



大学院工学研究科

磁性工学特論第10回

—磁気光学効果の測定法—

佐藤勝昭

農工副学長

第9回に学んだこと

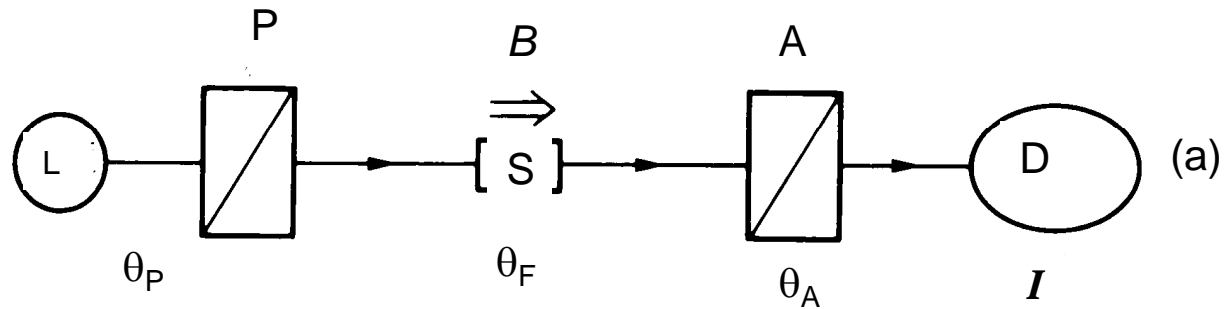
- 光の伝搬とマクスウェルの方程式
 - 固有解: 波動解、固有値: 複素屈折率
- ファラデー配置の場合の固有値と固有状態
 - 2つの固有値と対応する固有状態(円偏光)
- フォークト配置の場合の固有値と固有状態
 - 磁気誘起の複屈折
- ファラデー効果の現象論
 - ファラデー効果と誘電率テンソル

$$\begin{aligned}\Phi_F &= -\frac{\pi\Delta\hat{N}\ell}{\lambda} = -\frac{i\pi\ell}{\lambda} \cdot \frac{\varepsilon_{xy}}{\sqrt{\varepsilon_{xx}}} \\ &\approx -\frac{i\pi\ell}{\lambda} \cdot \frac{\varepsilon_{xy}^{(1)}M}{\sqrt{\varepsilon_{xx}^{(0)} + \frac{1}{2}\varepsilon_{xx}^{(2)}M^2}}\end{aligned}$$

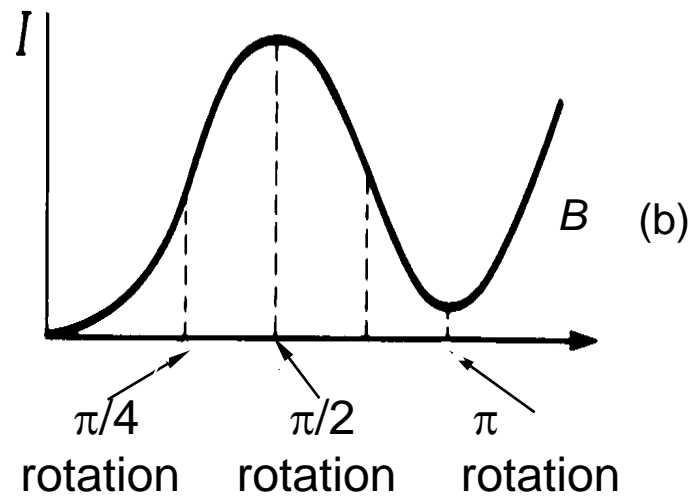
磁気光学効果の測定法

- 直交偏光子法
- 振動偏光子法
- 回転検光子法
- ファラデー変調法
- 光学遅延変調法
- スペクトル測定システム
- 楕円率の評価

直交偏光子法(クロスニコル)



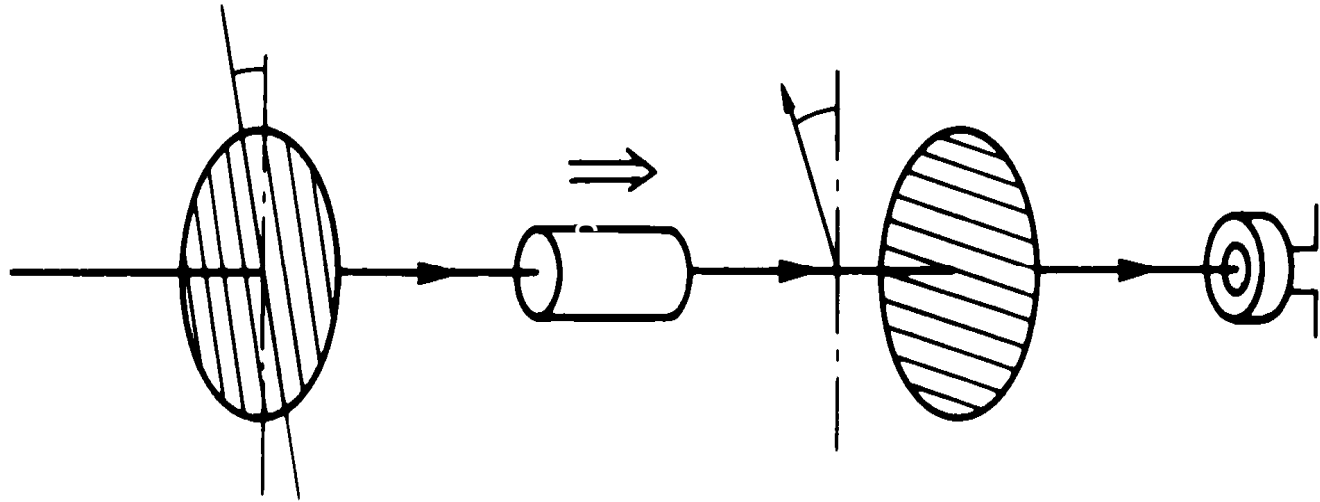
$$\theta_P = \theta_A + \pi/2$$



直交偏光子法の説明

- 検出器に現れる出力 I は, 偏光子の方位角を θ_P , 検光子の方位角を θ_A , ファラデー回転を θ_F とすると,
- $I = I_0 \cos^2(\theta_P + \theta_F - \theta_A)$ (5.1)
- と表される. ここに θ_P , θ_A はそれぞれ偏光子と検光子の透過方向の角度を表している. 直交条件では, $\theta_P - \theta_A = \pi/2$ となるので, この式は
- $I = I_0 \sin^2 \theta_F = (I_0/2)(1 - \cos 2\theta_F)$ (5.2)
- となる.

振動偏光子法



振動偏光子法の説明

- 偏光子と検光子を直交させておき, 偏光子を

$$\theta = \theta_0 \sin pt$$

- のように小さな角度 θ_0 の振幅で角周波数 p で振動させると, 信号出力 I_D は

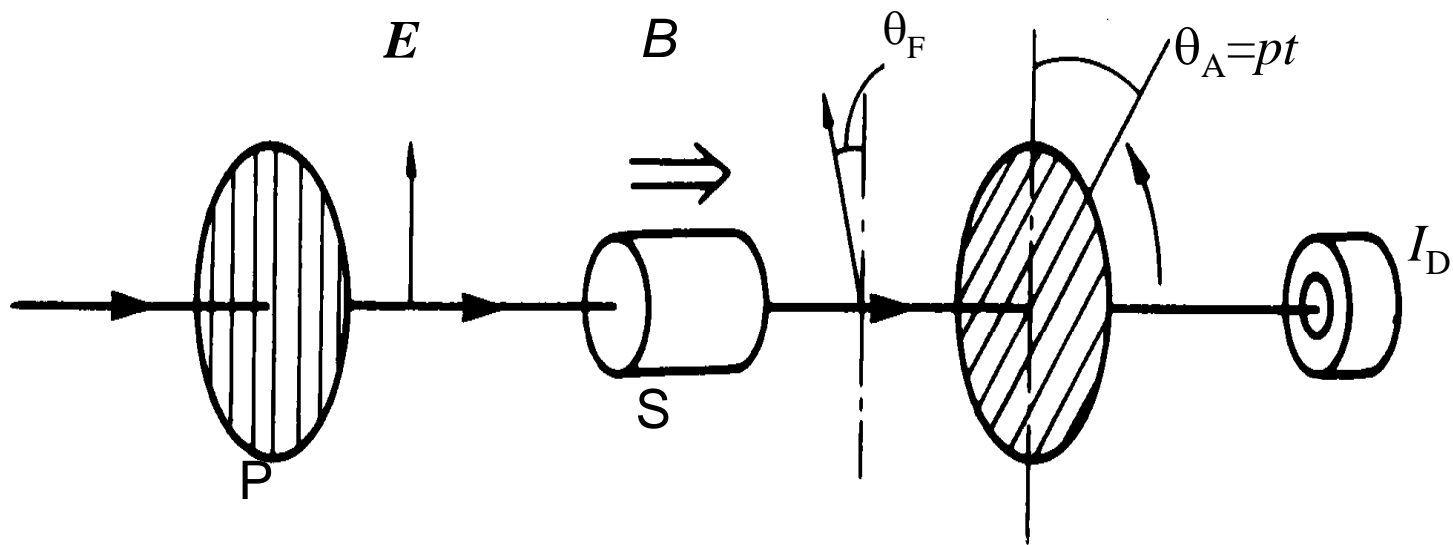
$$\begin{aligned} I_D &\propto I_0 \sin^2(\theta + \theta_F) = (I_0/2) \{1 - \cos 2(\theta + \theta_F)\} \\ &= I_0 \{1 - J_0(2\theta_0) \cos 2\theta_F\} / 2 - I_0 J_2(2\theta_0) \cos 2\theta_F \cdot \cos 2pt - I_0 J_1(2\theta_0) \sin 2\theta_F \cdot \sin pt \end{aligned}$$

J_n : n 次のベッセル関数

振動偏光子法の説明(cont)

- θ_F が小さければ, 角周波数 p の成分が光強度 I および θ_F に比例し, 角周波数 $2p$ の成分はほぼ 光強度 I に比例するので, この比をとれば θ_F を 測定できる

回轉檢光子法



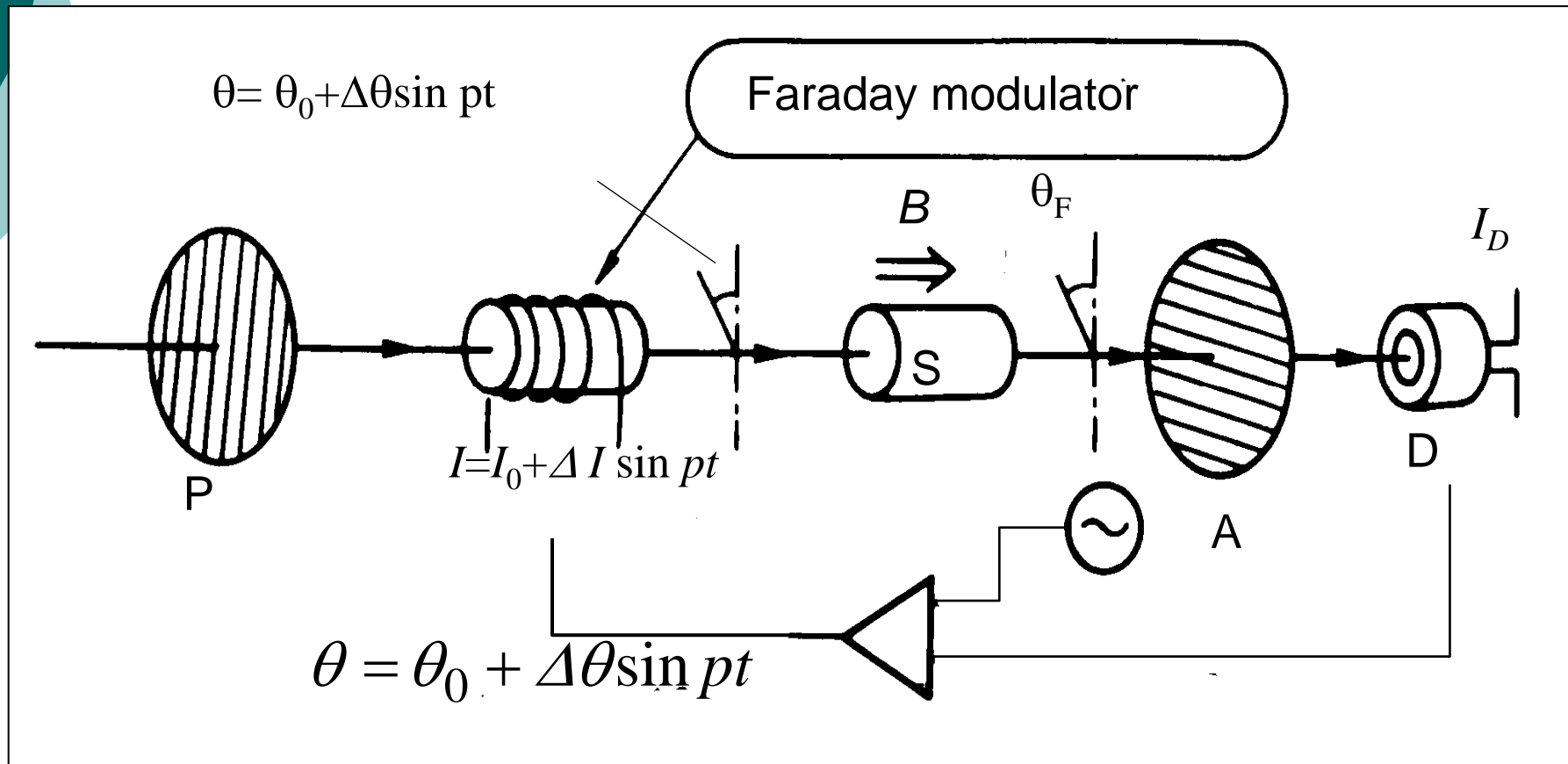
回転検光子法

- 検光子が角周波数 ρ で回転するならば, $\theta_A = \rho t$ と書けるので, 検出器出力 I_D は,

$$\begin{aligned} I_D &= I_0 \cos^2(\theta_F - \theta_A) \\ &= (I_0/2) \{1 + \cos 2(\theta_F - \rho t)\} \end{aligned}$$

- と表される. すなわち, 光検出器Dには回転角周波数の2倍の角周波数 2ρ の電気信号が現れる. 求めるべき回転角 θ_F は, 出力光の位相が, 磁界ゼロの場合からずれの大きさ ψ を測定すれば, $\psi/2$ として旋光角が求まる.

ファラデー変調器法



ファラデー変調器法

- 試料のファラデー効果によって起きた回転をファラデーセルによって補償し、自動的に零位法測定を行う
- 光検出器Dの出力が0になるようにファラデーセルに電流を流して偏光の向きを回転して試料による回転を打ち消している。感度を上げるために、ファラデーセルに加える直流電流に、変調用の交流を重畳させておき、Dの出力を、ロックイン・アンプなどの高感度増幅器で増幅した出力をフィードバックする。

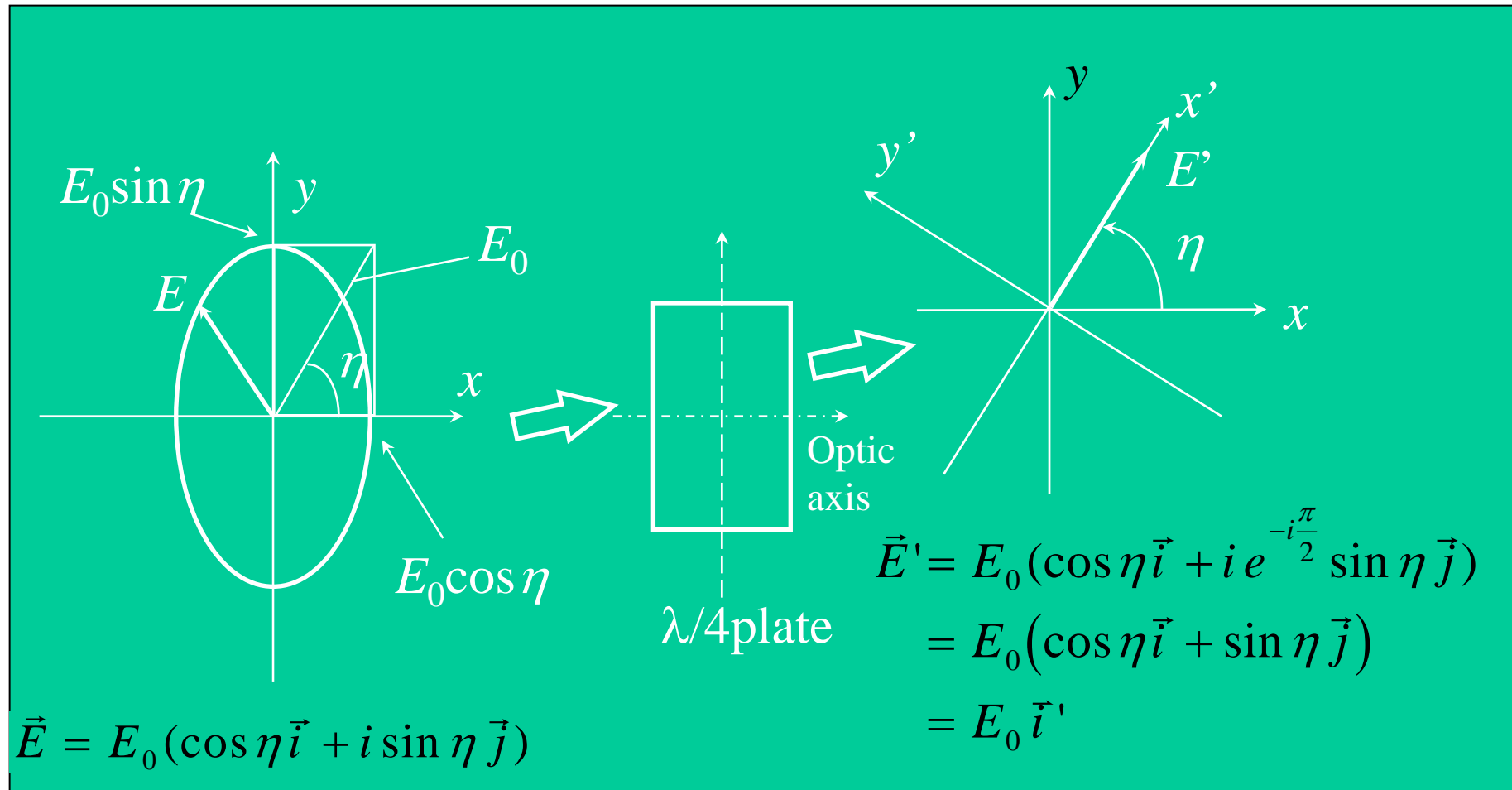
ファラデー変調器法つづき

- 検出器出力 I_D は,

$$\begin{aligned} I_D &= I_0 \sin^2(\theta_0 - \theta_F + \Delta\theta \sin pt) \\ &= (I_0/2) \{1 - \cos 2(\theta_0 - \theta_F) \cos(2\Delta\theta \sin pt) + \sin 2(\theta_0 - \theta_F) \sin(2\Delta\theta \sin pt)\} \\ &\approx (I_0/2) \{1 - \cos 2(\theta_0 - \theta_F) J_0(2\Delta\theta)\} + I_0 \sin 2(\theta_0 - \theta_F) J_1(2\Delta\theta) \sin pt \\ &\quad - I_0 \cos 2(\theta_0 - \theta_F) J_2(2\Delta\theta) \cos 2pt \end{aligned}$$

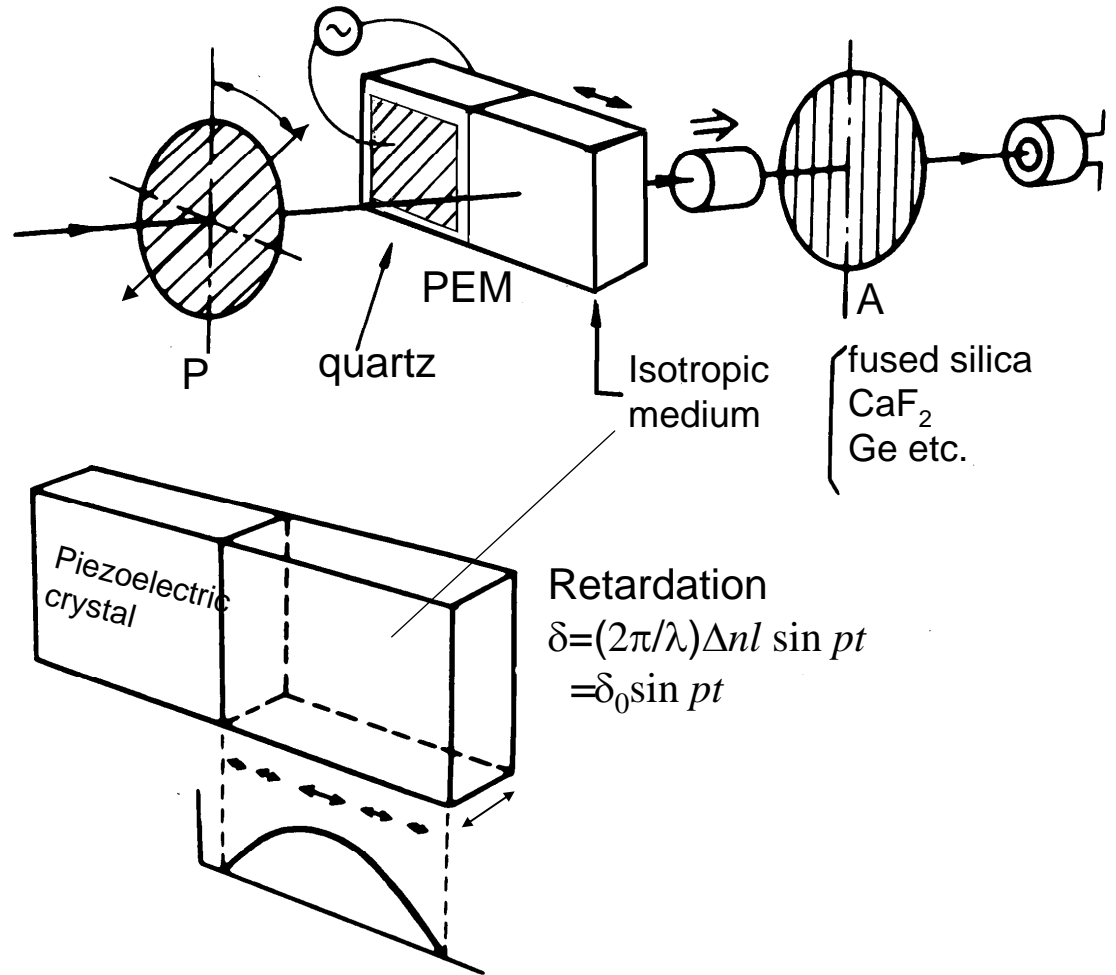
- したがって、交流成分の強度は $\sin 2(\theta_0 - \theta_F)$ に比例する。この信号を0にするように ($\theta_0 = \theta_F$ となるように) ファラデーセルに流す電流の直流成分にフィードバックする。

楕円率の測定法



円偏光変調法(光学遅延変調法)

- PEM(光弾性変調器)を用いる



円偏光変調法の原理

- 直線偏光 (45°)
- Y成分のみ δ 遅延
- 円偏光座標に変換
- 右円偏光および左円偏光に対する反射率をかける
- 元の座標系に戻す
- x軸から ϕ の角度の透過方向をもつ検光子からの出力光
- 光強度を求める

$$E_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} E_0 (i + j)$$

$$E_2 = \frac{E_0}{\sqrt{2}} (i + \exp(i\delta)j)$$

$$E_2 = \frac{E_0}{2} ((1 - i \exp(i\delta))r + (1 + i \exp(i\delta))l)$$

$$\begin{aligned} E_3 &= \frac{E_0}{2} (r_+ (1 - i \exp(i\delta))r + r_- (1 + i \exp(i\delta))l) \\ &= \frac{E_0}{2} (((r_+ + r_-) - i(r_+ - r_-) \exp(i\delta))i + i((r_+ - r_-) - i(r_+ + r_-) \exp(i\delta))j) \end{aligned}$$

$$E_4 = \frac{E_0}{2\sqrt{2}} (r^+ (1 - i \exp(i\delta)) \exp(i\phi) + r^- (1 + i \exp(i\delta)) \exp(i\phi))$$

$$I \approx \frac{E_0^2}{2} (R + \Delta R \sin \delta + R \sin(\Delta\theta + 2\phi) \cos \delta)$$

円偏光変調法の原理

- 磁気光学パラメータに書き換え

$$I = \frac{1}{2} E_0^2 R \{1 + 2\eta_K \sin \delta + \sin(2\phi - 2\theta_K) \cos \delta\}$$

- $\phi = 0$ かつ θ_K が小のとき

$$I \approx I_0 R (1 + 2\eta_K \sin \delta - 2\theta_K \cos \delta)$$

- $\delta = \delta_0 \sin pt$ を代入してBessel関数展開

$$\begin{aligned} \sin(x \sin \phi) &= 2J_1(x) \sin \phi + \dots \\ \cos(x \sin \phi) &= J_0(x) + 2J_2(x) \cos 2\phi \end{aligned}$$

- 周波数 p の成分が楕円率、 $2p$ の成分が回転角

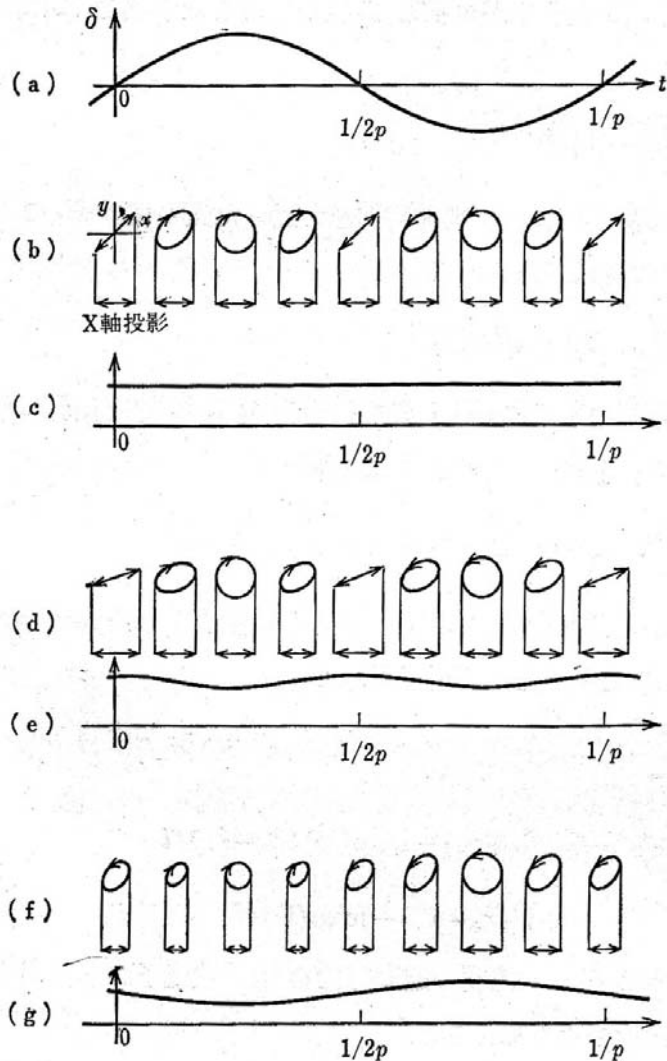
$$\begin{aligned} I_D &= (I_0/2) \{1 + 2\eta_K \sin(\delta_0 \sin pt) - \sin 2\theta_K \cos(\delta_0 \sin pt)\} \\ &= (I_0/2) \{1 - 2\theta_K J_0(\delta_0)\} + I_0 \cdot 2\eta_K J_1(\delta_0) \sin pt - I_0 \cdot 2\theta_K J_2(\delta_0) \cos 2pt + \dots \\ &\approx I(0) + I(p) \sin pt + I(2p) \cos 2pt \end{aligned}$$

$$I(0) = \frac{I_0}{2} \{1 - 2\theta_K J_0(\delta_0)\},$$

$$I(p) = 2I_0 \eta_K J_1(\delta_0)$$

$$I(2p) = -2I_0 \theta_K J_2(\delta_0)$$

円偏光変調法の図解

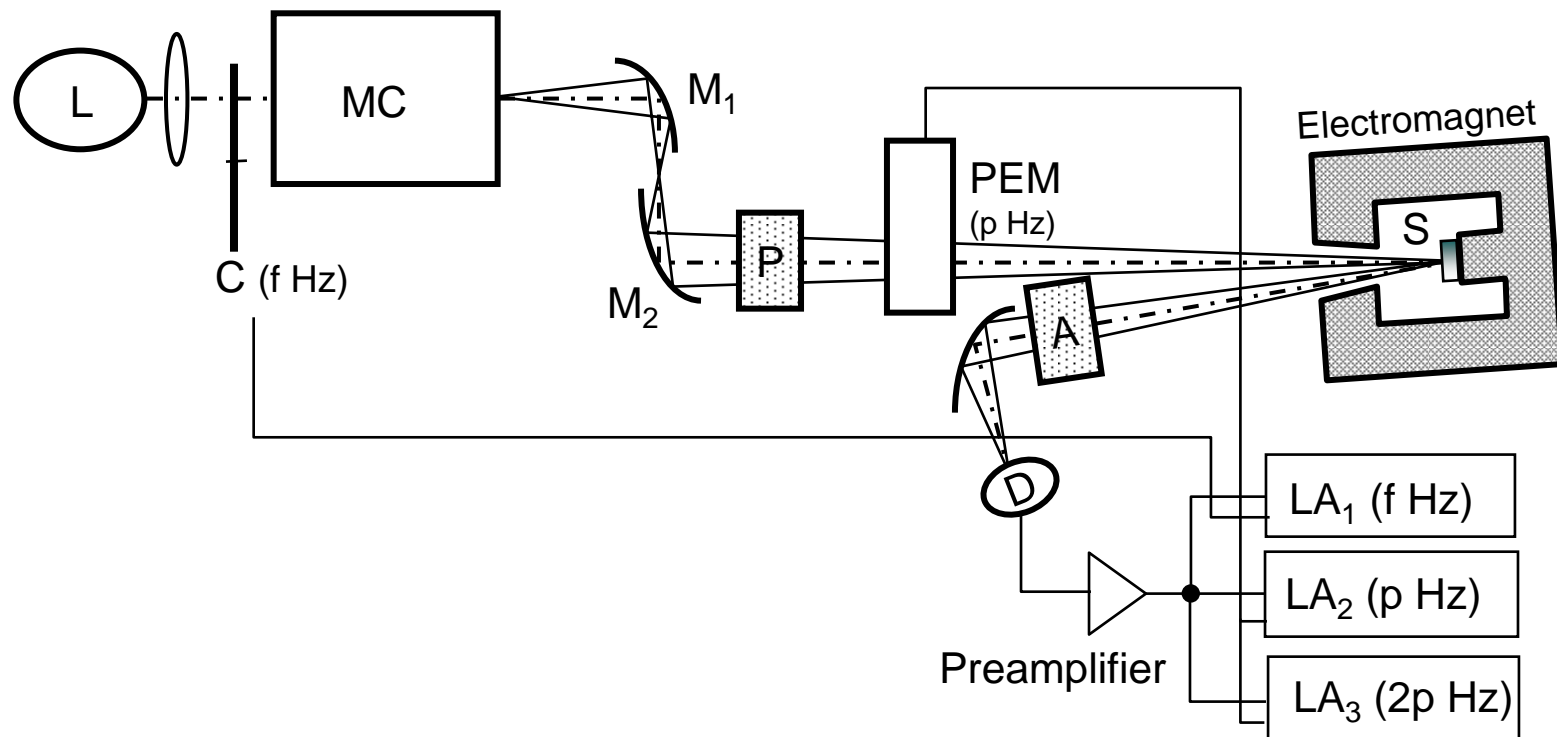


- 図 (a)は光弾性変調器(PEM) Mによって生じる光学的遅延 δ の時間変化を表す. この図において δ の振幅 δ_0 は $\pi/2$ であると仮定すると δ の正負のピークは円偏光に対応する.
- 試料Sが旋光性も円二色性ももたないとするとき, 電界ベクトルの軌跡は図(b)に示すように1周期の間にLP-RCP-LP-LCP-LPという順に変化する. (ここに, LPは直線偏光, RCPは右円偏光, LCPは左円偏光を表す.) 検光子の透過方向の射影は図(c)に示す様に時間に対して一定値をとる.
- 旋光性があるとベクトル軌跡は図(d)のようになり, その射影は(e)に示すごとく角周波数 $2p$ [rad/s] で振動する. 一方, 円二色性があるとRCPとLCPとのベクトルの長さに差が生じ, 射影(g)には角周波数 p [rad/s] の成分が現れる.

円偏光変調法の特徴

- 同じ光学系を用いて旋光角と楕円率を測定できるという特徴をもっている.
- また, 変調法をとっているため高感度化ができるという利点ももつ.
- この方法は零位法ではないので, 何らかの手段による校正が必要である.

磁気光学スペクトル測定系

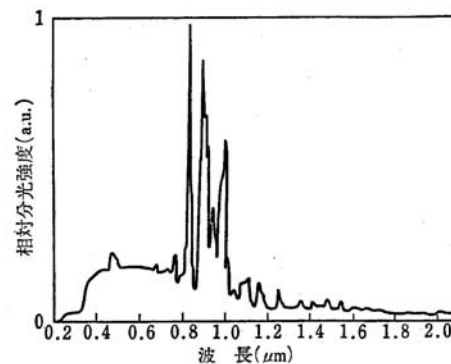
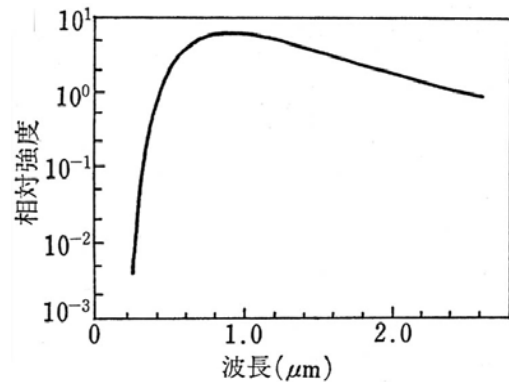


磁気光学スペクトル測定上の注意点

- 磁気光学スペクトルの測定には、光源、偏光子、分光器、集光系、検出器の一式が必要であるが、各々の機器の分光特性が問題になる。さらに、試料の冷却が必要な場合、あるいは、真空中での測定が必要な場合には、窓材の透過特性が問題になる。

光源

- ハロゲン・ランプ (近赤外-可視)
- キセノンランプ (近赤外-近紫外)
- 重水素ランプ (紫外)

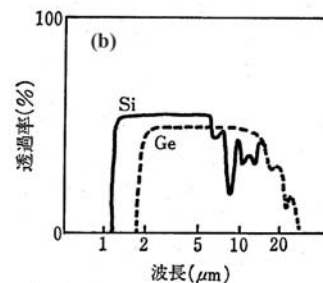
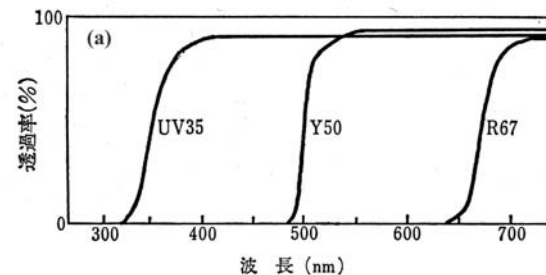
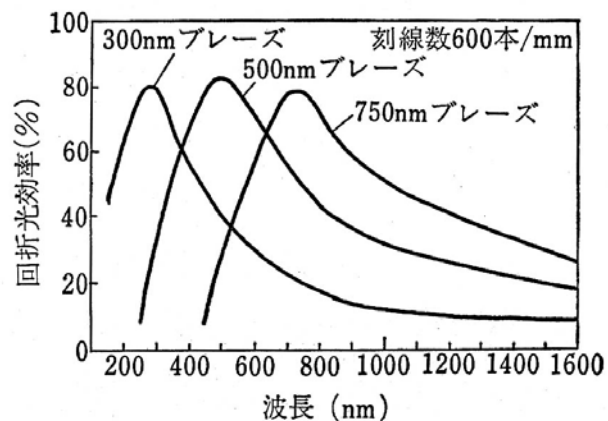


偏光子

- 複屈折(プリズム)偏光子
- 二色性偏光子(偏光板)
- ワイヤグリッド偏光子

分光器

- 分解能よりも明るさに重点を置いて選ぶ必要がある。焦点距離25cm程度で、fナンバーが3~4のものが望ましい。
- 回折格子は刻線数とブレイズ波長によって特徴づけられる。
- 高次光カットフィルタが必要

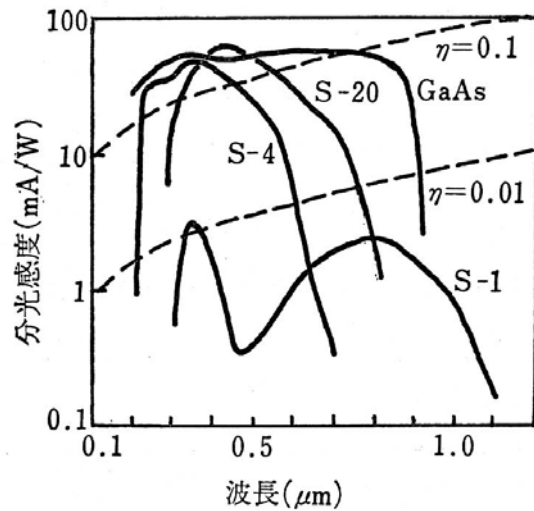


集光系

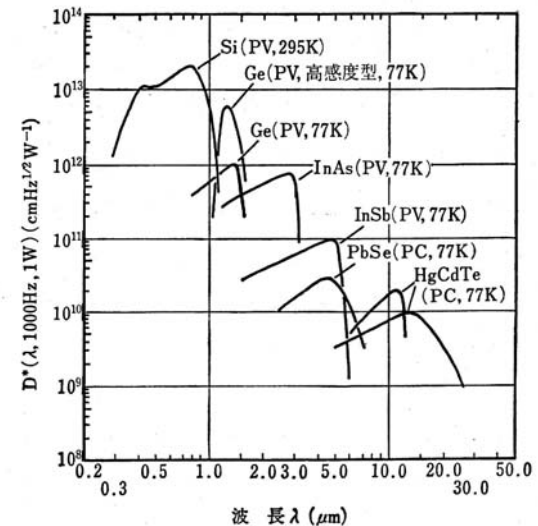
- 狭い波長範囲：レンズ使用
- 広い波長範囲：ミラー使用
 - 色収差が重要
 - たとえば，石英ガラスのレンズを用いて， $0.4 \sim 2 \mu\text{m}$ の間で測定するとすれば， $\delta f/f = -0.067$ となり， $f = 15\text{cm}$ ならば $\delta f \sim 1\text{cm}$ となる。

検出器

- 光電子増倍管
- 半導体光検出器

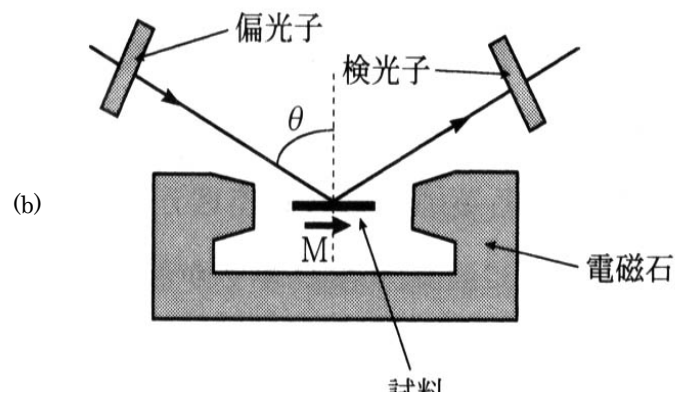
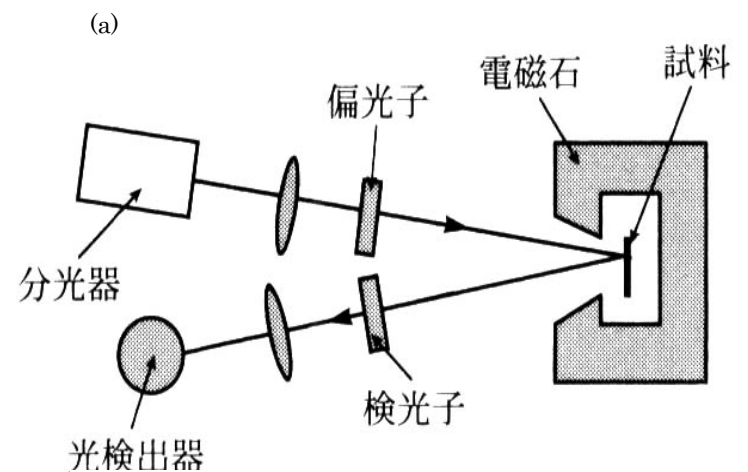


タイプ	光電面
S-1	Ag-O-Cs
S-4	Sb-Cs
S-20	マルチアルカリ
GaAs	GaAs 結晶

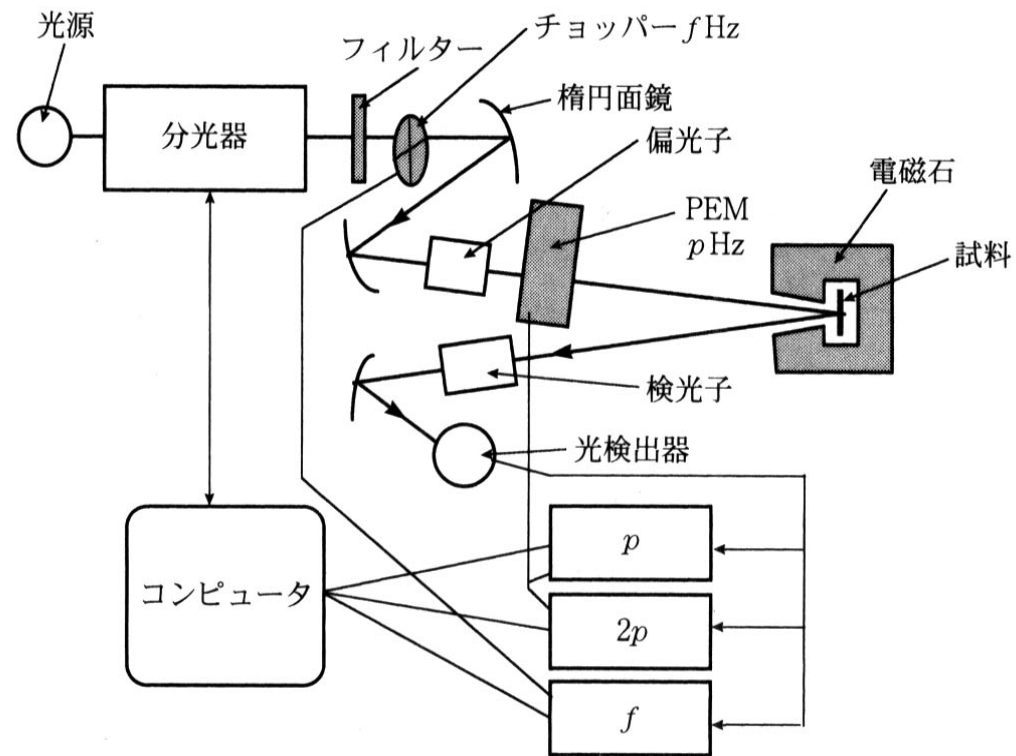


電磁石と冷却装置、素子の配置

- ファラデー配置とフォークト配置
- 穴あき電磁石
- 鉄芯マグネット
- 超伝導マグネット



電気信号の処理

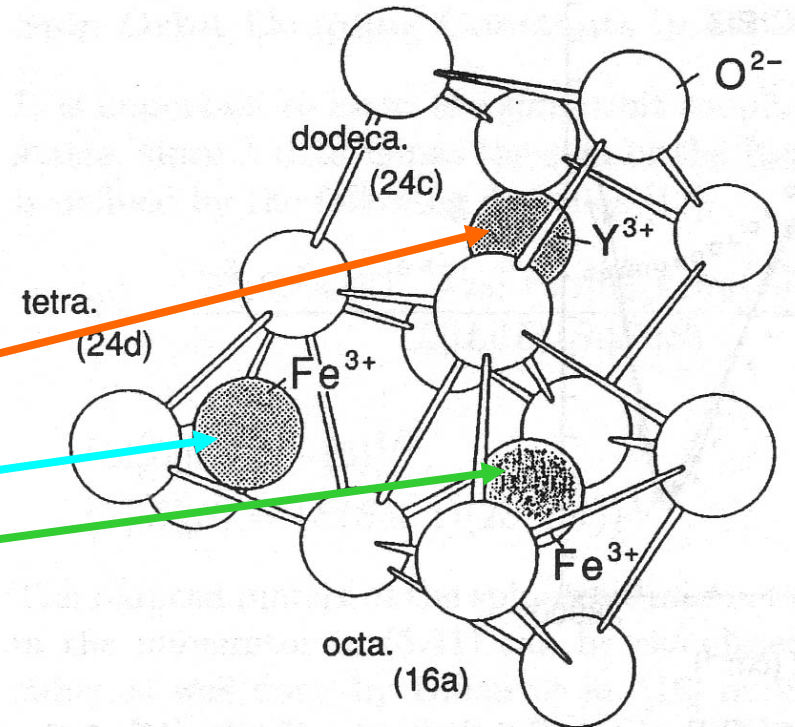


各種材料の磁気光学効果

- 酸化物磁性体：磁性ガーネット
- 金属磁性体：Fe, Co, Ni
- 金属間化合物・合金：PtMnSbなど
- 磁性半導体：CdMnTeなど
- アモルファス：TbFeCo, GdFeCoなど
- 人工構造膜：Fe/Au, Pt/Coなど

磁性ガーネット

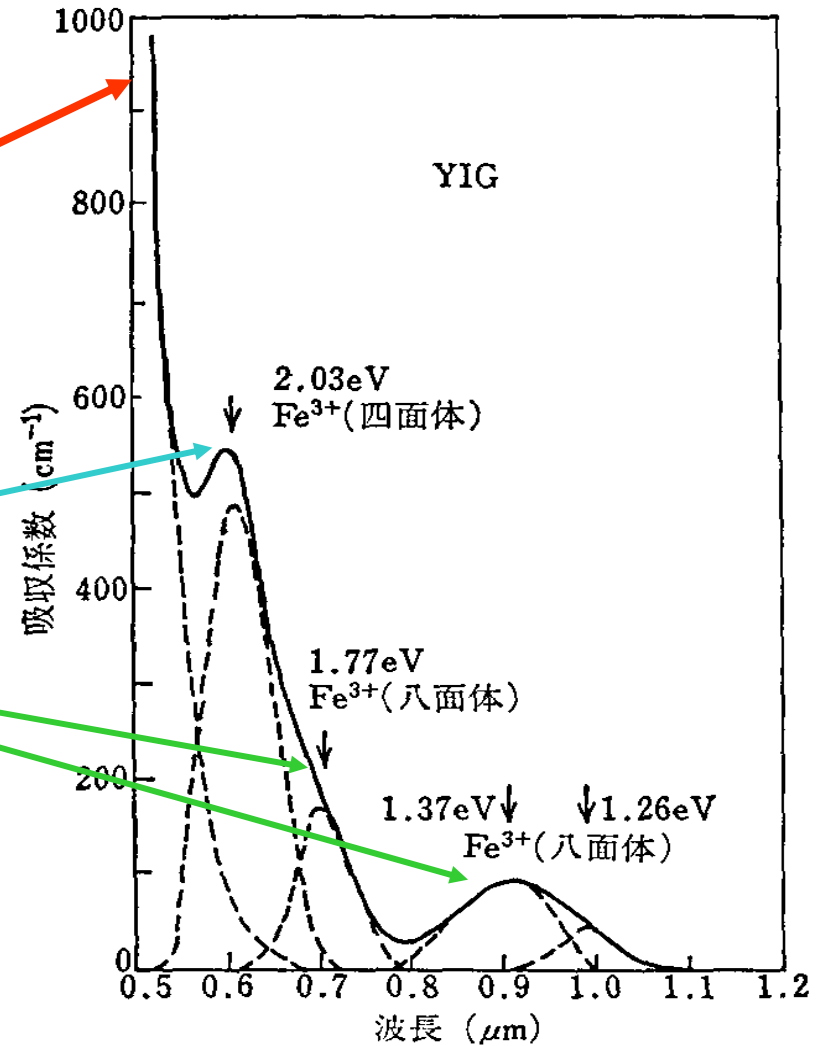
- 磁性ガーネット:
 - YIG($Y_3Fe_5O_{12}$)をベースとする鉄酸化物; Y→希土類 Biに置換して物性制御
- 3つのカチオンサイト:
 - 希土類 12面体位置
 - 鉄 Fe^{3+} 4面体位置 8面体位置、反強磁性結合
 - フェリ磁性体



ガーネットの結晶構造

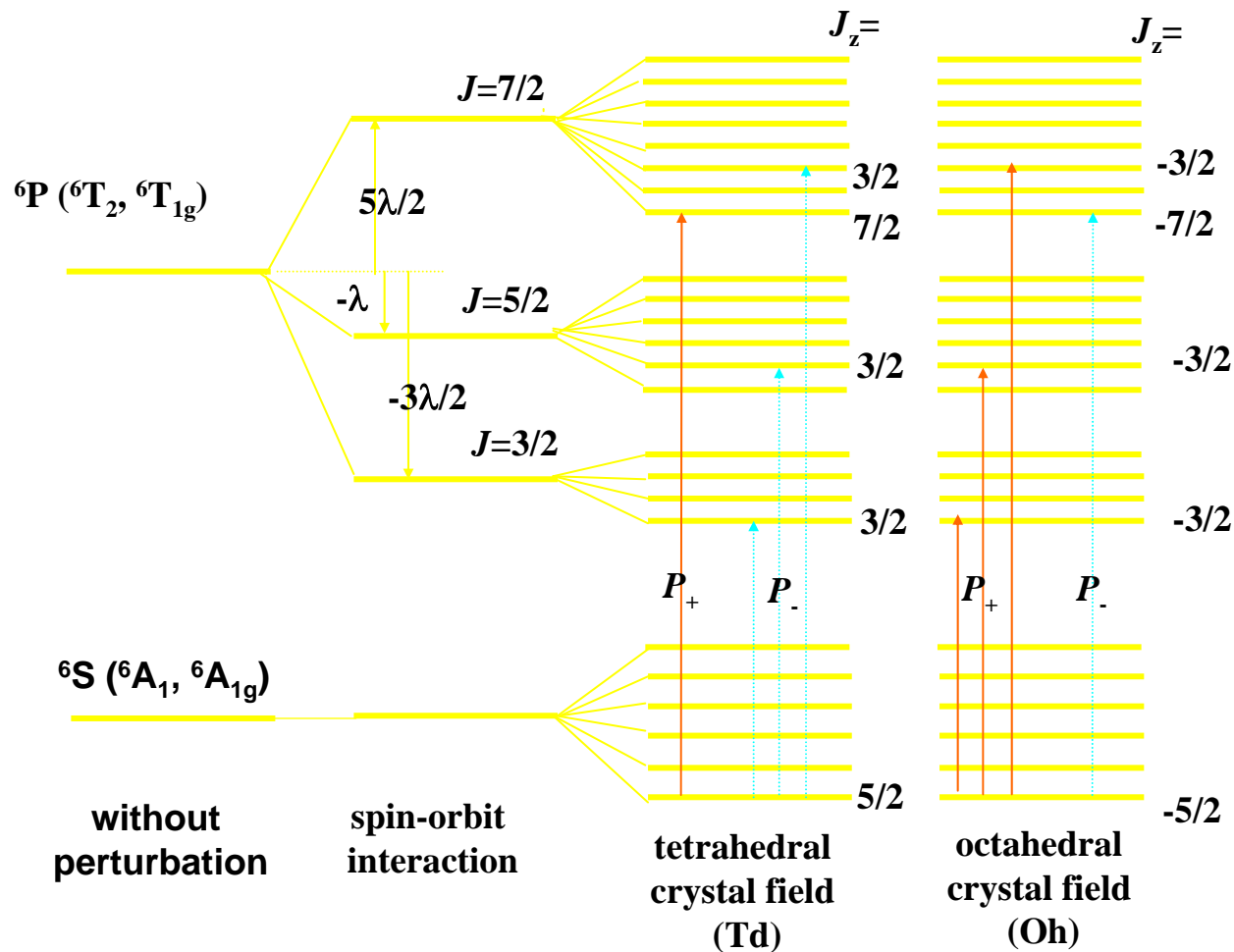
YIGの光吸収スペクトル

- 電荷移動型(CT)遷移
強い光吸収)2.5eV
- 配位子場遷移
弱い光吸収)
 - 4面体配位 2.03eV
 - 8面体配位
1.77eV, 1.37eV, 1.26eV



YIGの光吸収スペクトル(室温)²²⁾

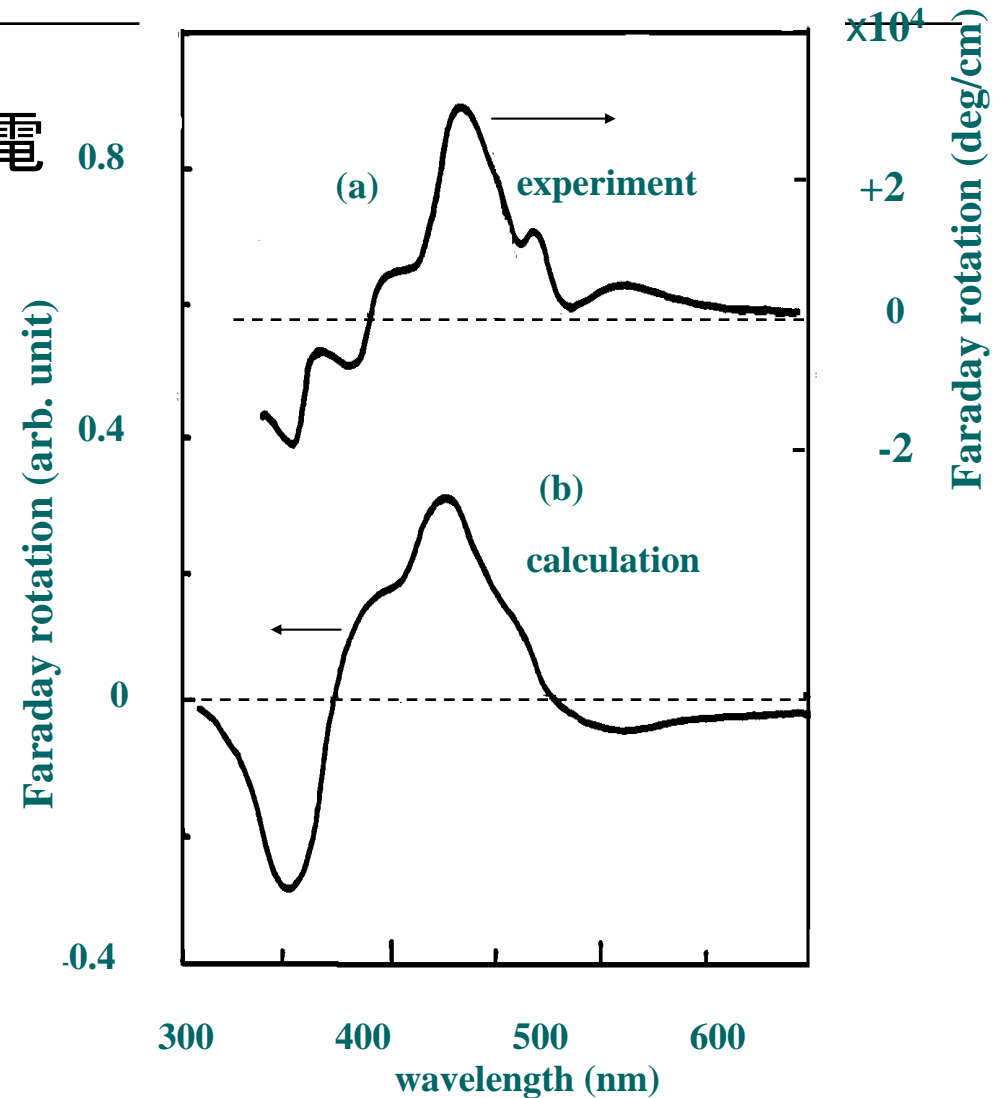
磁性ガーネットの $3d^5 2p^6$ 電子状態



品川による

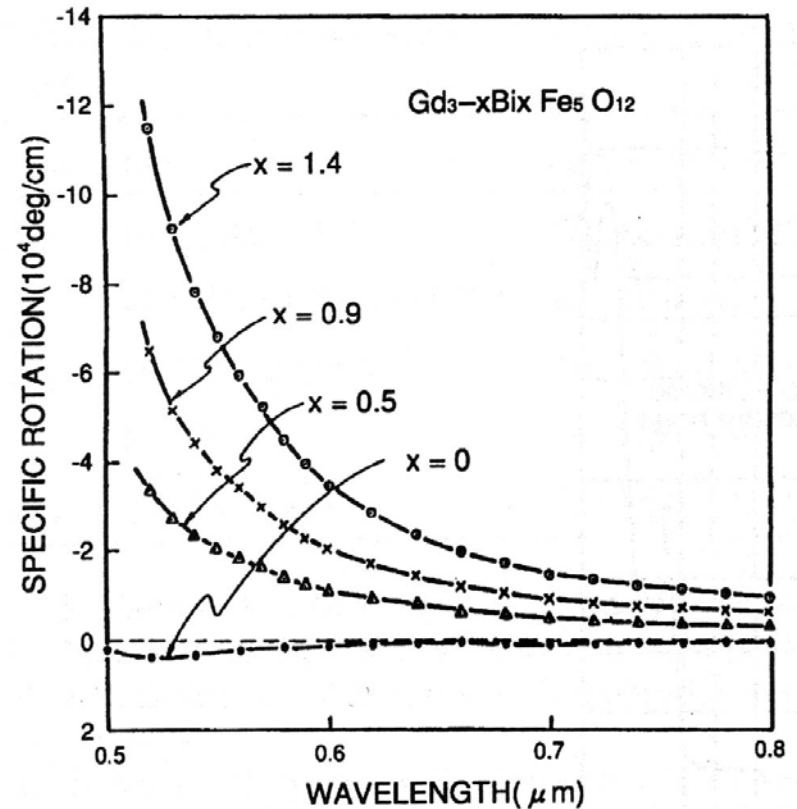
YIGの磁気光学スペクトル

- 電荷移動型遷移を多電子系として扱い計算。



Bi置換磁性ガーネット

- Bi: 12面体位置を置換
- ファラデー回転係数: Bi置換量に比例して増加。
- Biのもつ大きなスピン軌道相互作用が原因。
- Bi置換によって吸収は増加しないので結果的に性能指数が向上



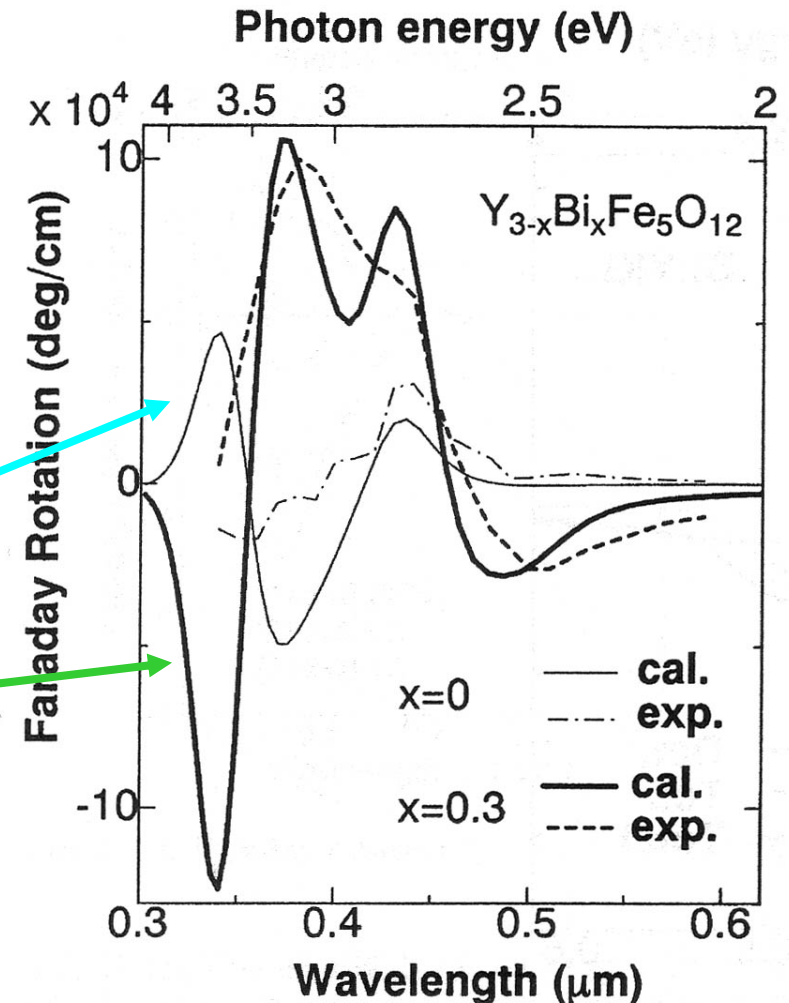
Bi置換YIGの磁気光学スペクトル

実験結果と計算結果

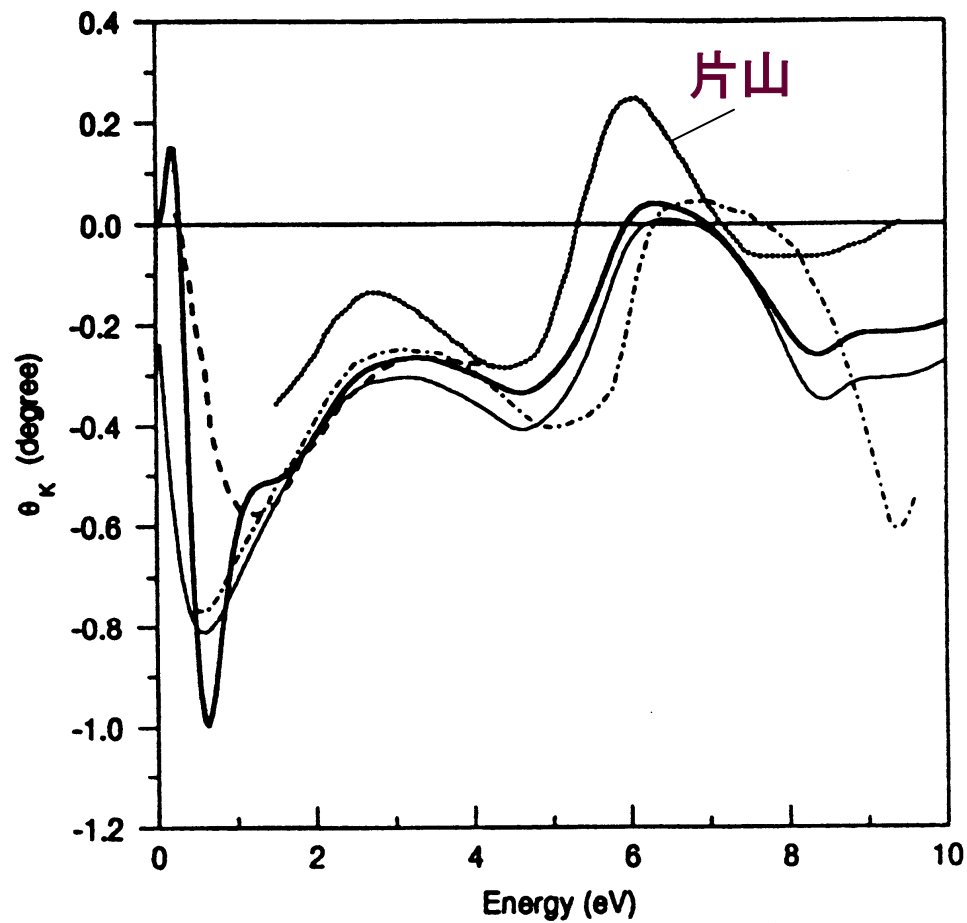
Table 5.6. Parameters used for calculation of Faraday rotation spectrum

transition	$\omega_0 \text{ cm}^{-1} (\text{eV})$	$\gamma \text{ cm}^{-1}$	$f \times 10^3$	site
$t_1(\pi) \rightarrow e^*$	20 170 (2.50)	1800	0.25	tet
$t_2(\pi) \rightarrow e^*$	21 620 (2.68)	1800	0.40	tet
$t_{2u}(\pi) \rightarrow t_{2g}^*$	23 110 (2.86)	1800	1.8	oct
$t_{1u}(\pi) \rightarrow t_{2g}^*$	25 600 (3.17)	2700	3.1	oct
$t_1(\pi) \rightarrow t_2^*$	27 400 (3.40)	2500	5.5	tet
$t_2(\pi) \rightarrow t_2^*$	29 120 (3.61)	2500	5.5	tet

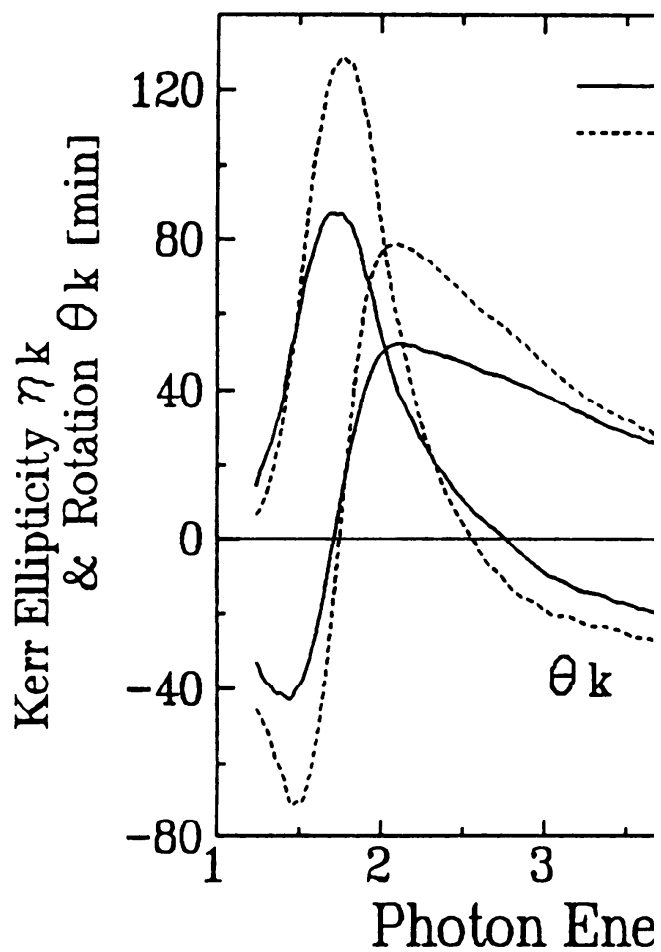
- スペクトルの計算
- $\zeta_{3d} = 300 \text{ cm}^{-1}$,
 - $\zeta_{2p} = 50 \text{ cm}^{-1}$ for YIG
 - $\zeta_{2p} = 2000 \text{ cm}^{-1}$ for $\text{Bi}_{0.3}\text{Y}_{2.7}\text{IG}$



Feのカー回転スペクトルの 理論と実験



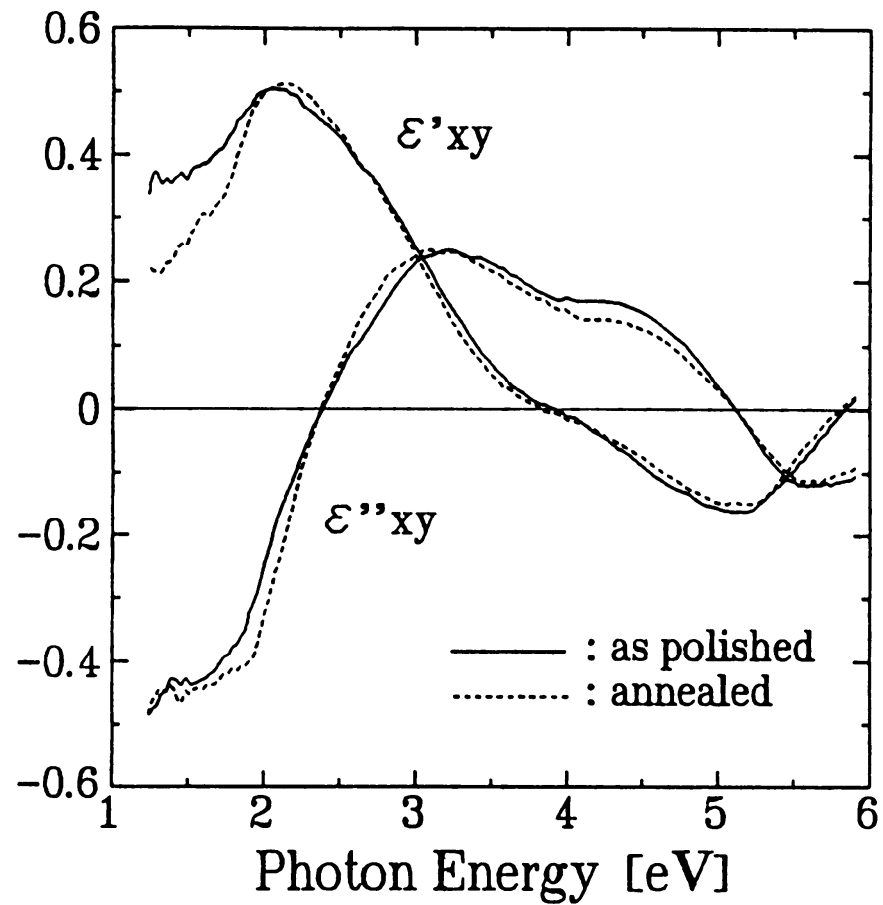
PtMnSbの磁気光学スペクトル



(a)

Diagonal Dielectric Constant
 $\epsilon'_{xx}, \epsilon''_{xx}$

Off-Diagonal Dielectric Constant
 $\epsilon'_{xy}, \epsilon''_{xy}$

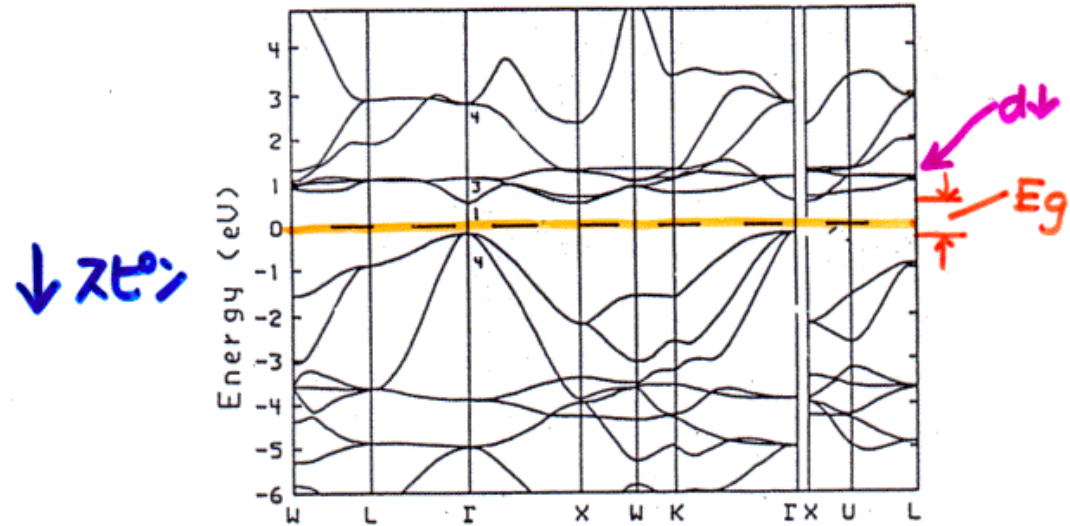
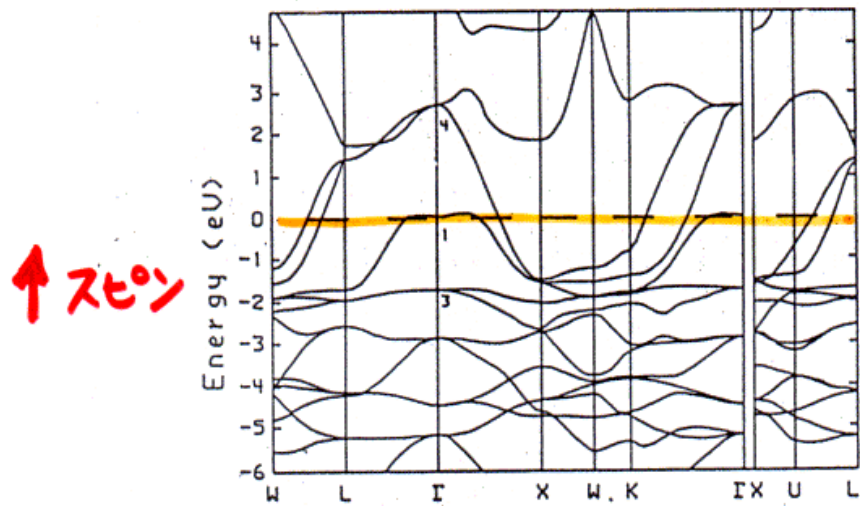


(b)

(c)

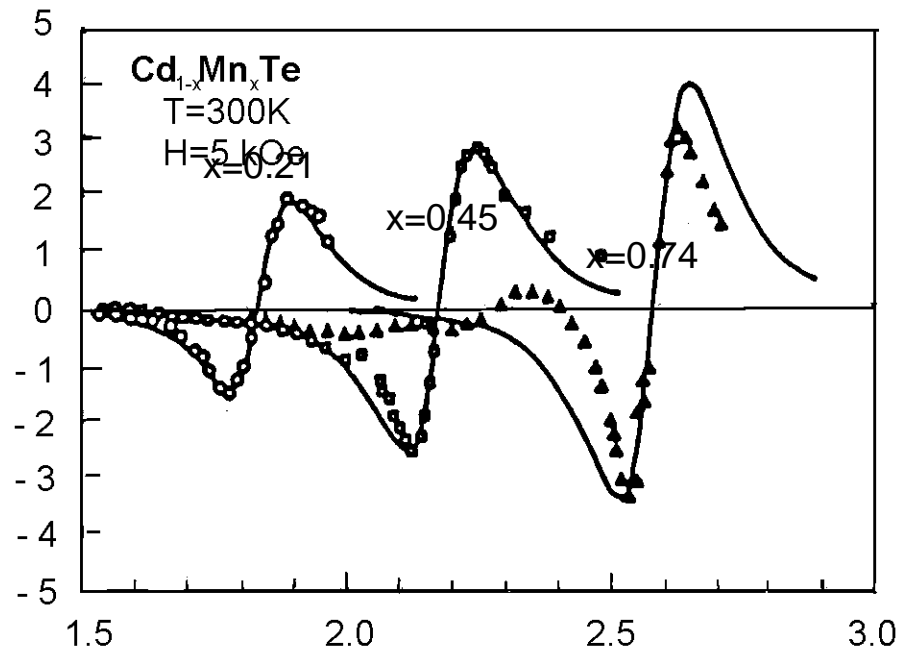
— : as polished
- - - : annealed

ハーフメタル: PtMnSb

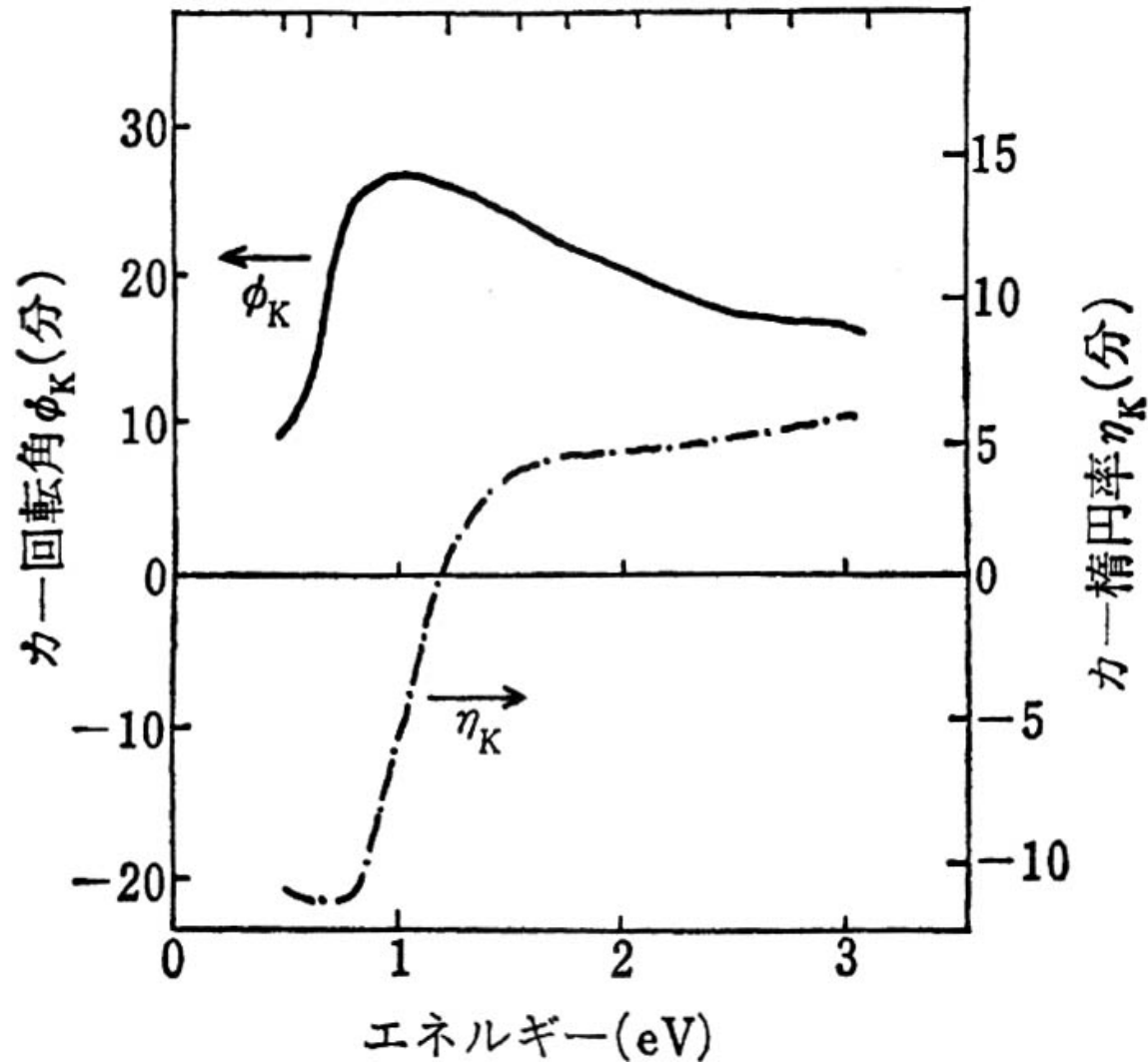


- ↑ スピンは金属、↓ スピンは半導体

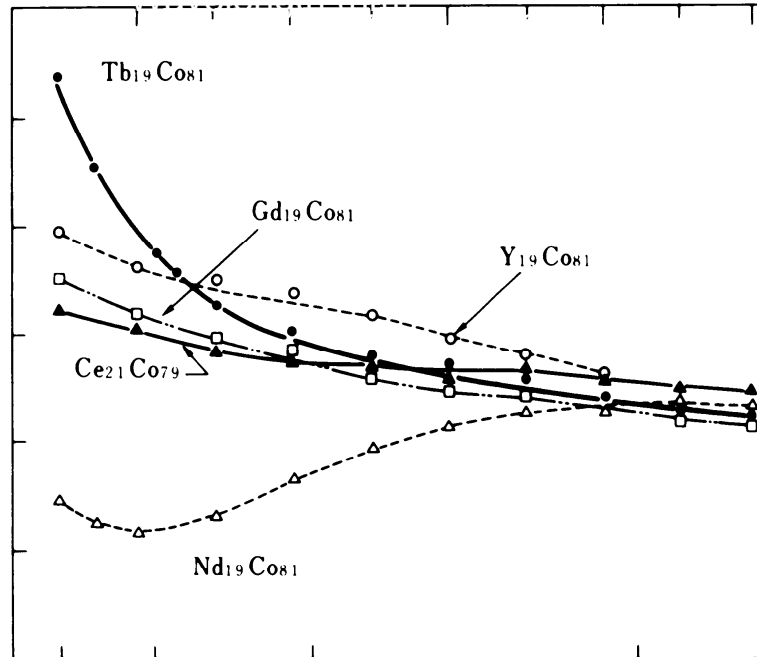
希薄磁性半導體CdMnTe



アモルファス CdCl₂ の暗の磁気光学効果



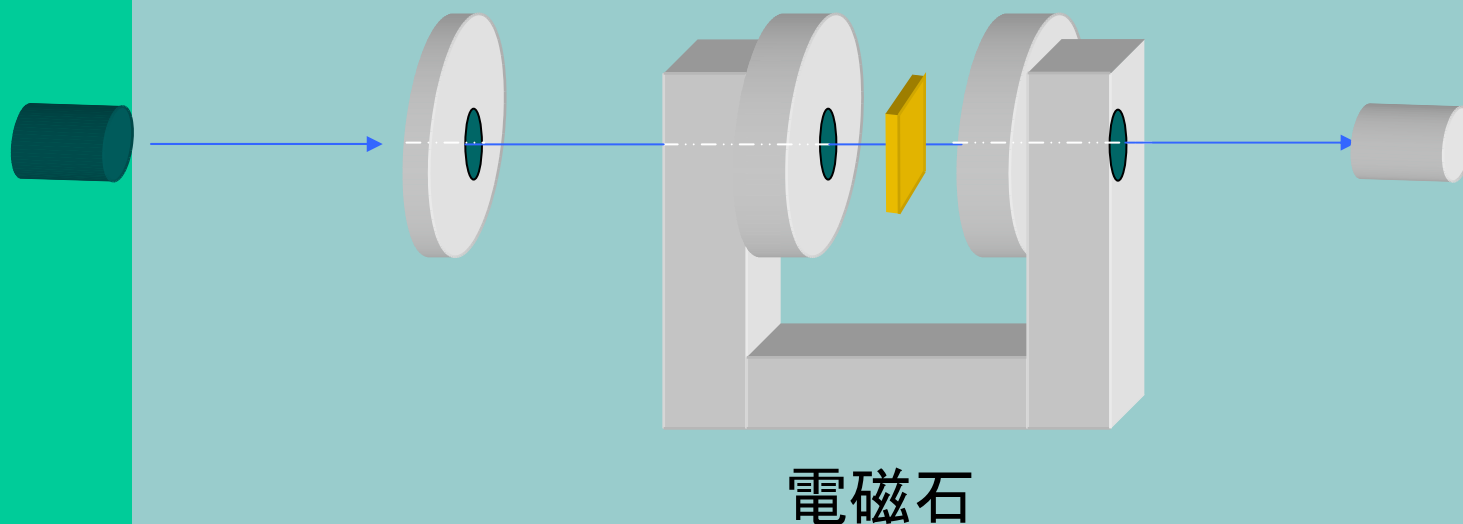
アモルファス希土類Co膜の 磁気光学スペクトル



磁気光学効果を用いたヒステリシス測定

○ 物理システム工学実験III,IV (P3年)

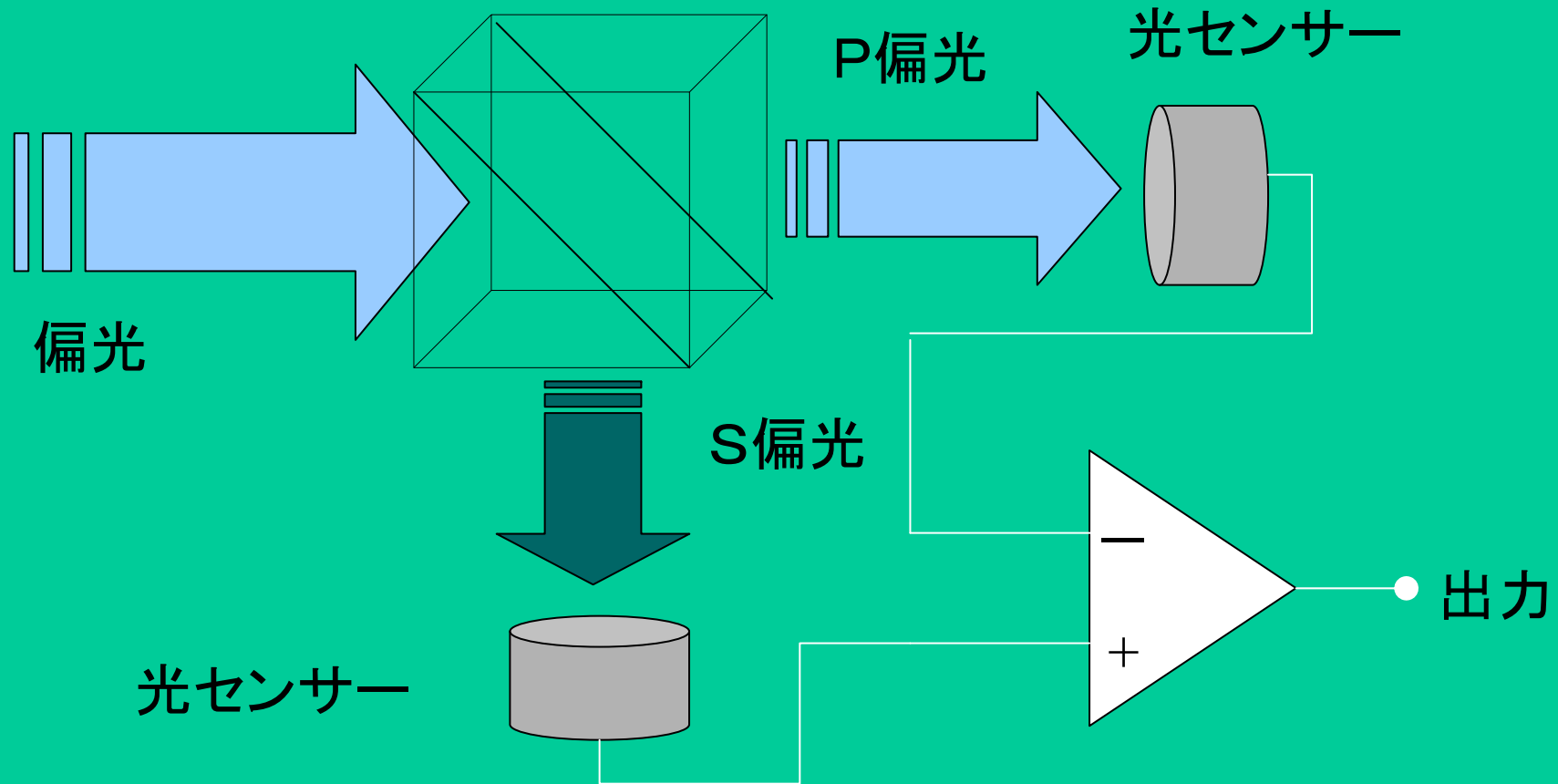
青色LED 偏光板 試料 コイル 差動検出器



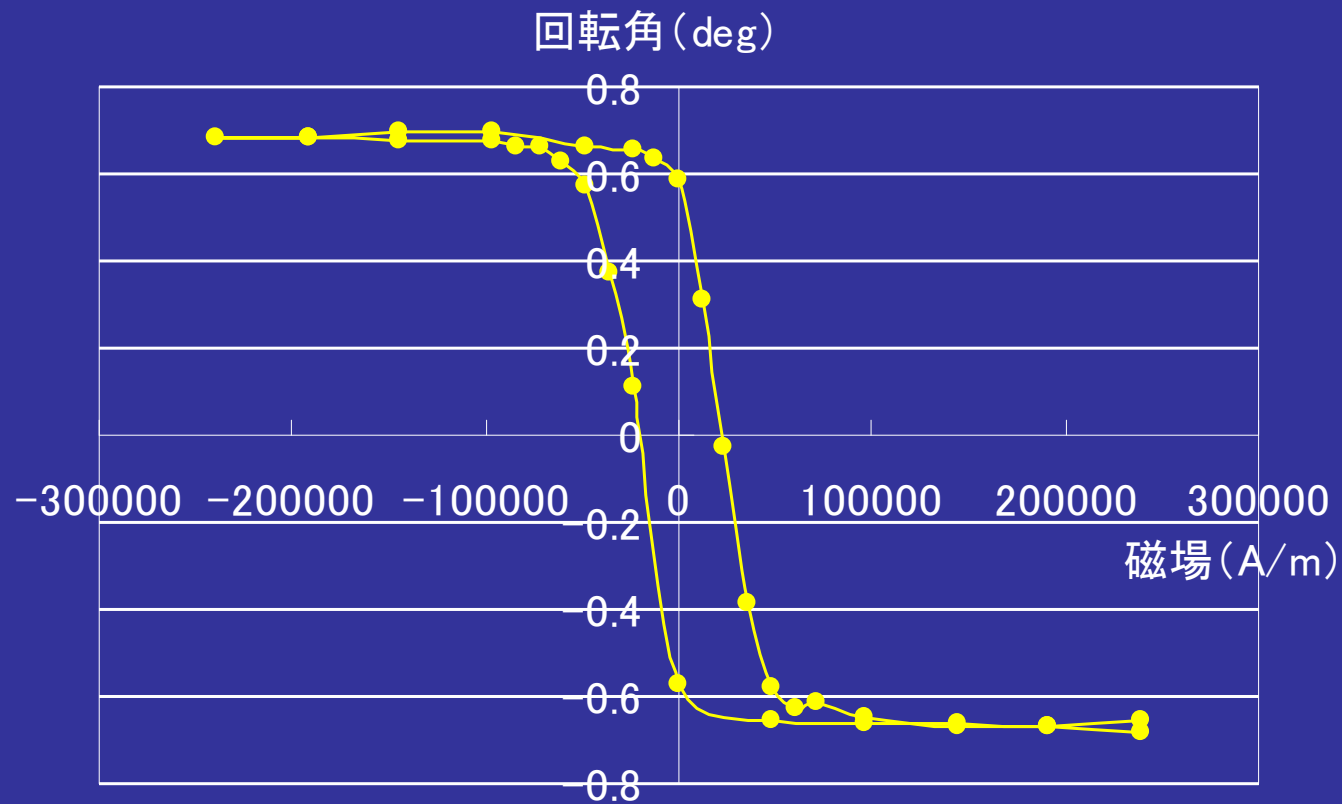
差動検出系

- 差動検出による高感度化

偏光ビームスプリッター

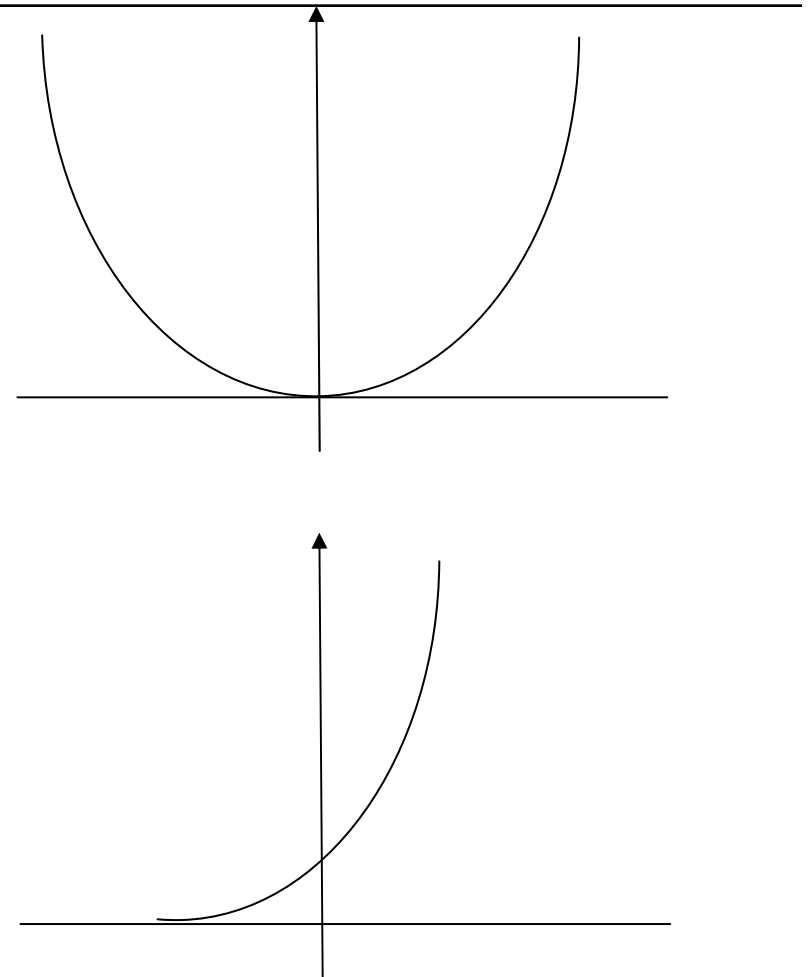


$(\text{Gd}_2\text{Bi})(\text{Fe}_4\text{Ga})\text{O}_{12}$ の ファラデーヒステリシスループ

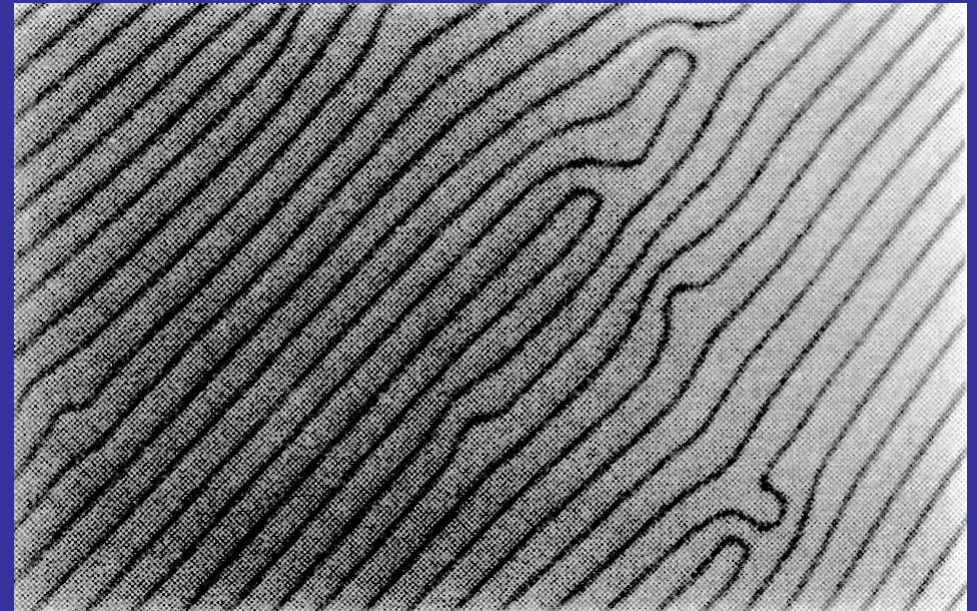
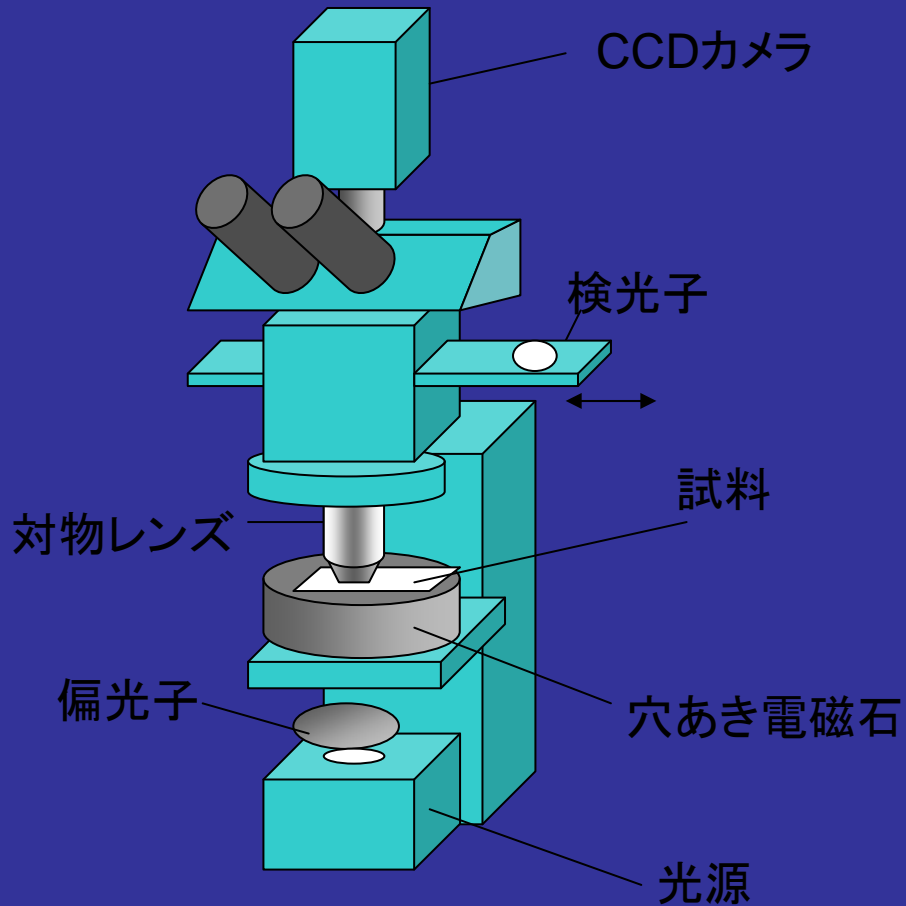


磁気光学顕微鏡による磁区観察

- クロスニコル条件では、磁化の正負に対して対称になり、磁気コントラストがでない
ので、偏光子と検光子の角度を90度から4度程度ずらしておく
と、コントラストが得られる。

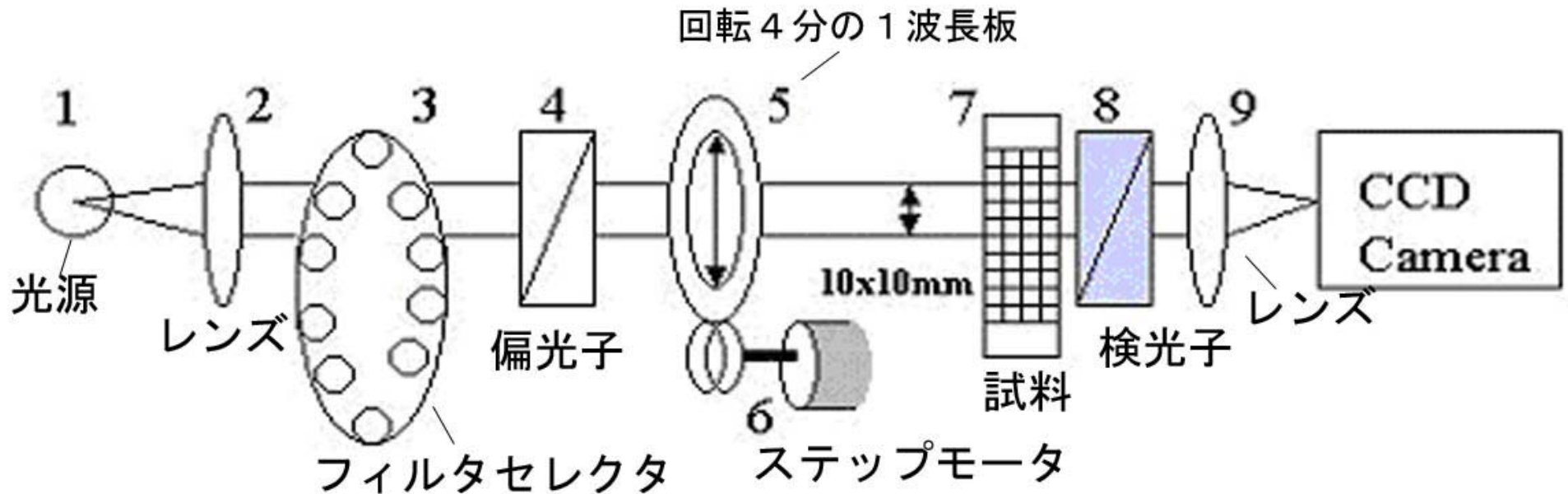


ファラデー効果を用いた 磁区のイメージング



ファラデー効果で観察した
 $(\text{Gd,Bi})_3(\text{Fe,Ga})_5\text{O}_{12}$ の磁区
NHK技研 玉城氏のご厚意による

CCDカメラによる磁気光学イメージング



磁性ガーネットの磁区の変化

