

# Магнитооптика и ее применения для диагностики магниторезистивных структур

О.С. Трушин

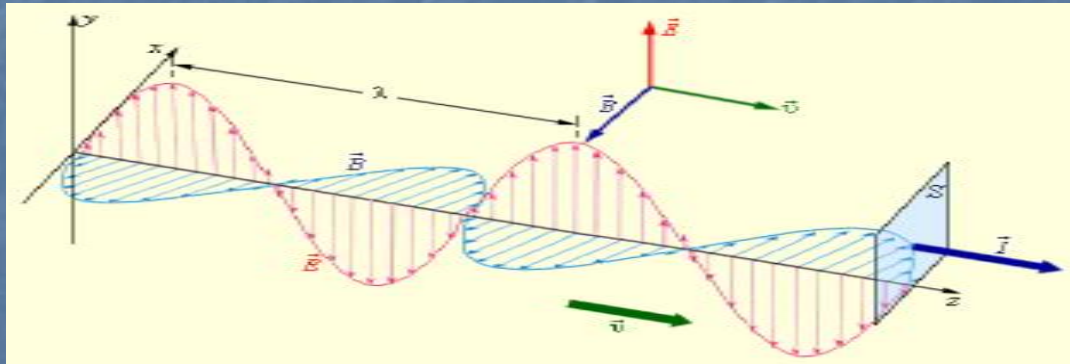
# План

- Введение ( история и современные применения )
- Основные МО эффекты
- Теория МО эффектов
- Применения МО для диагностики МР структур
- Заключение

# Введение

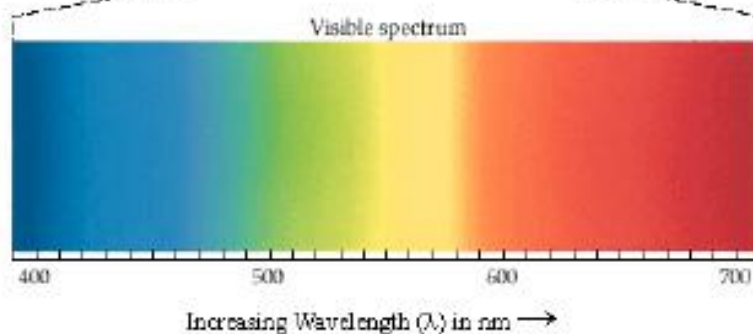
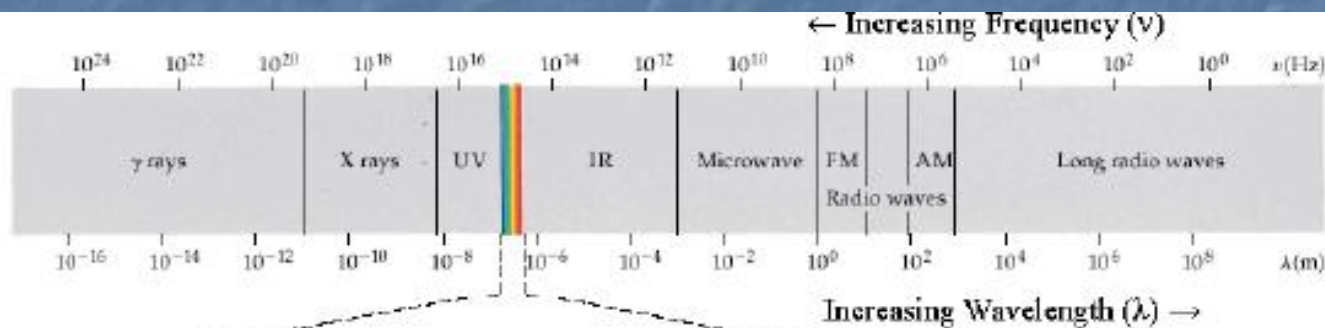
- Магнитооптика описывает явления взаимодействия света с веществом находящегося в магнитном поле
- Магнитооптика – важный инструмент исследования вещества
- Магнитооптика – основа создания новой техники манипуляции светом

# Электромагнитная природа света



$$E(\mathbf{r}, t) = E_0 \exp[-i(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})],$$

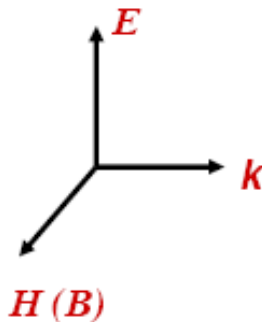
$$B(\mathbf{r}, t) = B_0 \exp[-i(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})],$$



1.5–3.2 eV

# Поляризация света I

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



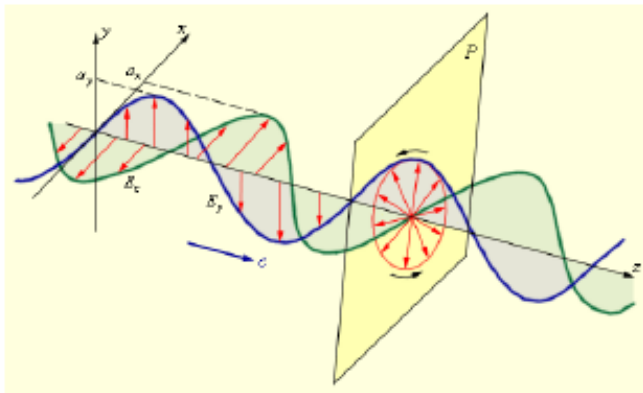
Плоскость, в которой колеблется световой вектор  $E$  называется плоскостью поляризации

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

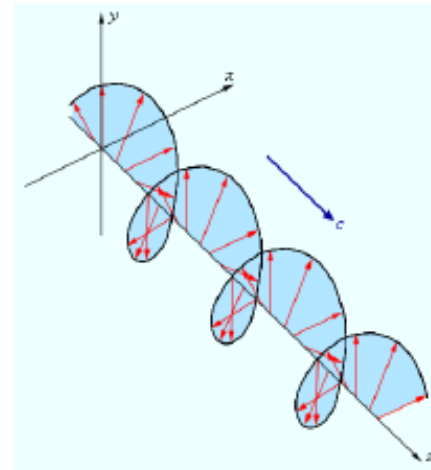
Это означает, что колебания векторов  $E$  и  $H$  происходят по всевозможным направлениям в поперечной плоскости. Такой свет называют **естественным**.

# Поляризация света II

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*

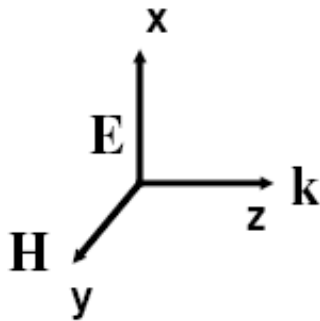
**Линейно-поляризованную волну можно разложить на право- и лево-поляризованные по кругу (эллипсу) волны**

# Магнитооптика

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  $xu$ ), амплитуду  $E_0$ , начальную фазу  $\Phi$ .

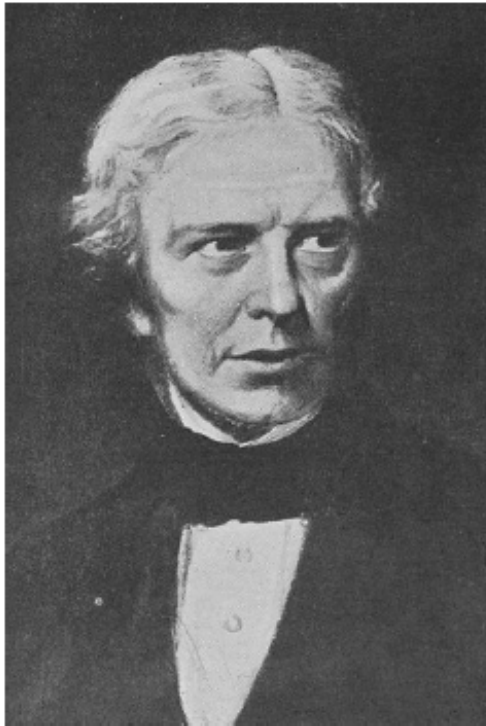
При этом исследуются причины, обуславливающие наблюдаемые изменения указанных параметров.



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

# История магнитооптики

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.**

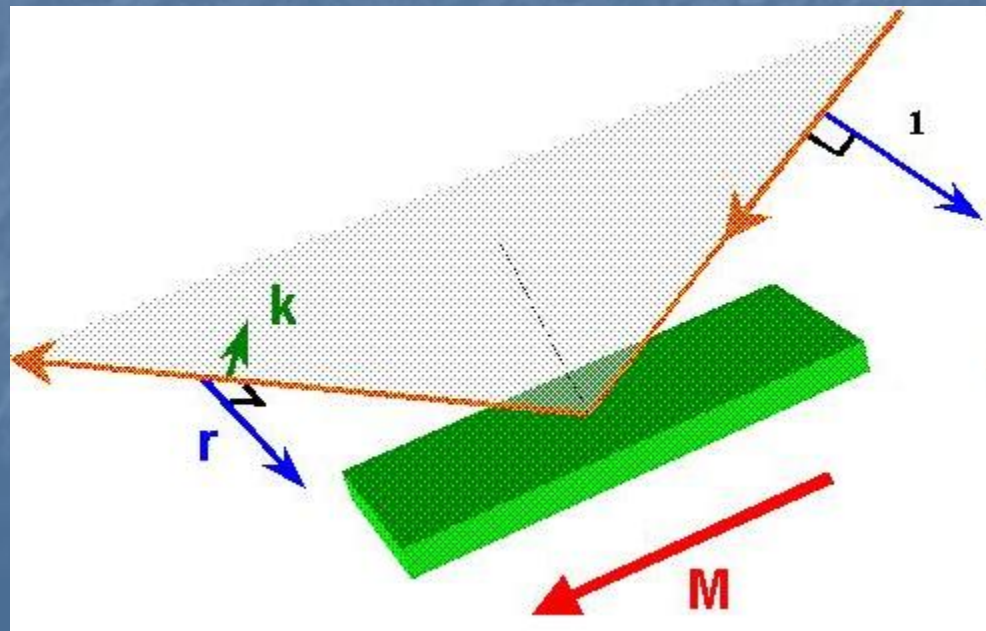
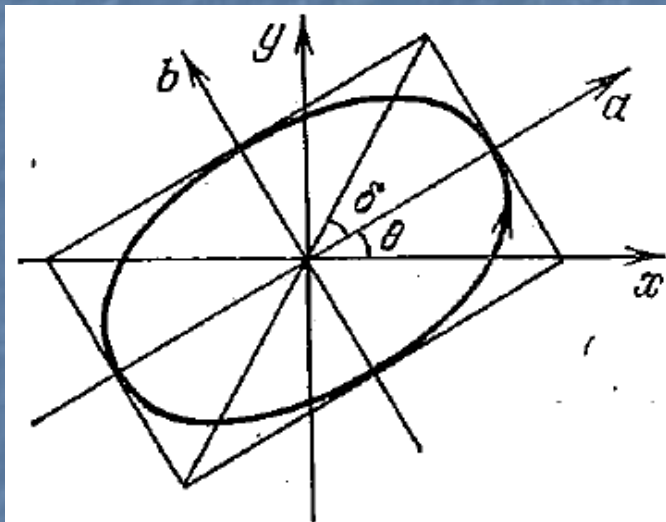
Среди других его открытий — первый **трансформатор, химическое действие тока, законы электролиза, действие магнитного поля на свет, диамагнетизм.**

Первым предсказал **электромагнитные волны.**

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



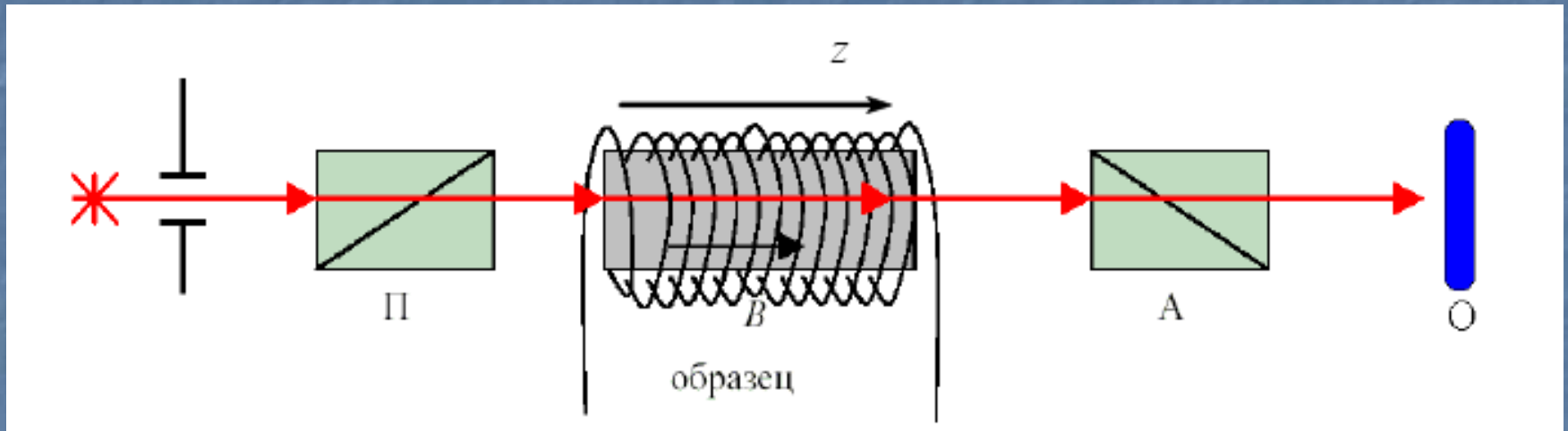
# Поляризация света II



# Основные МО эффекты

- Эффект Фарадея
- Эффект Коттона-Мутона
- Эффекты Керра: полярный, продольный, поперечный
- Нелинейные МО эффекты

# Эффект Фарадея

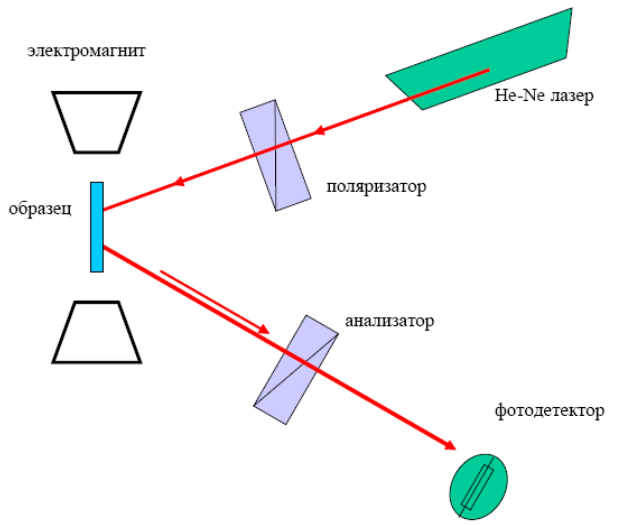


$$\varphi = \rho M l$$

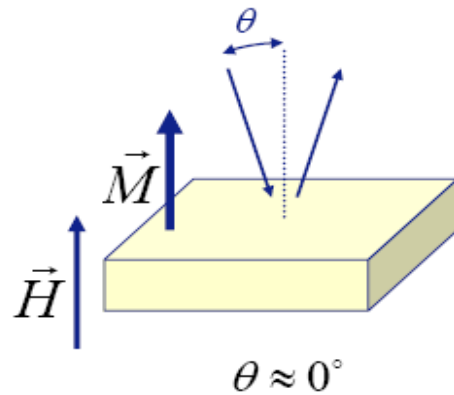
**Вращение плоскости поляризации**

«намагничивание светового луча» (Майкл Фарадей)

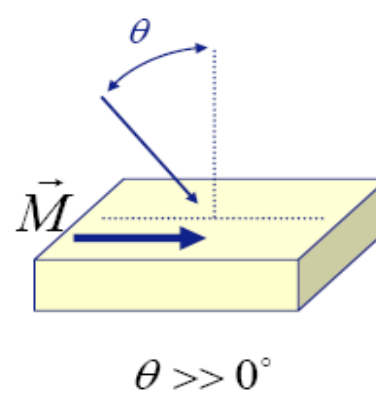
# Эффект Керра



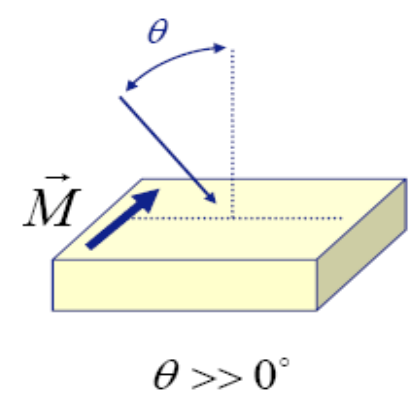
1. Вращение плоскости поляризации
2. Изменение эллиптичности
3. Изменение интенсивности



**polar**

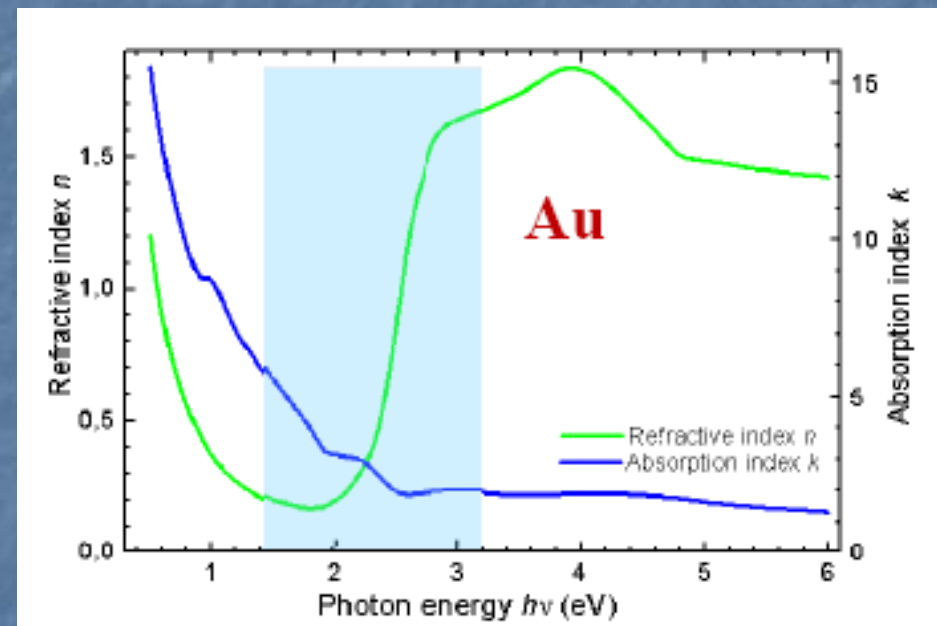
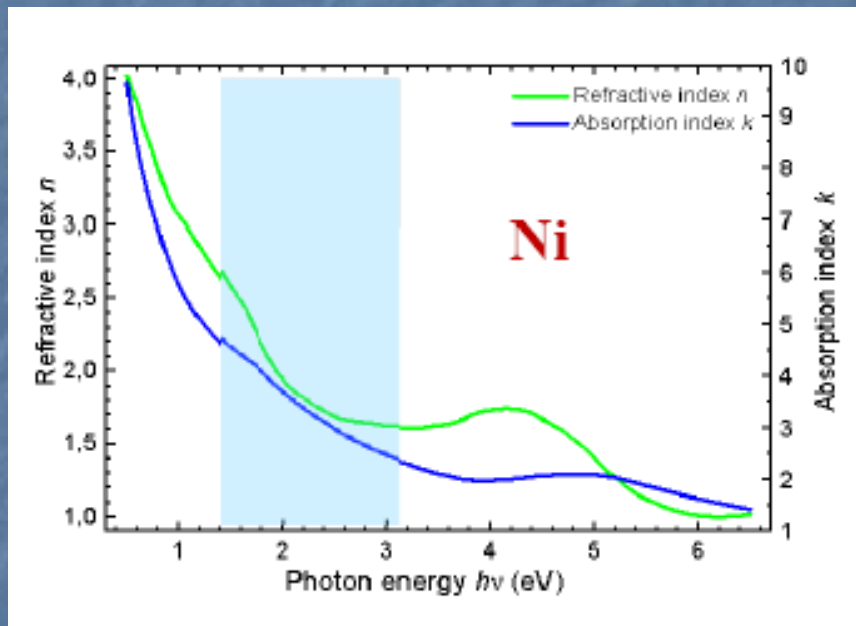


**longitudinal**



**transverse**

# Оптические постоянные металлов



# Теория МО эффектов

В основе МО эффектов лежит разница показателей преломления для разных направлений круговой поляризации: правой ( $n_+$  и левой  $n_-$ )

$$\hat{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 & i \cdot g & 0 \\ -i \cdot g & \varepsilon_1 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_0 \end{pmatrix}$$

$$g = \alpha \cdot M$$

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_0 + \beta \cdot M^2$$

# Формулы для эффектов Керра

Полярный эффект

$$\Phi_K^{s,p} = \operatorname{Re} \frac{r_{sp}}{r_{ss}(r_{pp})} = \operatorname{Im} \frac{\eta^2 [(\eta^2 - \sin^2 \phi)^{1/2} \mp \sin \phi \tan \phi]}{(\eta^2 - 1)(\eta^2 - \tan^2 \phi)} Q$$

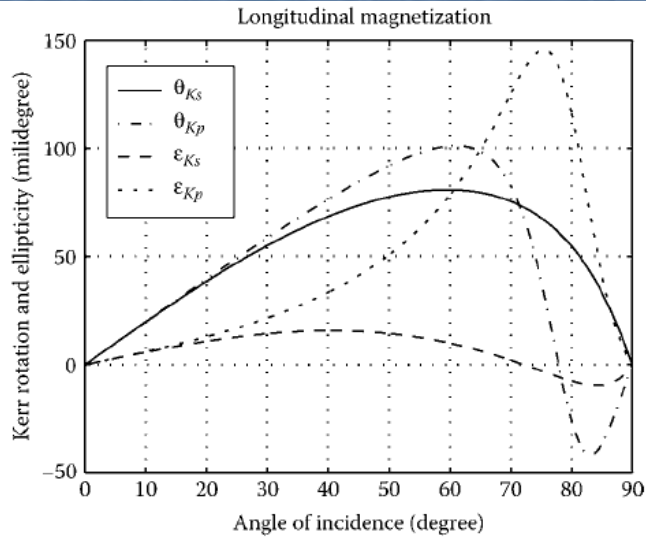
Меридиональный (продольный)

$$\Phi_K^{s,p} = \operatorname{Re} \frac{(\pm r_{sp})}{r_{ss}(r_{pp})} = \operatorname{Im} \frac{[\sin \phi \eta^2 (\sin \phi \tan \phi \pm \sqrt{\eta^2 - \sin^2 \phi})]}{(\eta^2 - 1)(\eta^2 - \tan^2 \phi)(\eta^2 - \sin^2 \phi)^{1/2}} Q$$

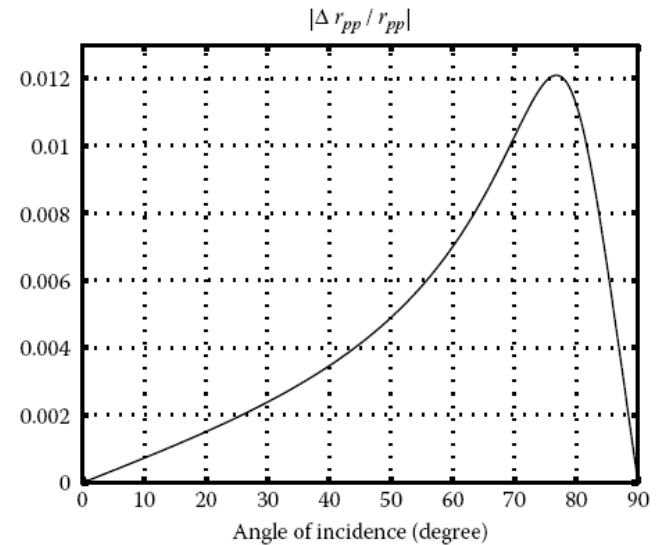
Поперечный

$$\delta_p = \frac{\Delta I}{I} = -\operatorname{Im} \frac{4 \tan \phi \eta^2}{(\eta^2 - 1)(\eta^2 - \tan^2 \phi)} Q.$$

# Типичные зависимости



**FIGURE 1.5**  
Complex longitudinal Kerr rotation and ellipticity  $\chi_{rs}^{(\text{lon})} = \theta_{Ks} + j\epsilon_{Ks}$  and  $\chi_{rp}^{(\text{lon})} = \theta_{Kp} + j\epsilon_{Kp}$  as functions of the angle of incidence for the  $s$  and  $p$  polarized incident waves, respectively, at an air-iron interface. The curves of the azimuths  $\theta_{Ks}$  and  $\theta_{Kp}$  and the ellipticities  $\epsilon_{Ks}$  and  $\epsilon_{Kp}$  were computed using the data of Figure 1.1 and Figure 1.4.



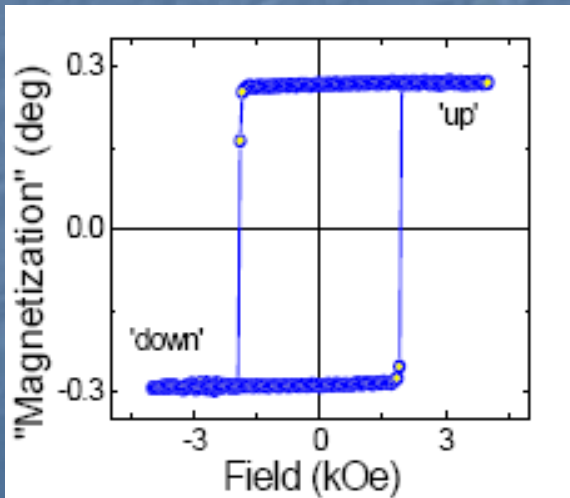
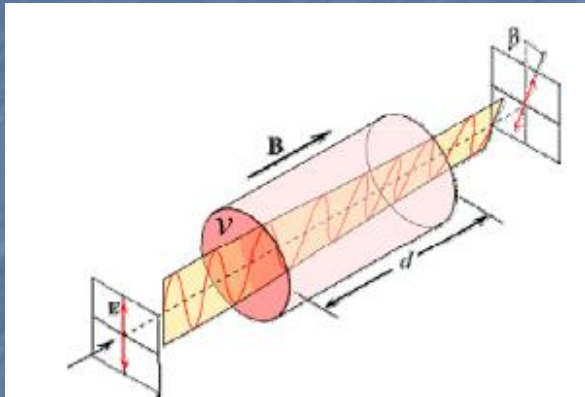
**FIGURE 1.6**  
Perturbation  $\Delta r_{pp}^{(\text{trans})}$  to the diagonal element  $r_{pp}$ , induced by the transverse magnetization at an air-iron interface as a function of the angle of incidence. The curve  $|\Delta r_{pp} / r_{pp}|$  was computed using the values for the diagonal and off-diagonal permittivity tensor elements

Меридиональный (продольный)

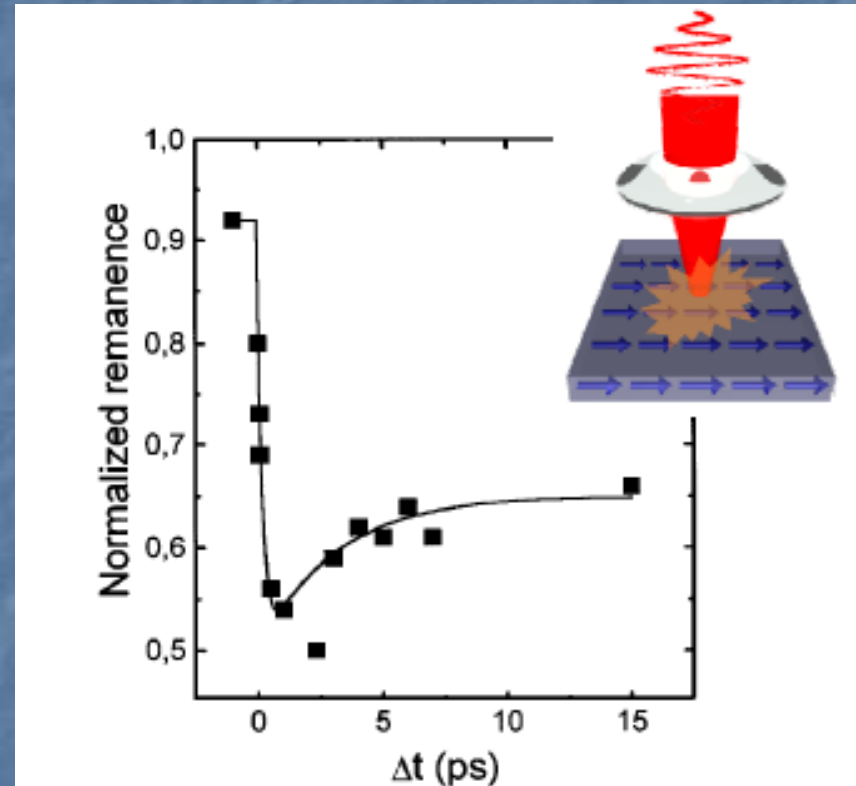
Экваториальный (поперечный)



# Применения МО эффектов



**hysteresis**



Beaurepaire et al, PRL 76, 4250 (1996).

**dynamics**

# Получение петель гистерезиса

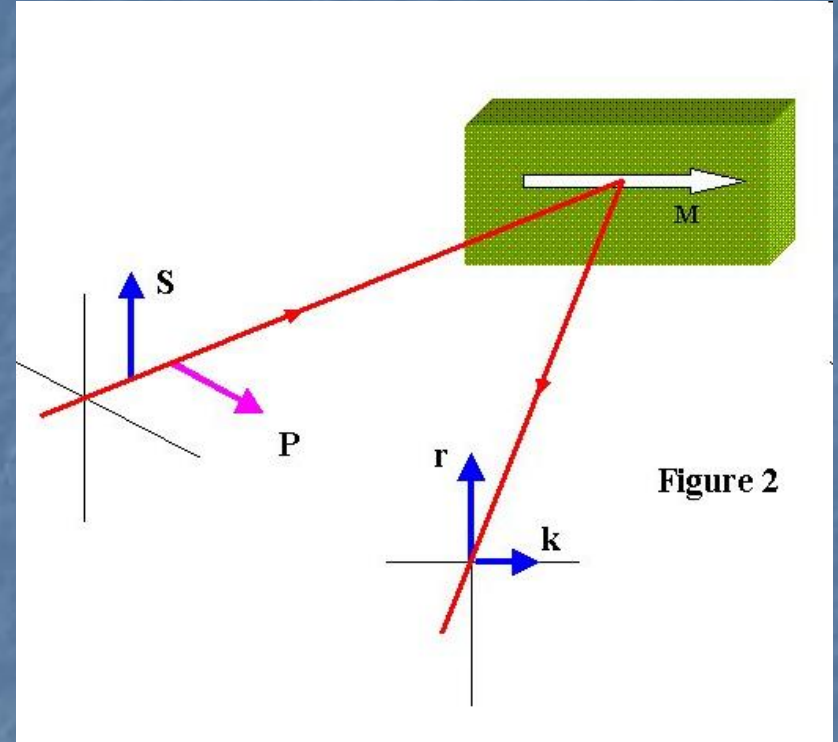
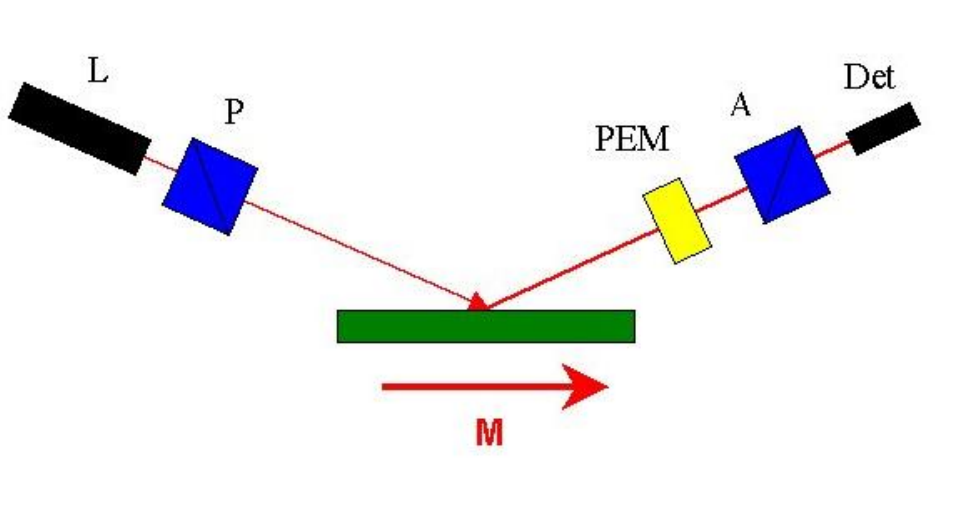


Figure 2

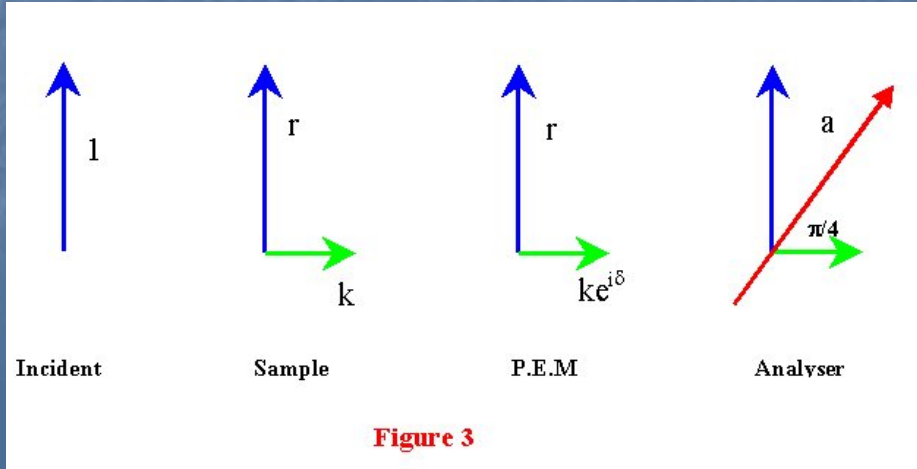
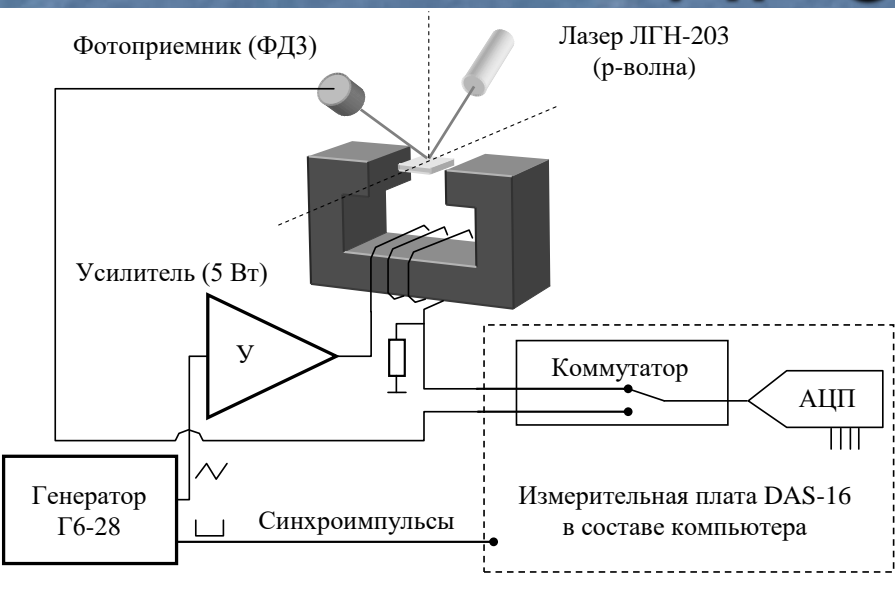
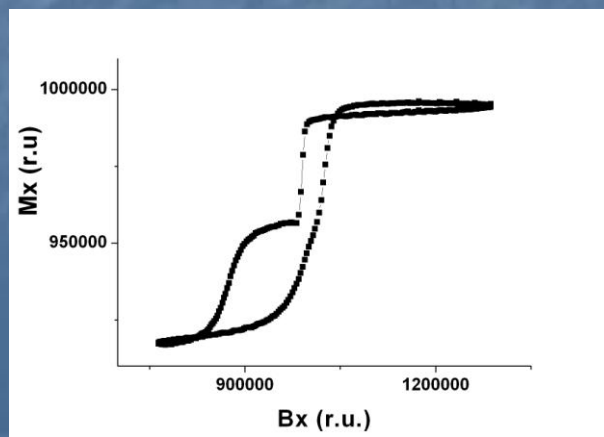


Figure 3

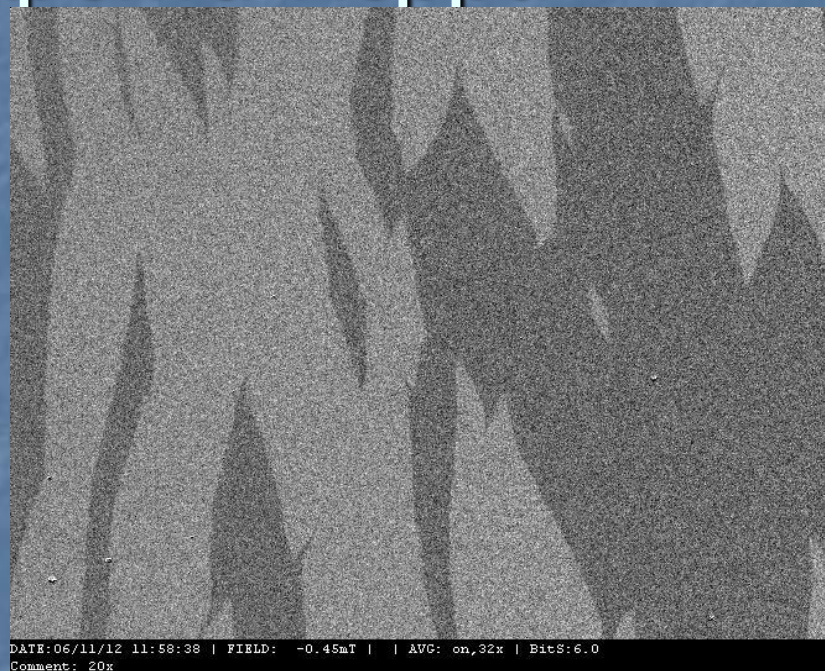
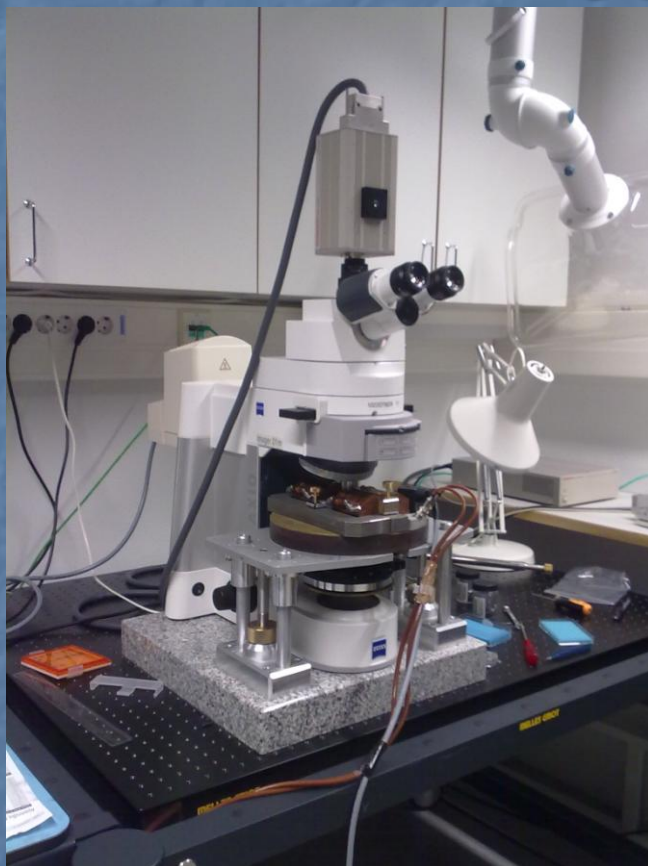
# Применения МО для диагностики МР структур



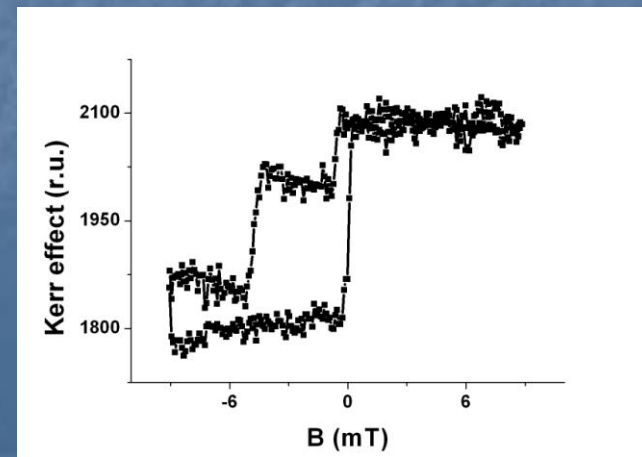
Экспериментальная кривая



# Исследование микромагнитных состояний методом микроскопии эффекта Керра



Микроскоп фирмы AVECO



# Сравнение двух типов СПИН-ВЕНТИЛЬНЫХ СТРУКТУР

## SV1



Ta(4nm)

FeMn(10nm)

NiFe(4nm)

Co(1nm)

Cu(2.5nm)

Co(1nm)

NiFe(4nm)

Ta(4nm)

Si

## SV2



Ta(2.5nm)

FeMn(10nm)

CoFe(6nm)

Cu(2.5nm)

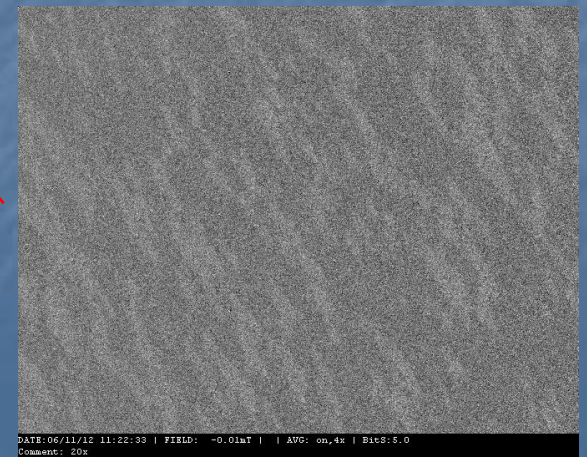
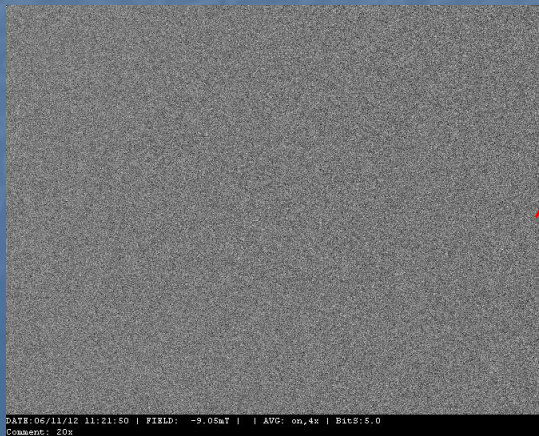
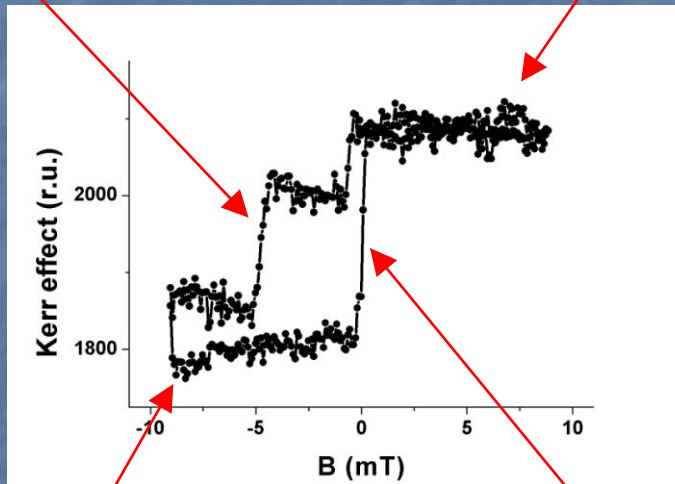
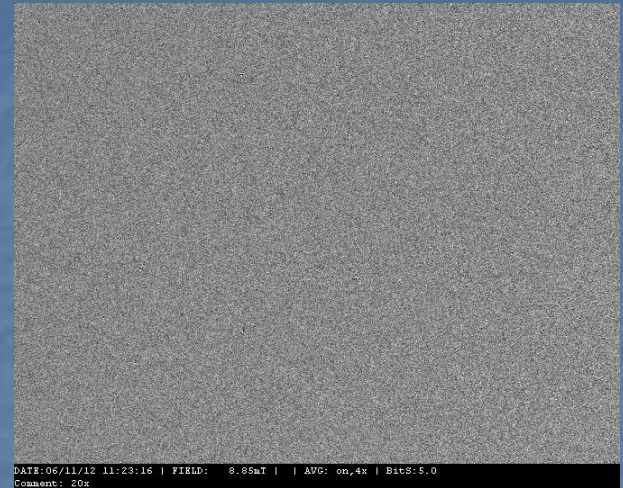
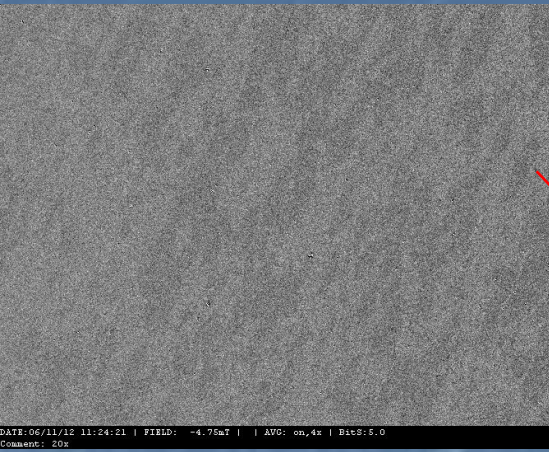
CoFe(6nm)

NiFe(2nm)

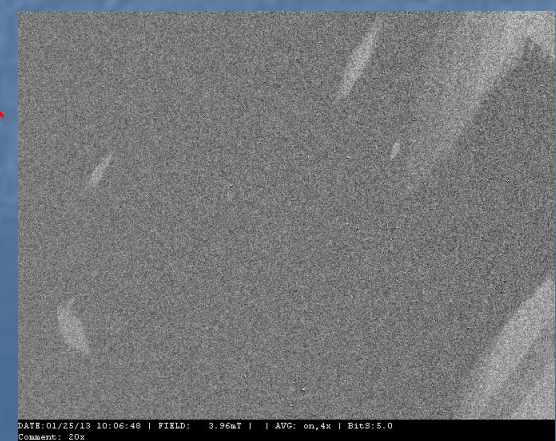
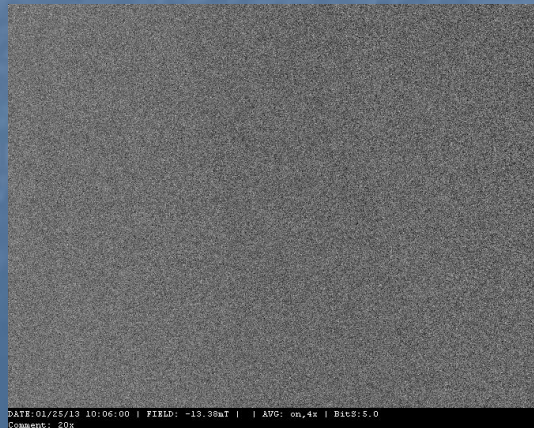
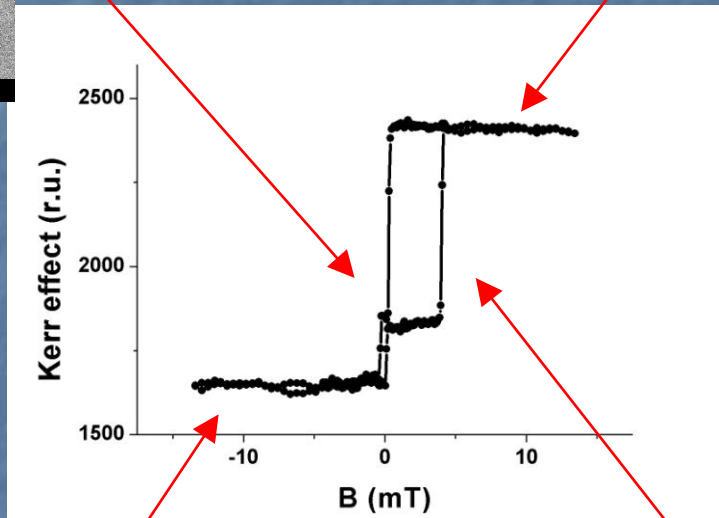
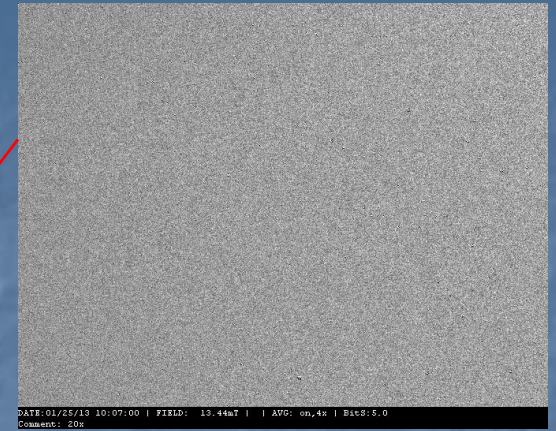
Ta(5nm)

Si

# SV1

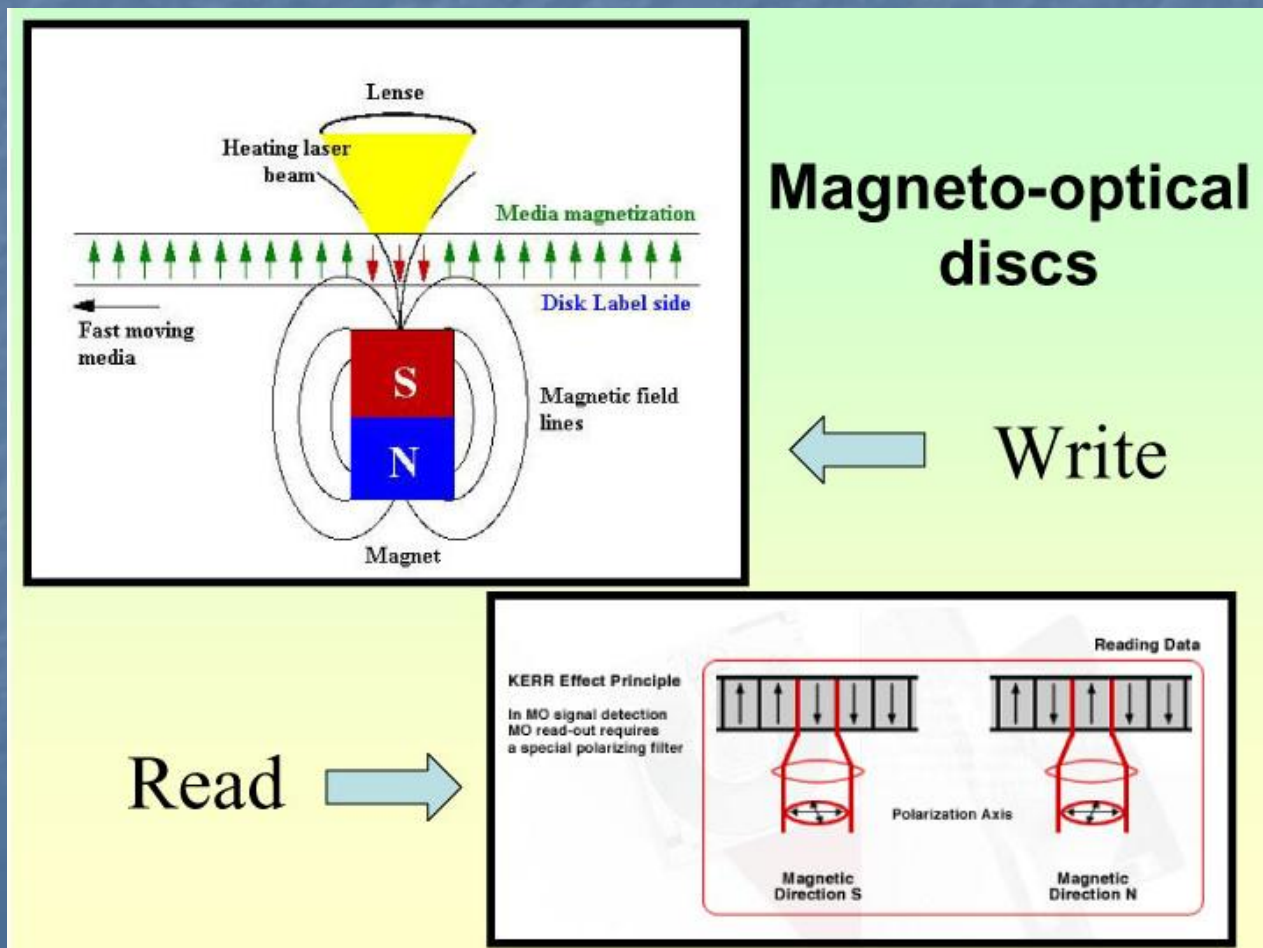


# SV2



# Технические применения МО эффектов

## эфффектов





# Контрольные вопросы

- Явление поляризации света
- Основные магнитооптические эффекты
- Использование магнитооптики для диагностики магнитных пленок
- Технические применения магнитооптики

# Литература

- Вдовичев С.Н. МАГНИТООПТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ (методическое пособие) ННГУ 2010
- Звездин А.К., Котов В.А. Магнитооптика тонких пленок
- Кринчик Г.С. Физика магнитных явлений , МГУ 1976 г.