обменом поле насыщения H_S значительно больше, чем H_S в образцах с ферромагнитным обменом, что обусловлено дополнительными затратами энергии на преодоление антиферромагнитного обмена между магнитными слоями.

$$H_{AF} = 4J_{AF} / M_S \times t_M,$$

В многослойных тонкопленочных образцах наблюдалось гигантское магнетосопротивление.

Магнетосопротивлением называют зависимость электрического сопротивления образца от величины внешнего магнитного поля.

Численно его характеризуют величиной

$$\delta_H = \frac{R(0) - R(H)}{R(H)},$$

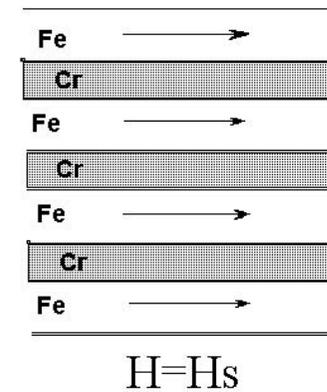
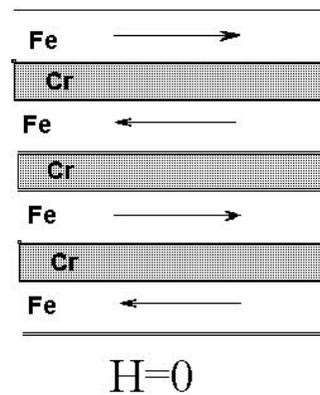
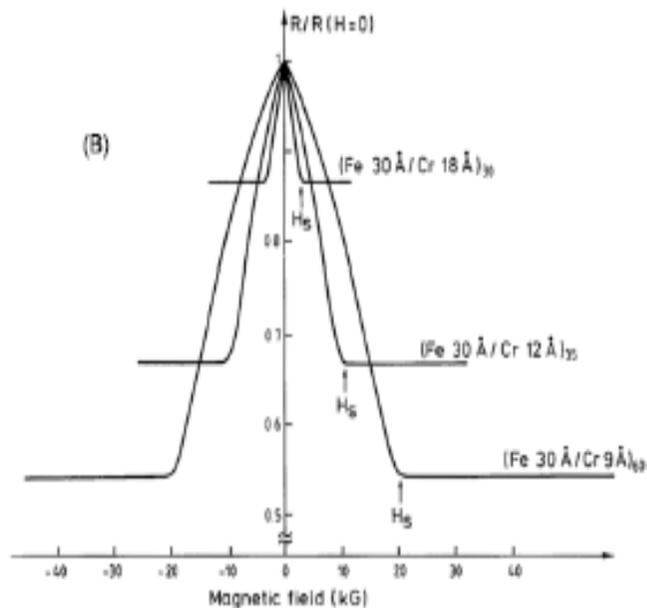
где $R(0)$ — сопротивление образца в отсутствие магнитного поля, а $R(H)$ — его сопротивление в магнитном поле

Эффект состоит в существенном изменении электрического сопротивления такой структуры при изменении взаимного направления намагниченности соседних магнитных слоёв.

Направлением намагниченности можно управлять, например, приложением внешнего магнитного поля.

В основе эффекта лежит рассеяние электронов, зависящее от направления спина (**намагниченности**).

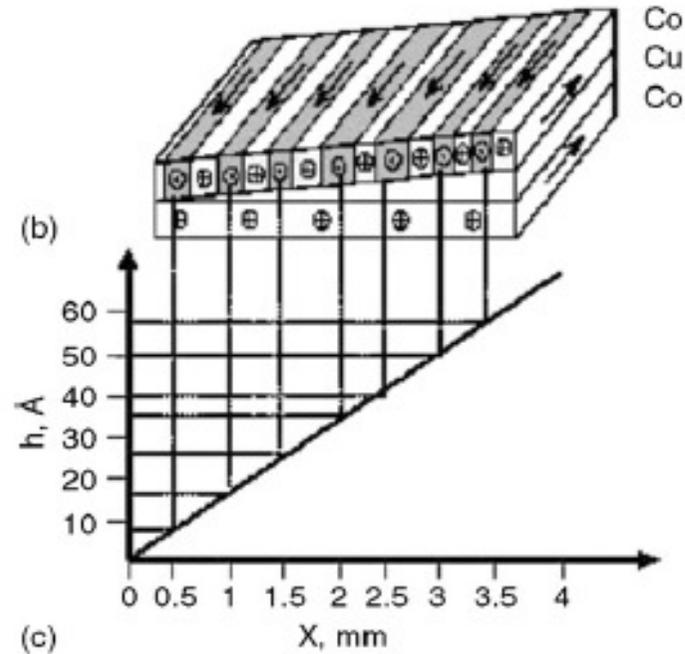
За открытие гигантского магнетосопротивления в 1988 году физики Альберт Ферт (Университет Париж-юг XI) и Питер Грюнберг (Исследовательский центр Юлих) были удостоены Нобелевской премии по физике в 2007 году.



Данные полученные А. Фертом и П. Грюнбергом



(a)

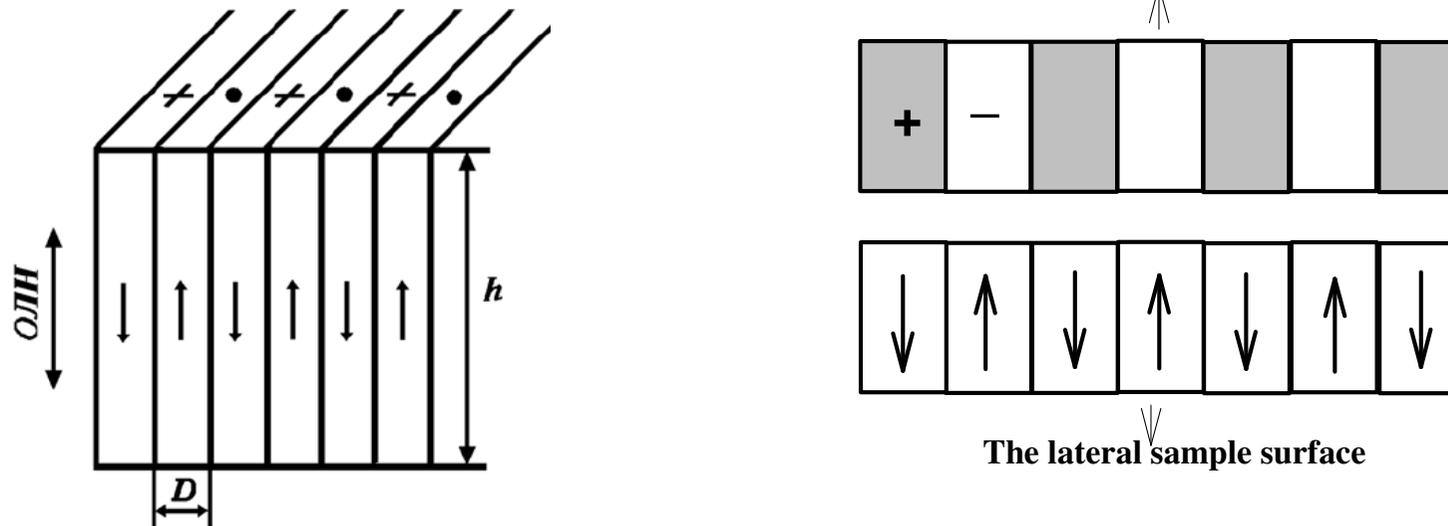


(a) Доменная структура сэндвичей 50 нм $\text{Co}/(x \text{ grad } h) \text{Cu}$ клин/50 нм Co ; $x = 0 - 3.5$ мм; $\text{grad } h = 1.7$ нм/мм. (b) Схематическое изображение доменной структуры.

4. Пермалловые пленки

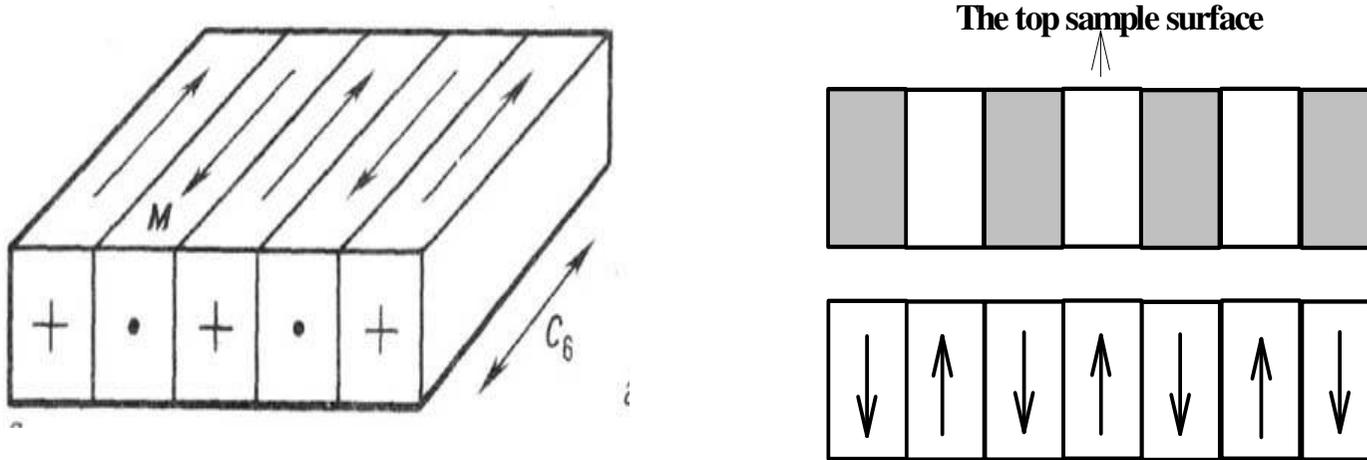
$$K_{\perp} / 2\pi M_s^2 > 1$$

Вектор намагниченности параллелен легкой оси намагничивания, т.е. перпендикулярен поверхности пленок.

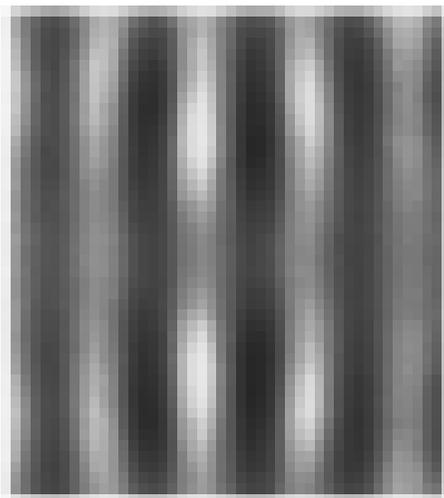


Схематическое изображение доменной структуры (слева) и доменной структуры, наблюдаемой с помощью полярного эффекта Керра (справа)

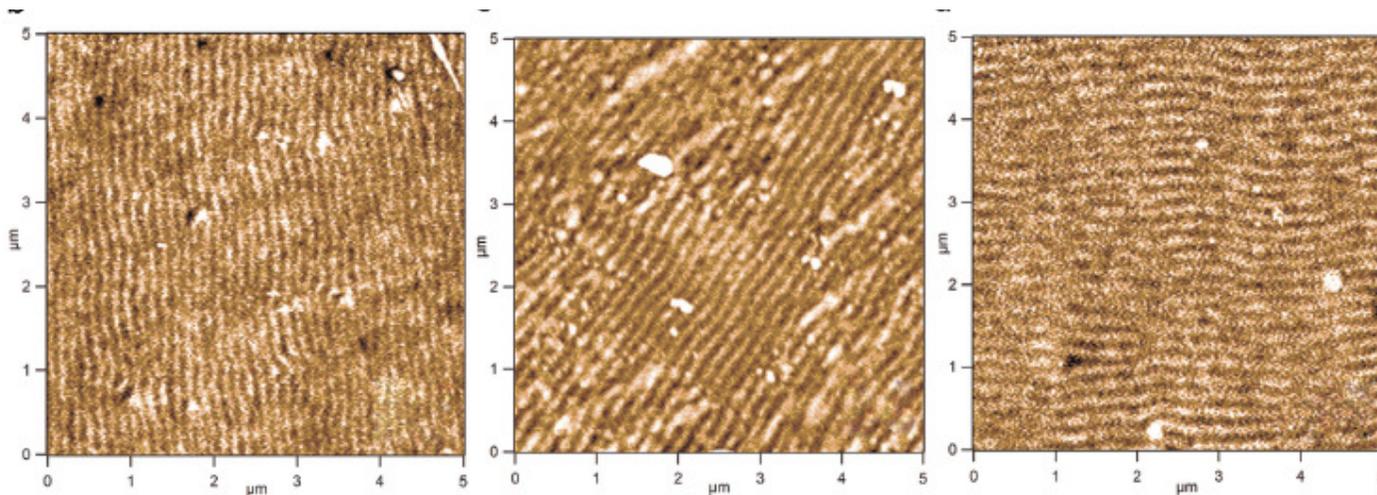
$$K_{\perp} / 2\pi M_S^2 \leq 1 \quad \text{и} \quad t \leq t_{cr} = 2\pi \sqrt{A/K_{\perp}}$$



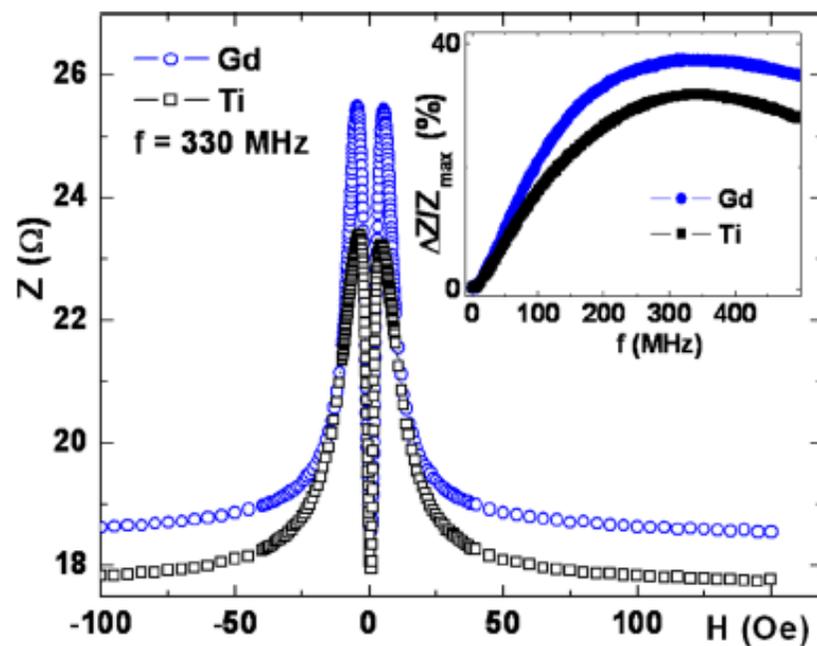
Схематическое изображение доменной структуры (слева) и доменной структуры, наблюдаемой с помощью меридионального эффекта Керра (справа)



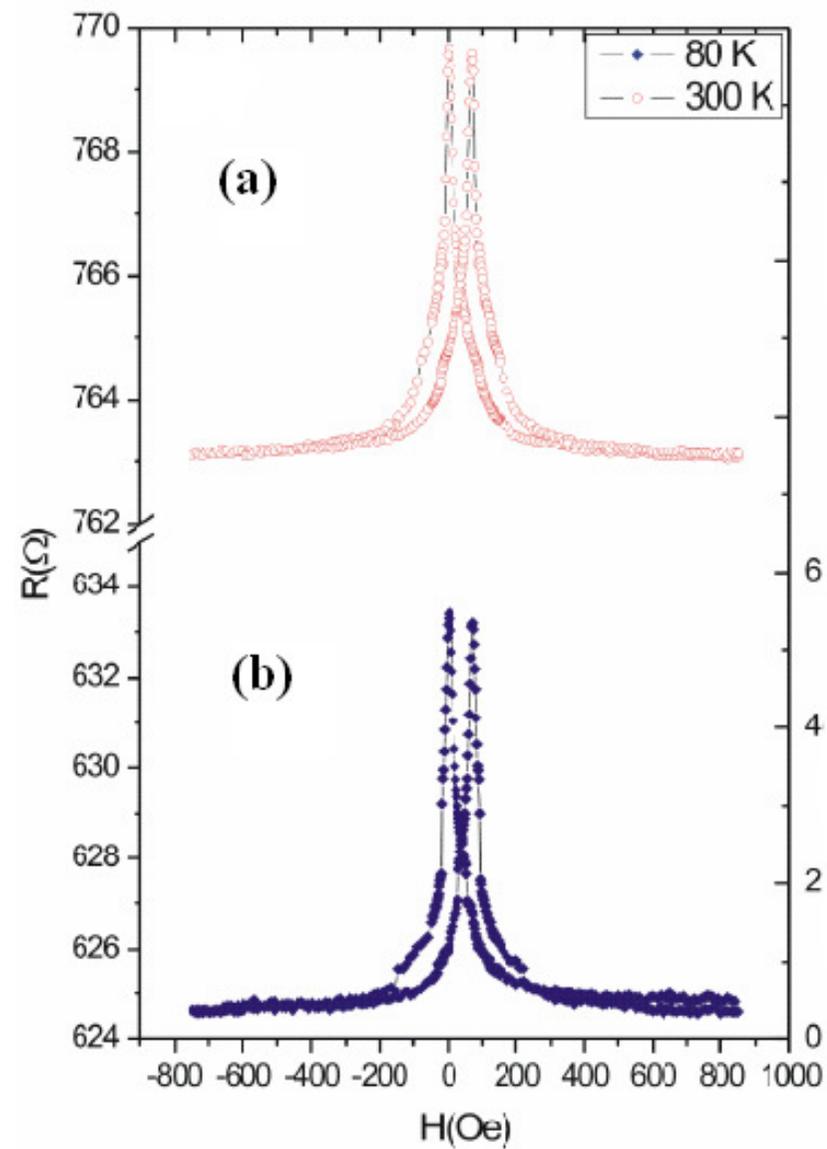
Типичная доменная структура пермалловых пленок



Вращательная анизотропия пермалловых пленок



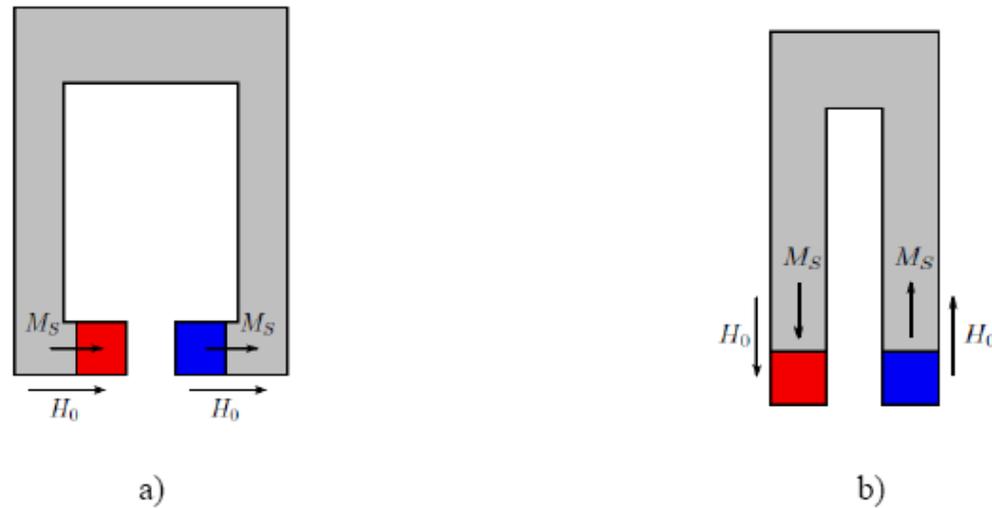
→ Полевая зависимость магнитоимпеданса, наблюдаемая для $[\text{FeNi}/\text{Ti}(6\text{nm})]_2/\text{FeNi}$ $[\text{FeNi}/\text{Gd}(2\text{nm})]_2/\text{FeNi}$ образцов



Магнетосопротивление, наблюдаемое для NiFe пленки толщиной 10 нм (a) и Ti (2nm)/NiFe (5~15nm)/Ti (2nm) (b)

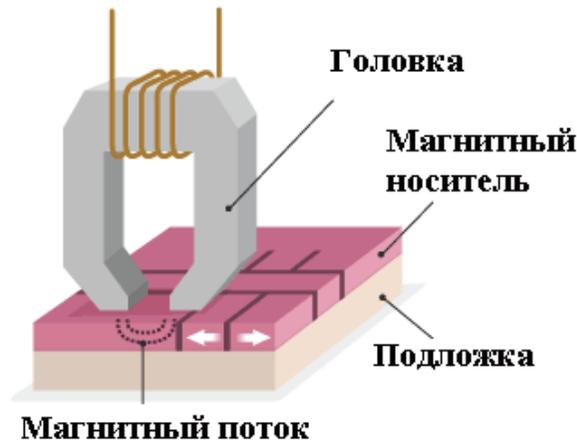
5. Тонкопленочные магнитные головки

Магнитная головка — устройство для записи, стирания и считывания информации с магнитного носителя: ленты, или диска.

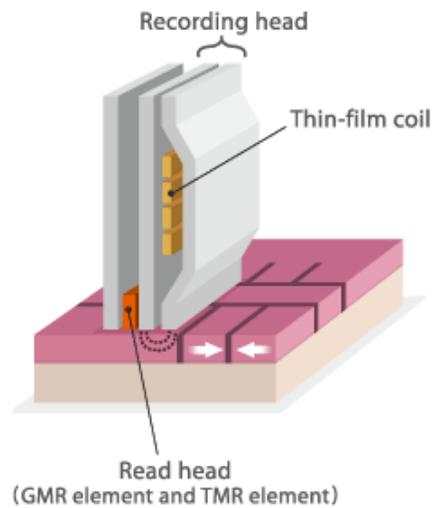


Расположение полюсов горизонтальной (а) и вертикальной (b) двухполюсных магнитных головок.
Направление M_S в полюсах показано стрелками.

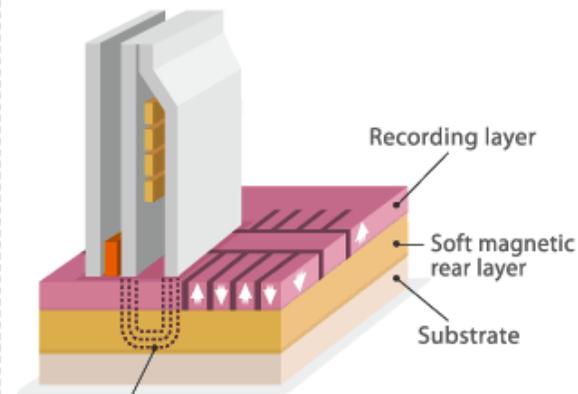
Развитие высокоплотной магнитной записи сопровождалось сильной модификацией магнитных головок.



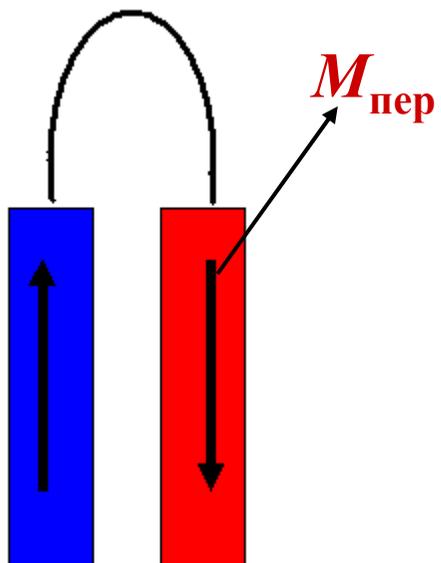
Тонкопленочная головка
(продольная запись)



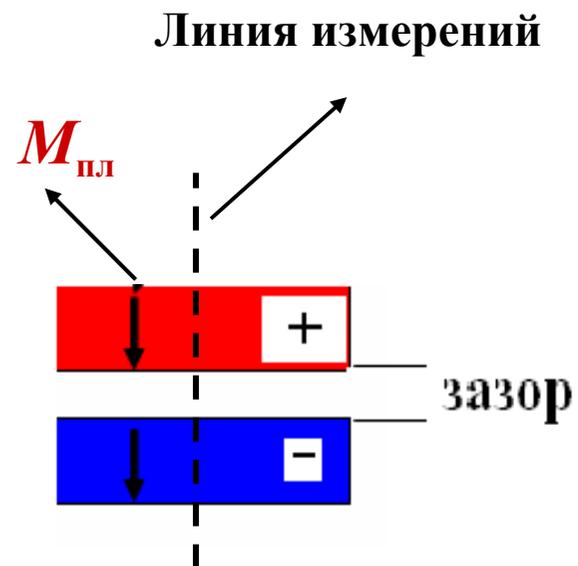
Тонкопленочная головка
(перпендикулярная запись)



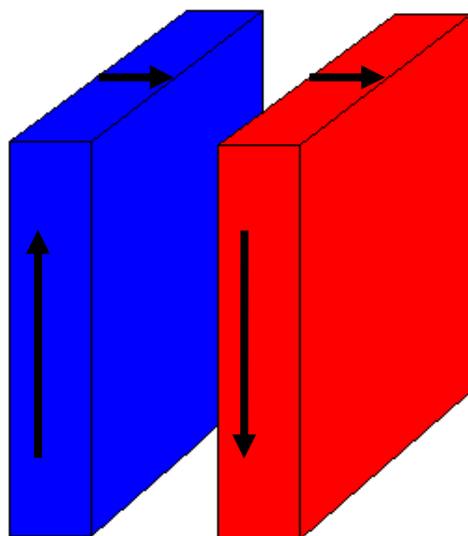
The flux emerging from the magnetic poles passes through a soft magnetic rear layer in a U-shaped path. Using the perpendicular section of this path enables high-density perpendicular magnetic recording.

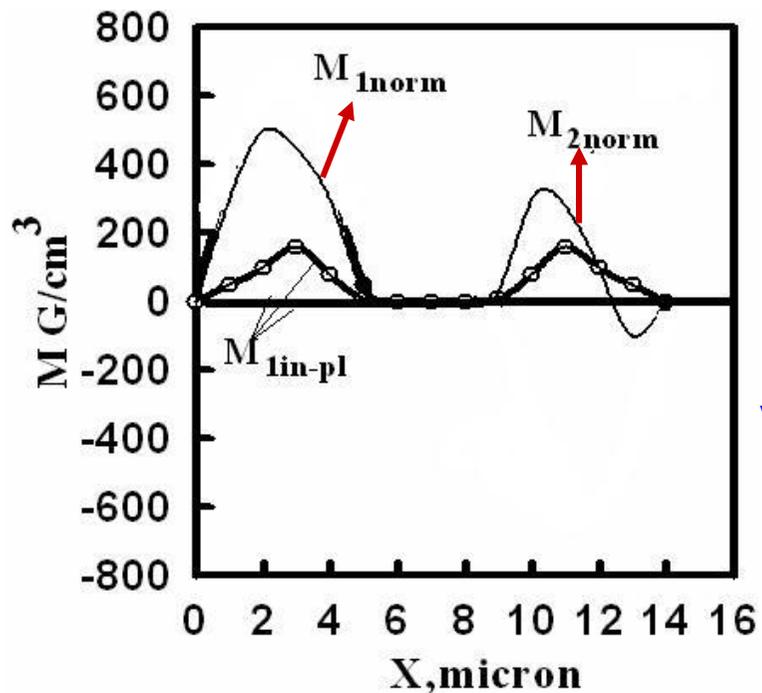


Вид сбоку ТМГ



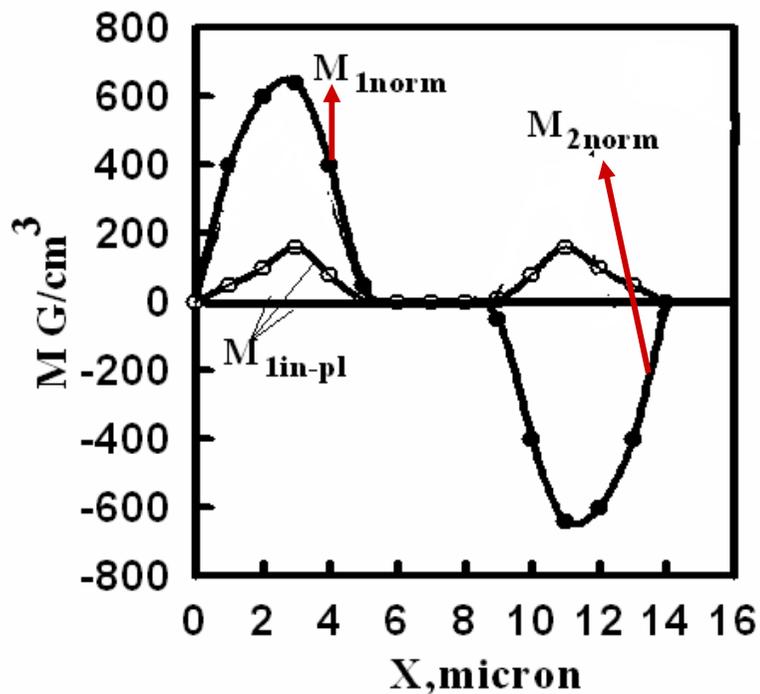
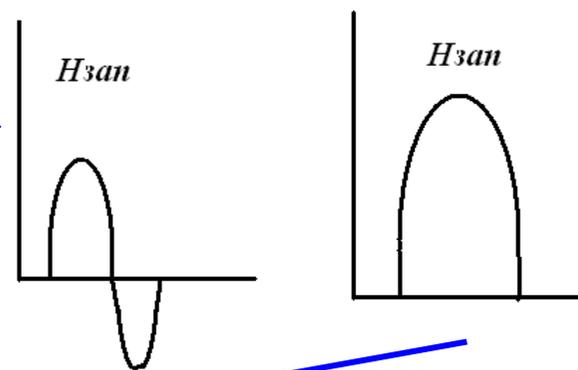
Рабочая поверхность ТМГ





Распределение плоскостной M_{in-pl} и перпендикулярной M_{norm} компонент намагниченности вблизи зазора первой тонкопленочной магнитной головки Лаззари.

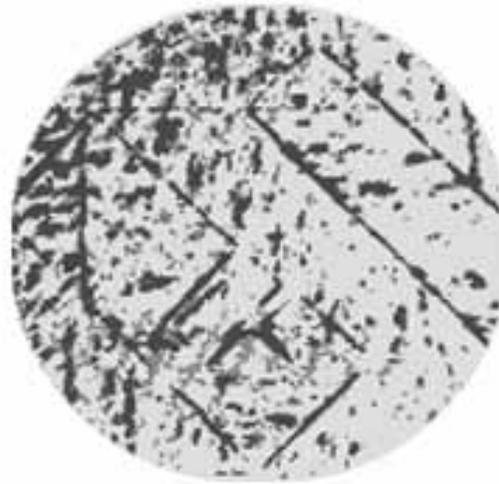
Толщина магнитных пленок равна 5 мкм, зазор - 3.5 мкм.



Распределение плоскостной M_{in-pl} и перпендикулярной M_{norm} компонент намагниченности вблизи зазора модифицированной тонкопленочной магнитной головки Лаззари.

Метод Биттера (1930г)

- Применяется суспензия магнитных частиц, которые переориентируются в зависимости от направления приложенного поля.
- На намагниченной поверхности частицы концентрируются вдоль участков образца, где намагниченность меняет свой знак и формируют картины Биттера.



Изображения доменов в монокристалле железа

Просвечивающая электронная микроскопия Лоренца

- Сила Лоренца вызывает отклонение электронов пучка, идущего перпендикулярно магнитному полю
- Метод магнитной микроскопии имеет очень высокое разрешение
- Внутри общей категории Лоренцевская микроскопии можно выделить различающиеся методы визуализации: **микроскопию Френеля и микроскопию Фуко**

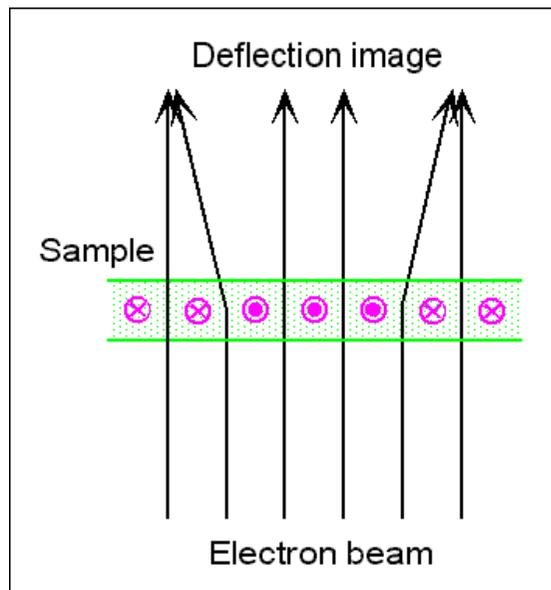


Схема метода

Разрешающая способность:

- **2 нм** (для магнитных структур при наилучших условиях)

- **10 – 20 нм** (при типичных условиях)

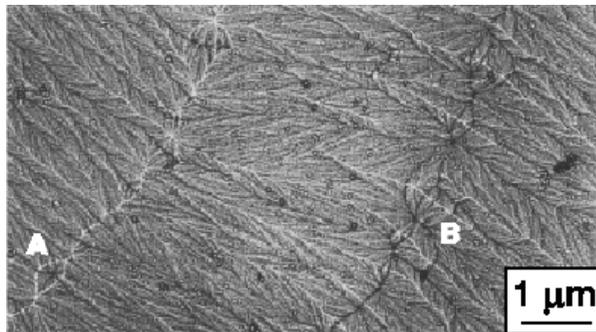
Временное разрешение:

- десятки секунд

Просвечивающая электронная микроскопия Лоренца

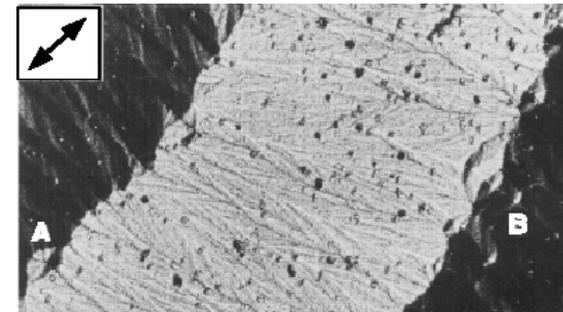
Микроскопия Френеля

- ◆ Формируются узкие области относительно высокой и низкой интенсивности в позициях, которые соответствуют стенкам доменов.
- ◆ Это происходит из-за малых отклонений, вызванных силой Лоренца, действующей на пучок, прошедший сквозь образец.
- ◆ В зависимости от направления намагниченности каждого домена, сила Лоренца будет слегка отклонять пучок то к одной стенке, то к другой. Вследствие этого будет видно, что домен имеет яркую стенку с одной стороны и темную стенку с другой.



Микроскопия Фуко

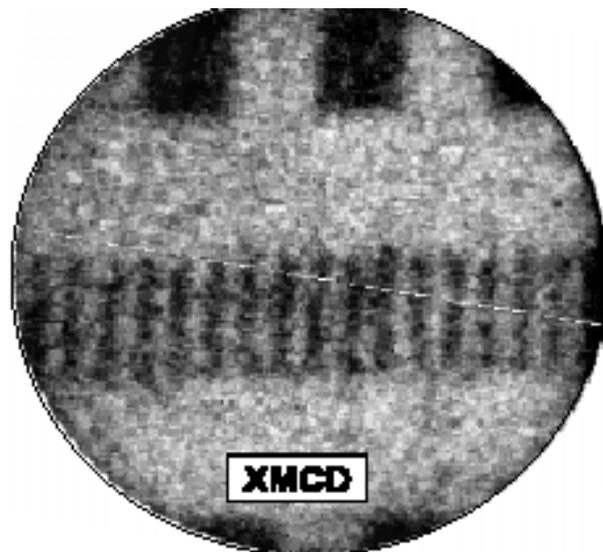
- ◆ Изображение остается в фокусе и образуется дифракционная фигура в одной из плоскостей микроскопа. Перемещая диафрагму, можно блокировать электроны, которые были отклонены в одном направлении магнитным полем.
- ◆ Яркость каждого домена зависит от направления его намагниченности.



Доменные структуры для металлического стекла

Рентгеновский магнитный круговой дихроизм

- Эффект зависит от относительной ориентации углового момента рентгеновского фотона и намагниченности образца
- Образец не должен быть проводящим, а измерение не чувствительно к загрязнению поверхности или умеренной шероховатости



Изображение жесткого диска

Разрешающая способность:

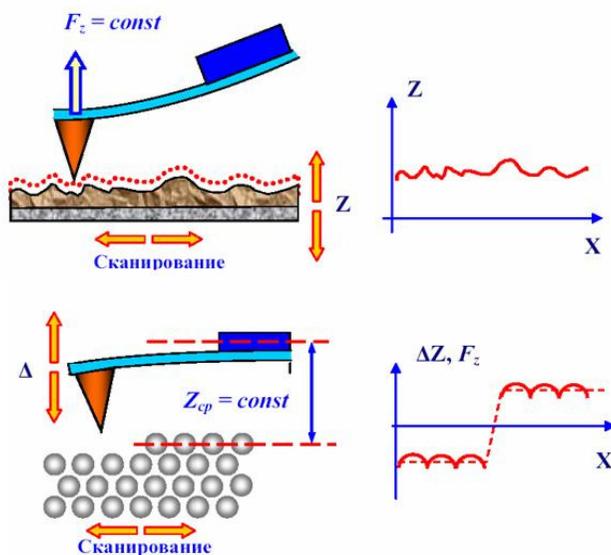
- 500 нм (типичное разрешение)

Временное разрешение:

- ≥ 10 мин

Магнитная силовая микроскопия (MFM)

- ◆ Методика основана на взаимодействии между ферромагнитной иглой и магнитным полем рассеяния вблизи образца
- ◆ Существует режим постоянного тока и постоянной высоты.
- ◆ На первом этапе микроскоп работает как обычный атомный силовой микроскоп (АСМ), чтобы в деталях определить топографический профиль вдоль одной линии сканирования.
- ◆ На втором - микроскоп, используя определенный ранее профиль линии сканирования, вновь сканирует ту же самую линию магнитным зондом на небольшой, но постоянной высоте (обычно 20 – 200 нм) над образцом)



Разрешающая способность:

-20 нм

Временное разрешение:

-10мин

Сканирующая электронная микроскопия с анализом поляризации (SEMPA)

- ◆ **Изображение создается путем измерения спиновой поляризации вторичных электронов в каждой точке**
- ◆ **Сфокусированный электронный пучок сканирует поверхность магнитной микроструктуры по исследуемой области**
- ◆ **Так как глубина испускания медленных электронов мала (несколько нм), SEMPA измеряет магнитные свойства приповерхностной области и, таким образом, идеально подходит для изучения тонких магнитных пленок или магнитных свойств, присущих поверхностной области.**

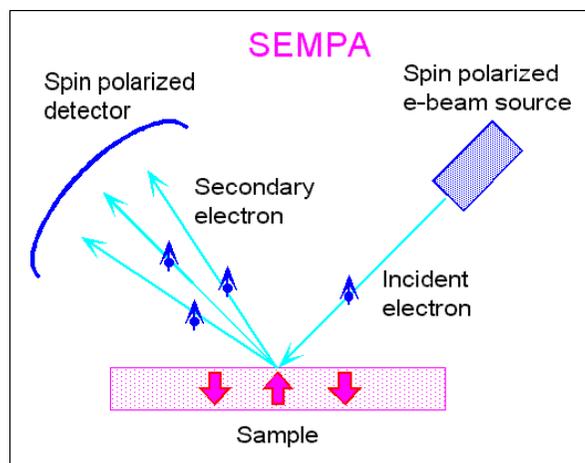
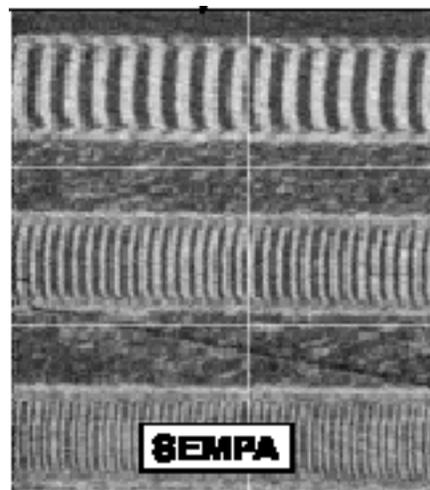


Схема метода



Изображение жесткого диска

Разрешающая способность:

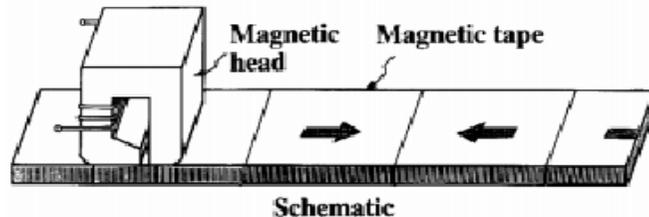
- **20 нм** (задается фокусным диаметром первичного пучка)

Временное разрешение:

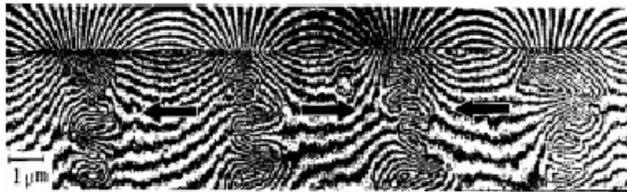
- **5мин**

Метод электронной голографии

- ◆ Возможны прямая визуализация и количественное измерение магнитного потока
- ◆ Электроны можно рассматривать как волны, испускаемые точечным источником с очень узким распределением энергии, т.е. пучок имеет высокие степени как пространственной, так и временной когерентности.
- ◆ Бипризма просвечивающего электронного микроскопа разделяет пучок электронов надвое: первая половина пучка проходит через тонкий изучаемый образец, а вторая остается невозмущенной
- ◆ Наблюдаемые интерференционные линии можно непосредственно интерпретировать как магнитные силовые линии



Изображение доменов на магнитной дорожке



Интерференционная микрофотография

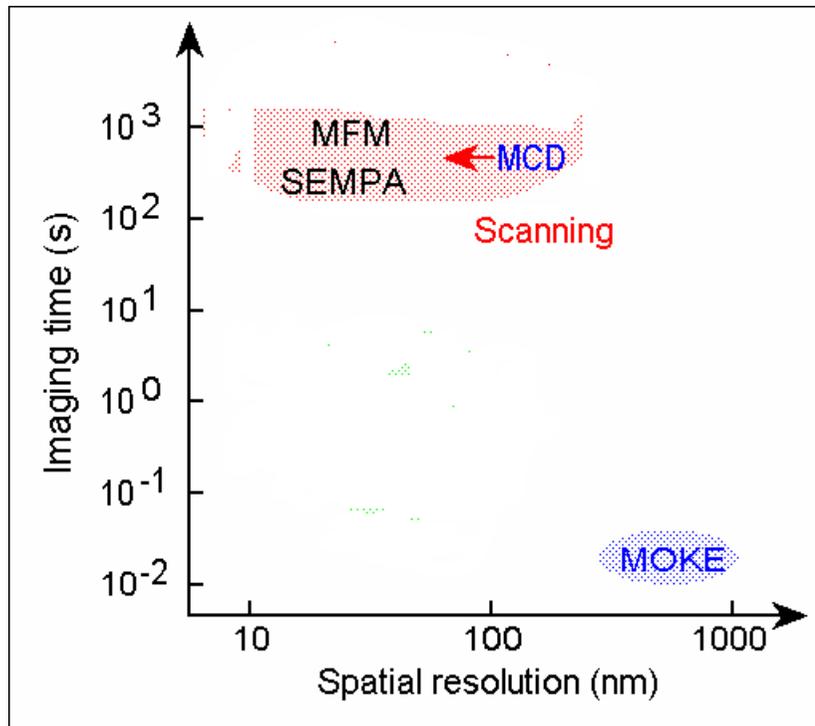
Разрешающая способность:

- 10 нм

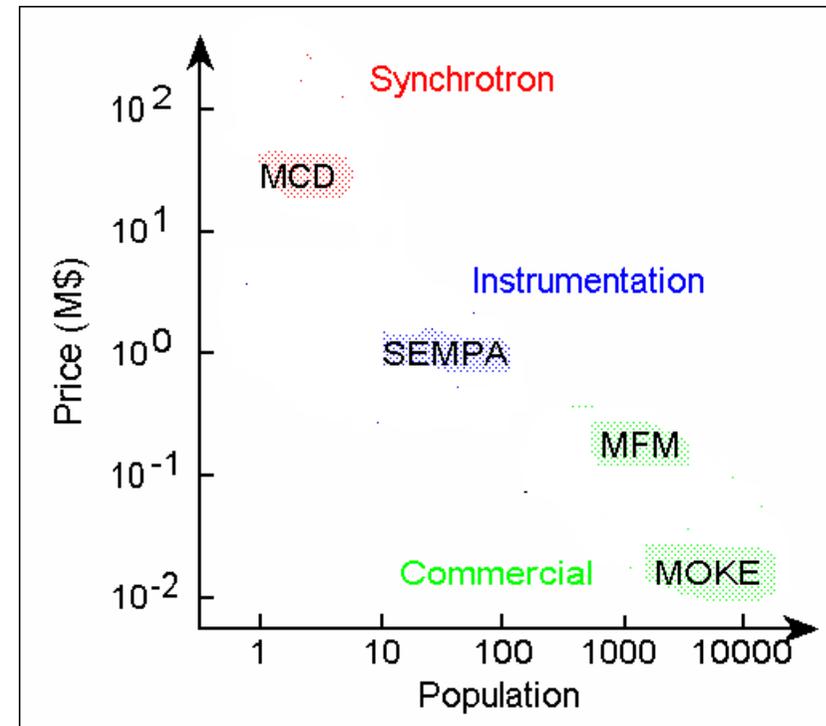
Толщина образца:

- 150 нм (так как данный метод является просвечивающим, магнитный образец должен быть однородно утончен)

Эффективность и популярность методов визуализации



Зависимость времени реализации
от пространственного
разрешения



Зависимость цены от
популярности метода

- **Примеры, иллюстрирующие возможности магнито-оптических методов при решении фундаментальных задач физики магнитных явлений рассмотрены**
- **В настоящее время практически все магнитные лаборатории применяют магнито-оптические методы исследования магнитных материалов и доменных структур**

- СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ