

# ЛЕКЦИЯ 6

## Магнитооптика магнитоупорядоченных сред

*Е.Е. Шалыгина*

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

# **СОДЕРЖАНИЕ**

- Классификация магнитооптических эффектов**
- Феноменологическая теория магнитооптических эффектов**
- Магнитооптические методы при решении фундаментальных и прикладных задач физики магнитных явлений**

- Слово “магнетизм” образовалось из названия греческого города “Magnesia”, в котором были обнаружены камни, притягивающие железо.
- Этот минерал был назван “магнетит” ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )
- Этот материал был назван ферримагнетиком.

**Первая книга по магнетизму была подготовлена англичанином Уильямом Гильбертом(1540-1603).**

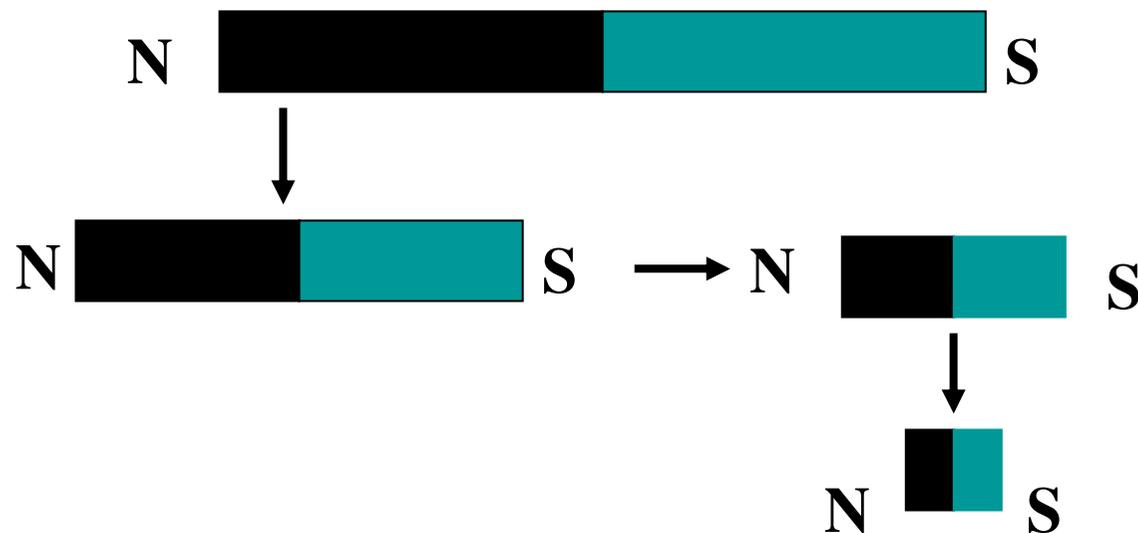
**Он экспериментировал с естественными магнитами и железом и сформировал четкую картину магнитного поля земли.**

**Он объяснил полученные данные присутствием души в магнитах, которые вызывают взаимодействие двух магнитов.**

**Р. Декарт (1596-1650 гг.) построил реалистическую картину магнитных явлений. Он полагал, что магнитные материалы состоят из магнитных винтиков**

## Предполагалось, что магнитные заряды являются источником магнитных полей

Если мы делим постоянный магнит последовательно пополам, то любой малый кусочек имеет магнитные заряды обоих знаков, то есть существуют только магнитные диполи.



Магнитный монополюль — гипотетическая элементарная частица, с ненулевым магнитным зарядом — точечный источник радиального магнитного поля (?)

К концу XVIII века было выяснено, что в лабораторных условиях невозможно создать тело с ненулевым полным магнитным зарядом

# **Магнитостатические явления**

## **Существуют силы притяжения и отталкивания**

**Если предположить, что существуют «магнитные полюса», то можно записать закон Кулона по аналогии с электрическими зарядами**

$$**F = k (m_1 \times m_2) / r^2 ,**$$

**Где  $m_1$  и  $m_2$  are магнитные заряды;  $r$  – расстояние  
между ними;**

**$k = 1$  для CGS system.**

Напряженность магнитного поля - сила  
действующая на единичный положительный заряд

$$H = m / r^2$$

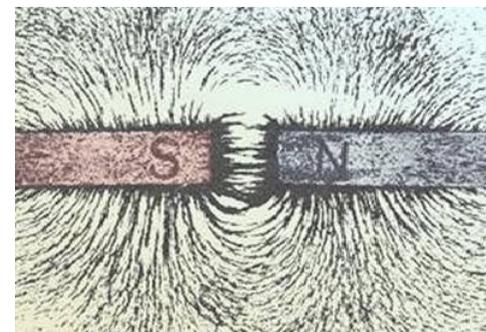
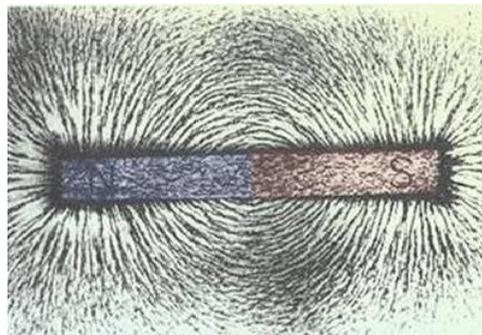
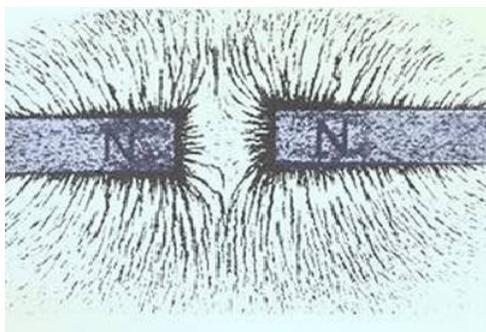
Сила, действующая на заряд  $m$  в поле  $H$

$$F = m H$$

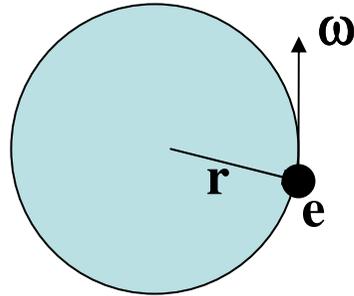
Магнитный момент диполя

$$M = m \times l$$

-m            +m



# Магнитный момент атома.



Магнитный момент обусловлен движением электрона по орбите

$$\mu = i S = (e/T) \pi r^2 = e r^2 \omega / 2m$$

$$T = 2\pi / \omega$$

Угловой момент движения

$$P = m \omega r^2$$

$$\mu = -(e/2m) P$$

Здесь  $e$  – заряд электрона;  $r$  – радиус орбиты,  $m$  – масса электрона.

$g = (e/2m)$  - гиромагнитное отношение

## Намагниченность магнитного материала



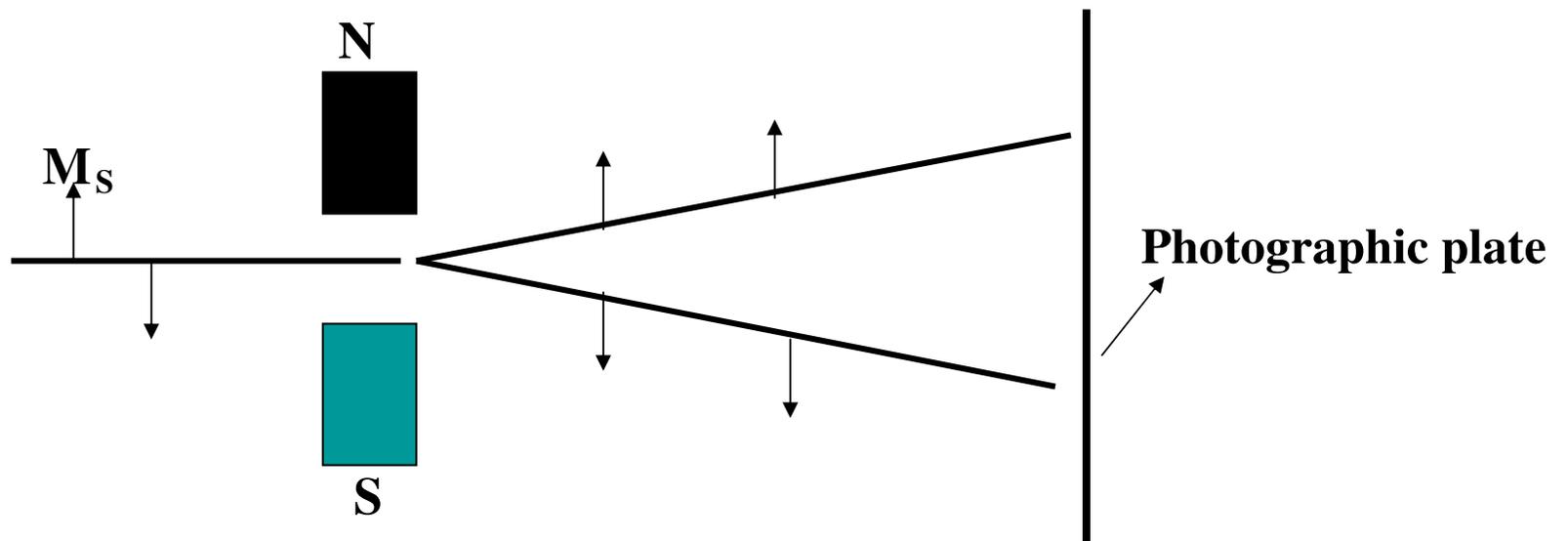
Орбитальное движение электрона + Спин

+

Магнитный момент ядра

# Опыт Штерна-Герлаха

- Использовались атомы серебра с  $S = 1/2$ .
- В поле  $S$  имеет только значения  $+ 1/2$  and  $-1/2$ .



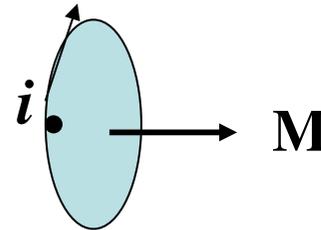
# Диамагнетизм

Материалы не имеют атомного магнитного момента

(Cu, Ag, Au, C- графит, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

$$\chi = M / H$$

$$\chi \approx - 10^{-5}$$

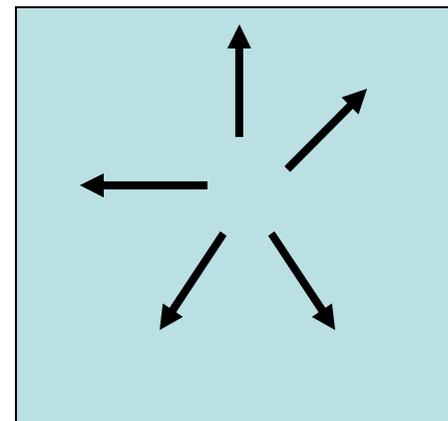


Диамагнетизм существует во всех материалах (!!!)

# Парамагнетизм

V, Nb, Mn, Ti

$$\chi \approx 10^{-5} - 10^{-2}$$



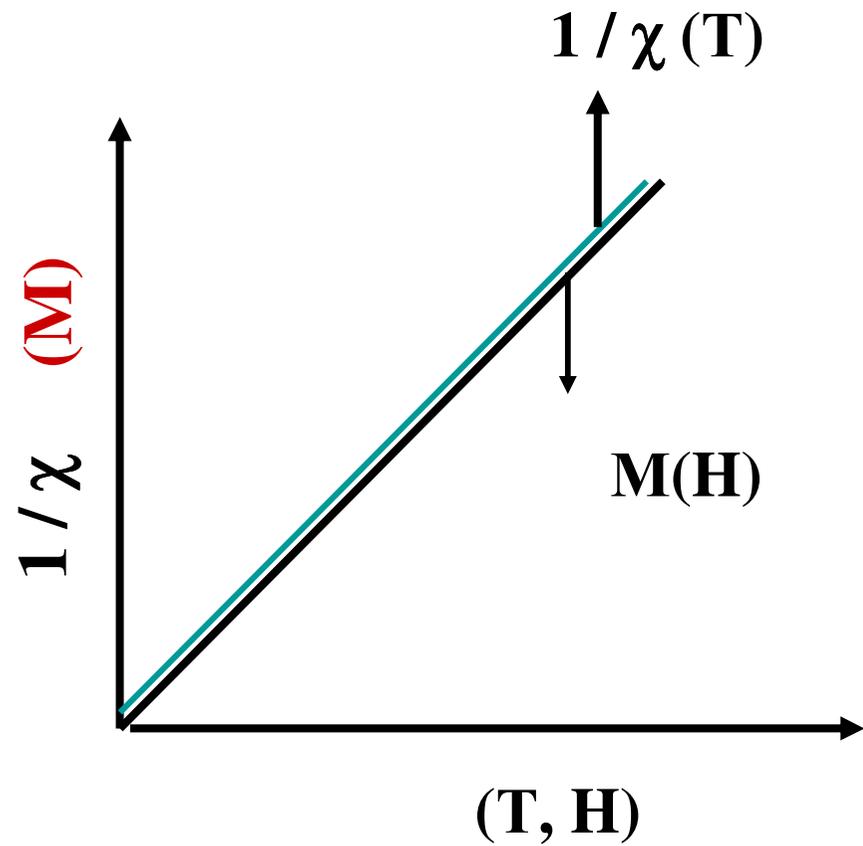
Расчет таких систем был выполнен Ланжевеном

$$\chi = C / T \text{ (закон Кюри)}$$

$$C = NM^2/3k,$$

$N$  – число атомов,  $M$  – магнитный момент атома,  $k$  – постоянная Больцмана

$$k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$$

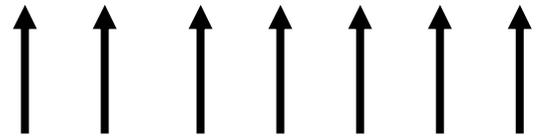


Зависимость  $1/\chi$  от  $T$  для парамагнетика и  $M(H)$ .

# Ферромагнетизм

## Первая гипотеза Вейсса:

Существует внутреннее поле  $H_M$ .



Fe, Ni, Co  $\chi \approx 10^5 - 10^7$

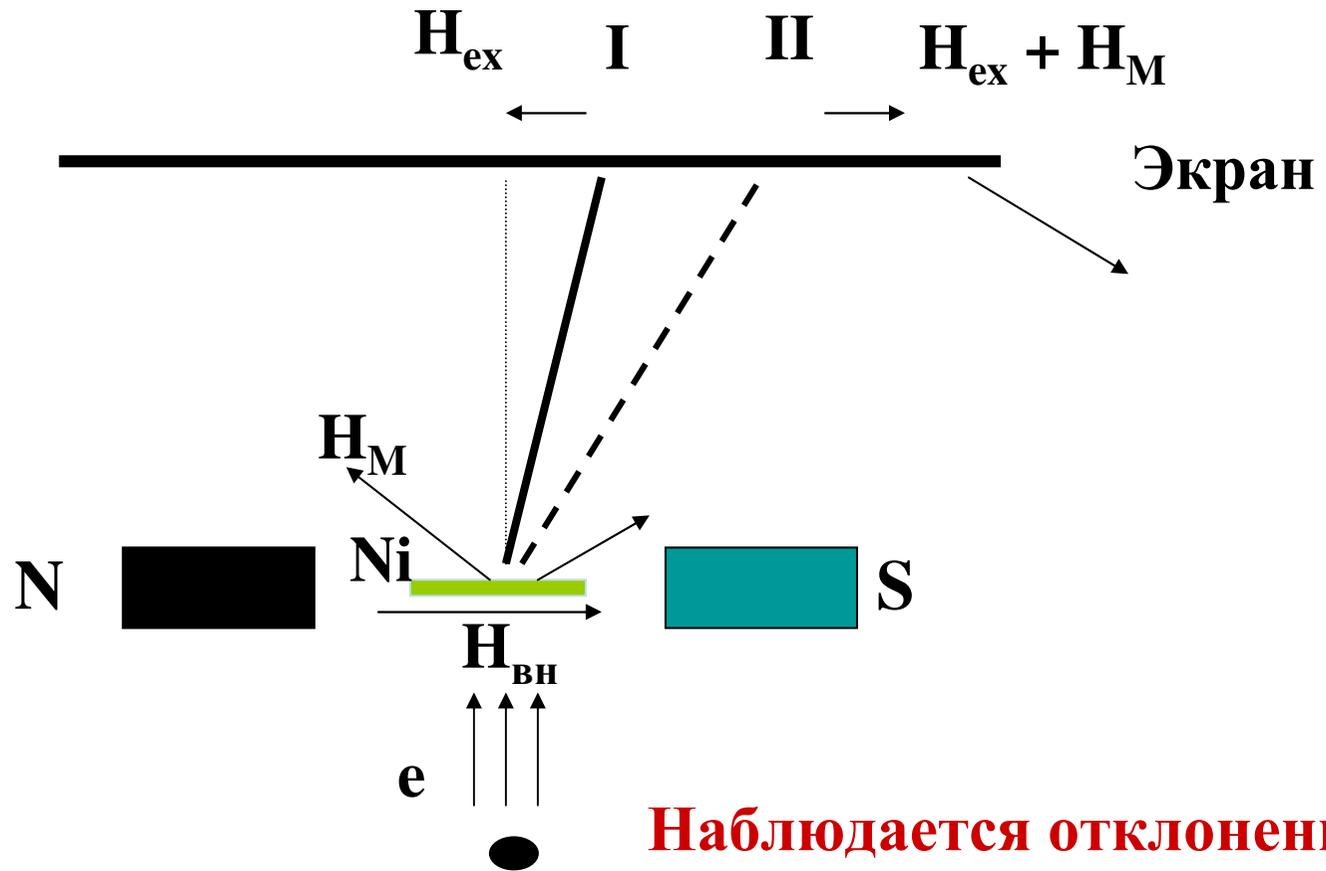
Вейсс предположил, взаимодействие между магнитными моментами пропорционально намагниченности

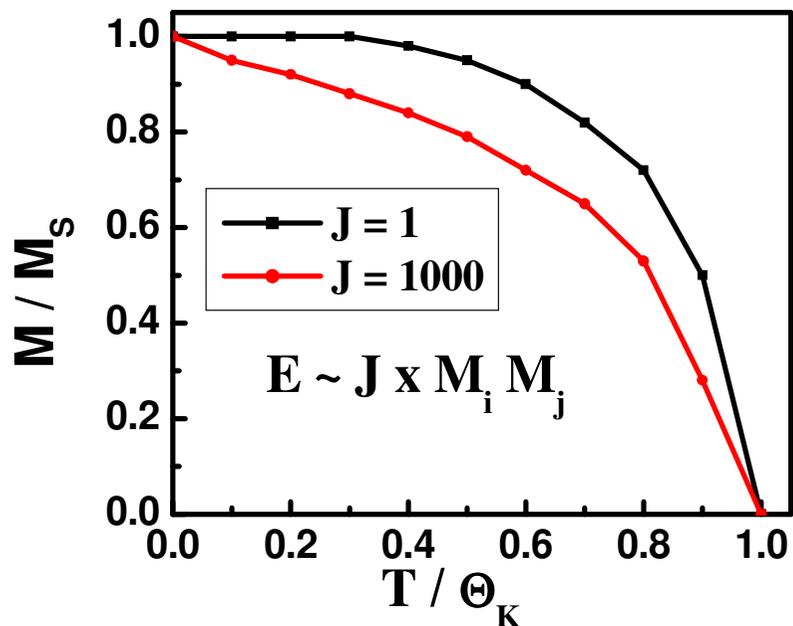
$$H_M = w \chi M$$

$$\chi = C / (T - \Theta) \text{ (Закон Кюри- Вейсса)}$$

# Причина $H_M$

## Опыт Дорфмана





$\Theta = \Theta_K = (NM^2w) / 3k$  – температура Кюри

$$H_M = w \times M$$

**Fe**

$$\Theta_K = 1063 \text{ K,}$$

$$M = 2.2 \mu_B, N = 8.54 \times 10^{28} \text{ m}^{-3}$$

$$H_M \sim 10^7 \text{ Oe}$$

В Гауссовой системе единиц магнетон Бора определяется как

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2cm_e}$$

В системе СИ как

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e}$$

где  $\hbar$  — постоянна Планка  $e$  — заряд электрона,  $m_e$  — масса электрона,  $c$  — скорость света

Величина магнетона Бора составляет, в зависимости от выбранной системы единиц:

$$927,400915(26) \cdot 10^{-26} \text{ Дж/Тл (СИ)}$$

$$927,400915(26) \cdot 10^{-23} \text{ эрг/Гс (СГС)}$$

## **Основной вывод**



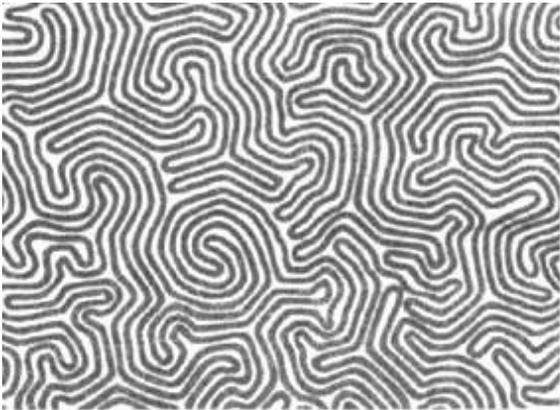
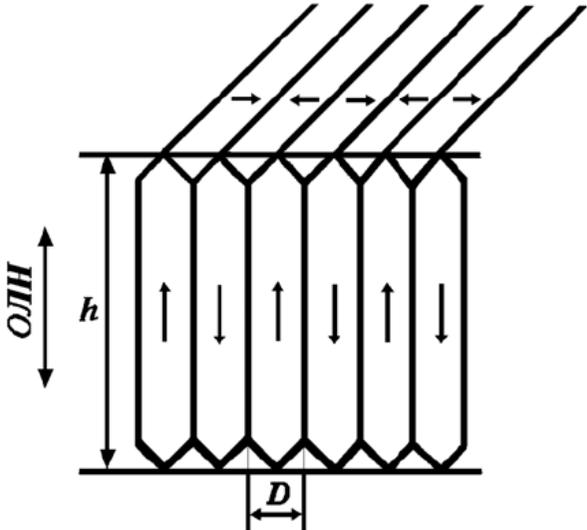
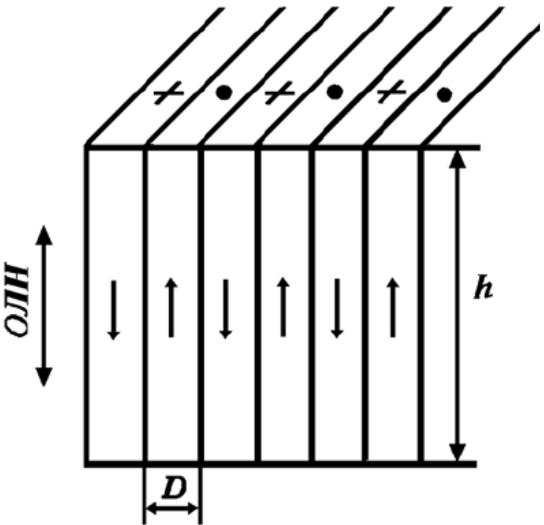
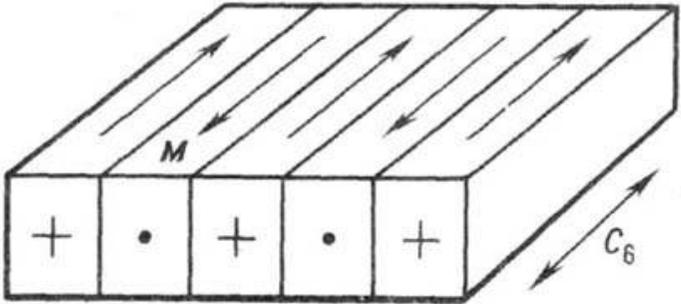
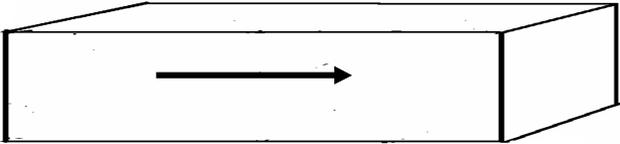
**Все существующие материалы проявляют магнитные свойства, но их поведение в магнитном поле различно**

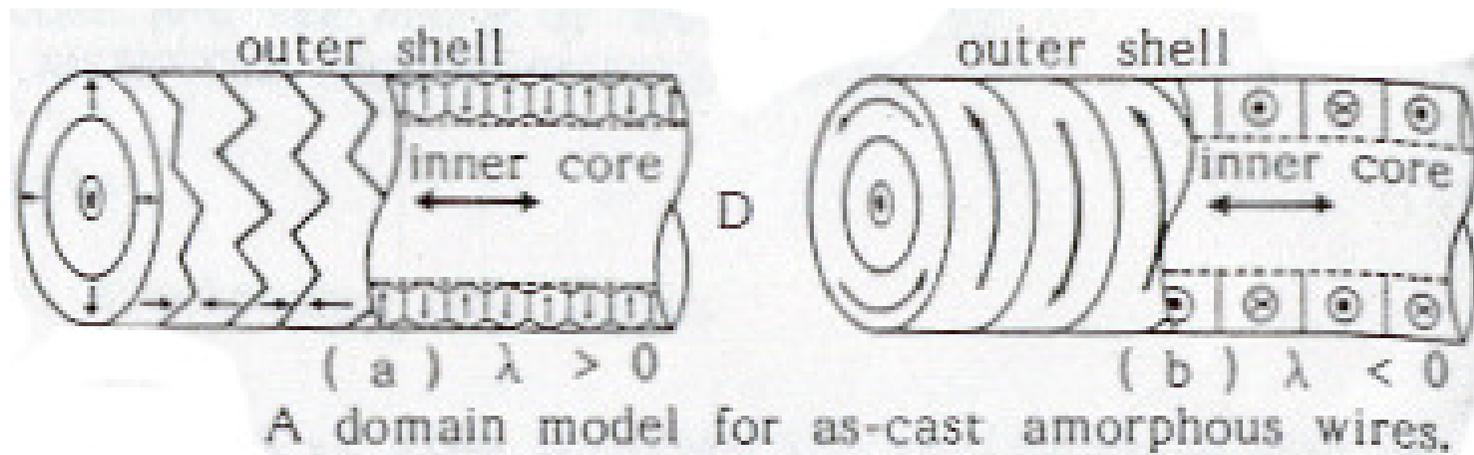
**Вторая гипотеза Вейсса:**

**Магнитные материалы имеют домены.**

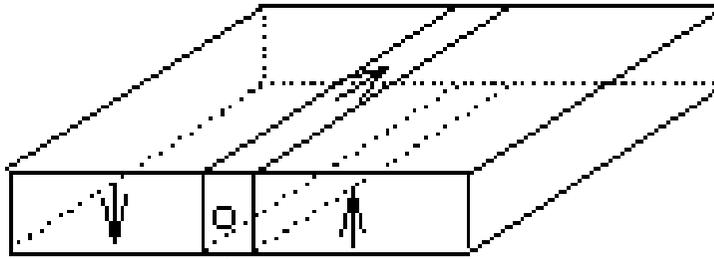
**Между доменами существуют доменные границы**

**Существует огромное многообразие доменных структур в ферромагнитных материалах**

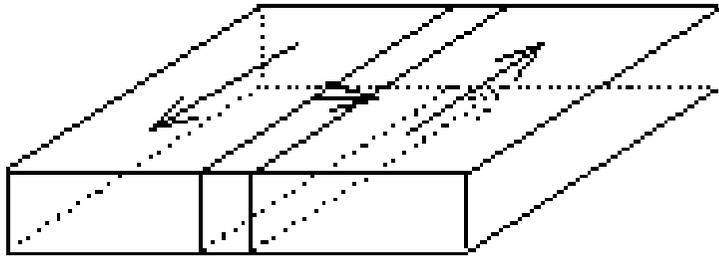




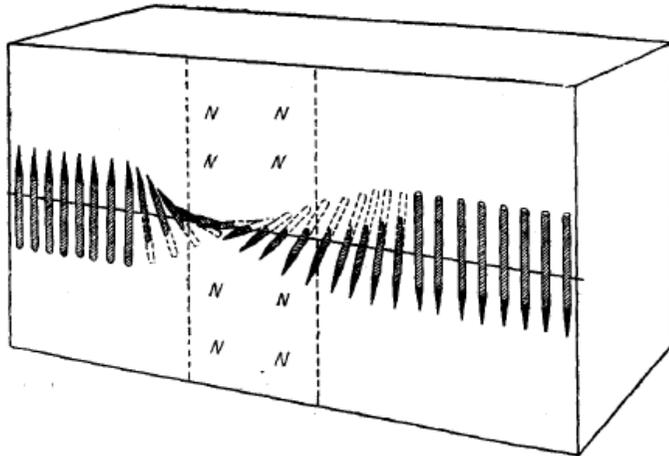
*Схематическое изображение доменной структуры,  
предложенной для микропроводок*



**Bloch domain wall**



**Neel domain wall**



*180°-градусной доменной стенке Блоха*

Размер доменов- (нм-μм).

Ширина доменных границ

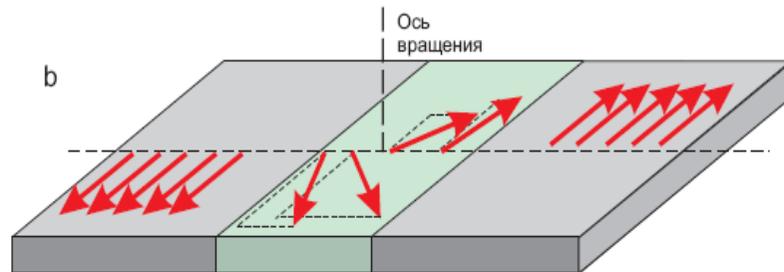
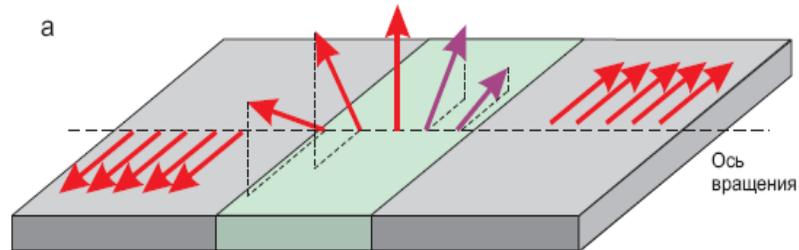
$$\nabla = \pi \sqrt{A/K},$$

Где **A** - обменный параметр

**K** - константа анизотропии

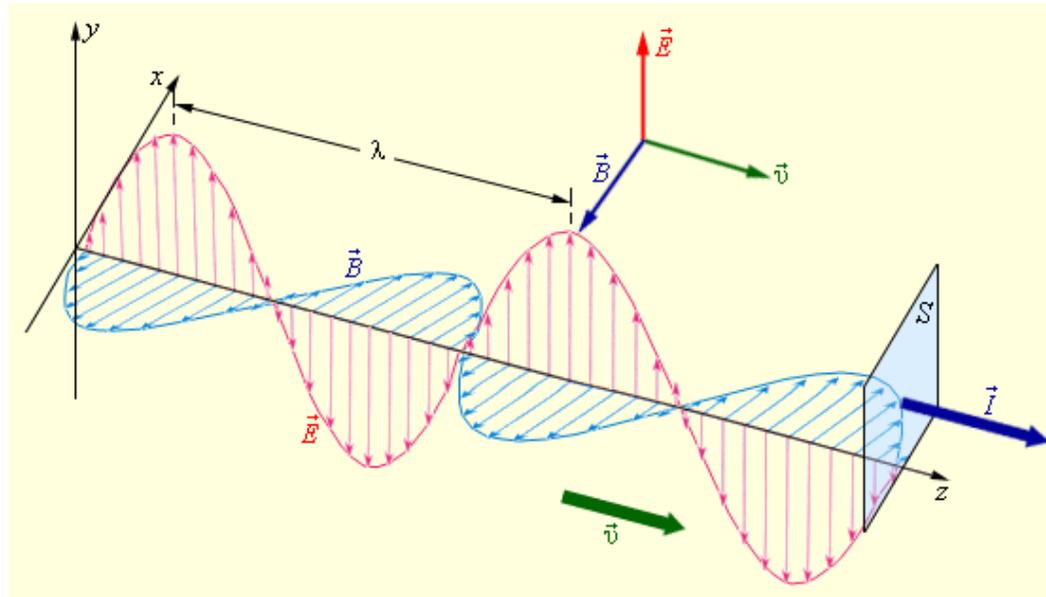
Для Fe, Ni, Co

$$\nabla \sim 10 - 20 \text{ nm}$$



*180°-градусной доменной стенке Блоха (a) и стенки Нееля (b)*

**Оптика** — раздел физики, рассматривающий явления, связанные с распространением электромагнитных волн (преимущественно видимого и близких к нему диапазонов) в среде.



Электромагнитная волна представляет собой процесс периодического, **взаимосвязанного изменения векторов напряжённости электрического  $E$  и магнитного полей  $B$  ( $H$ )**, направленных перпендикулярно лучу распространения волны при котором изменение электрического поля вызывает изменения магнитного поля, которые, в свою очередь, вызывают изменения электрического поля

Колебания векторов  $E$  и  $B$  происходят во взаимно перпендикулярных плоскостях и перпендикулярно линии распространения волны ( вектору скорости, вектор  $k$ ) **и в любой точке совпадают по фазе.**

**Видимое излучение — электромагнитные волны (ЭМВ),  
воспринимаемые человеческим глазом**

**Спектр видимого излучения**

Цвет	Диапазон длин волн, нм	Диапазон частот, ТГц
<u>Фиолетовый</u>	380—440	790—680
<u>Синий</u>	440—485	680—620
<u>Голубой</u>	485—500	620—600
<u>Зелёный</u>	500—565	600—530
<u>Жёлтый</u>	565—590	530—510
<u>Оранжевый</u>	590—625	510—480
<u>Красный</u>	625—740	480—400

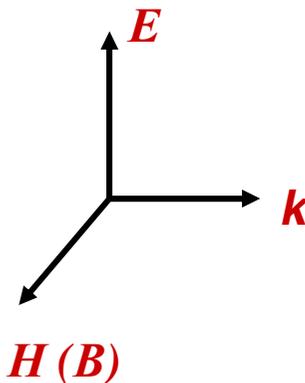
$$\lambda = T \cdot C, \quad \lambda = 2\pi/\omega \cdot C, \quad \omega = 2\pi/\lambda \cdot C$$

**C** – скорость света в вакууме, **T** – период, **λ** – длина ЭМВ

**C** ~ 300 000 км/с

Электромагнитное излучение с такими длинами волн также называется *видимым светом*, или просто **светом**

Если колебания электрического и магнитного полей происходят только в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, то такой свет называют линейно-поляризованным (или плоско поляризованным).



Плоскость, в которой колеблется световой вектор  $E$  называется плоскостью поляризации

Световые волны, испускаемые обычными источниками света (например, лампочкой накаливания), не поляризованы.

Это означает, что колебания векторов  $E$  и  $H$  происходят по всевозможным направлениям в поперечной плоскости. Такой свет называют **естественным**.

**Поляризатор** — устройство, предназначенное для получения полностью или частично поляризованного оптического излучения с произвольным состоянием поляризации.

Линейные поляризаторы основаны на использовании физических явлений.

Одно из них — **двойное лучепреломление**

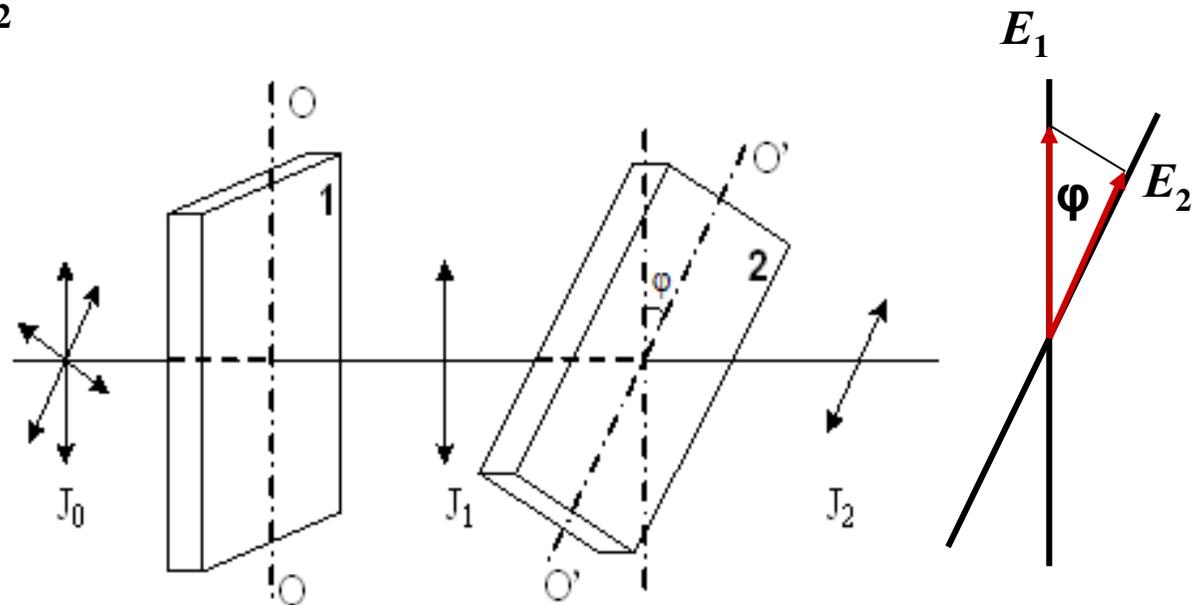
**Двойное лучепреломление** — эффект расщепления в **анизотропных** средах луча света на две составляющие. Впервые обнаружен датским ученым **Расмусом Бартолином** (датский ученый 1625-1698 гг) на **кристалле исландского шпата**

Естественный свет проходит последовательно через две пластинки турмалина.

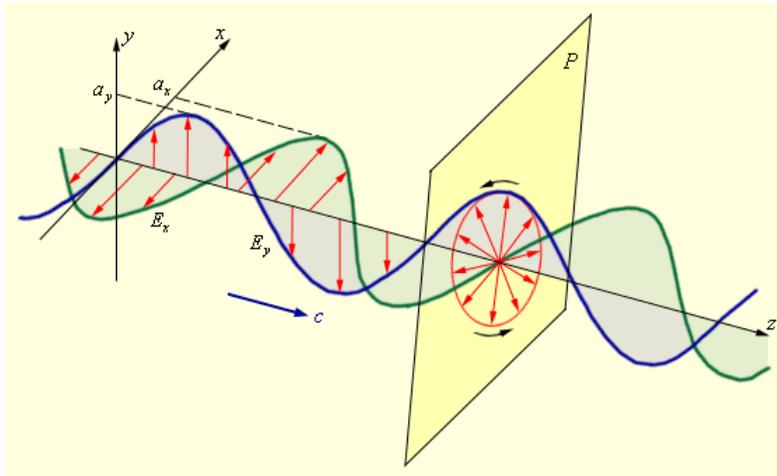
$J_1$  и  $J_2$  – интенсивности света, прошедшего пластинки 1 и 2, соответственно.

Угол между направлениями оптических осей  $OO$  и  $O'O'$   $\varphi = 45^\circ$  ( $90^\circ$ ).

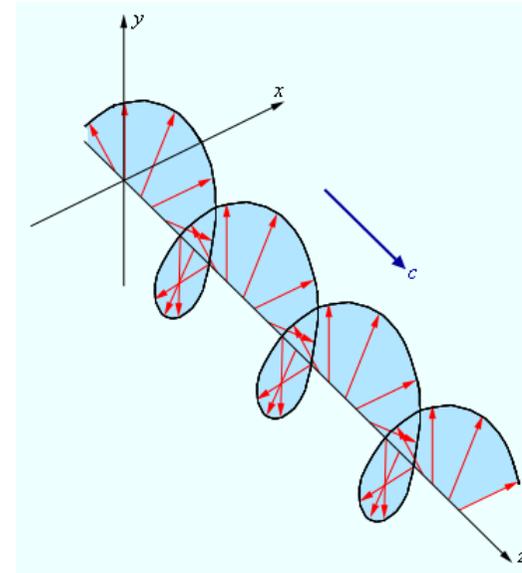
$$E_2 = E_1 \cos \varphi, J_1 = E_1^2, J_2 = E_2^2$$



Если вдоль одного и того же направления распространяются две монохроматические волны, поляризованные в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, то в результате их сложения в общем случае возникает эллиптически поляризованная волна

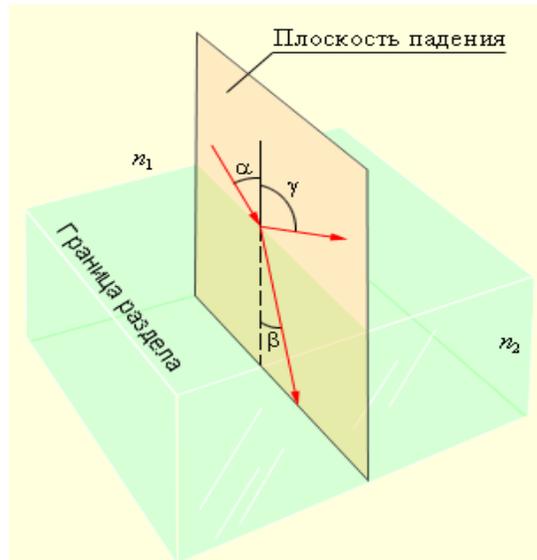


*Сложение двух взаимно перпендикулярно поляризованных волн и образование эллиптически поляризованной волны*



*Электрическое поле в эллиптически поляризованной волне*

**Линейно-поляризованную волну можно разложить на право- и лево-поляризованные по кругу (эллипсу) волны**



1. Падающий и отраженный лучи, а также перпендикуляр к границе раздела двух сред лежат в одной плоскости (*плоскость падения*).
2. Угол отражения  $\gamma$  равен углу падения  $\alpha$ .
3. Отношение синуса угла падения  $\alpha$  к синусу угла преломления  $\beta$  есть величина, постоянная для двух данных сред. Закон преломления был экспериментально установлен голландским ученым В. Снеллиусом в 1621 г.

$$\sin \alpha / \sin \beta = n$$

Постоянную величину  $n$  *относительный показатель преломления* второй среды относительно первой.

Относительный показатель преломления двух сред равен отношению их абсолютных показателей преломления:  $n = n_2 / n_1$

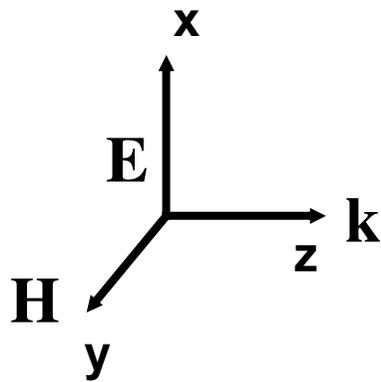
$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta$$

**Физический смысл показателя преломления – это отношение скорости распространения волн в первой среде  $v_1$  к скорости их распространения во второй среде  $v_2$ :  $n = v_1 / v_2$**

**Магнитооптика - раздел физики, рассматривающий явления взаимодействия света с намагниченным кристаллом.**

**Реально изучается влияние намагниченности среды на параметры падающего света: поляризацию (положение  $E$  относительно оси  $x$  в плоскости  $xy$ ), амплитуду  $E_0$ , начальную фазу  $\Phi$ .**

**При этом исследуются причины, обуславливающие наблюдаемые изменения указанных параметров.**



$$E = E_0 \cos(\omega t + \Phi)$$

Впервые магнитооптический эффект на проходящем через намагниченный кристалл свете был обнаружен Фарадеем в 1845 году. Этот эффект был назван его именем.



Майкл Фарадэй (1791 – 1867)  
английский **физик-экспериментатор** и **химик**.

Открыл **электромагнитную индукцию**, лежащую в основе современного промышленного производства электричества и многих его применений.

Создал первую модель **электродвигателя**.

Среди других его открытий — первый **трансформатор**, **химическое действие тока**, **законы электролиза**, **действие магнитного поля на свет**, **диамагнетизм**.

Первым предсказал **электромагнитные волны**.

Фарадэй — основоположник учения об **электромагнетизма**, которое затем математически оформил и развил **Максвелл**

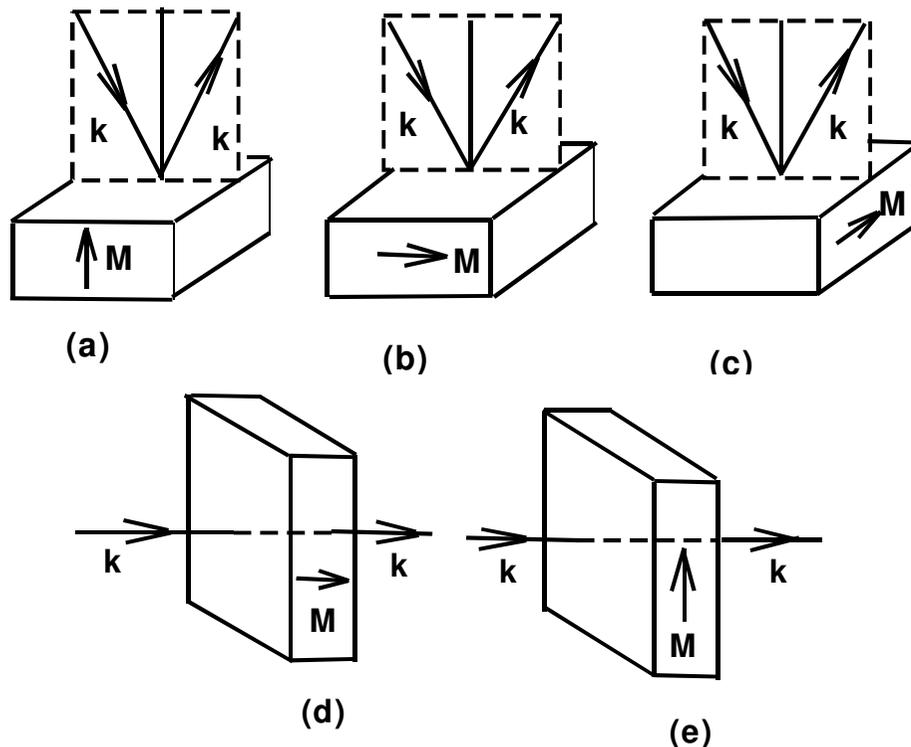
**В 1876 г. Керр** обнаружил магнитооптические эффекты на отраженном от намагниченного кристалла свете. Эти эффекты были названы эффектами Керра.



- Джон Керр (1824—1907) — шотландский физик.
- Работал в университете Глазго в 1857—1901 гг. Член Лондонского королевского общества (1890).
- Работы в области оптики. Открыл в 1875 г. **явление двойного лучепреломления** в изотропном веществе, помещенном в электрическое поле (**эффект Керра**).
- В 1876 г. открыл также **магнитооптический эффект**.

## Магнитооптические эффекты классифицируются с учетом

- направления распространения света  $k$  относительно ориентации намагниченности  $M$  в кристалле
- метода их наблюдения (эффекты в отраженном и проходящем свете).



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

Фарадей и Фохт эффект наблюдаются в случае (d) и (e), соответственно.

▶ **ПЭК, МЭК и Фарадей** эффекты проявляются во вращении плоскости поляризации и появлении эллиптичности в отраженном от намагниченного образца линейно-поляризованном свете.

▶ **ЭЭК** представляет собой реальное изменение интенсивности отраженного от намагниченного образца линейно-поляризованного света.

# Феноменологическая теория магнитооптических эффектов

Уравнения Максвелла — система уравнений в дифференциальной или интегральной форме, описывающих электромагнитное поле и его связь с электрическими зарядами и токами в вакууме и сплошных средах.

Название	СГС	СИ	Примерное словесное выражение
Закон Гаусса	$\text{div } D = 4 \pi \rho$	$\text{div } D = \rho$	Электрический заряд является источником электрической индукции
Закон Гаусса для магнитного поля	$\text{div } B = 0$	$\text{div } B = 0$	Не существует магнитных зарядов
Закон индукции Фарадея	$\text{rot } E = - (1/c)(\partial B/\partial t)$	$\text{rot } E = - \partial B/\partial t$	Изменение магнитной индукции порождает вихревое электрическое поле
Теорема о циркуляции и магнитного поля	$\text{rot } H = (4\pi j/c) + (1/c)(\partial D/\partial t)$	$\text{rot } H = j + \partial D/\partial t$	Электрическое поле и изменение электрической индукции порождают вихревое магнитное поле

При решении уравнений Максвелла распределения зарядов и токов часто считаются заданными

$$\operatorname{div} D = 0$$

$$\operatorname{div} B = 0$$

$$\operatorname{rot} E = -(1/c)(\partial B/\partial t)$$

$$\operatorname{rot} H = (1/c)(\partial D/\partial t)$$

Материальные уравнения среды

$$B = [\mu] H$$

$$D = [\epsilon] E$$

Диэлектрическая (магнитная) проницаемость среды — физическая величина, характеризующая свойства среды и показывающая зависимость электрической (магнитной) индукции от напряженности электрического (магнитного) поля.

Решение уравнений Максвелла с учетом  $[\epsilon]$  и  $[\mu]$  является основной задачей феноменологической теории магнитооптических эффектов

**Изотропная кубическая среда намагничена вдоль оси Z.**

В этом случае среда может быть описана антисимметричными диэлектрическим  $[\epsilon]$  и магнитным  $[\mu]$  тензорами второго ранга с комплексными антисимметричными недиагональными компонентами:

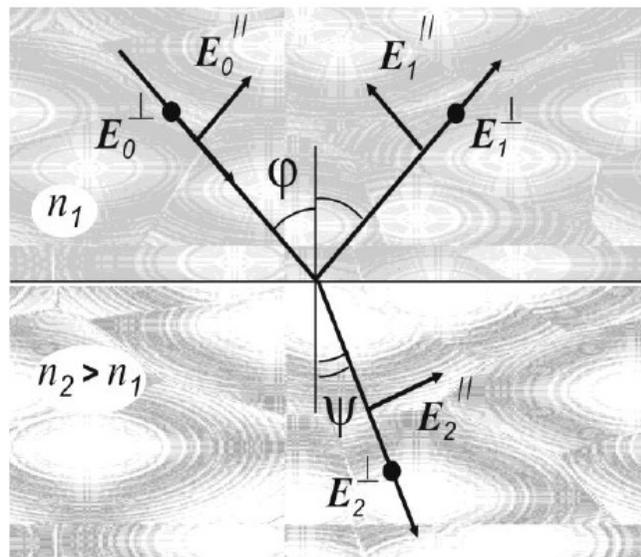
$$[\epsilon] = \begin{vmatrix} \epsilon & \epsilon_{xy} & 0 \\ \epsilon_{yx} & \epsilon & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_0 \end{vmatrix} \quad [\mu] = \begin{vmatrix} \mu & \mu_{xy} & 0 \\ \mu_{yx} & \mu & 0 \\ 0 & 0 & \mu_0 \end{vmatrix}$$

где

$$\begin{aligned} \epsilon &= \epsilon_1 - i\epsilon_2 & \epsilon_1 &= n^2 - k^2 & \epsilon_{xy} &= -\epsilon_{yx} = i\epsilon Q = \epsilon' = \epsilon'_1 - \epsilon'_2 \\ \epsilon_2 &= 2nk & & & \mu_{xy} &= -\mu_{yx} = i\mu Q' = \mu' = \mu'_1 - \mu'_2 \\ \mu &= \mu_1 - i\mu_2 & Q &= Q_1 - iQ_2 & Q' &= Q'_1 - iQ'_2 \end{aligned}$$

В первом приближении  $Q$  и  $Q'$  являются линейными по  $M$ .

$$Q = Q' = 0 \text{ при } M = 0$$



*Перпендикулярные и параллельные составляющие вектора  $E$  в падающей (индекс 0), отраженной (индекс 1) и преломленной (индекс 2) волнах*

$$E_1^\perp = -E_0^\perp \frac{\sin(\varphi - \psi)}{\sin(\varphi + \psi)} \quad (1),$$

$$E_1^\parallel = E_0^\parallel \frac{\operatorname{tg}(\varphi - \psi)}{\operatorname{tg}(\varphi + \psi)} \quad (2)$$

$$E_2^\perp = E_0^\perp \frac{2 \cos \varphi \sin \psi}{\sin(\varphi + \psi)} \quad (3),$$

$$E_2^\parallel = E_0^\parallel \frac{2 \cos \varphi \sin \psi}{\sin(\varphi + \psi) \cos(\varphi - \psi)} \quad (4)$$

$$R_\perp = \left( \frac{E_1^\perp}{E_0^\perp} \right)^2 = \frac{\sin^2(\varphi - \psi)}{\sin^2(\varphi + \psi)}, \quad (5)$$

$$R_\parallel = \left( \frac{E_1^\parallel}{E_0^\parallel} \right)^2 = \frac{\operatorname{tg}^2(\varphi - \psi)}{\operatorname{tg}^2(\varphi + \psi)}. \quad (6)$$

$$T = 1 - R$$

$R_\perp$  и  $R_\parallel$  - коэффициенты Френеля

**В продольной конфигурации, комплексные показатели преломления право- и лево-поляризованных по кругу (эллиптически поляризованных при поглощении  $K \neq 0$ ) волн. определяются соотношениями:**

$$n^*_{\pm} = \epsilon_0 \mu_0 [1 \pm \gamma^* (Q + Q')]$$

$\gamma^*$  является косинус угла между волновым вектором  $k$  и осью  $Z$  ( $\gamma^* \sim 1$  для сильно поглощающих сред).

$Q$  – магнитооптический параметр, неравный нулю при  $H \neq 0$ .

$Q'$  – магнитооптический параметр, равный нулю при  $H \neq 0$ .

**Различие  $n^*_+$  и  $n^*_-$  в намагниченной среде** (соответственно, разница фазовых скоростей света право- и лево-поляризованной по кругу световых волн

$V_+ = C/n^*_+$ ,  $V_- = C/n^*_-$ ) является физической причиной появления ПЭК, МЭК и эффекта Фарадея.

**В поперечной конфигурации собственными модами в среде являются линейно-поляризованные p- и s- волны (вектор  $E$  световой волны соответственно параллелен и перпендикулярен плоскости падения света).**

**Коэффициенты преломления этих волн определяются соотношениями:**

$$n^2_p = \epsilon \mu_0 (1 - Q^2);$$

$$n^2_s = \epsilon_0 \mu (1 - Q'^2)$$

**В области длин волн видимым светом**

$$\mu = 1 \quad \longrightarrow \quad Q' = 0$$

## Эффект Фарадея

Линейно поляризованное излучение может быть представлено как суперпозицию двух право- и лево-поляризованных волн с противоположным направлением вращения.

Во внешнем магнитном поле показатели преломления для циркулярно право- и лево-поляризованного света становятся различными.



При прохождении через среду линейно- поляризованного излучения его циркулярно лево- и право-поляризованные составляющие распространяются с разными скоростями, приобретая разность хода, линейно зависящую от оптической длины пути.



Плоскость поляризации линейно-поляризованного монохроматического света с длиной волны  $\lambda$ , прошедшего в среде путь  $l$ , поворачивается на угол

$$\theta = \pi l (n_+ - n_-) / \lambda$$

## Полярный и меридиональный эффект Керра

В продольной конфигурации, амплитуда отраженной волны  $R_{p,s}$  связана через матрицу отражения с амплитудой падающей волны  $A_{p,s}$

$$\begin{vmatrix} R_p \\ R_s \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} r_{pp} & r_{ps} \\ r_{sp} & r_{ss} \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} A_p \\ A_s \end{vmatrix}$$

где  $r_{pp} = r_{pp}(n, k, \varphi)$  и  $r_{ss} = r_{ss}(n, k, \varphi)$  - коэффициенты отражения Френеля,

$r_{ps} = r_{sp}$  - коэффициенты отражения, обусловленные наличием внешнего магнитного поля, приложенного к магнитному образцу

$n$  и  $k$  - соответственно коэффициенты преломления и поглощения;  $\varphi$  - угол падения света,

$r_{ps} = r_{ps}\{(Q+Q'), n, k, \varphi\}$  и  $r_{sp} = r_{sp}\{(Q+Q'), n, k, \varphi\}$ .

Например, пусть падающий световой является линейно-поляризованным с амплитудой  $A_P$ .

$$R_P = r_{PP} \times A_P;$$

$$R_S = r_{SP} \times A_P$$

$$r_{SP} \propto M$$

$$r_{SP} r_{SP}^* \propto M^2$$



$$I = R_P^* R_P + R_S^* R_S = I_0 + \nabla(M^2)$$

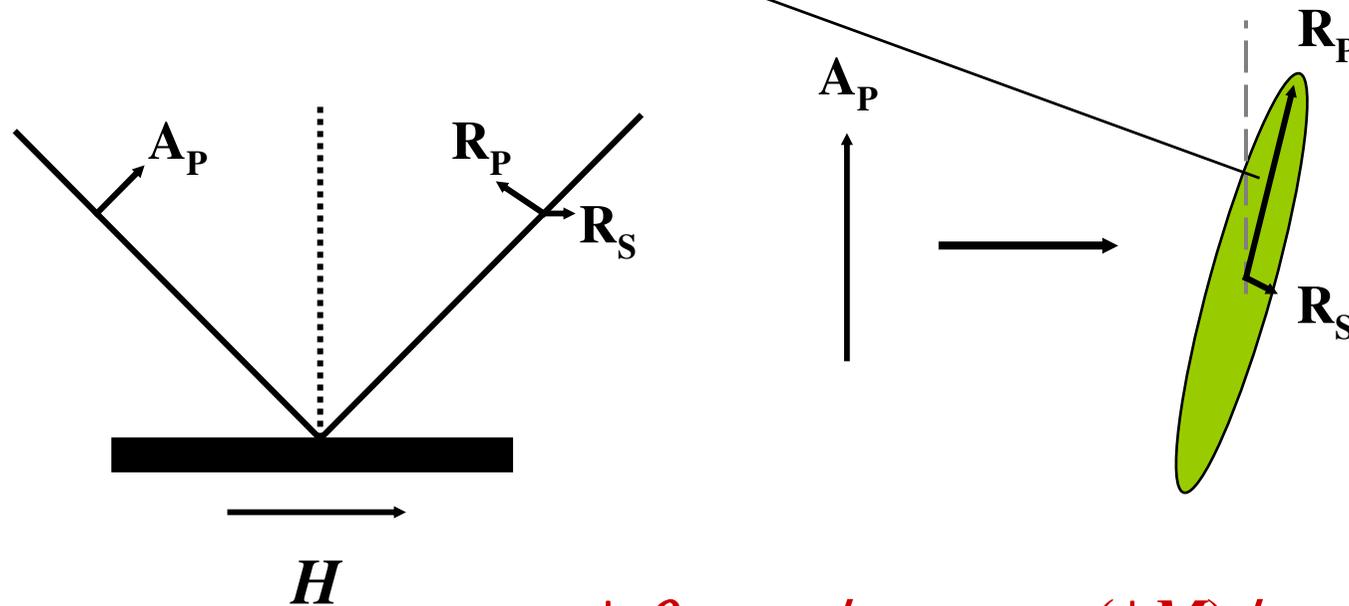
$$I_0 = R_P^* R_P$$

$$I - I_0 = \nabla(M^2)$$

В этом случае изменение интенсивности света, отраженного от намагниченного кристалла квадратично по намагниченности ( $M^2$ ).

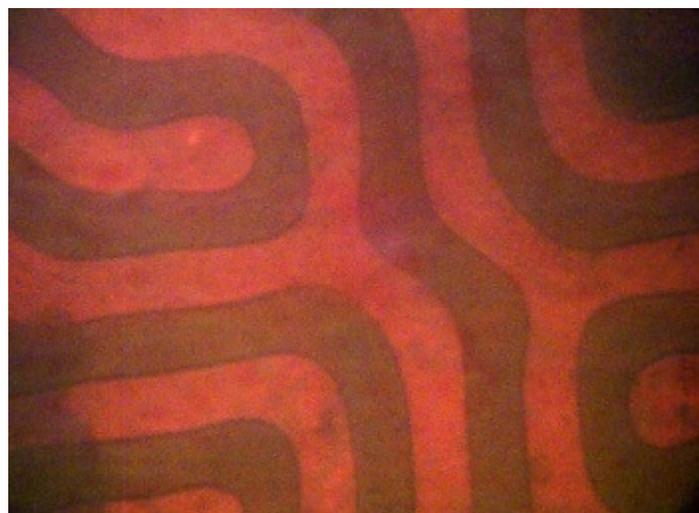
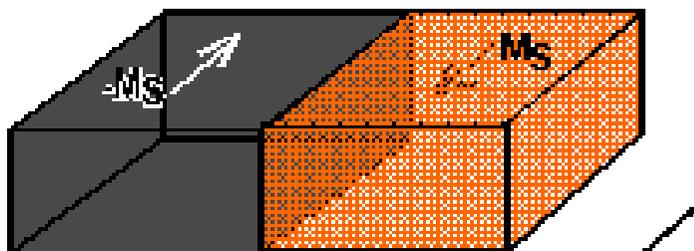
*Отраженный свет является эллиптически поляризованным,  
и большая ось эллипса повернута относительно р-  
компоненты на угол*

$$\theta = r_{SP} / r_{PP} = r_{SP}(M) / r_{PP} \quad \theta \sim \underline{0.5 - 0.005^\circ}$$



$$\pm \theta = r_{SP} / r_{PP} = r_{SP}(\pm M) / r_{PP}$$

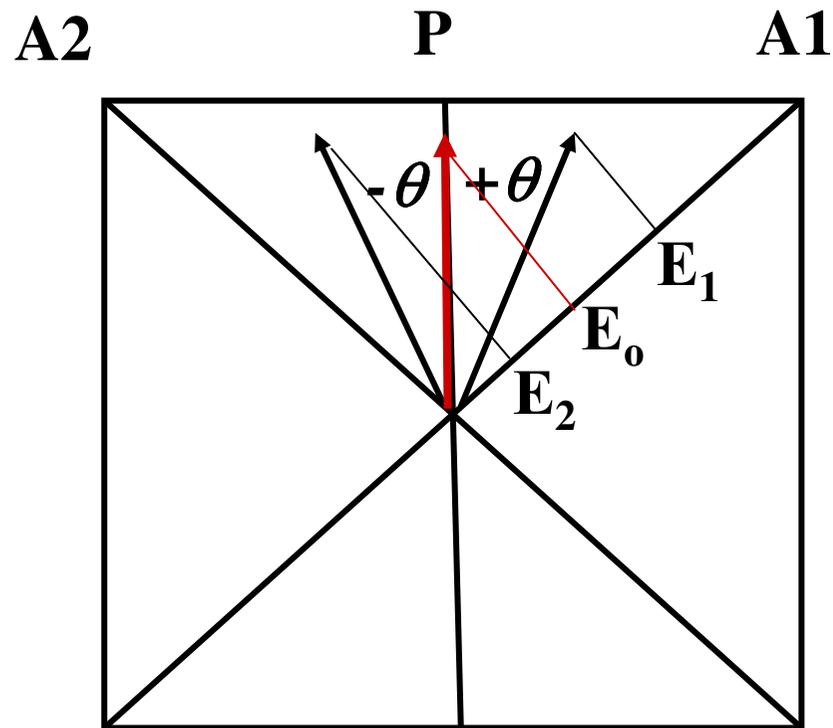
## Наблюдения доменной структуры с помощью магнито-оптического контраста



✳ Свет, отраженный от доменов с  $+M_S$  и  $-M_S$  намагниченностью (или прошедший через домены), имеет  $+\theta$  и  $-\theta$  Керровское (или Фарадеевское) вращение, соответственно. В результате интенсивность света, отраженного от этих доменов или прошедшего через них, увеличивается ( $I_1$ ) и уменьшается ( $I_2$ ) по сравнению с ненамагниченным состоянием.

✳ Измерения **МЭК**, **ПЭК** и **ЭФ** выполняются при наличии поляризатора и анализатора.

*Зависимости ПЭК и МЭК от  
направления магнитного поля  $H$ .*



Здесь **P** и **A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>** – оси  
поляризатора и  
анализатора,  
соответственно;

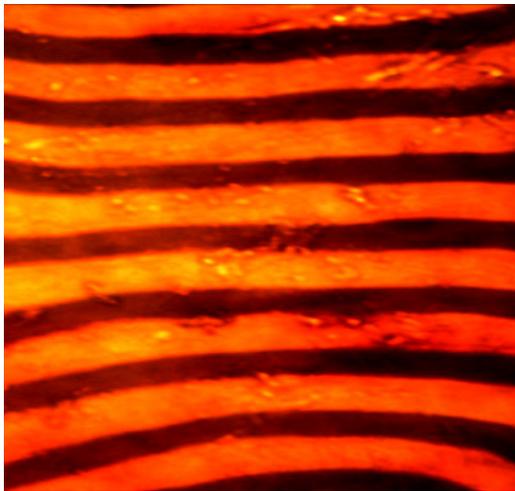
**$\theta$**  - угол Керровского  
вращения;  $E_0$  и  $E_1, E_2$  –  
амплитуды света,  
отраженного от не  
намагниченного и  
намагниченного образца,  
соответственно.

$$I_0 \sim E_0^2 \text{ и } I_1 \sim E_1^2, \quad I_2 \sim E_2^2;$$

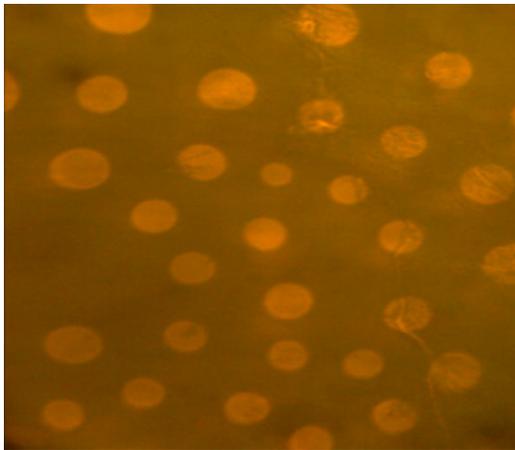
$$I_1 > I_2$$



$H = 0$



$H_{\parallel} \neq 0$ , ширина  
доменов порядка 15  
микрон



$H_{\perp} \neq 0$ , радиус  
круговых доменов  
порядка 10-20  
микрон

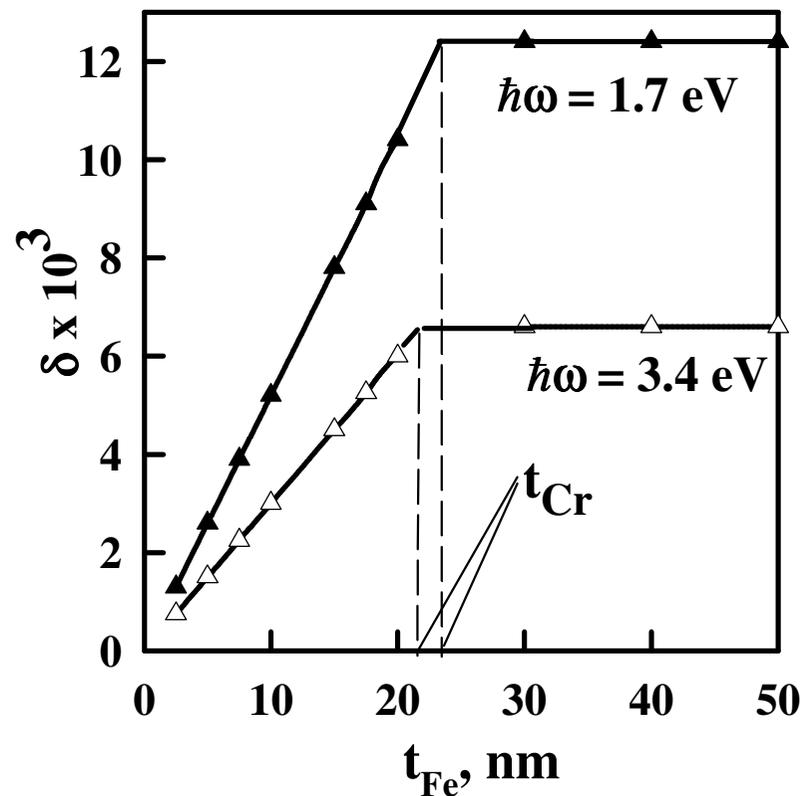
**Какая приповерхностная толщина ферромагнитного образца может быть исследована с помощью магнитооптических методов?**

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

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

где  $\lambda$  - длина волны падающего света,  
 $k$  – коэффициент поглощения среды

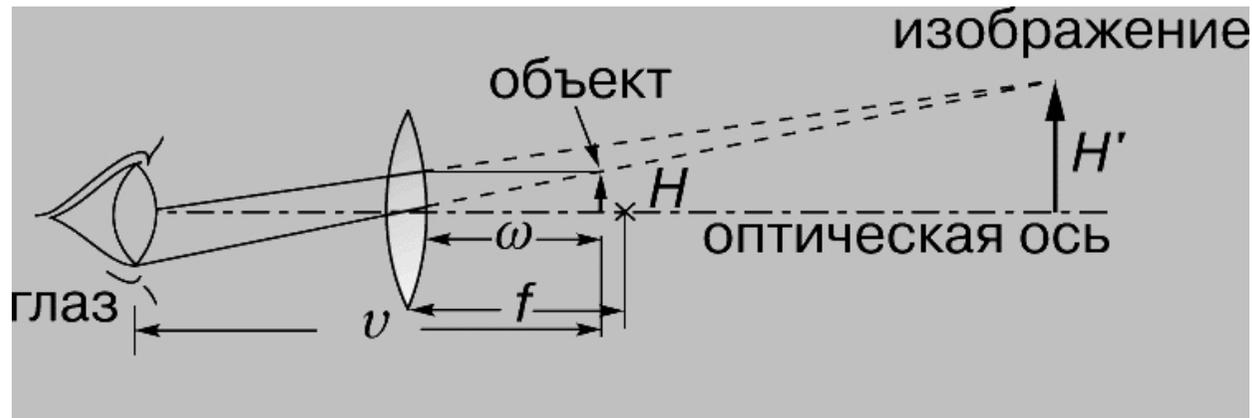
$t_{\text{Pen}} \sim 10 - 20$  нм  
в области энергии падающего света  
 $0.5 < \hbar\omega < 6$  эВ  
(2480 – 200 нм).



Зависимость ЭЭК от толщины слоя железа,  $\delta(t_{Fe})$ , наблюдаемая для **Fe** тонкопленочных систем при  $\hbar\omega = 1.7$  и  $3.4$  эВ.

$t_{инф} = 21$  и  $23$  нм при  $\hbar\omega = 3.4$  и  $1.7$  эВ, соответственно.

$$\delta \sim 10^{-1} - 10^{-5}$$

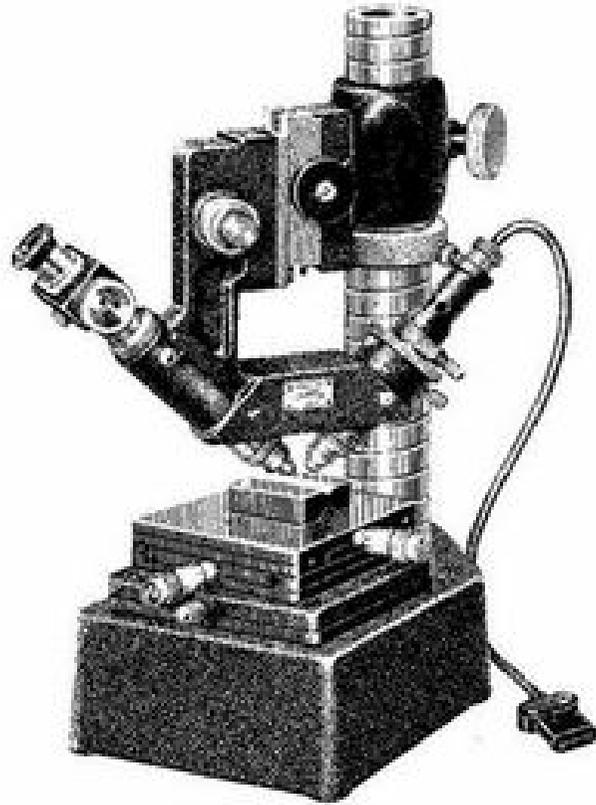


*ЛУПА схема и принцип действия.*

Видимое увеличение  $M = (H/f)/(H/v) = v/f$ ,

ГДЕ  $f$  - фокусное расстояние линзы,  $v$  - расстояние наилучшего зрения, т.е. наименьшее расстояние, на котором глаз хорошо видит при нормальной аккомодации.

# Микроскопы



## Магнитооптическая микроскопия

### Особенности

Пространственное разрешение ~ 300 нм

Магнитное поле: неограниченно

## **МАГНИТО-ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПРИ РЕШЕНИИ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ**

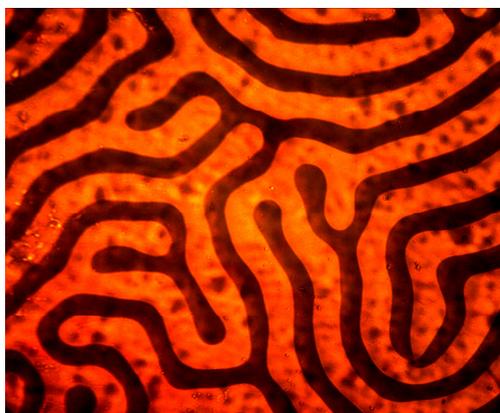
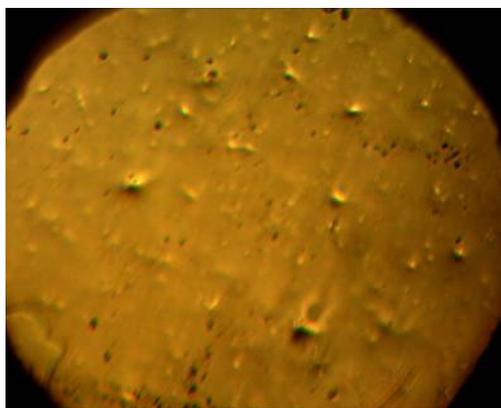
**1. В настоящее время большое внимание уделяется разработке новых магнитомягких материалов для высокочастотных практических приложений в микроэлектронике.**

Перспективными для этой цели являются магнитные пленки **FeN** и многослойные структуры на их основе. Особенность пленок **FeN** состоит в том, что индукция насыщения этих сплавов выше, чем чистых пленок железа (порядка **2.8 – 3 Т, вместо 2.2 Т**).

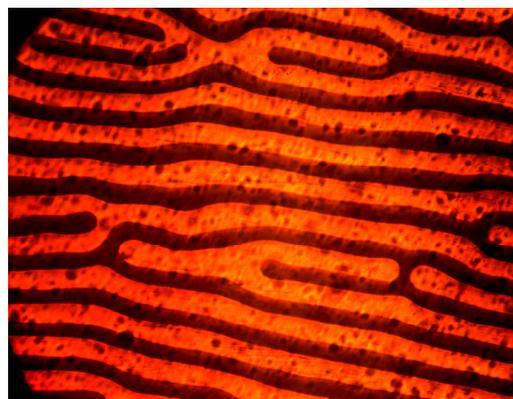
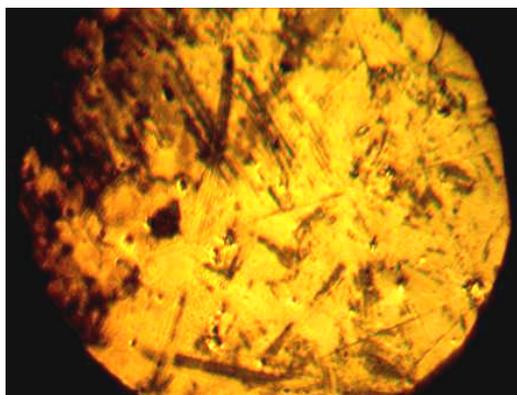
Расширение функциональности магнитных систем связано с изучением особенностей их взаимодействия с активными компонентами внешней среды. Повышающаяся насыщенность окружающей среды сильными магнитными полями требует понимания механизмов их влияния на химические процессы, протекающие на поверхности магнитных материалов, а именно процессы магнитной коррозии.



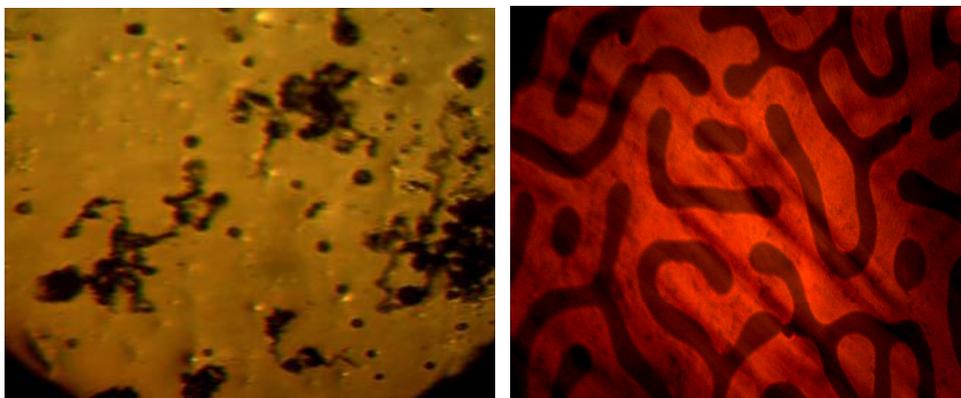
*Вид доменной структуры феррит-гранатовой пленки*



*Изображение поверхности исходной однослойной плёнки FeN (слева) и доменная структура ФГ пленки, находящейся в оптическом контакте с указанным образцом (справа).*

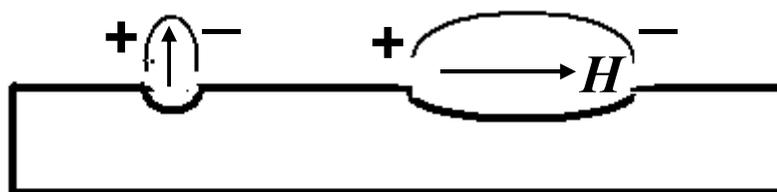


*Изображение поверхности однослойной FeN плёнки после ее обработки раствором 35% уксусной кислоты в магнитном поле  $H = 50$  Э, параллельном плоскости образца, (справа) и доменная структура ФГ пленки, находящейся в оптическом контакте с указанным образцом (слева).*



*Изображение поверхности FeN пленки после ее обработки раствором 35% уксусной кислоты в магнитном поле  $H \approx 50$  Э, перпендикулярном плоскости образца (слева) и доменная структура ФГ пленки, находящейся в оптическом контакте с образцом (справа).*

**Результаты свидетельствует о видоизменении распределений полей рассеяния на поверхности изучаемых тонкопленочных систем, которое обусловлено появлением дефектов продолговатой и круглой формы после травления образцов в магнитном поле**



**Интенсивные расследования магнитных явлений начали приблизительно в 1820 год.**

- **1820 –1870 гг.**
- **1870 –1920 гг.**
- **1920 – 1970 гг.**
- **1970 – до настоящего времени**

## 1820 -1870

- **В 1820 году Эрстед (1777- 1851 гг.) обнаружил связь между электричеством и магнетизмом. Он показал, что электрический ток создает магнитное поле**
- **В 1831 году Фарадей (1791-1867 гг.) открыл закон электромагнитной индукции**
- **В 1845 году Фарадей обнаружил вращение плоскости поляризации в стекле, помещенном в магнитное поле**

## 1870 - 1920

- **В 1896 году Питер Зееман (1865-1943 гг.) обнаружил эффект расщепления спектральных линий в магнитном поле**
- **В 1897 году Джозеф Лармор (1857- 1942 гг.) обнаружил прецессию электрона в магнитном поле**
- **В 1907 год Пьер-Эрнст Вейсс (1865- 1940 гг.) построил теорию ферромагнетизма.**

## 1920 -1970

- В 1920 году Вольфганг Паули (1900-1958 гг.) ввел новую концепцию - “Магнетон Бора”.
- В 1925 год Джордж Юджин Уленбек (1900-1988 гг.) и Сэмюэл Абрахам Гаудсмит (1902-1978 гг.) доказали наличие спина у электрона.
- Вернер Гейзенберг (1901-1976 гг.), Яков Ильич Френкель (1894-1952 гг.) и Феликс Блох (1905-1983 гг.) построили квантовую теорию ферромагнетизма
- Эдмунд Клифтон Стонер (1899-1968 гг.) и Э. Вольфарт построили теория процессов перемагничивания однодоменных частиц,
- Николай Сергеевич Акулов (1900-1976 гг.) построил теорию магнитной анизотропии

## 1970 - до настоящего времени

- **Обнаружены новые эффекты.**
- **Высоко-температурная сверхпроводимость ( $T_{SC} \sim 77 - 96^\circ$ ) – 1986 г.**
- **Новые нелинейные оптические и магнито-оптические эффекты**
- **Гигантское магнитосопротивление (За открытие гигантского магнетосопротивления в 1988 году физики Альбер Ферт (Университет Париж-юг XI) и Петер Грюнберг (Исследовательский центр Юлих) были удостоены Нобелевской премии по физике в 2007 году)**
- **Гигантский магнитоимпеданс**
- **Квантовые эффекты в низкоразмерных материалах (один или два размера значительно меньше, чем другой размер).**

**Новые явления были связаны с получением новых материалов**

- Y-Cu-Ba-O;**
- Ультра тонкие магнитных пленок с нанометрической толщиной;**
- Многослойные структуры, состоящие из чередующихся магнитных и немагнитных слоев субмикронной толщины;**
- Аморфные материалы (ленты, микропровода);**
- Жидкие и органические магнитные материалы.**

**Появились новые научные направления**

**Биомагнетизм**

**Магнито-химия**

## **Представлены**

- **Классификация магнитооптических эффектов**
- **Физическая причина появления магнитооптических эффектов (МОЭ)**
- **Феноменологическая теория магнитооптических эффектов**
- **Приведен пример применения МОЭ в практических приложениях**