

Магнитооптические материалы.

Магнитооптические эффекты

Магнитооптические эффекты:

- продольные и поперечные;
- линейные и квадратичные по намагниченности

Методы исследования магнитных структур

- Метод порошковых фигур. Метод Биттера.
- Магнитооптические методы
 - ✓ Магнитооптические эффекты
 - ✓ Метод темнопольной дифракции
 - ✓ Лазерная сканирующая микроскопия.
 - ✓ Рентгеновский магнитооптический метод
- Магнитная силовая микроскопия
- Электронная микроскопия
 - ✓ Просвечивающая электронная микроскопия
 - ✓ Микроскопия на вторичных электронах
 - ✓ Сканирующая туннельная микроскопия

Этапы любого исследования

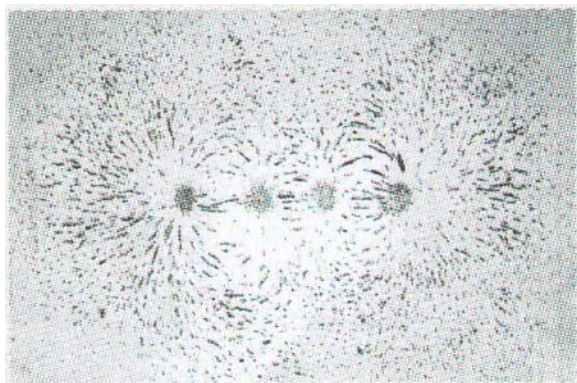
- Получение контраста
- Интерпретация результатов

Характеристики методов

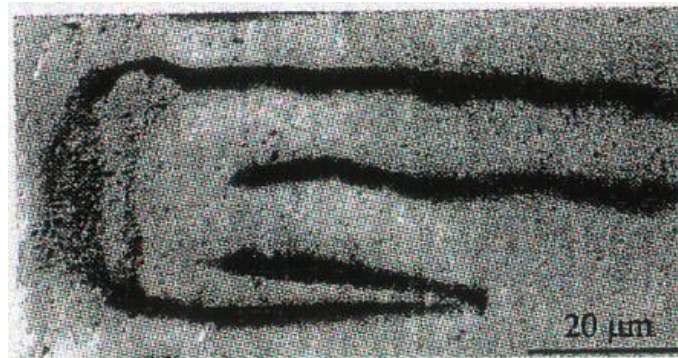
исследования:

- Пространственная разрешающая способность
- Информационная глубина
- Время записи

Метод Биттера (порошковых фигур).



Первые порошковые
картинки



Современные
результаты

Характеристика метода (F.Better (1931)):

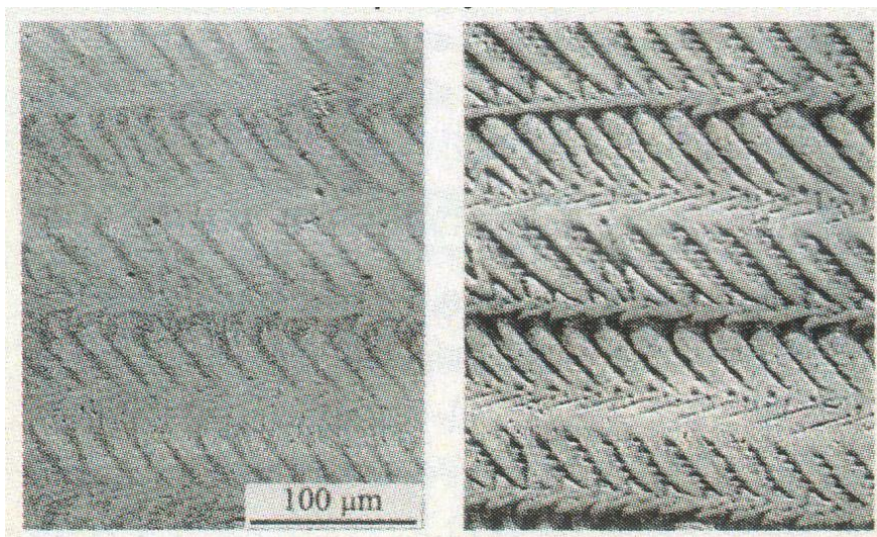
- Для получения были использованы суспензии, содержащие частицы размера от 10 нм до 1 мкм:
 - ✓ Однодоменные частицы ~ 10 нм
 - ✓ Многодоменные частицы ~ 100 нм
- Контраст биттеровских суспензий наиболее сильный в областях, где возникают градиентные поля



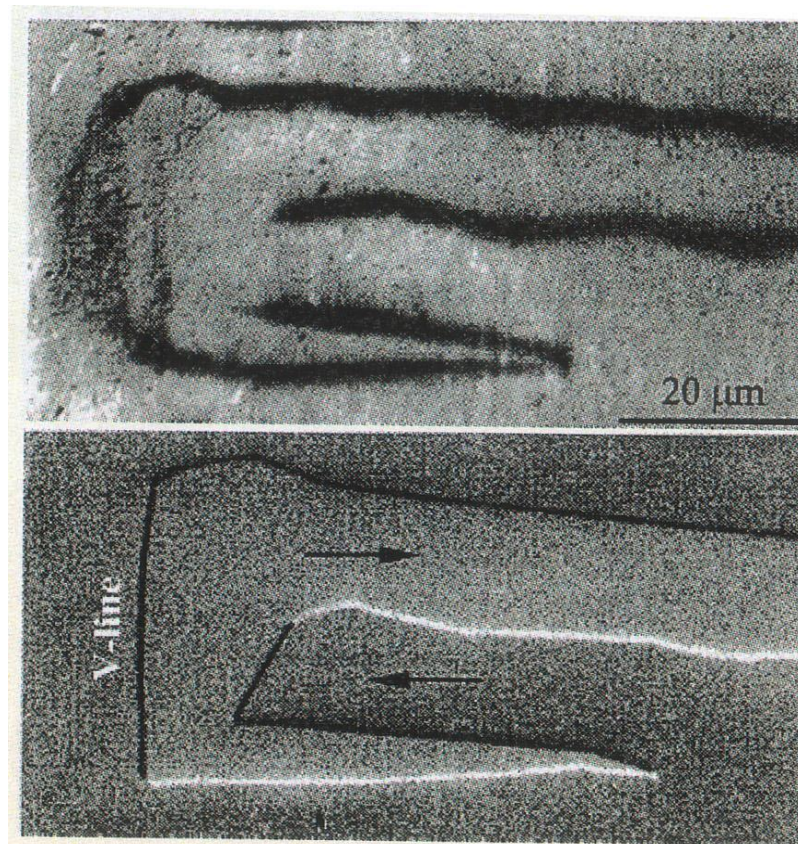
Francis Bitter,
1902 — 1967

- ✓ В 1931 г. впервые экспериментально наблюдал доменную структуру ферромагнетика.
- ✓ В 1938 г. была разработана теория молекулярного поля для антиферромагнетиков.
- ✓ В 1936 г. создать непрерывно действующий электромагнит постоянного тока, позволивший достичь магнитной индукции в 10 Т (Магнит Биттера).
- ✓ В 1939 г. построил соленоид, создающий стационарное магнитное поле с напряженностью до 80 кЭ.

Метод Биттера (порошковых фигур).



Увеличение контраста в поле



Изображения,
полученные методами
Биттера и Керра

Метод Биттера (порошковых фигур).

Основные характеристики метода

- Пространственная разрешающая способность: более 100 – 500 нм
- Информативная глубина: менее 5 мкм
- Время записи: около 1 с

Преимущества метода

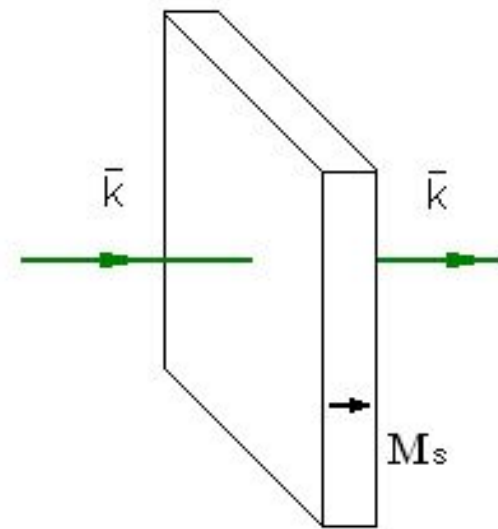
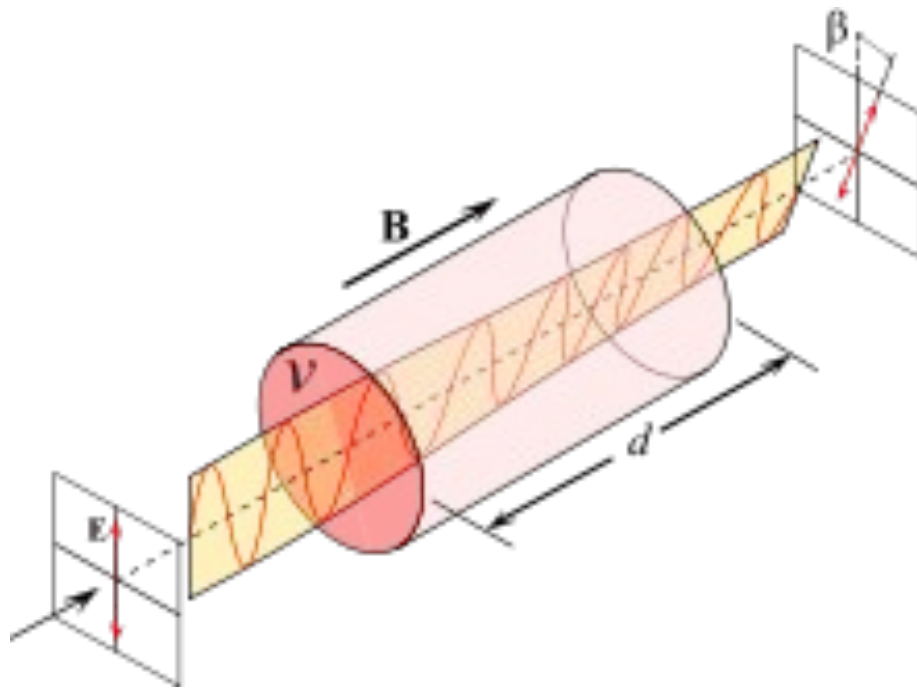
- ✓ Не требует специального оборудования
- ✓ Не требует подготовки поверхности
- ✓ Использование суспензий – единственный метод изучения сложных 3D поверхностей

Недостатки метода

- ✓ Структуры, которые образуют слабые поля размагничивания, изучить не удастся
- ✓ Сложная связь между градиентом поля размагничивания и намагниченностью (нелинейна и нелокальна), поэтому возникают сложности в интерпретации результатов
- ✓ Большое время записи, поэтому не удастся изучать динамические явления.

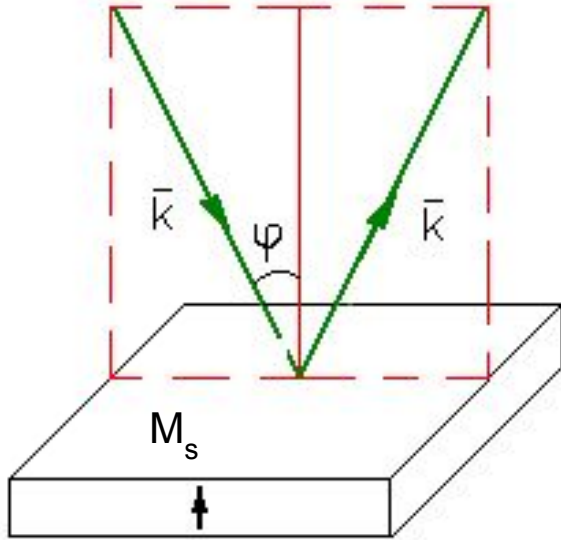
Магнитооптические методы. Эффект Фарадея. (1845г.)

Вращение плоскости
поляризации и
появление
эллиптичности
линейно
поляризованного
света.

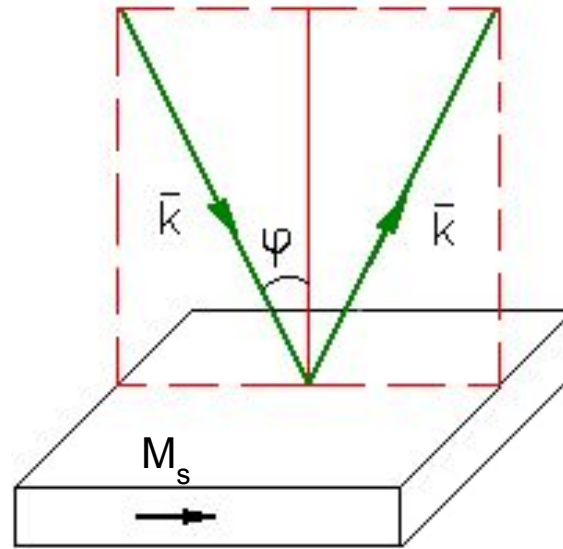


Магнитооптические методы. Эффекты Керра (1876 г.)

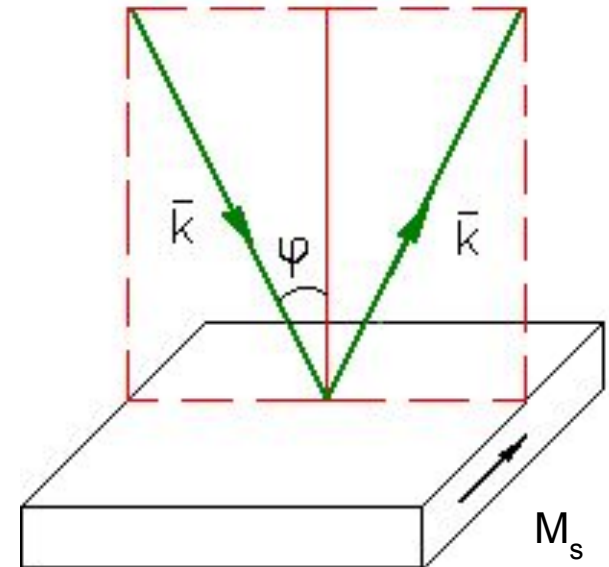
Полярный
(продольный)



Меридиональный
(продольный)



Экваториальный
(поперечный)



Полярный и меридиональный эффекты - вращение плоскости поляризации и появление эллиптичности отраженного от намагниченной среды линейно-поляризованного света.

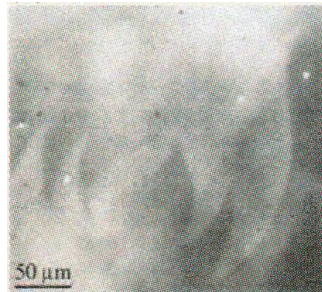
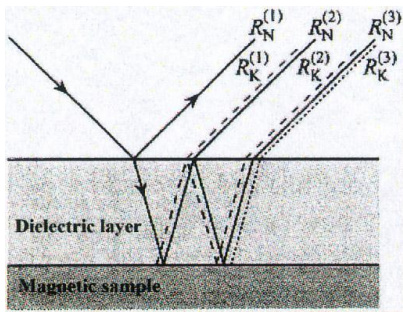
Изменения интенсивности у s и p волн не происходит.
Если поляризация занимает промежуточное положение между s и p состоянием, наблюдается изменение интенсивности.

Состоит в изменении интенсивности и сдвиге фазы линейно-поляризованного света, отраженного от намагниченной среды.

Магнитооптический контраст керровской микроскопии

- Интерференция и усиление благодаря диэлектрическому покрытию
- «Цифровой контраст»= «контраст образца» — «репера» (репер – в состоянии насыщения или усредненная картина под влиянием земного поля)
- Визуализация разных компонент намагниченности благодаря использованию разных плоскостей падения для одного образца.

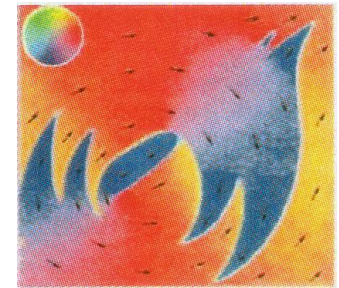
Доменная структура на поверхности сплава FeNi



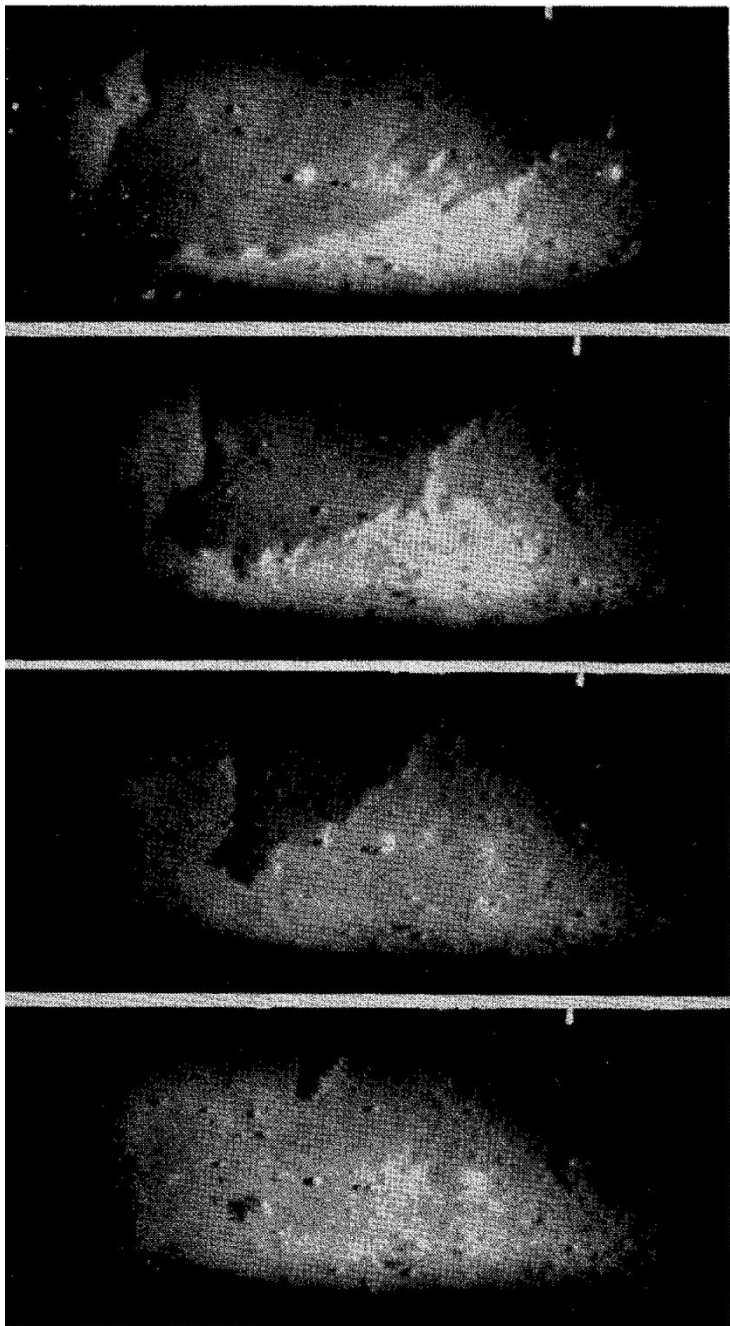
Без усиления



Репер (земное поле)



Цифровой контраст



Первые фотографии доменной структуры, выполненные с помощью эффекта Керра.

Доменная структура пленки (Ni 80%, Fe 20%) толщиной 10 – 50 нм процессе перемагничивания. Copeland J.A., Humphrey F.V., Journ. Appl. Phys., 34, 1211 (1963)

Длительность экспозиции порядка нескольких секунд.

Магнитооптические методы.

Основные характеристики магнитооптических методов:

- Пространственная разрешающая способность: более 300 нм
- Информационная глубина: порядка 10 нм
- Время записи: 1 пс – 1 мкс и менее

Достоинства метода:

- ✓ Образцы не разрушаются и не загрязняются
- ✓ Прямые наблюдения, которые не меняют намагниченность образца
- ✓ Можно изучать динамические явления

Недостатки метода:

- ✓ Необходима предварительная подготовка образца (гладкая поверхность)
- ✓ Ограничение разрешающей способности длиной волны
- ✓ Возможно анализировать лишь тонкий приповерхностный слой (эффект Керра лишь несколько 10 нм)

Метод темнопольной дифракции.

Рассеянное изображение

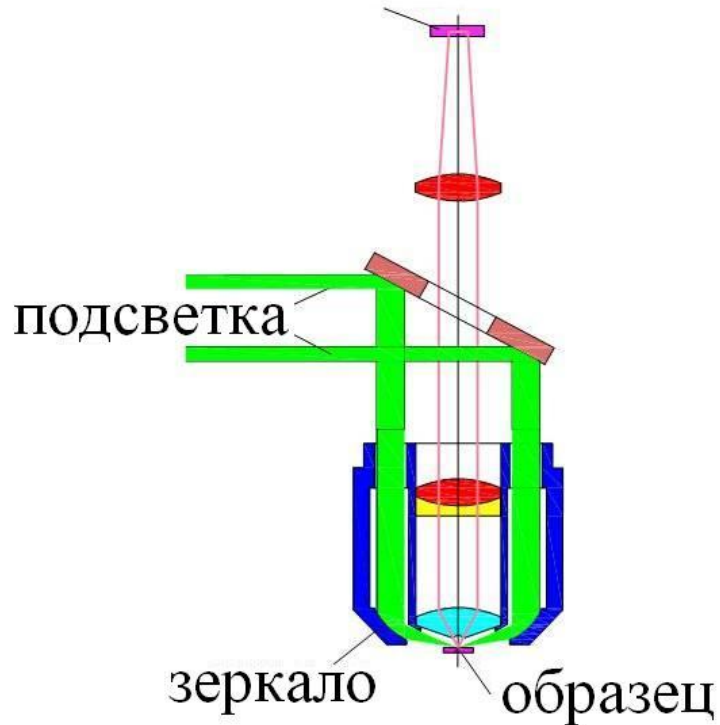
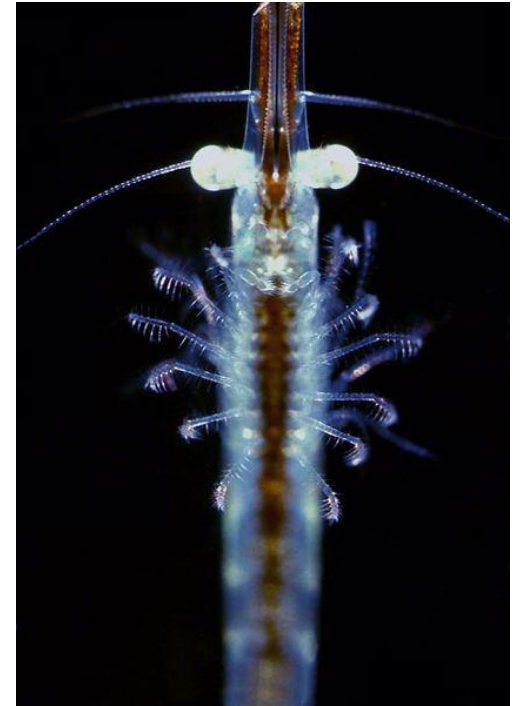


Схема темнопольной микроскопии в падающем свете.

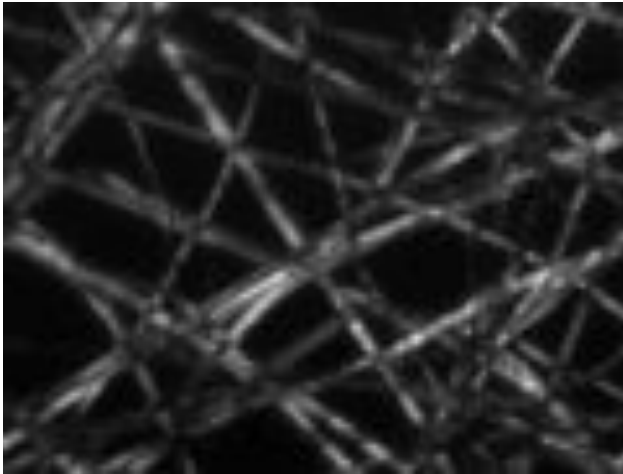
Подсветка образца осуществляется сбоку (зеленая линия). Изображение создается светом, рассеиваемым на неоднородностях образца

Основы
метода
разработаны
Р. Зигмонди в
1906 году.

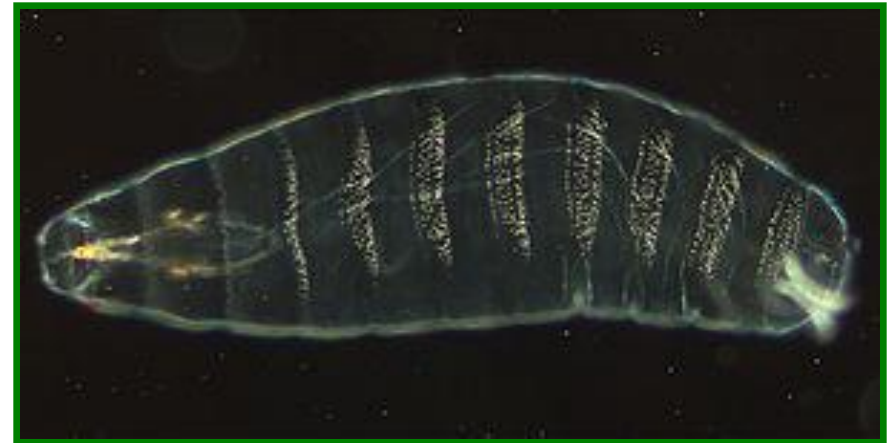
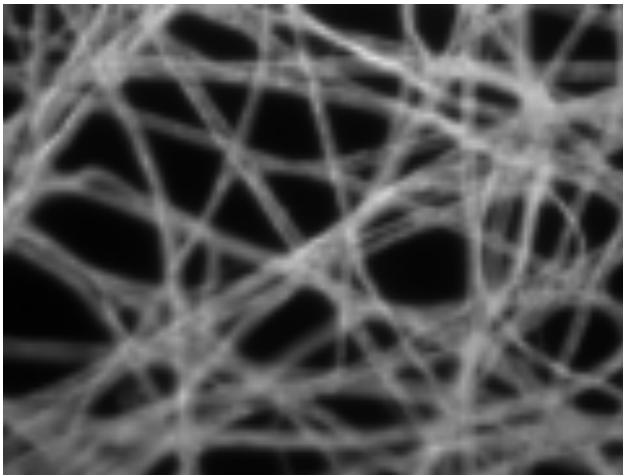


Изображение мизиды, полученное методом темнопольной микроскопии

Метод темнопольной дифракции.



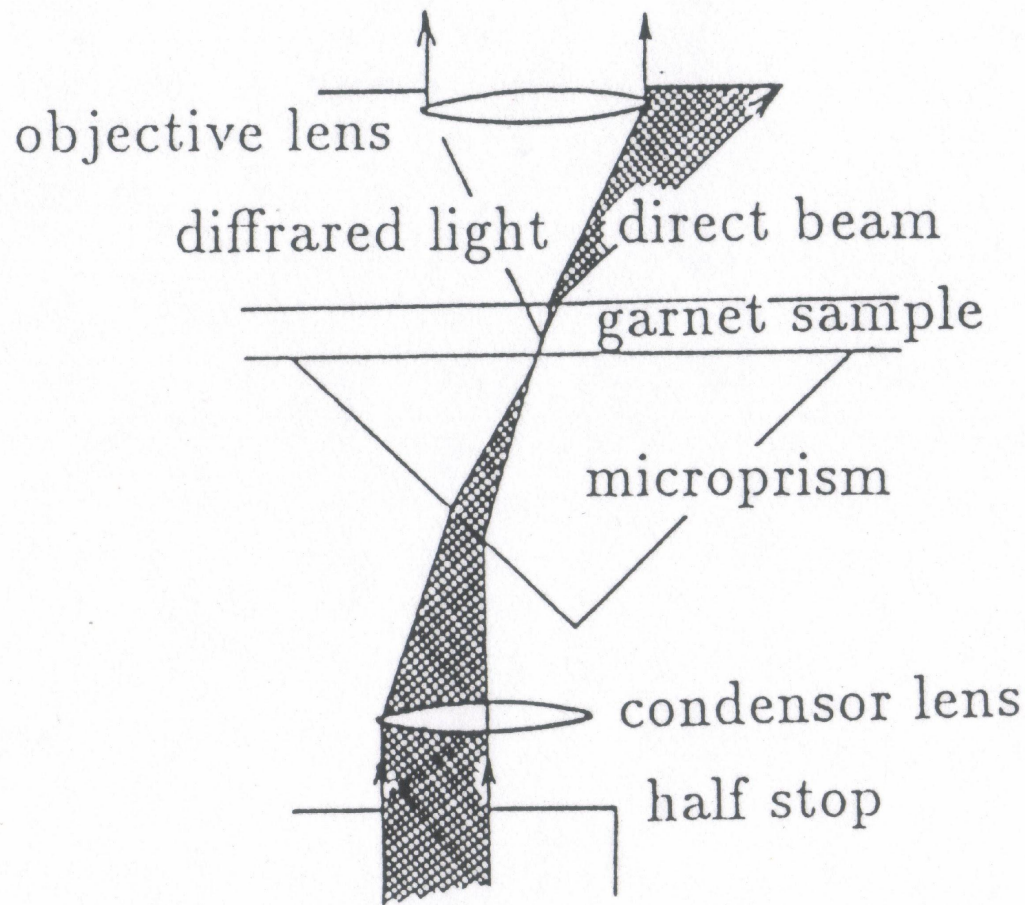
Бумага. Изображение получено с помощью поляризационного микроскопа

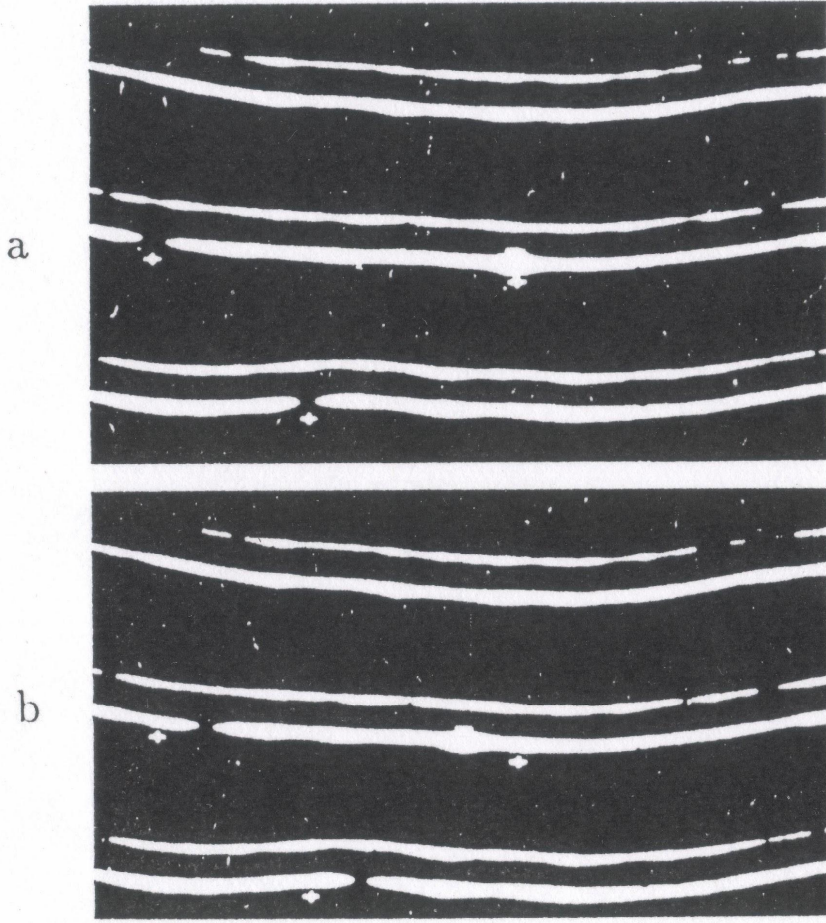


Кутикула личинки дрозофилы. Метод темнопольной дифракции

Бумага. Изображение получено методом тёмного поля

**Схема экспериментальной установки для наблюдения
ВБЛ в поляризационном световом микроскопе на
основе метода темнопольной дифракции.**

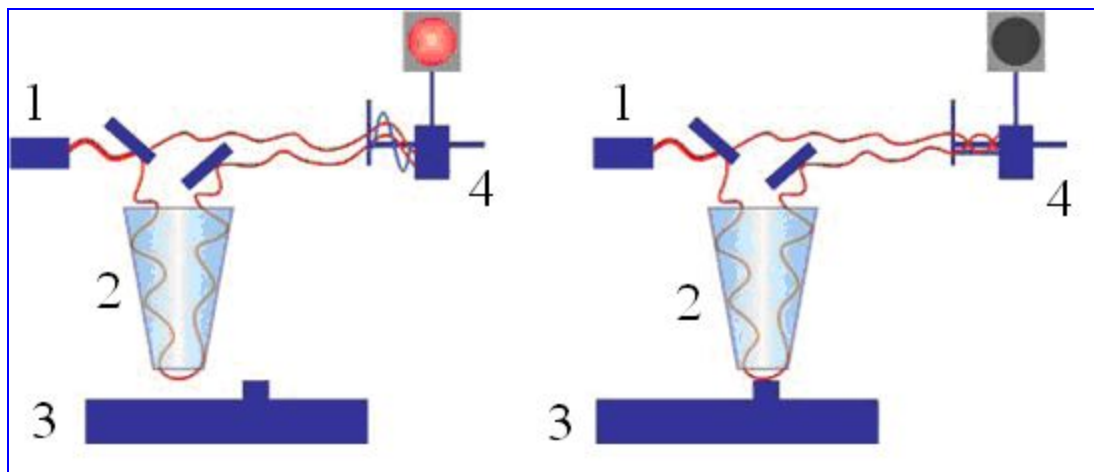




**Начальные
положения трех ВБЛ
– (а) темные и
светлые пятна,
отмеченные «+», (б)
положение ВБЛ
после приложения
плоскостного
импульсного
магнитного поля.**

Лазерная сканирующая оптическая микроскопия (микроскопия ближнего поля).

- Идея микроскопии ближнего поля была предложена в 1928 году Сингхом (E.H. Syngh).
- В начале 80-х годов группа исследователей из Цюрихской лаборатории фирмы IBM во главе с Дитером Полем (D.W. Pohl) проникла внутрь дифракционного предела и продемонстрировала разрешение $\lambda/20$ на приборе, работающем в видимом оптическом диапазоне



- 1 – лазер
- 2 – волновод
- 3 – образец
- 4 - детектор

Лазерная сканирующая оптическая микроскопия (микроскопия ближнего поля).

Основные характеристики метода:

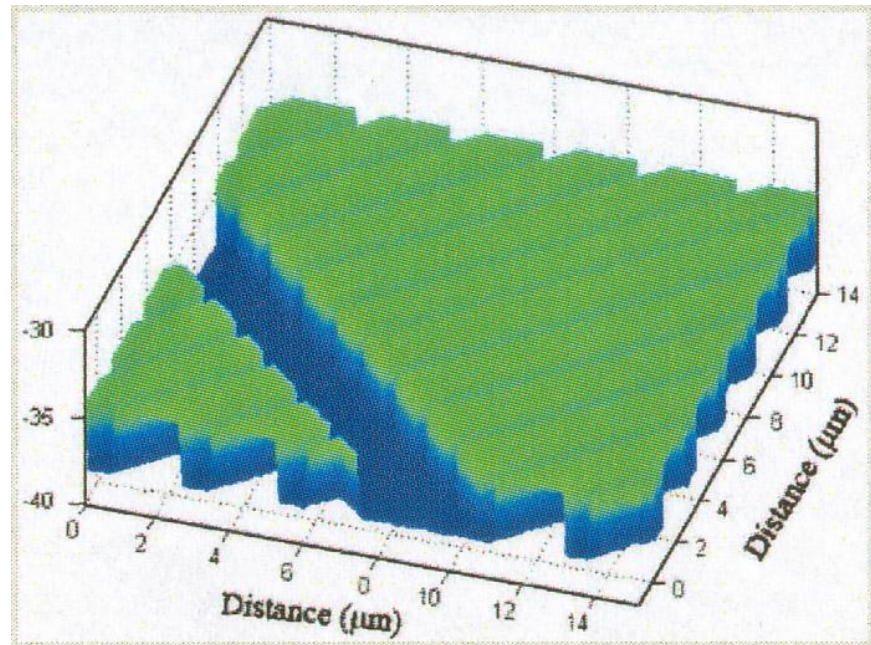
- Пространственная разрешающая способность: более 50 нм
- Информационная глубина: порядка 10 нм

Достоинства метода:

- ✓ Увеличение разрешающей способности
- ✓ Высокий контраст

Недостатки метода:

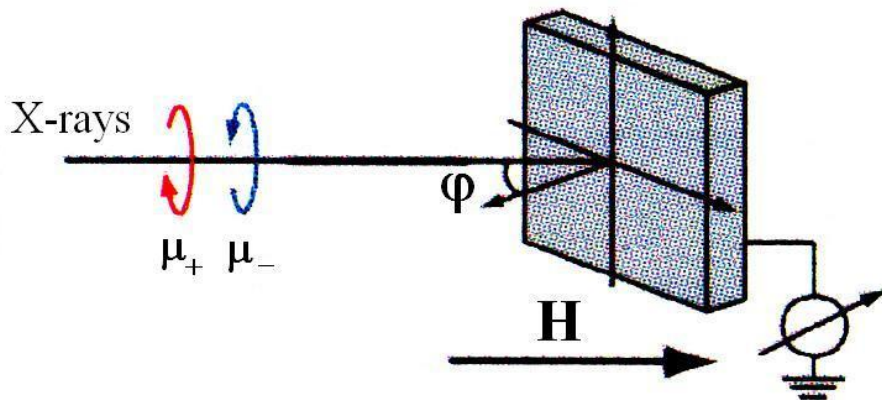
- ✓ Медлительность метода
- ✓ Локальный разогрев



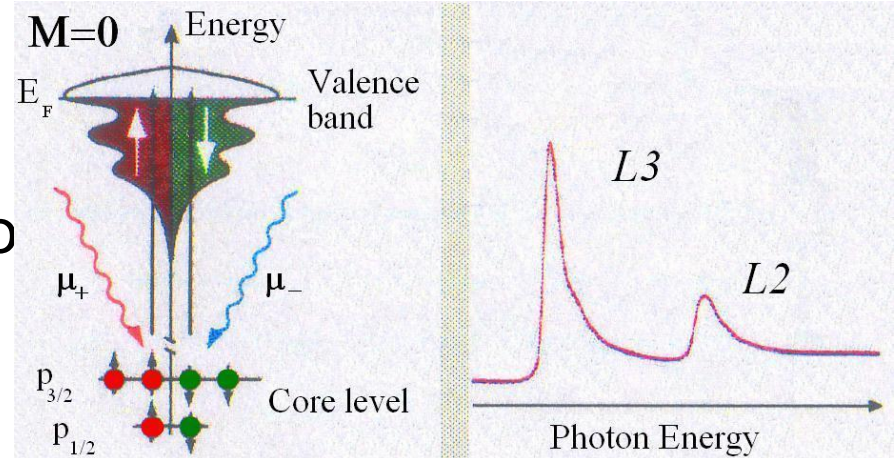
Микроскопия ближнего поля

Рентгеновская фотоэмиссионная электронная микроскопия (X-PEEM)

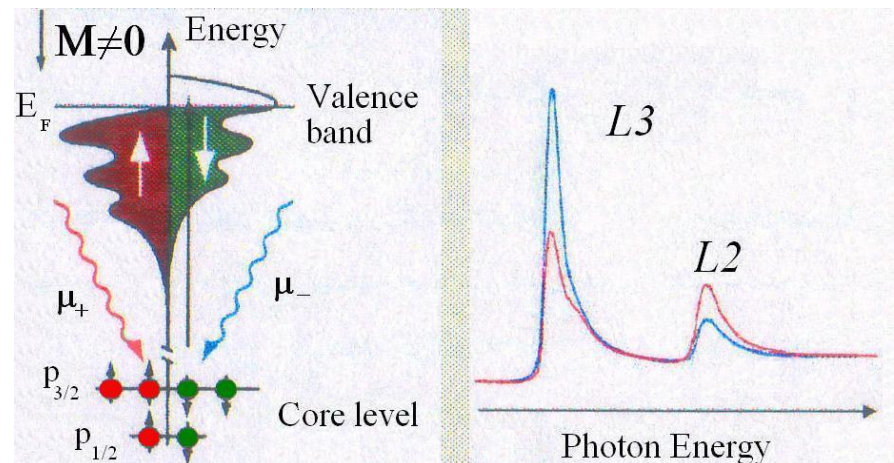
Явление дихроизма – зависимость интенсивности поглощения циркулярно поляризованного рентгеновского излучения от направления поляризации



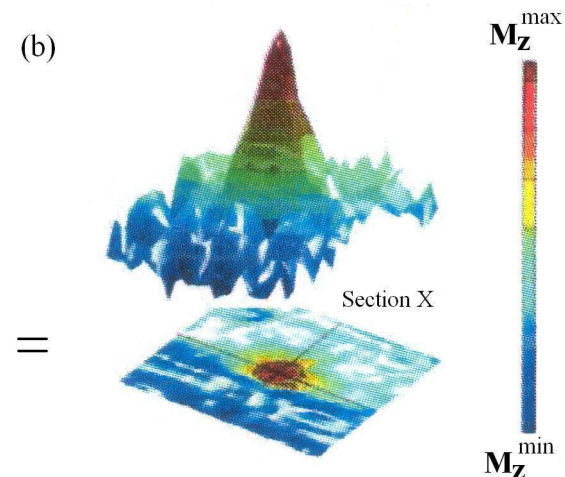
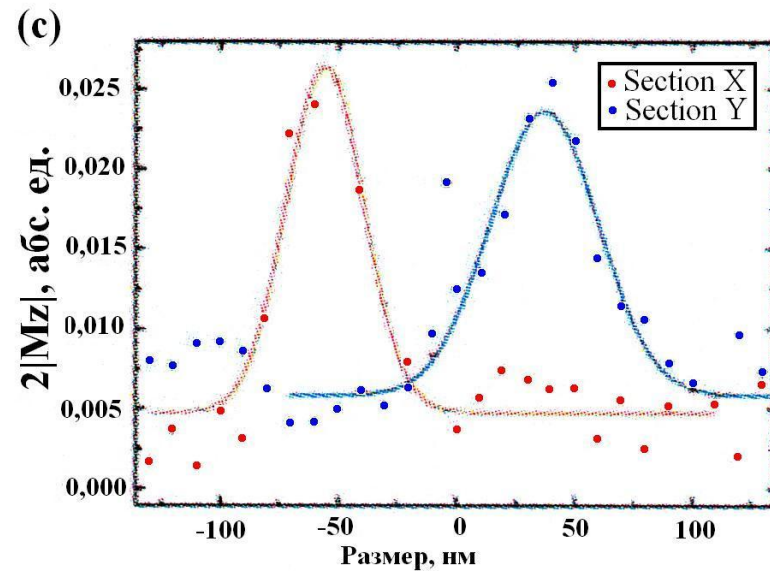
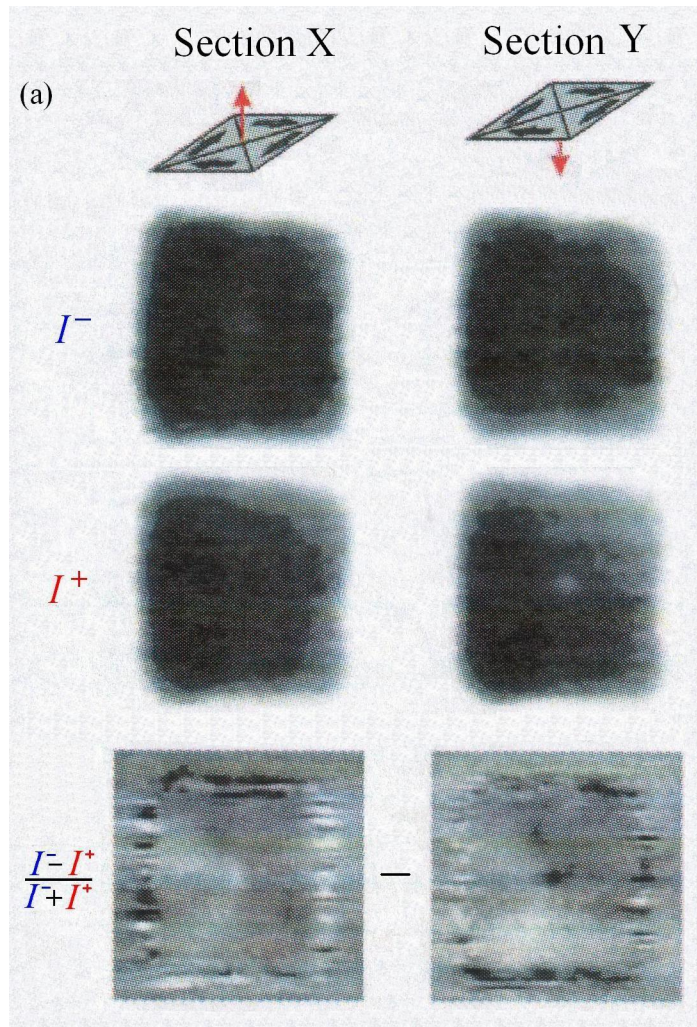
Плотность состояний $M=0$



Плотность состояний $M \neq 0$



Рентгеновская фотоэмиссионная электронная микроскопия. Структура магнитного вихря. (контраст)



Рентгеновская фотоэмиссионная электронная микроскопия (X-PEEM)

Основные характеристики метода:

- Пространственная разрешающая способность ~ 5 нм
- Информационная глубина ~ 10 мкм
- Время записи: 1 минута

Достоинства метода:

- Высокая разрешающая способность
- Очень большая информационная глубина
- Внешнее поле не влияет на контраст

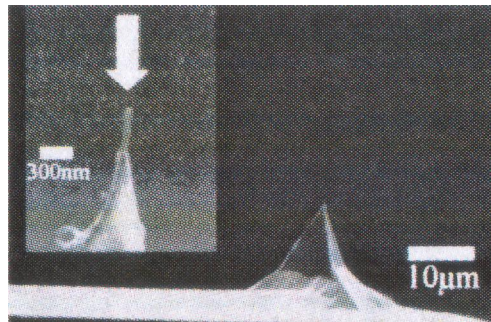
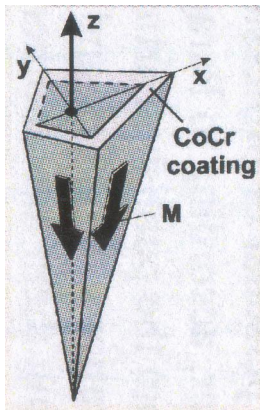
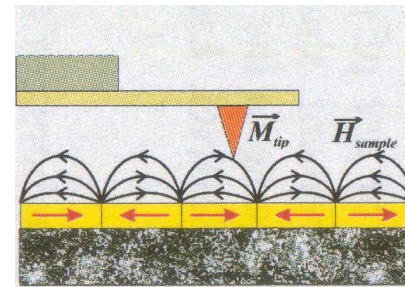
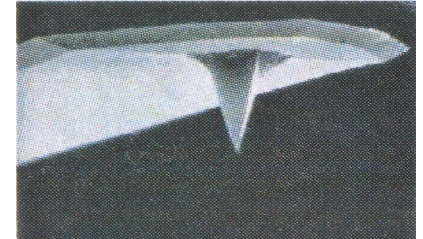
Недостатки метода:

- Высокая стоимость
- Большое время записи

Магнитная силовая микроскопия (MFM)

Идея MFM

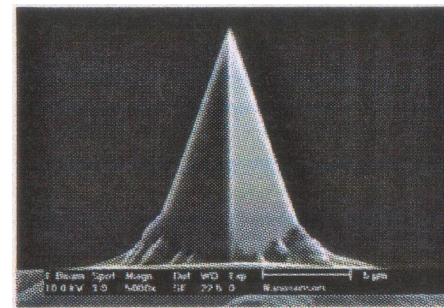
- MFM – вариант атомной силовой микроскопии, при котором поверхность сканируется ферромагнитной иглой
- Механизм взаимодействия – магнитостатическое взаимодействие между иглой и образцом



SEM - изображение иглой.

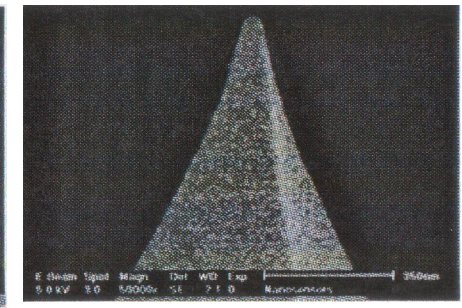
Схематичное изображение иглой

Иголка – карбоновая нанотрубка, заполненная железом



SEM – изображения коммерческих сенсоров для MFM

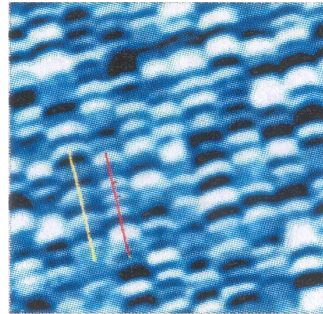
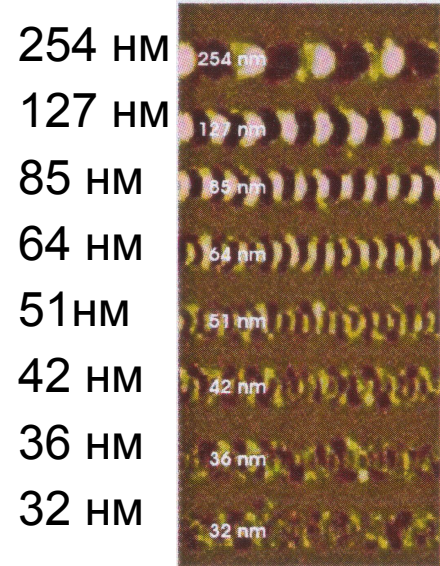
масштаб 5 мкм



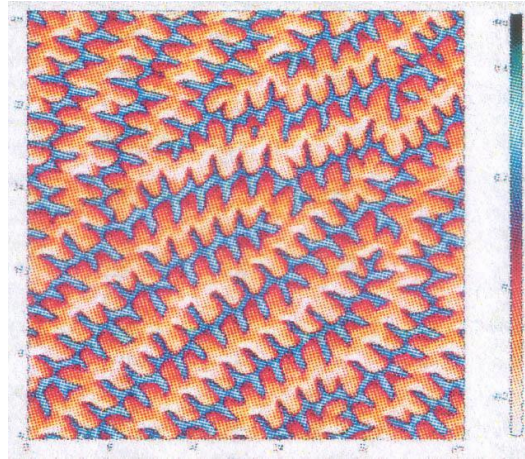
масштаб 350 нм

Гарантированное пространственное разрешение 50 нм

Магнитная силовая микроскопия: контраст

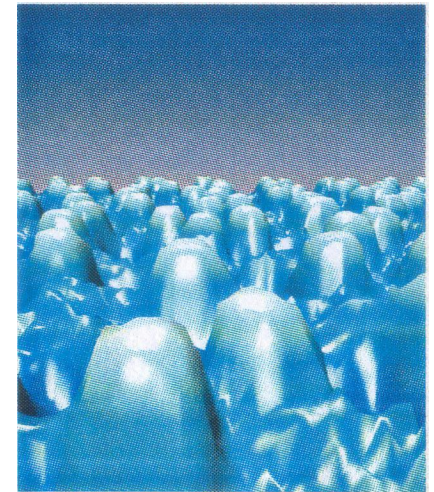


Размер
1,6 X1,6 мкм



Размер
40 X40 мкм

Поверхностные
домены
гранатовой
пленки

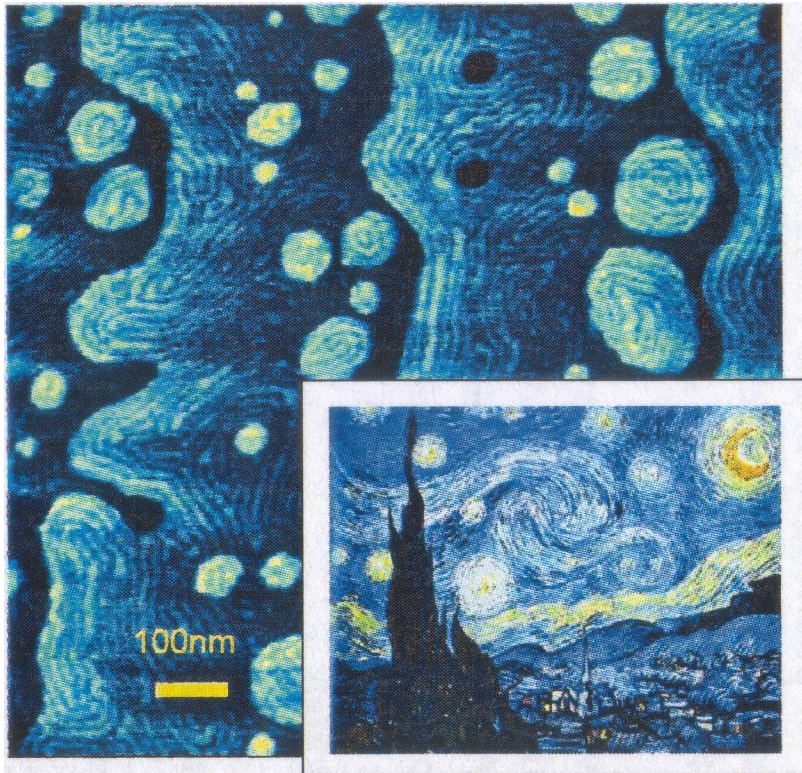


Намагниченность
в спиновом стекле

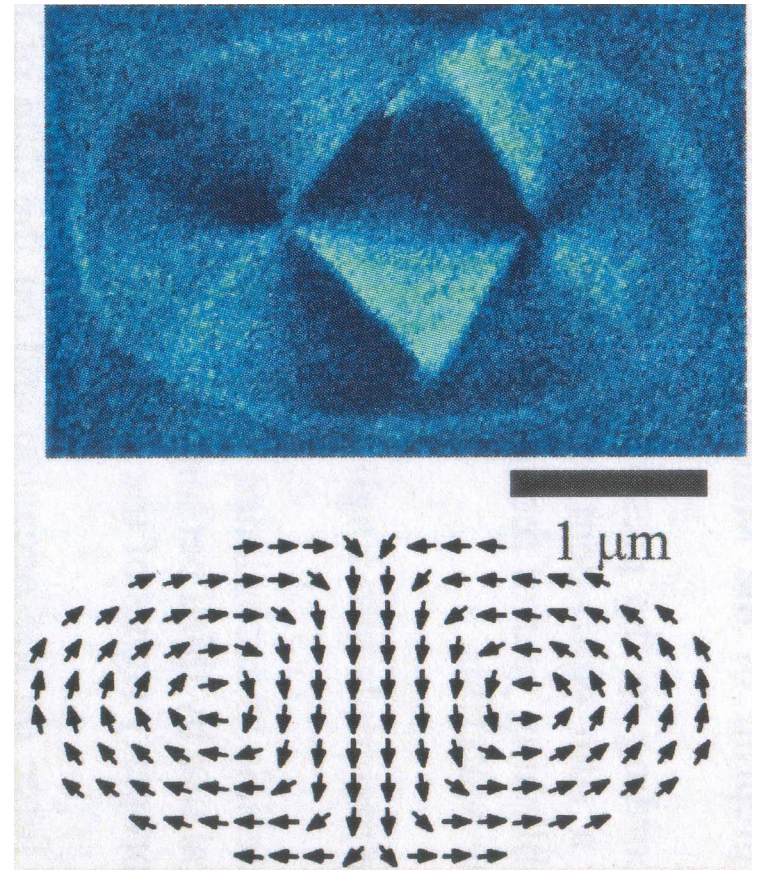
Жесткий
диск с
разными
размерами
битов

Жесткий диск
Seagate
Barracuda
750 Gb

Магнитная силовая микроскопия: контраст



MFM – изображения
ферроэлектрических
полосовых доменов размером
10 нм в PbTiO_3 на SrTiO_3



MFM – изображение магнитной
структуры наночастицы в форме
эллипса

Магнитная силовая микроскопия

Достоинства метода:

- Высокое пространственное разрешение
- Относительно невысокая стоимость

Основные характеристики метода:

- Пространственная разрешающая способность ~ 10 нм
- Информационная глубина ~ 5 мкм
- Время записи: 1 минута

Недостатки метода:

- Возможность изучать лишь перпендикулярную компоненту намагниченности
- Большое время записи
- Необходимо подбирать иголки для разных материалов

Просвечивающая электронная микроскопия

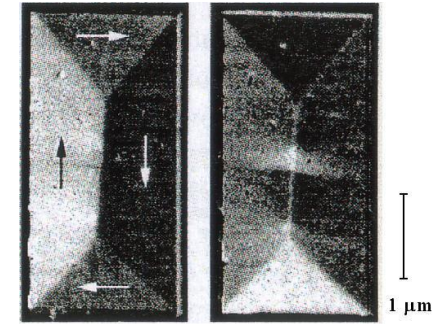
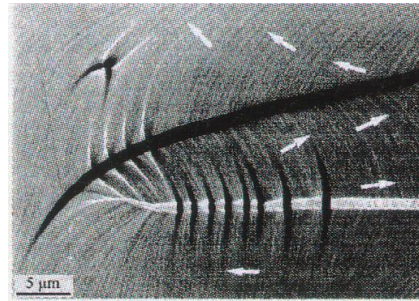
(Transmission electron microscopy TEM)

- Просвечивающий электронный микроскоп (ТЕМ) – это устройство, в котором изображение от ультратонкого образца (толщиной порядка 0,1 мкм) формируется в результате взаимодействия пучка электронов с веществом образца
- Первый ТЕМ создан немецкими инженерами-электронщиками Максом Кноллем и Эрнстом Руской в 1931 г. (Нобелевская премия в 1986 г.)
- Первый практический просвечивающий электронный микроскоп был построен Альбертом Пребусом и Дж. Хиллиером в университете Торонто (Канада) в 1938 г. на основе принципов, открытых ранее Кноллем и Руской.

Просвечивающая электронная микроскопия (Transmission electron microscopy TEM)

Типы ТЕМ

- Лоренцева микроскопия
- Дифференциальная фазовая микроскопия
- Электронная голография

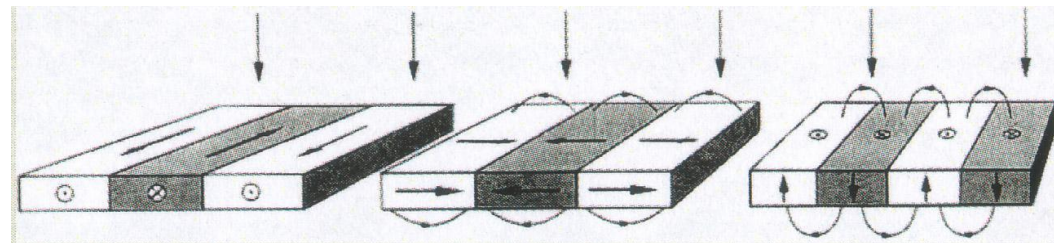
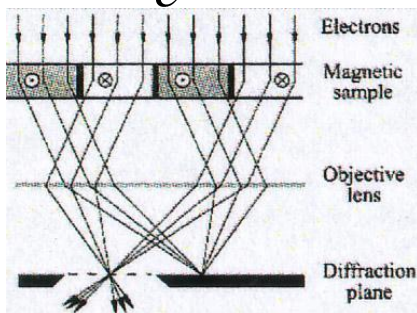


Волновая
доменная
структура
поликристал-
лического
пермаллоя

Компоненты
намагниченности в
пермалловом
элементе

Лоренцева микроскопия.
Сила Лоренца:

$$\vec{F} = \frac{e}{c} [\vec{V} \times \vec{B}]$$

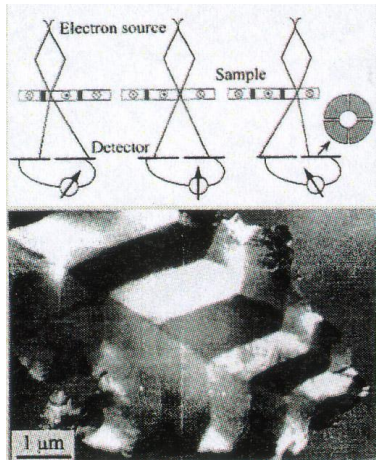


Дифференциальная фазовая микроскопия

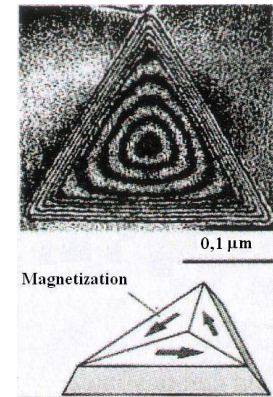
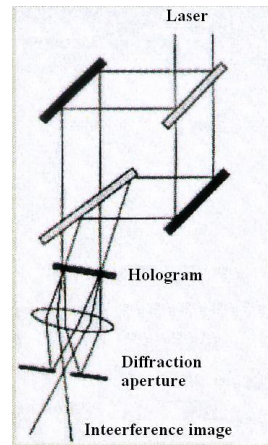
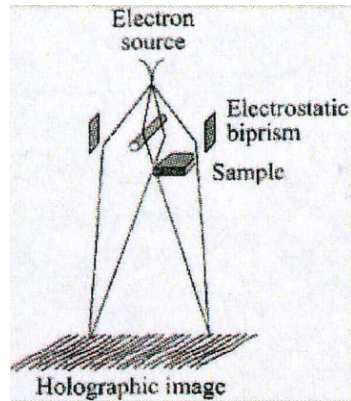
Повышение контраста в электронной микроскопии

- Дифференциальная фазовая микроскопия – сканирующая просвечивающая микроскопия (D-TEM)
- Электронная голография – голография на электронных пучках (H-TEM)

D-TEM



H-TEM



Домены в фольге
железа

Магнитная структура
треугольной призмы из
Co

Просвечивающая электронная микроскопия

Основные характеристики метода:

- Пространственная разрешающая способность:
 - ✓ Лоренцева микроскопия более 50 нм
 - ✓ Дифференциальная фазовая микроскопия более 10 нм
 - ✓ Электронная голография более 5 нм
- Информационная глубина: порядка 100 нм
- Время записи: 1с

Достоинства метода:

- Высокая разрешающая способность
- Высокий контраст
- Возможность изучения взаимодействия доменных границ с дефектами решетки

Недостатки метода:

- Некоторые структуры изучать невозможно (компенсация полей, направление силы и др.)
- Ограничения на толщину образцов (не более нескольких 100 нм)
- Сложная подготовка образцов
- Внешнее поле влияет на результаты

Микроскопия на вторичных электронах

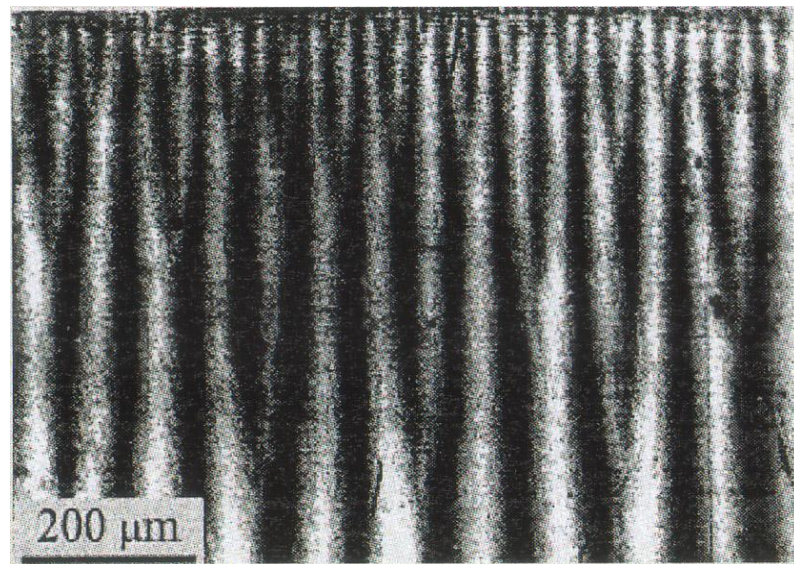
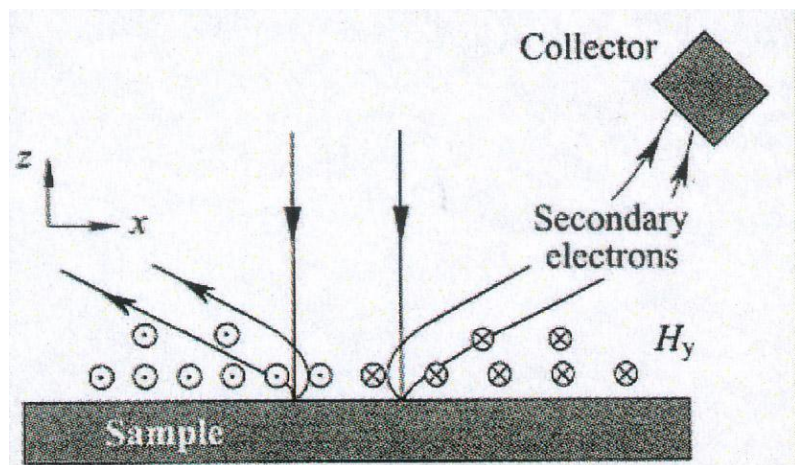
Типы микроскопии на вторичных электронах:

- Сканирующая электронная микроскопия (SEM)
- Сканирующая электронная микроскопия с поляризационным анализом (SEMPA)

Сканирующая электронная микроскопия (SEM)

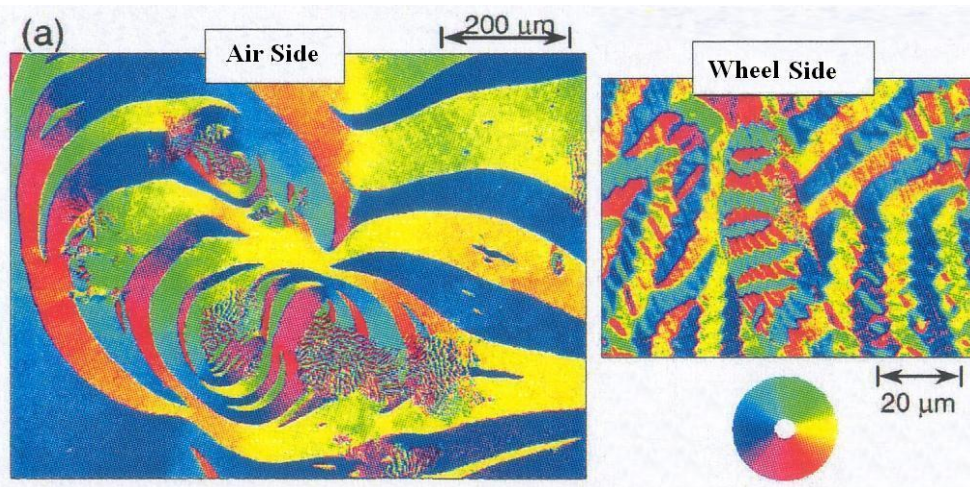
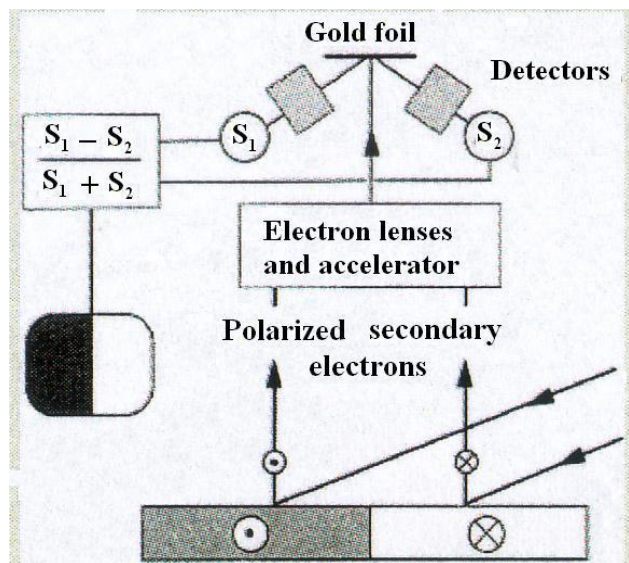
- Поверхность образца сканируется электронным лучом ($E_o = 10 - 100$ кэВ)
- Рассеянные электроны ($E_r = 0,8 - 0,9 E_o$)
- Вторичные электроны ($E_s = 50$ эВ)
- Вторичные электроны легко отклоняются локальными полями в образце, можно определить намагниченность образца

Сканирующая электронная микроскопия (SEM)



Сканирующая электронная микроскопия с поляризационным анализом (SEMPA)

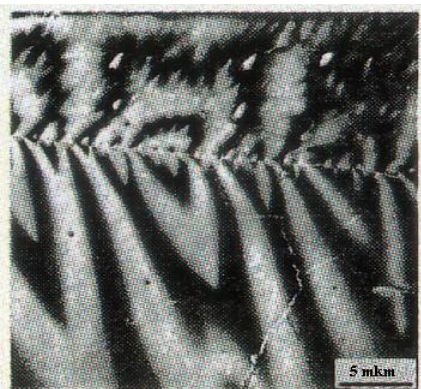
SEMPA (Koike, Hayakawa, 1984) – использование эффекта спиновой поляризации вторичных электронов



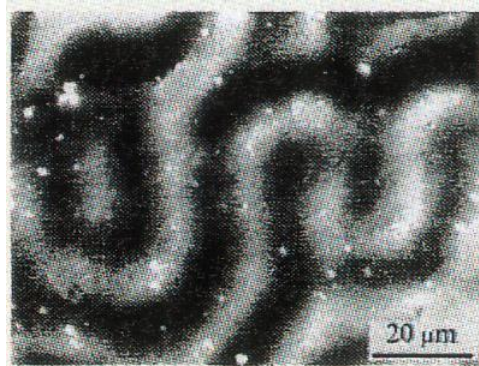
Две поверхности загнутой ленты Fe

Сравнение контраста разных методов изучения магнитной структуры Co

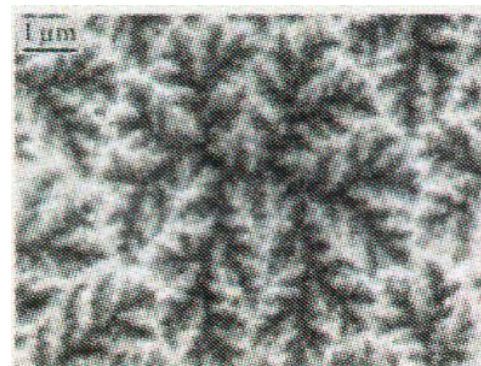
Изображение по методу порошковых фигур



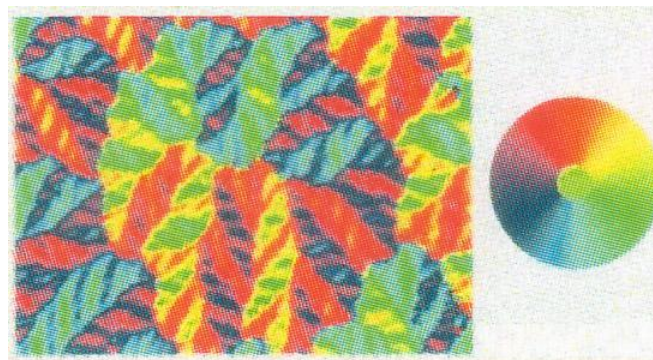
Изображение, полученное с помощью МО эффекта Керра



SEMPA – изображение (полярная компонента)



SEMPA – изображение (плоскостная компонента)



Микроскопия на вторичных электронах

Достоинства метода:

- Нечувствительность к качеству поверхности (SEM)
- Возможность изучать поверхность, покрытую немагнитным материалом (SEM)
- Высокая разрешающая способность (SEMPA)
- Высокий контраст

Основные характеристики метода:

- Пространственная разрешающая способность:
 - ✓ SEM более 500 нм
 - ✓ SEMPA более 10 нм
- Информационная глубина:
 - ✓ SEM около 10 мкм
 - ✓ SEMPA порядка 1 нм
- Время записи: 10 с

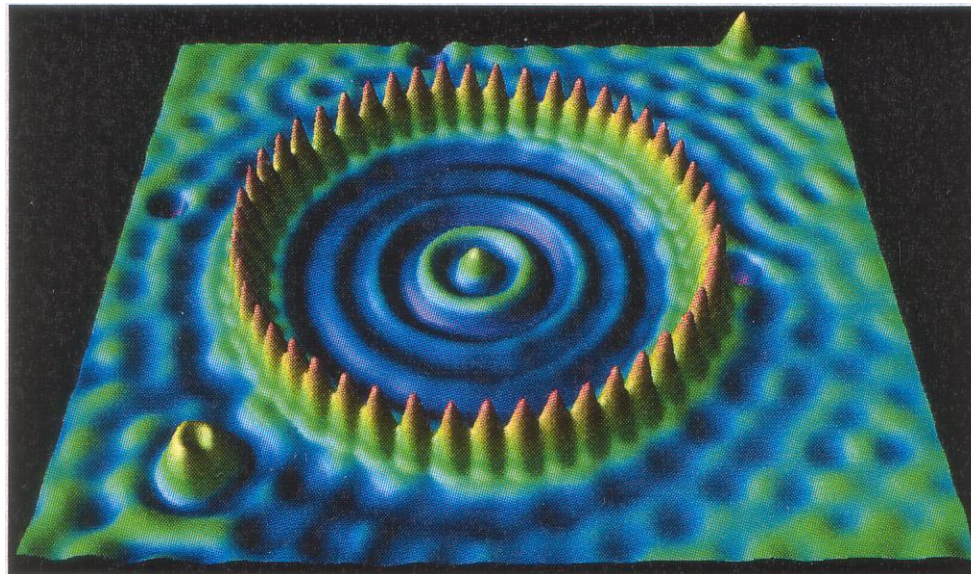
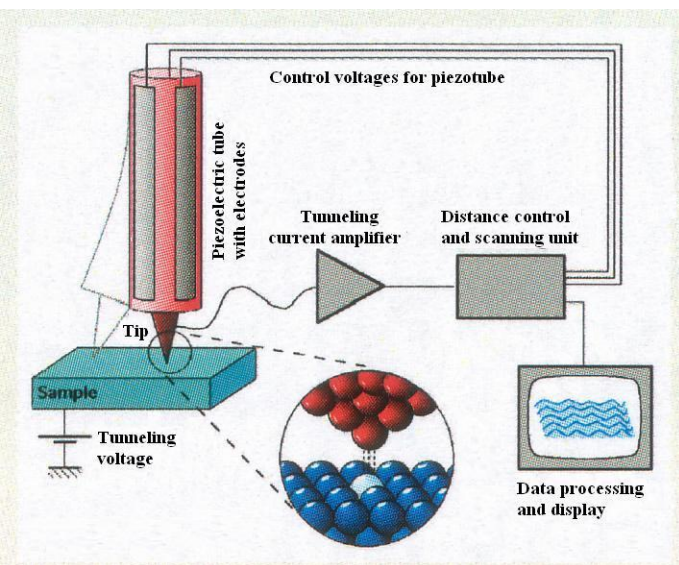
Недостатки метода:

- Сложность оборудования (высоковольтные электронные микроскопы, сверхвысокий вакуум, детектор спиновой поляризации)
- Сложность экспериментов во внешнем поле
- Большое время записи

Сканирующая туннельная микроскопия (scanning tunneling microscope STM)

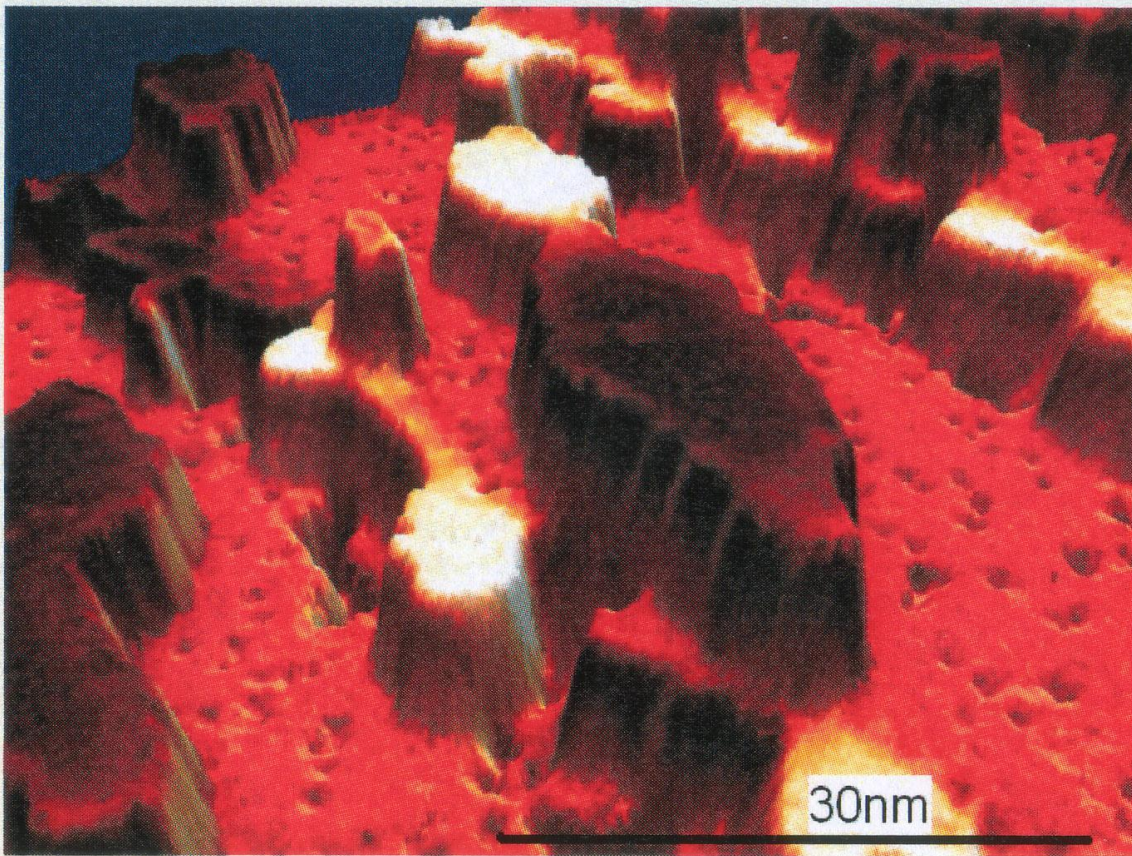
1981 – Разработка туннельного микроскопа (Г. Биннингем и Г. Рорером – IBM)

1986 – Нобелевская премия



IBM: квантовый коралл (кольцо из атомов Fe)

Сканирующая туннельная микроскопия со спин-поляризованными электронами (SP-STM)



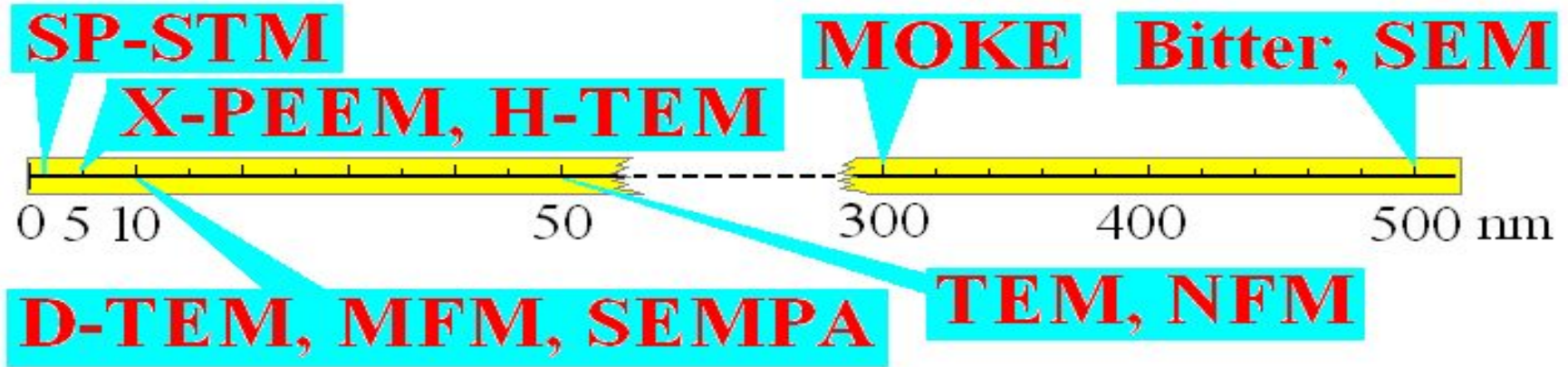
Разрешающая
способность метода
более 1 нм

«Острова» Fe на монослое Fe, который нанесен на поверхность W

Методы исследования магнитных структур

- Метод порошковых фигур. Метод Биттера.
- Магнитооптические методы
 - ✓ Магнитооптические эффекты
 - ✓ Метод темнопольной дифракции
 - ✓ Лазерная сканирующая микроскопия.
 - ✓ Рентгеновский магнитооптический метод
- Магнитная силовая микроскопия
- Электронная микроскопия
 - ✓ Просвечивающая электронная микроскопия
 - ✓ Микроскопия на вторичных электронах
 - ✓ Сканирующая туннельная микроскопия

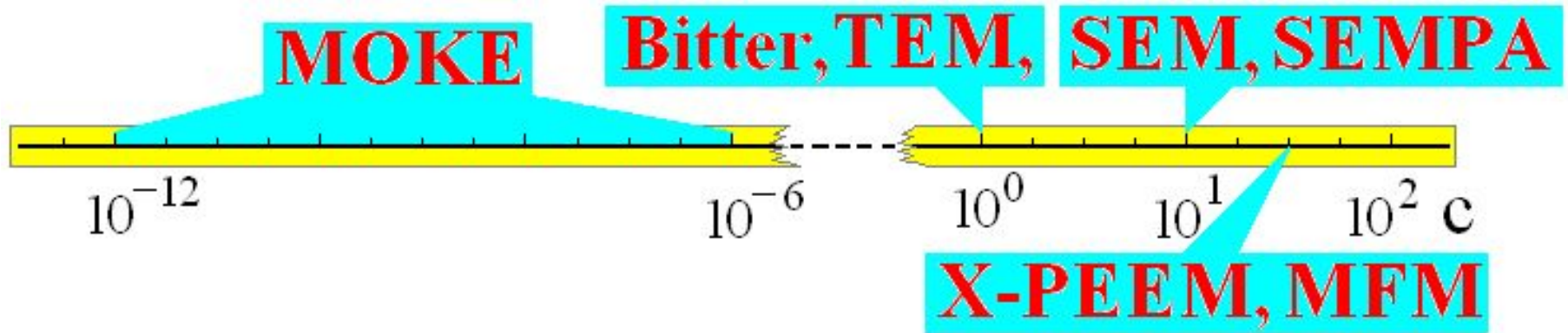
Пространственное разрешение различных методов



- **Bitter** – метод порошковых фигур Биттера (500 нм)
- **SEM** – сканирующая электронная микроскопия (500 нм)
- **MOKE** – магнитооптический эффект Керра (300 нм)
- **TEM** – просвечивающая электронная микроскопия (50 нм)
- **NFM** – микроскопия ближнего поля (50 нм)
- **D-TEM** – дифференциальная просвечивающая электронная микроскопия (10 нм)

- **MFM** – магнитная силовая микроскопия
- **SEMPA** – сканирующая электронная микроскопия с поляризационным анализом
- **X-PEEM** – рентгеновская фотоэмиссионная электронная микроскопия (50 нм)
- **H-TEM** – голографическая просвечивающая электронная микроскопия
- **SP-STM** – сканирующая туннельная микроскопия со спин-поляризованными электронами (1 нм)

Временное разрешение различных методов



- **Bitter** – метод порошковых фигур Биттера (500 нм)
- **SEM** – сканирующая электронная микроскопия (500 нм)
- **МОКЕ** – магнитооптический эффект Керра (300 нм)
- **TEM** – просвечивающая электронная микроскопия (50 нм)

- **MFM** – магнитная силовая микроскопия
- **SEMPA** – сканирующая электронная микроскопия с поляризационным анализом
- **X-PEEM** – рентгеновская фотоэмиссионная электронная микроскопия (50 нм)

Практикум: **сделано**-**сдано**

Данные на 2 и 23 октября 2018

