

大阪大学基礎工学研究科特別講義

2002.6.12-14

光と磁気

磁気光学の基礎から光磁気デバイスまで

農工大学物理システム工学科

佐藤勝昭

講義内容

- 12日
- 13:00—14:30 序論、光と磁気の現象論
- 14:40—16:10 光と磁気の電子論(量子論)
磁気光学効果の測定法
- 13日
- 10:30—12:00 人工構造薄膜の磁気光学効果
磁気光学効果の応用(1)光記録
- 13:00—14:30 磁気光学効果の応用(2)光通信
- 14日
- 8:50—11:30 磁気光学効果の最近の展開

はじめに

- 磁気光学効果：1845年にFaradayが発見
- 実用化：1980年代に光磁気ディスクおよび光アイソレータとして市場に
- センサ：主として電流センサとして利用
- 観測手段として：磁気光学顕微鏡
- 未来研究：近接場磁気光学顕微鏡および非線形磁気光学効果

序論：光と磁気の結びつき

- 磁気光学効果と光磁気効果
- 自然活性とファラデー効果
- 強磁性体のファラデー効果
- 磁気カー効果
- 磁気光学スペクトル
- その他の磁気光学効果
- 光磁気効果

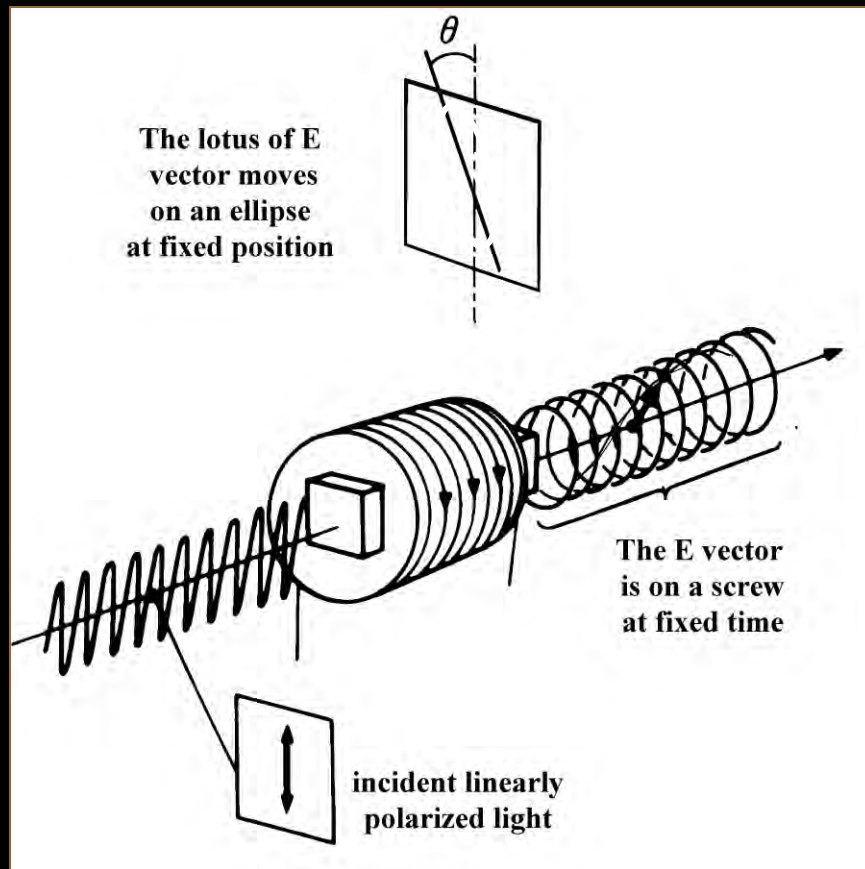
磁気光学効果と光磁気効果

- **光**→**磁気**: 光磁気効果(Photomagnetic effect)
 - **熱磁気効果**: キュリー温度記録→MOディスク
 - 光誘起磁化: ルビー、磁性半導体
 - 光誘起スピン再配列→光モータ
- **磁気**→**光**: 磁気光学効果(Magneto-optical effect)
 - スペクトル線の分裂、移動(ゼーマン効果)
 - 磁気共鳴: 強磁場ESR、マグネトプラズマ共鳴
 - **狭義の磁気光学効果**(Faraday, Kerr, Cotton Mouton)

光学活性

- **光学活性**：旋光性と円二色性
旋光性：直線偏光が回転する効果
円二色性：直線偏光が楕円偏光に変わる効果
- **自然活性**：物質自身がもつ光学活性(結晶構造、分子構造に起因)
- **電気光学効果**：電気分極によって生じる光学活性
- **磁気光学効果**：磁化によって生じる光学活性

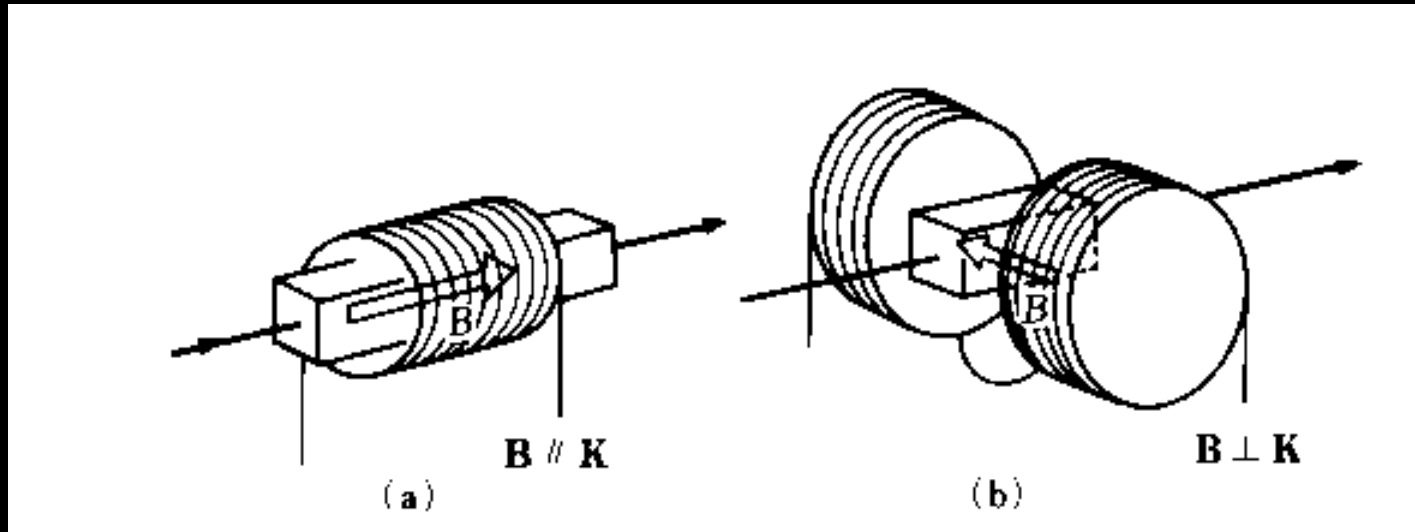
ファラデー効果とは



直線偏光が入射したとき

- 出射光が**楕円偏光**になり
(磁気円二色性)
- その**主軸が回転**する効果
(磁気旋光: Faraday回転)

磁気光学効果の2つの配置



- (a) Faraday配置 磁化と波動ベクトルが平行
- (b) Voigt配置 磁化と波動ベクトルが垂直

自然旋光性とファラデー効果

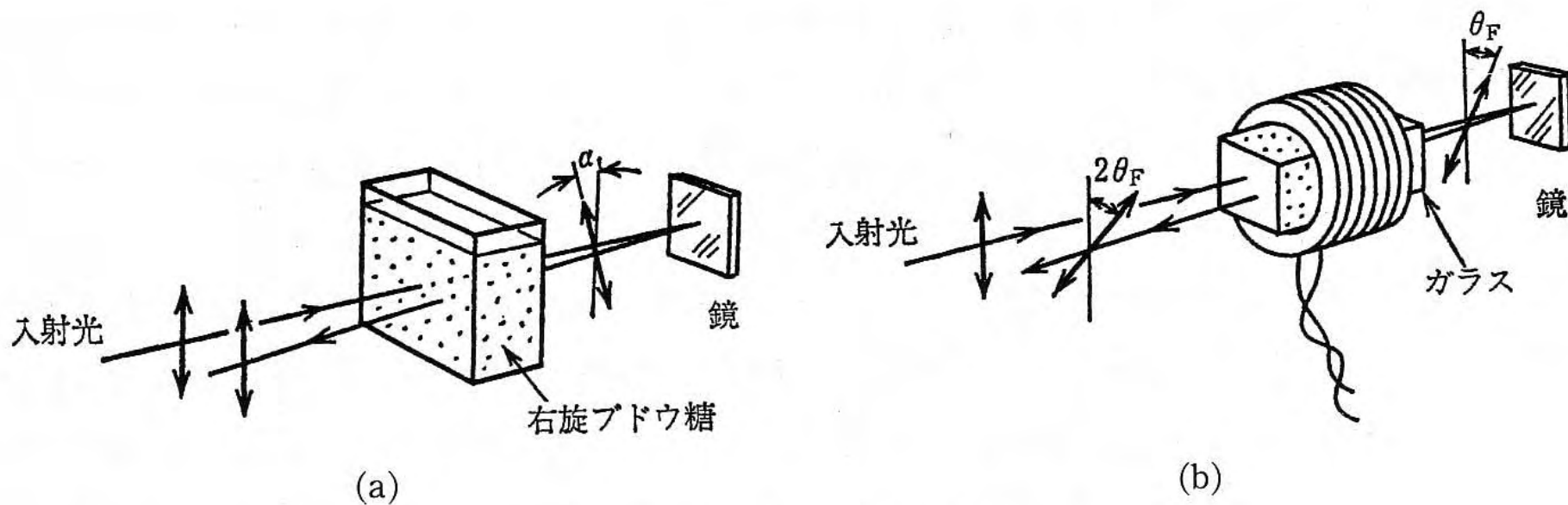


図 2.7 ファラデー効果の場合
ブドウ糖液中を往復した光は旋光しないが (a), 磁界中のガラスを往復した光は片道の 2 倍だけ旋光している (b).

ファラデー効果で観察した GdIG:Biの磁区構造

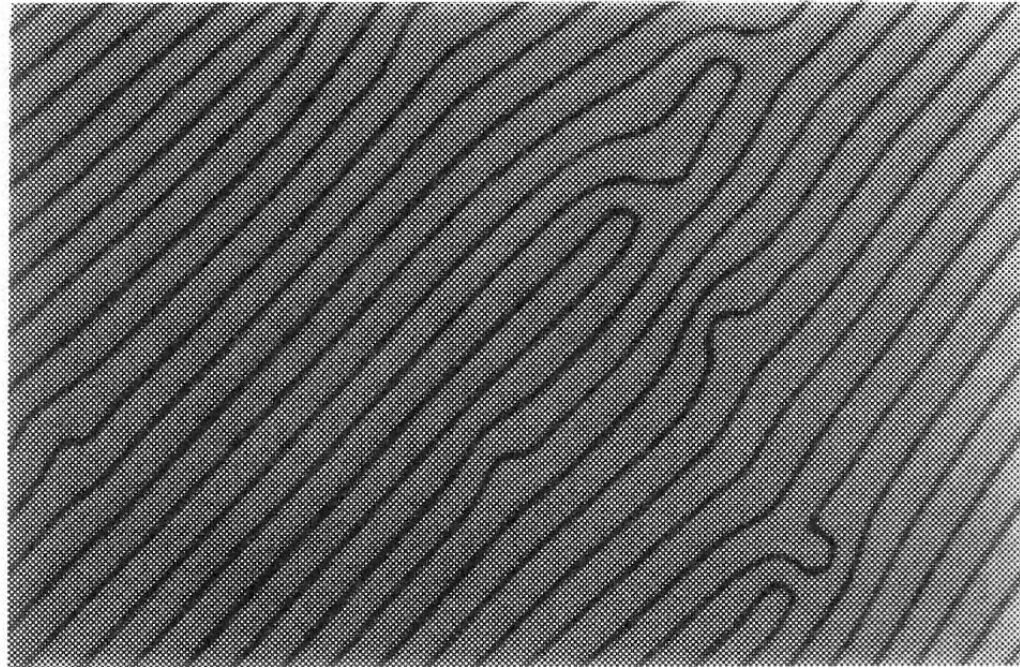


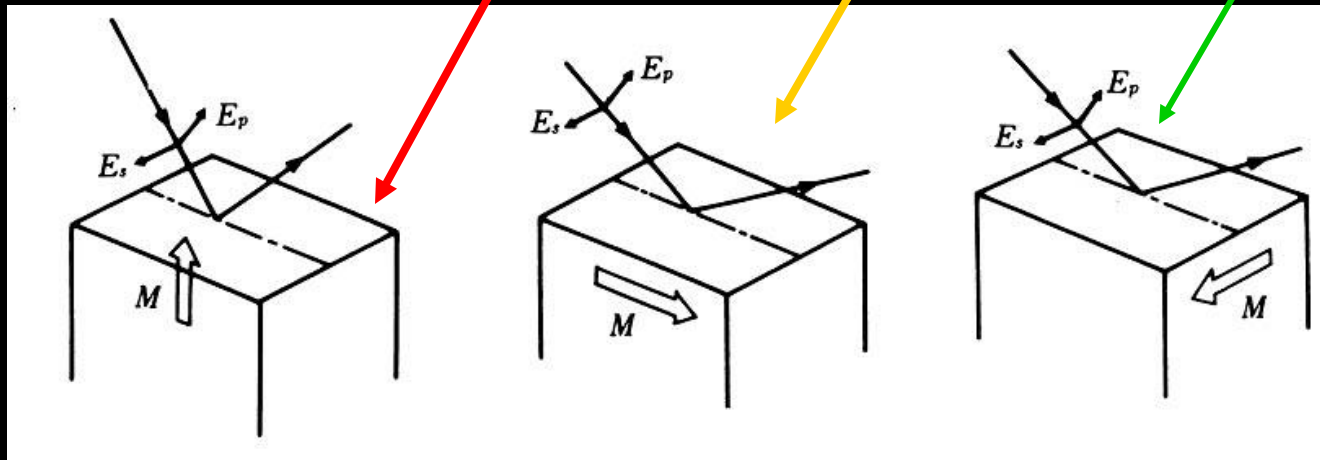
図 2.10 ビスマス (Bi) 添加ガドリニウム鉄ガーネット (GdIG) の磁区の顕微鏡写真 (玉城氏のご厚意による)

代表的な磁性体のファラデー効果

物質名	旋光角 (deg/cm)	性能指数 (deg/dB)	測定波長 (nm)	測定温度 (K)	磁界 (T)	文献
Fe	$3.825 \cdot 10^5$		578	室温	2.4	4)
Co	$1.88 \cdot 10^5$		546	//	2	4)
Ni	$1.3 \cdot 10^5$		826	120 K	0.27	4)
$Y_3Fe_5O_{12}$ *	250		1150	100 K		5)
$Gd_2BiFe_5O_{12}$	$1.01 \cdot 10^4$	44	800	室温		6)
MnSb	$2.8 \cdot 10^5$		500	//		7)
MnBi	$5.0 \cdot 10^5$	1.43	633	//		8)
$YFeO_3$	$4.9 \cdot 10^3$		633	//		9)
$NdFeO_3$	$4.72 \cdot 10^4$		633	//		10)
$CrBr_3$	$1.3 \cdot 10^5$		500	1.5K		11)
EuO	$5 \cdot 10^5$	104	660	4.2 K	2.08	12)
$CdCr_2S_4$	$3.8 \cdot 10^3$	35(80K)	1000	4K	0.6	13)

磁気カー効果

- 3つのMO-Kerr 効果
 - **極力一効果** (磁化が反射面の法線方向、直線偏光は傾いた楕円偏光となる)
 - **縦力一効果** (磁化が試料面内 & 入射面内、直線偏光は傾いた楕円偏光となる)
 - **横力一効果** (磁化が試料面内、入射面に垂直偏光の回転はないが磁界による強度変化)



代表的な磁性体のカー回転角

物質名	カー回転角 (deg)	測定光エネルギー (eV)	測定温度 (K)	磁界 (T)	文献
Fe	0.87	0.75	室温		14)
Co	0.85	0.62	//		//
Ni	0.19	3.1	//		//
Gd	0.16	4.3	//		15)
Fe ₃ O ₄	0.32	1	//		16)
MnBi	0.7	1.9	//		17)
CoS ₂	1.1	0.8	4.2	0.4	18)
CrBr ₃	3.5	2.9	4.2		19)
EuO	6	2.1	12		20)
USb _{0.8} Te _{0.2}	9.0	0.8	10	4.0	21)
CoCr ₂ S ₄	4.5	0.7	80		22)
a-GdCo *	0.3	1.9	298		23)
PtMnSb	2.1	1.75	298	1.7	24)
CeSb	90	0.46	1.5	5.0	25)

磁気光学効果の基礎 I. 現象論

- 光＝電磁波
- 電磁波の伝搬現象：マクスウェル方程式
- 媒体：連続体とみなす→誘電率テンソル
 - 磁化の効果→非対角成分
- 固有値問題→複素屈折率：2つの固有値
 - 固有解：左右円偏光
 - 左右円偏光の位相差→旋光
 - 左右円偏光の振幅差→円二色性

磁気光学効果の式

マクスウェル方程式

$$\text{rot rot } E(\omega) + \frac{\tilde{\varepsilon}(\omega)}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} E(\omega) = 0$$

固有方程式

$$\begin{pmatrix} \hat{N}^2 - \varepsilon_{xx} & -\varepsilon_{xy} & 0 \\ \varepsilon_{xy} & \hat{N}^2 - \varepsilon_{xx} & 0 \\ 0 & 0 & -\varepsilon_{zz} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix} = 0$$

固有値

$$\hat{N}_{\pm}^2 = \varepsilon_{xx} \pm i\varepsilon_{xy}$$

固有関数：左右円偏光

非対角成分がないとき：左右円偏光の応答に差がない



磁気光学効果は生じない

誘電率テンソル

$$D = \tilde{\epsilon} \epsilon_0 E$$

$$\tilde{\epsilon} = \begin{pmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} & \epsilon_{xz} \\ \epsilon_{yx} & \epsilon_{yy} & \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} & \epsilon_{zy} & \epsilon_{zz} \end{pmatrix}$$

$$\epsilon_{ij} = \epsilon'_{ij} + \epsilon''_{ij}$$

等方性の媒質 ; M//z軸
Z軸のまわりの90°
回転C4に対し不変

$$\tilde{\epsilon}' = C_4^{-1} \tilde{\epsilon} C_4 = \begin{pmatrix} \epsilon_{yy} & -\epsilon_{yx} & -\epsilon_{yz} \\ -\epsilon_{xy} & \epsilon_{xx} & \epsilon_{xz} \\ -\epsilon_{zy} & \epsilon_{zx} & \epsilon_{zz} \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} \epsilon_{xx} &= \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{yx} &= -\epsilon_{xy} \\ \epsilon_{xz} &= \epsilon_{yz} = \epsilon_{zx} = \epsilon_{zy} = 0 \end{aligned}$$

$$\tilde{\epsilon} = \begin{pmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} & 0 \\ -\epsilon_{xy} & \epsilon_{xx} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{zz} \end{pmatrix}$$

磁気光学の式

$$\Delta\hat{N} = \hat{N}_+ - \hat{N}_- = \sqrt{\varepsilon_{xx} + i\varepsilon_{xy}} - \sqrt{\varepsilon_{xx} - i\varepsilon_{xy}} \approx i \frac{\varepsilon_{xy}}{\sqrt{\varepsilon_{xx}}}$$

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

磁気光学効果には対角・非対角両成分が寄与

Kerr効果の式

$$\begin{aligned}\Phi_K &= \theta_K + i\eta_K = -\frac{\Delta\theta}{2} - i\frac{\Delta r}{2r} = -i\frac{\hat{\Delta}r}{2\hat{r}} \approx i\frac{1}{2}\ln\left(\frac{\hat{r}_-}{\hat{r}_+}\right) \\ &= \frac{\varepsilon_{xy}}{(1-\varepsilon_{xx})\sqrt{\varepsilon_{xx}}}\end{aligned}$$

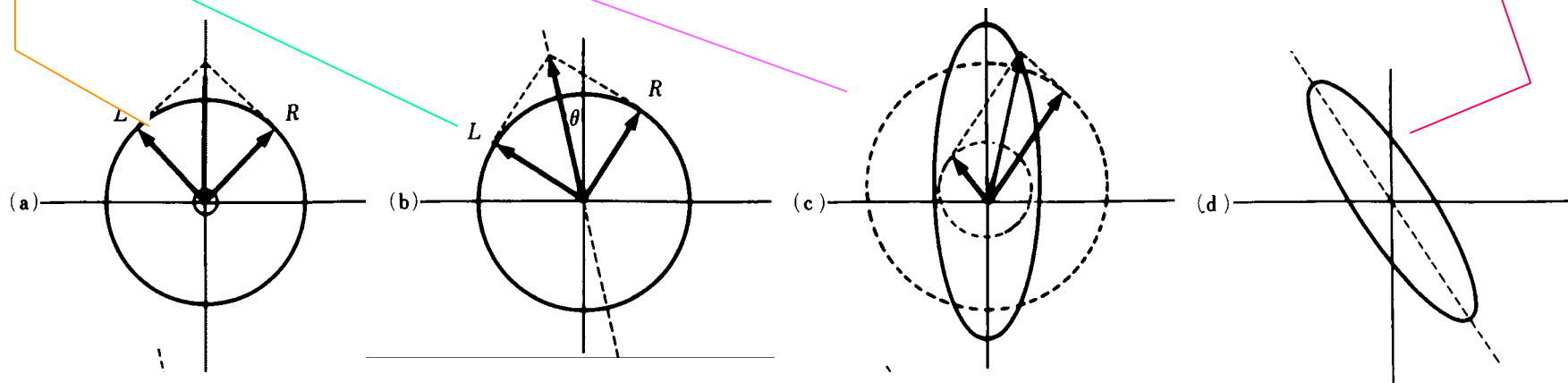
磁気光学効果の現象論

直線偏光は等振幅等速度の左右円偏光に分解できる

媒質を通ることにより左円偏光の位相と右円偏光の位相が異なると旋光する

媒質を通ることにより左円偏光の振幅と右円偏光の振幅が異なると楕円になる

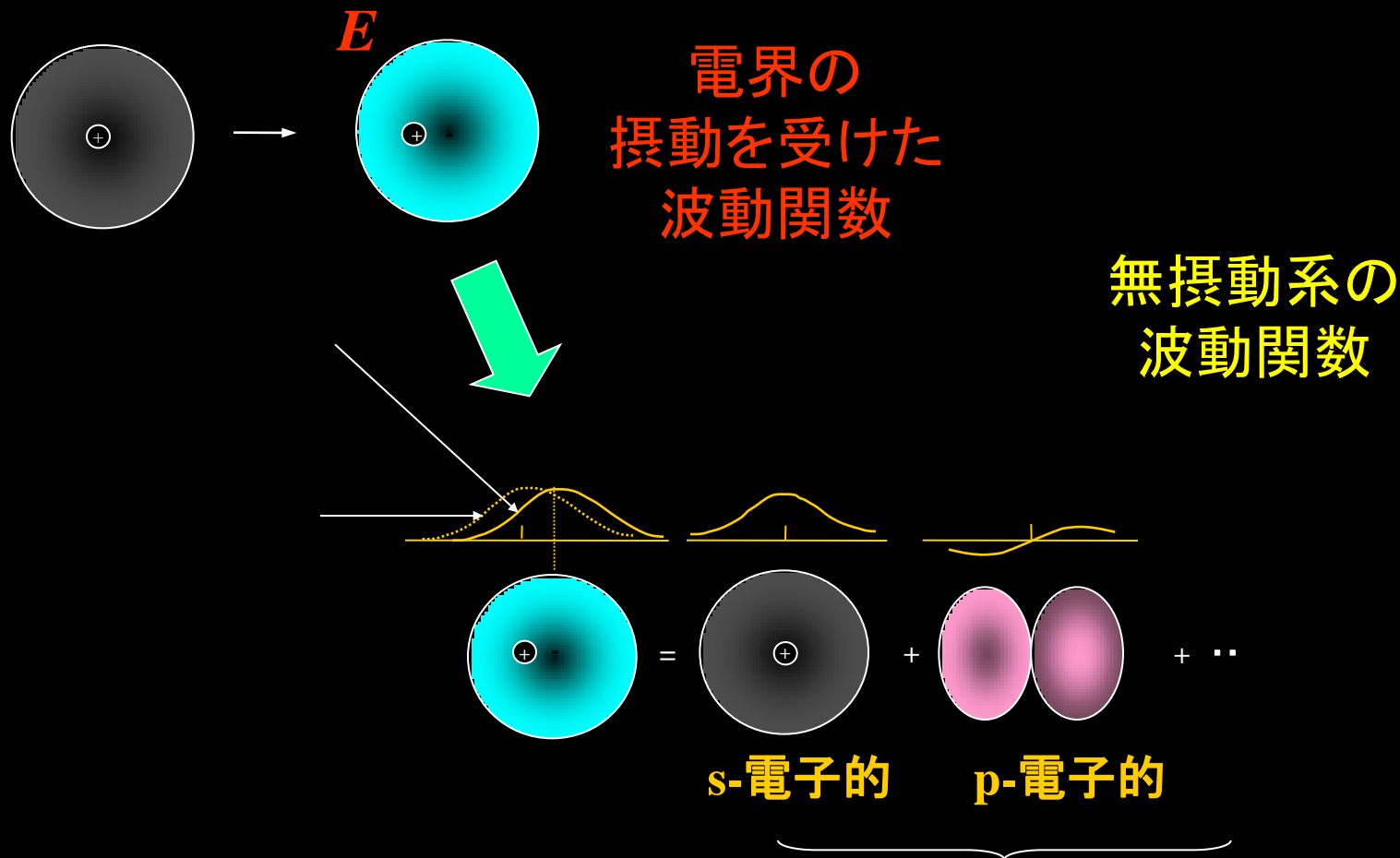
一般には、主軸の傾いた楕円になる



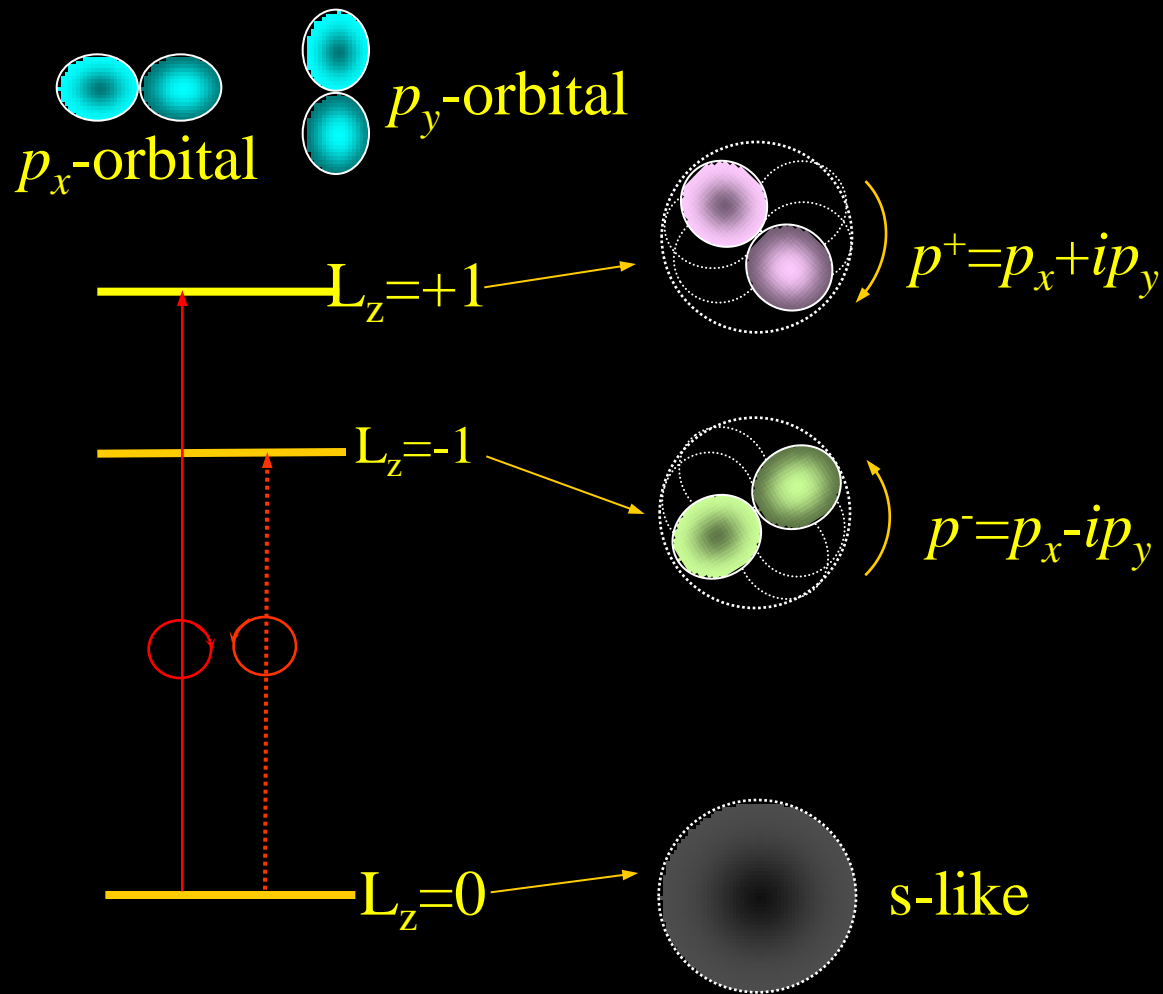
磁気光学効果の量子論

- 磁化の存在→スピン状態の分裂
 - 左右円偏光の選択則には影響しない
- スピン軌道相互作用
- 右(左)回り光吸収→右(左)回り電子運動誘起
- 大きな磁気光学効果の条件
 - 遷移強度の強い許容遷移が存在すること
 - スピン軌道相互作用の大きな元素を含む
 - 磁化には必ずしも比例しない

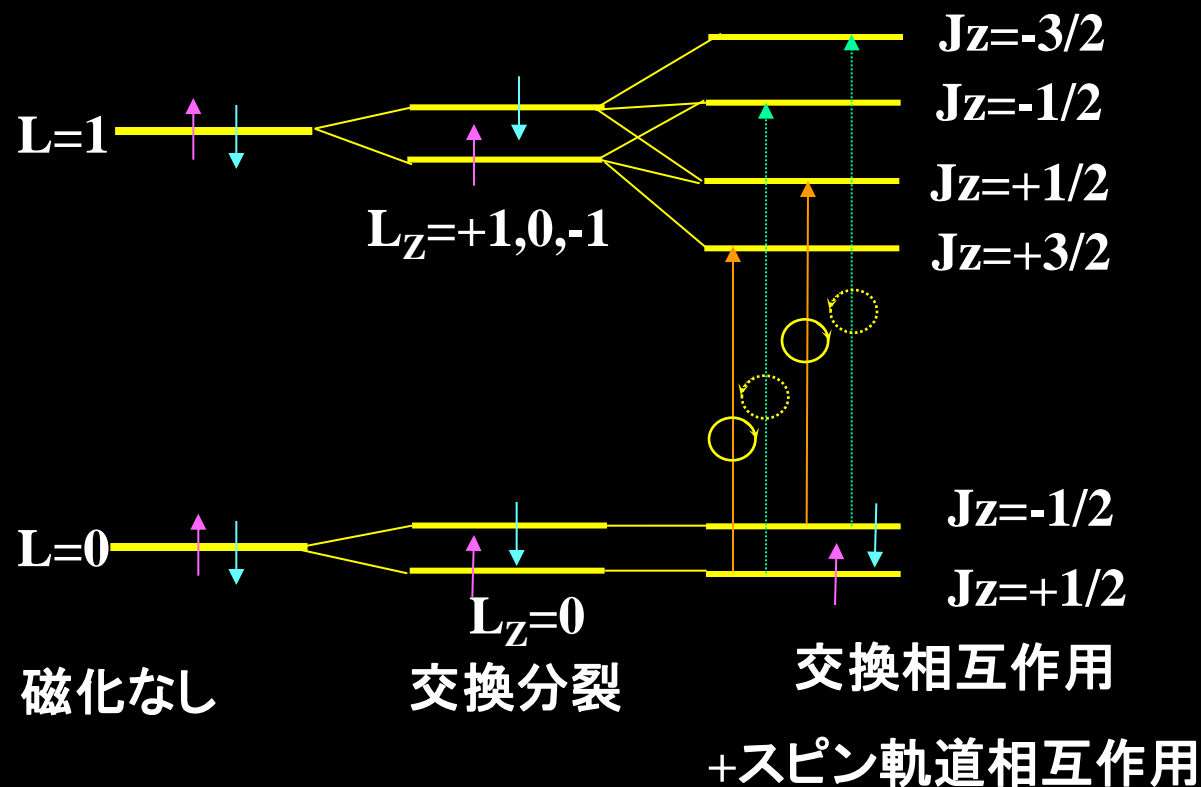
電子分極のミクロな扱い



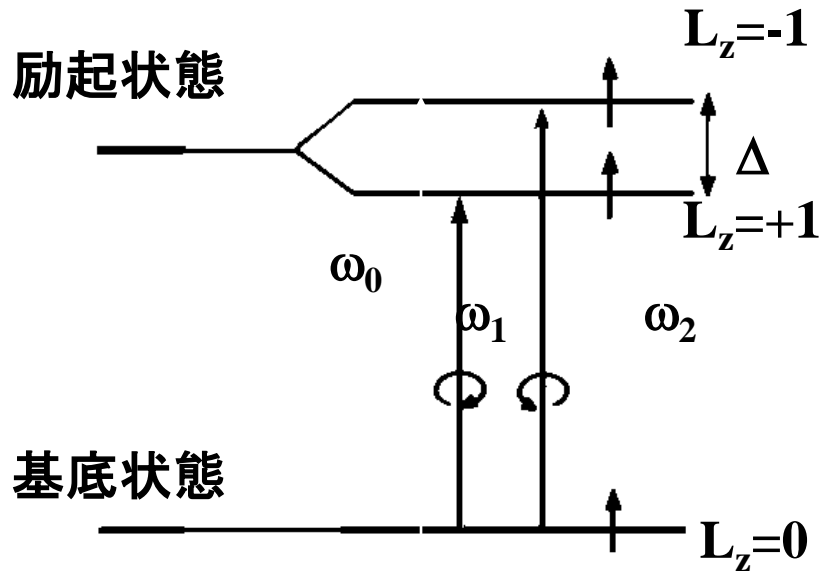
円偏光の吸収と電子構造



スピン軌道相互作用の重要性

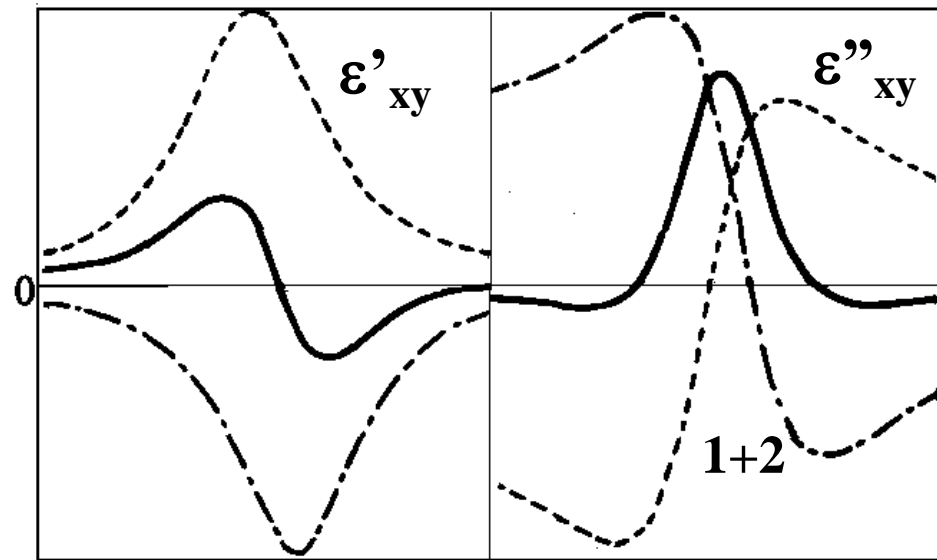


反磁性型スペクトル



磁化の無いとき

磁化のあるとき



光子エネルギー

光子エネルギー

1+2

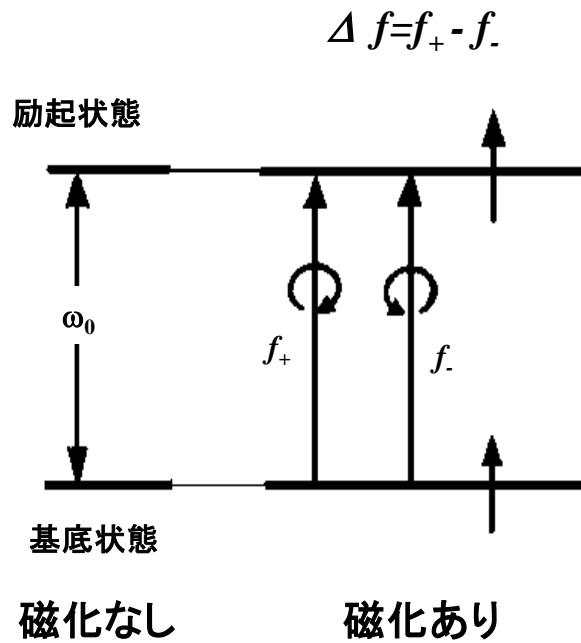
誘電率の非対角成分のピーク値

$$\varepsilon''_{xy} \Big|_{peak} = \frac{Ne^2 f \Delta_{so}}{4m\varepsilon_0 \omega \gamma^2}$$

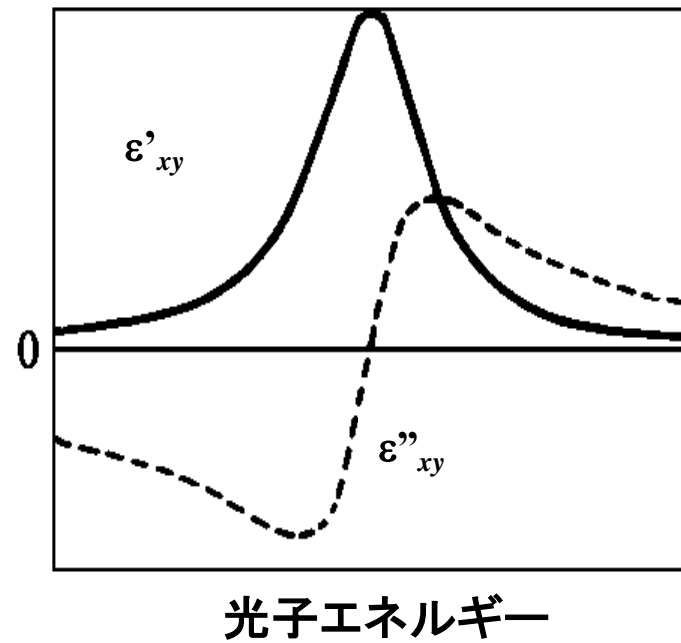
大きな磁気光学効果を持つ条件:

- ・光学遷移の振動子強度 f が大きい
- ・スピン軌道相互作用が大きい
- ・遷移のピーク幅が狭い

常磁性型スペクトル



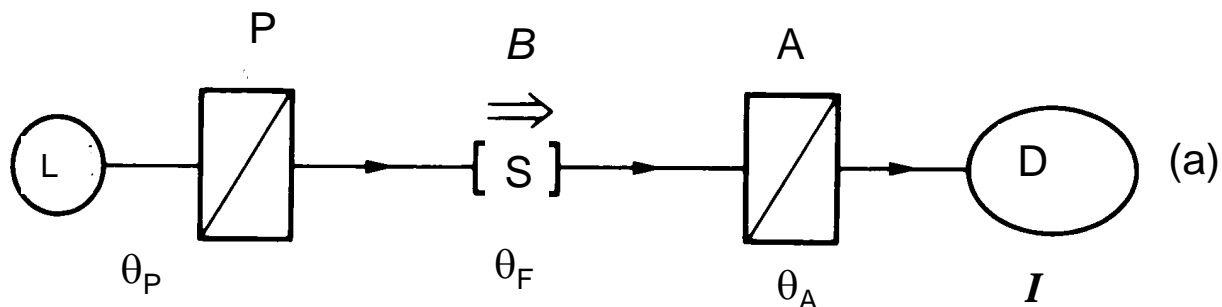
誘電率の非対角要素



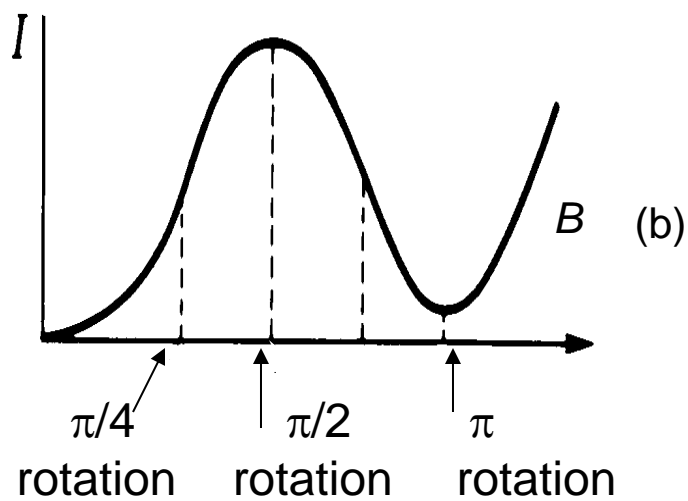
磁気光学効果の測定法

- 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

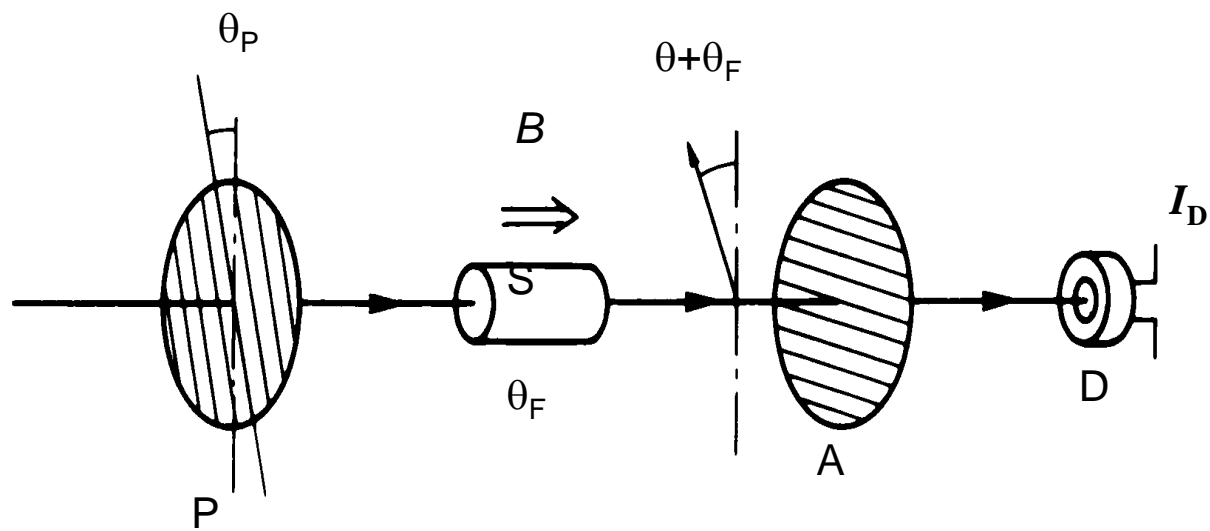
直交偏光子法



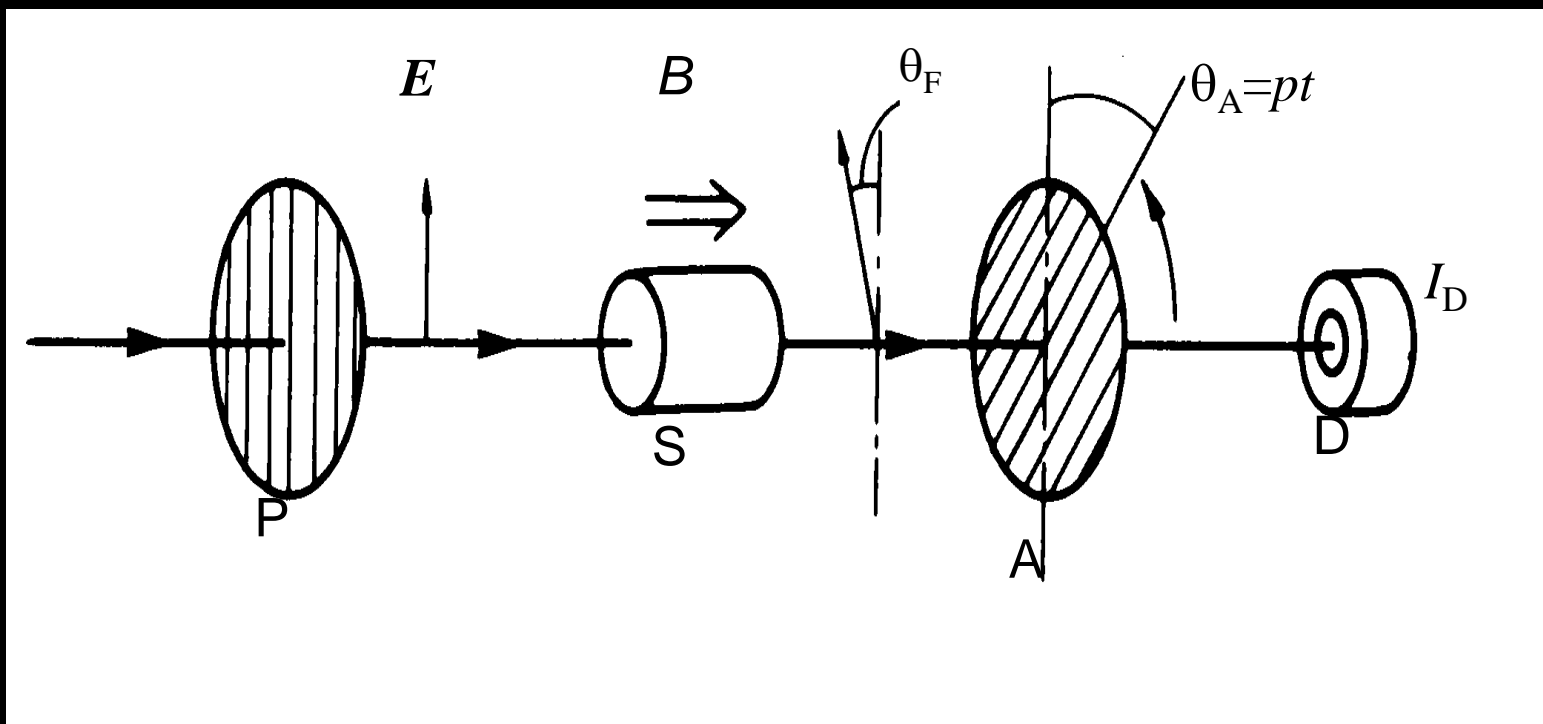
$$\theta_P = \theta_A + \pi/2$$



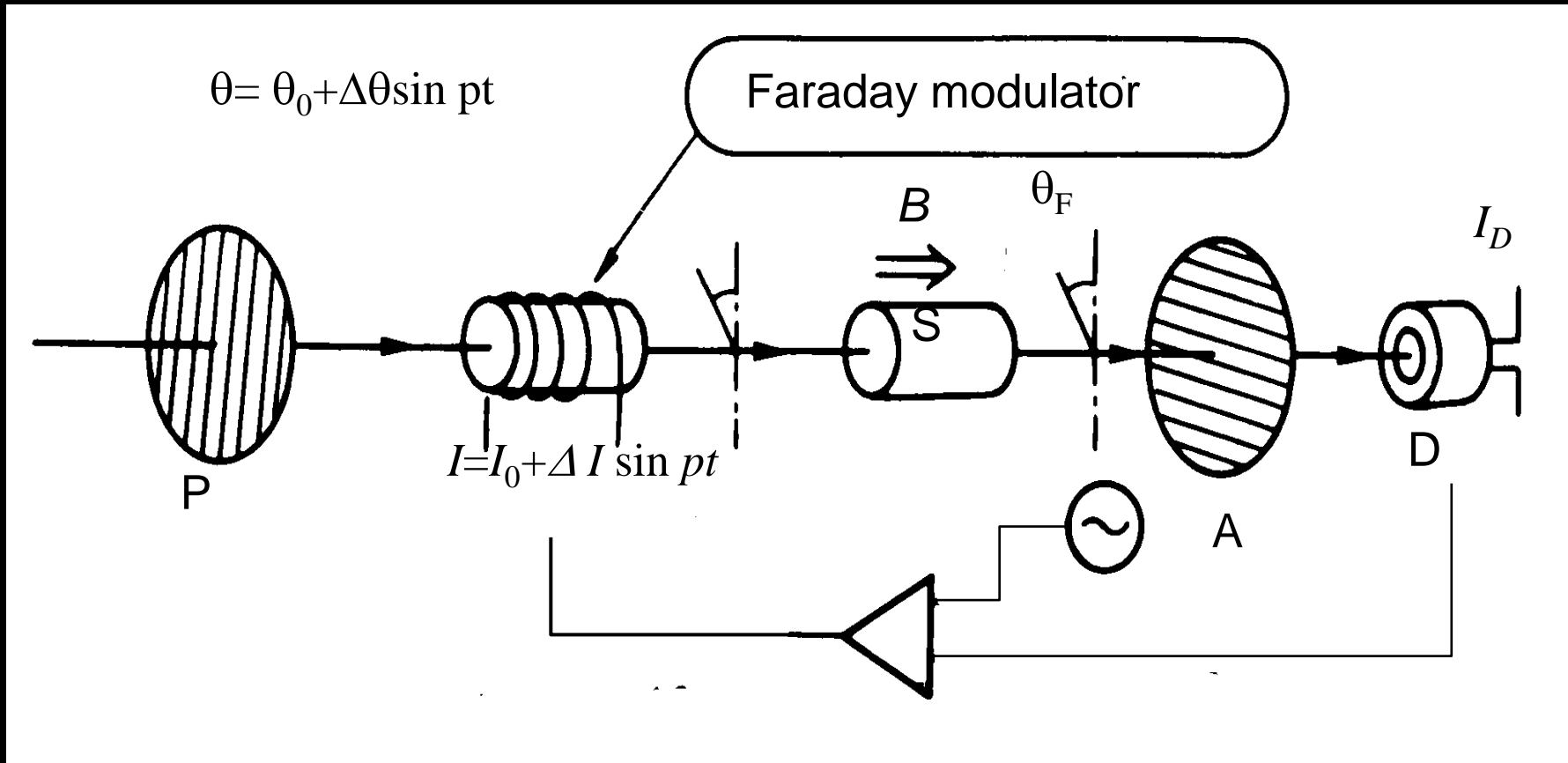
振動偏光子法



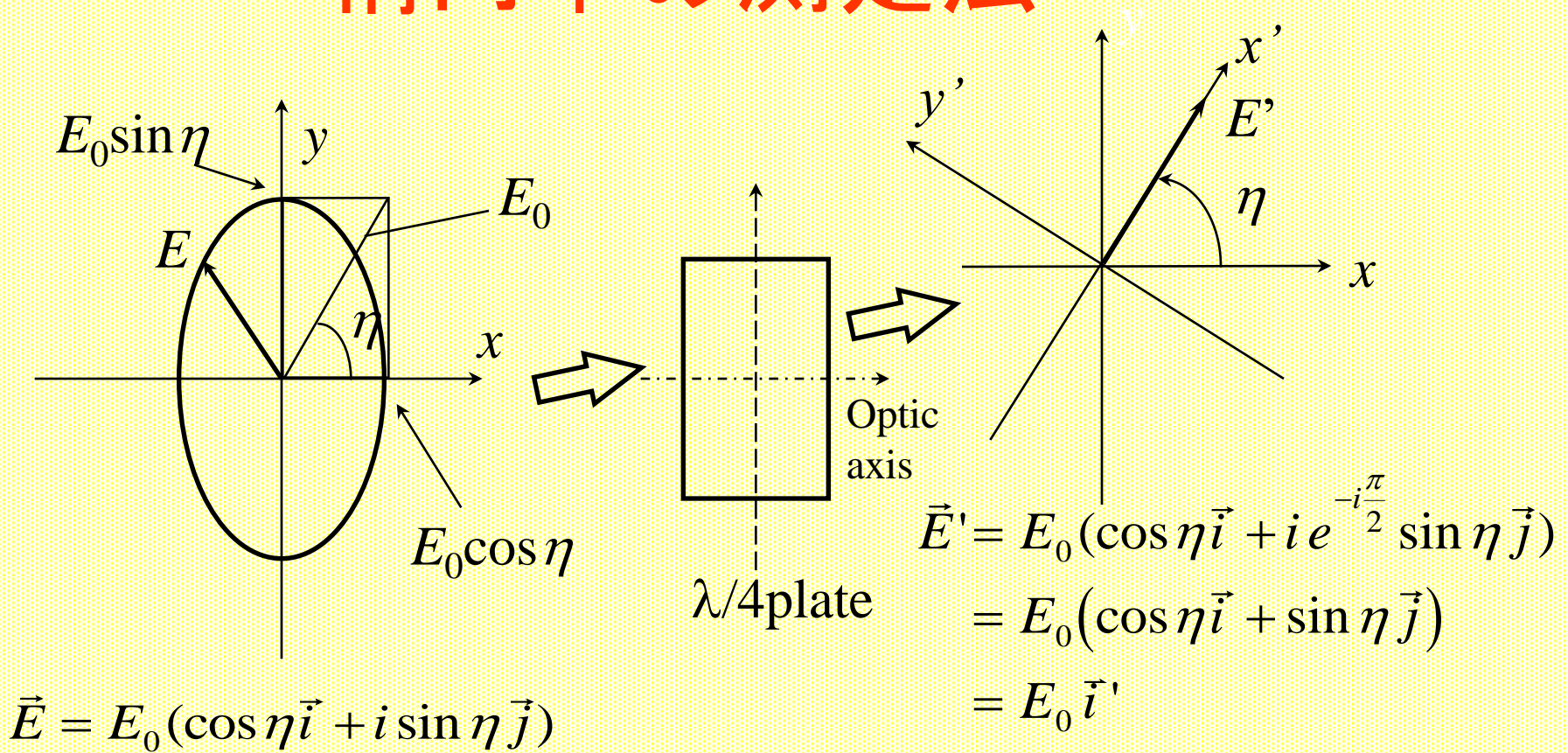
回轉檢光子法



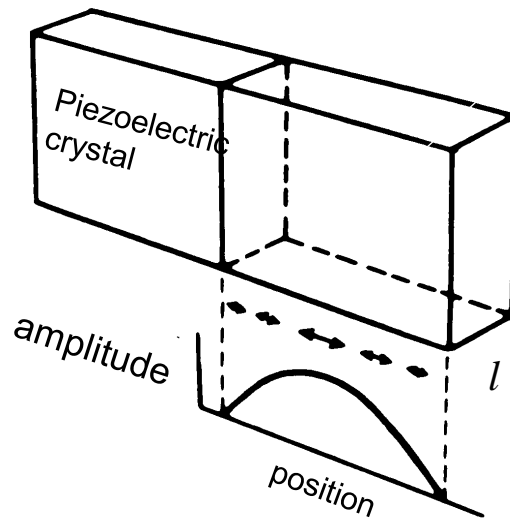
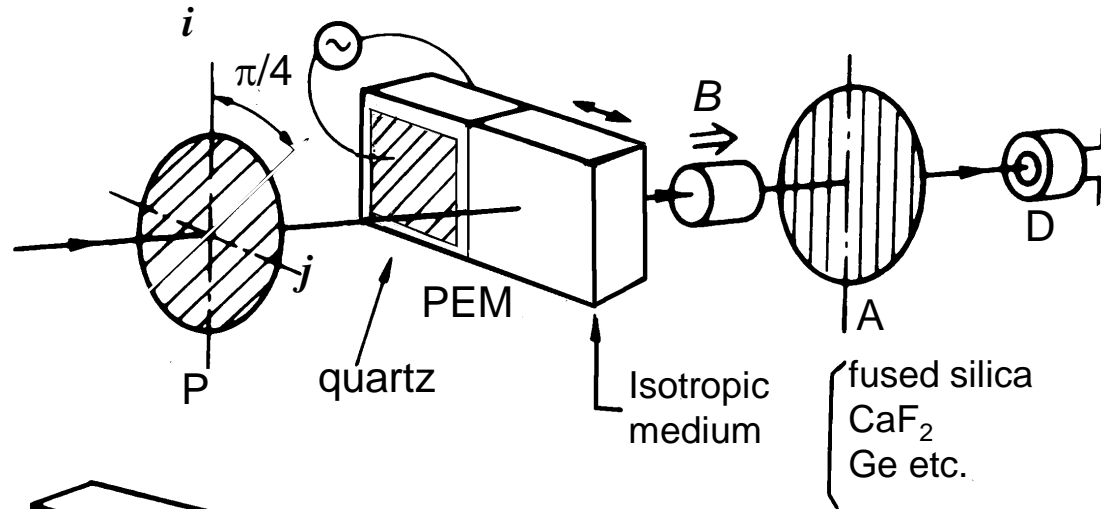
ファラデー変調器法



楕円率の測定法



光学遅延変調法

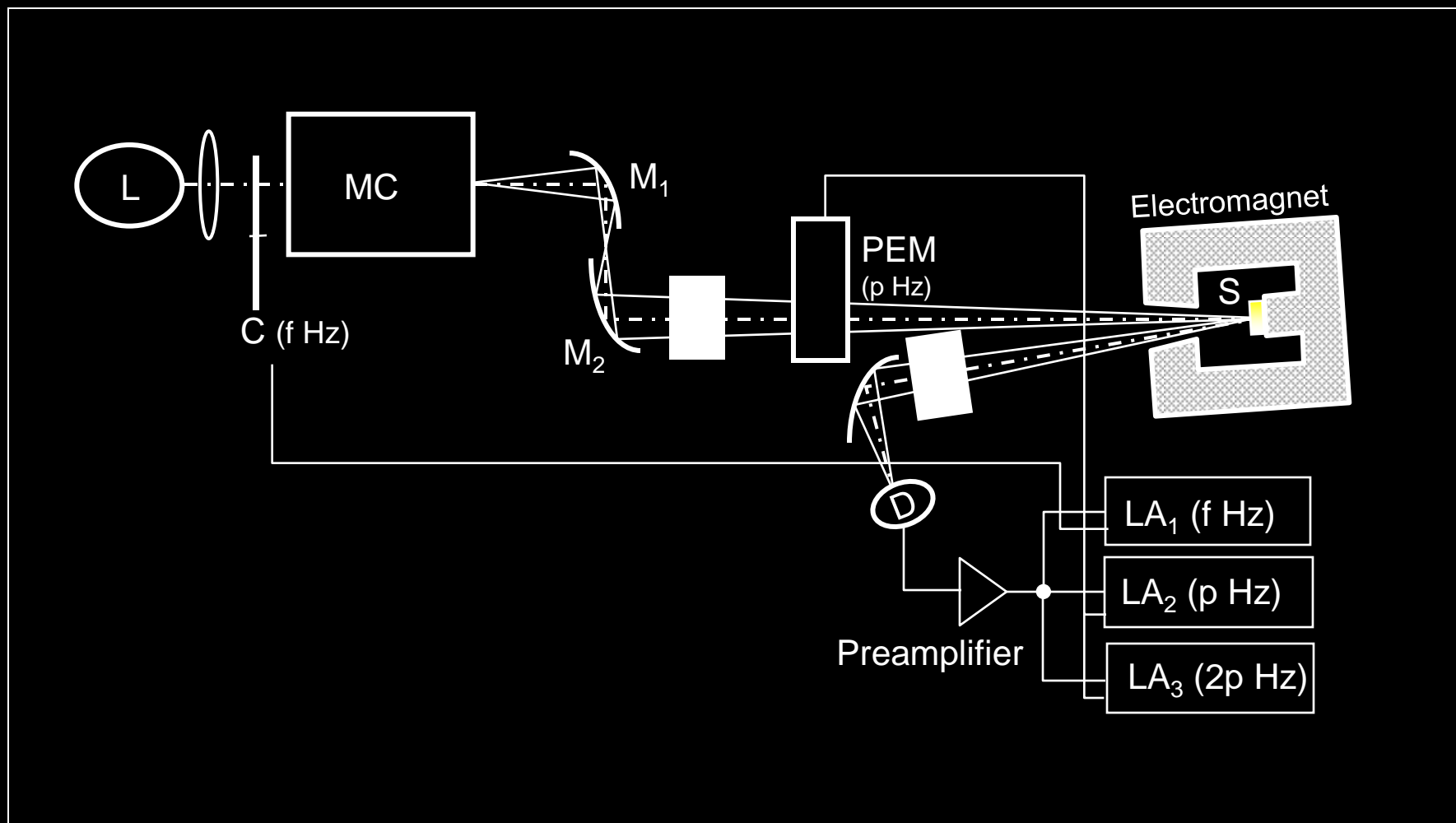


Retardation

$$\delta = (2\pi/\lambda)\Delta n l \sin pt$$

$$= \delta_0 \sin pt$$

磁気光学スペクトル測定系



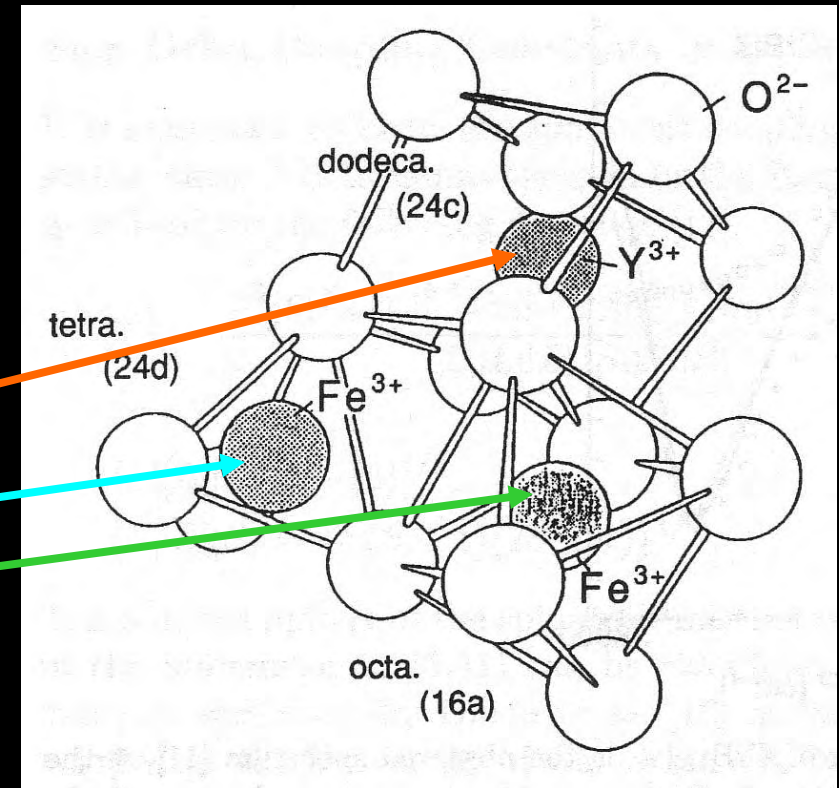
各種材料の磁気光学効果

- 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

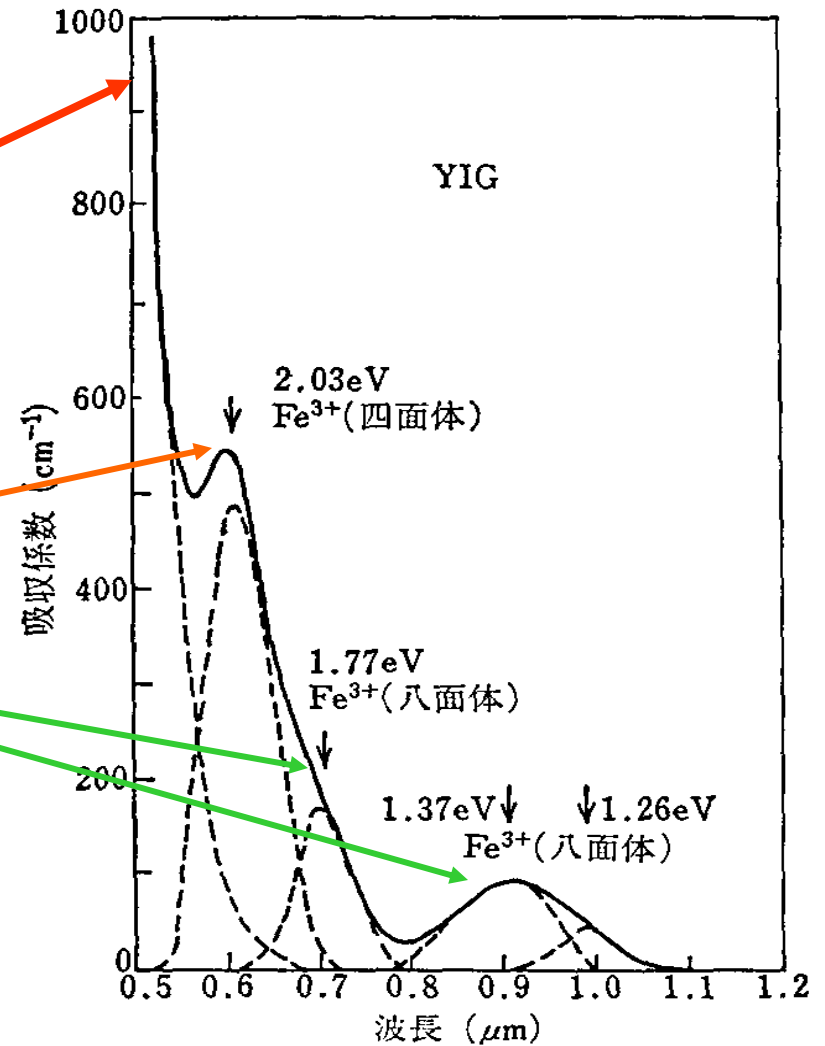
- 磁性ガーネット:
 - YIG($Y_3Fe_5O_{12}$)をベースとする鉄酸化物; Y→希土類、Biに置換して物性制御
- 3つのカチオンサイト:
 - 希土類 12面体位置
 - 鉄 Fe^{3+} 4面体位置 8面体位置、反強磁性結合
 - フェリ磁性体



ガーネットの結晶構造

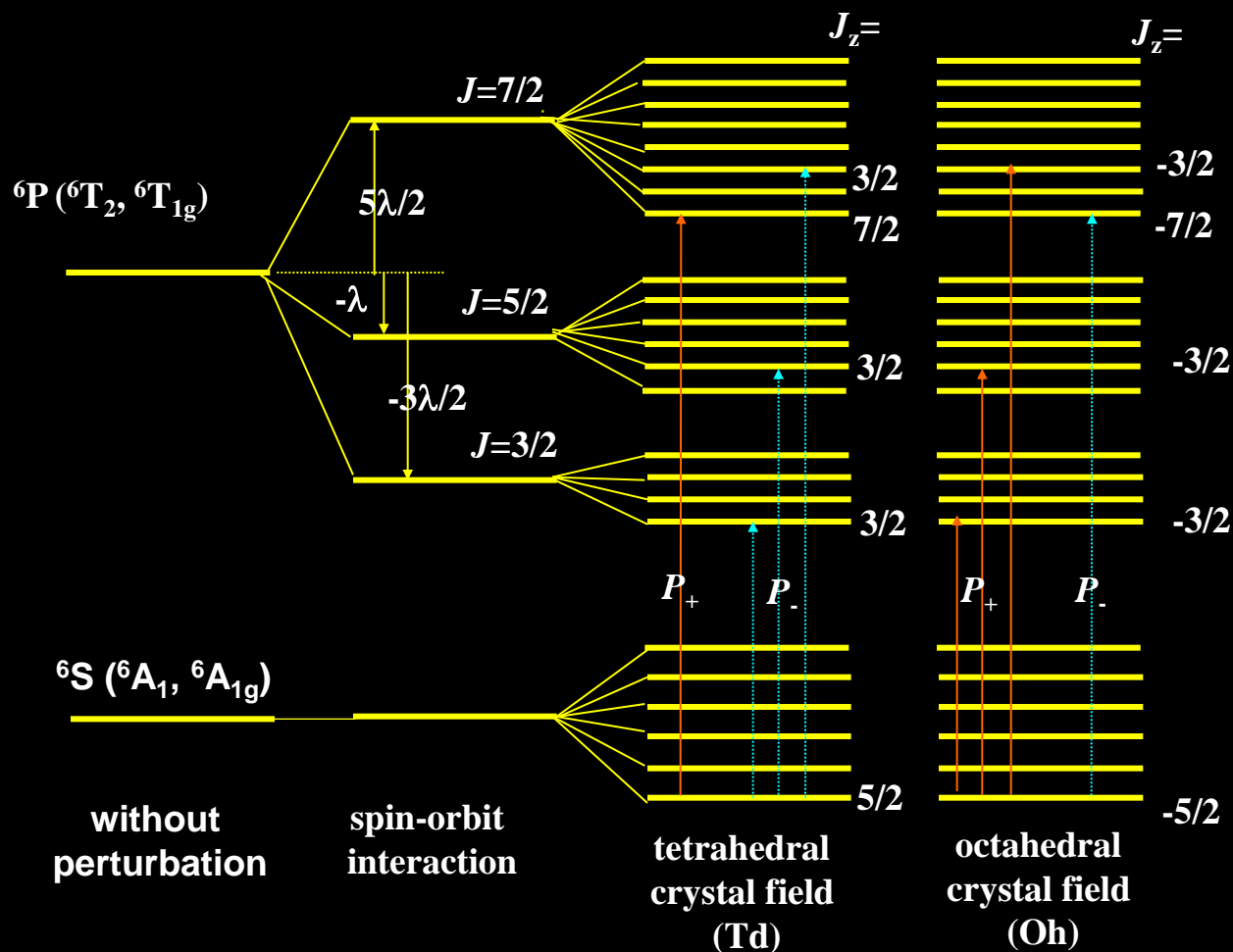
YIGの光吸収スペクトル

- 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⁾

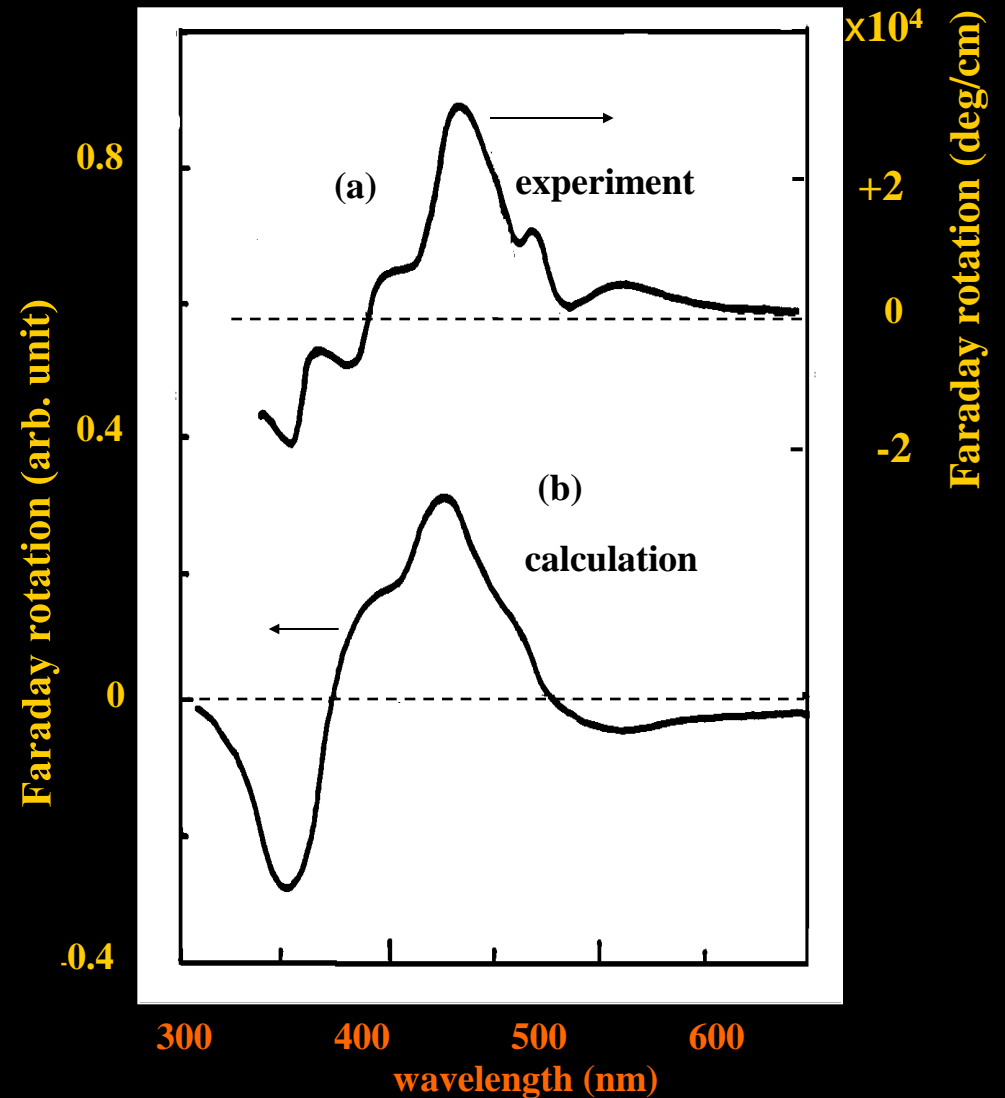
磁性ガーネットの $3d^5 2p^6$ 電子状態



品川による

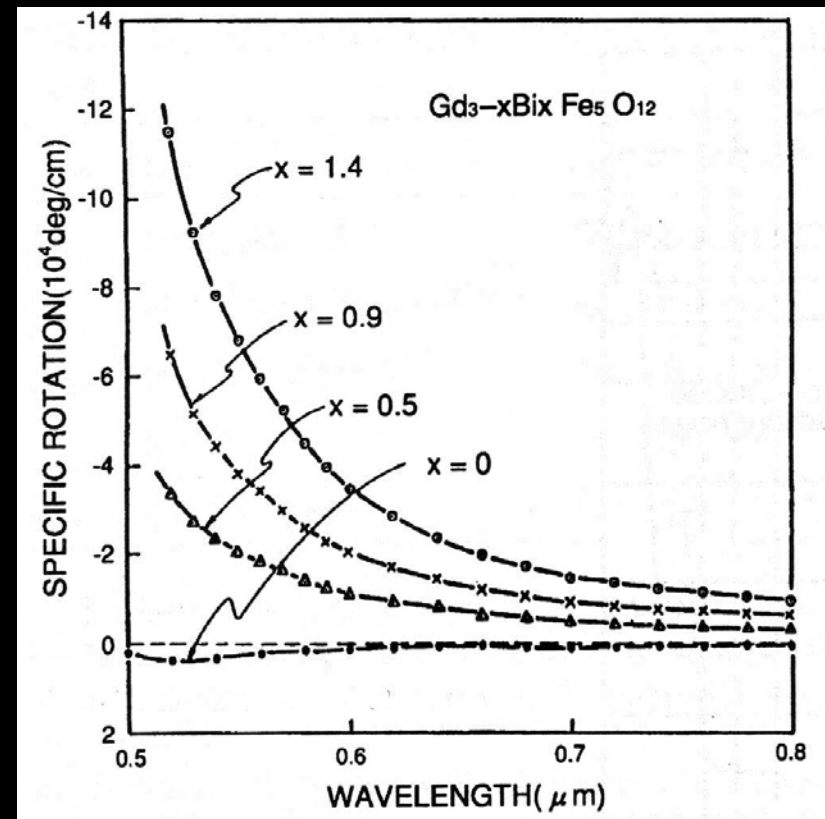
YIGの磁気光学スペクトル

- 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



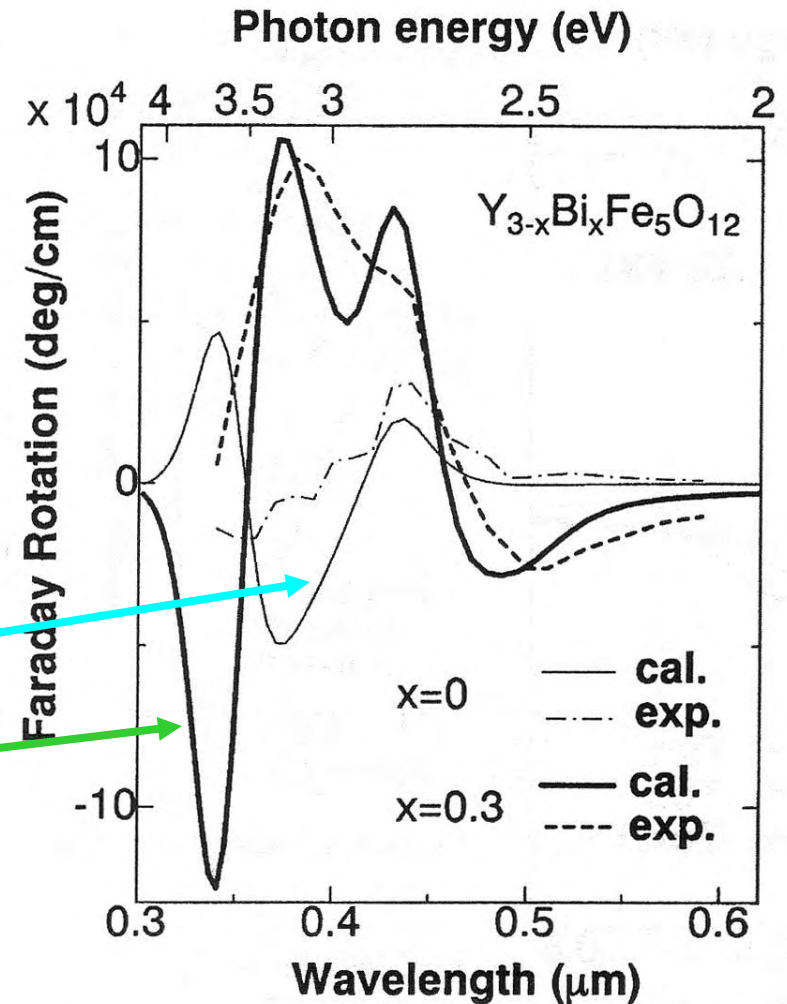
Bi置換YIGの磁気光学スペクトル

実験結果と計算結果

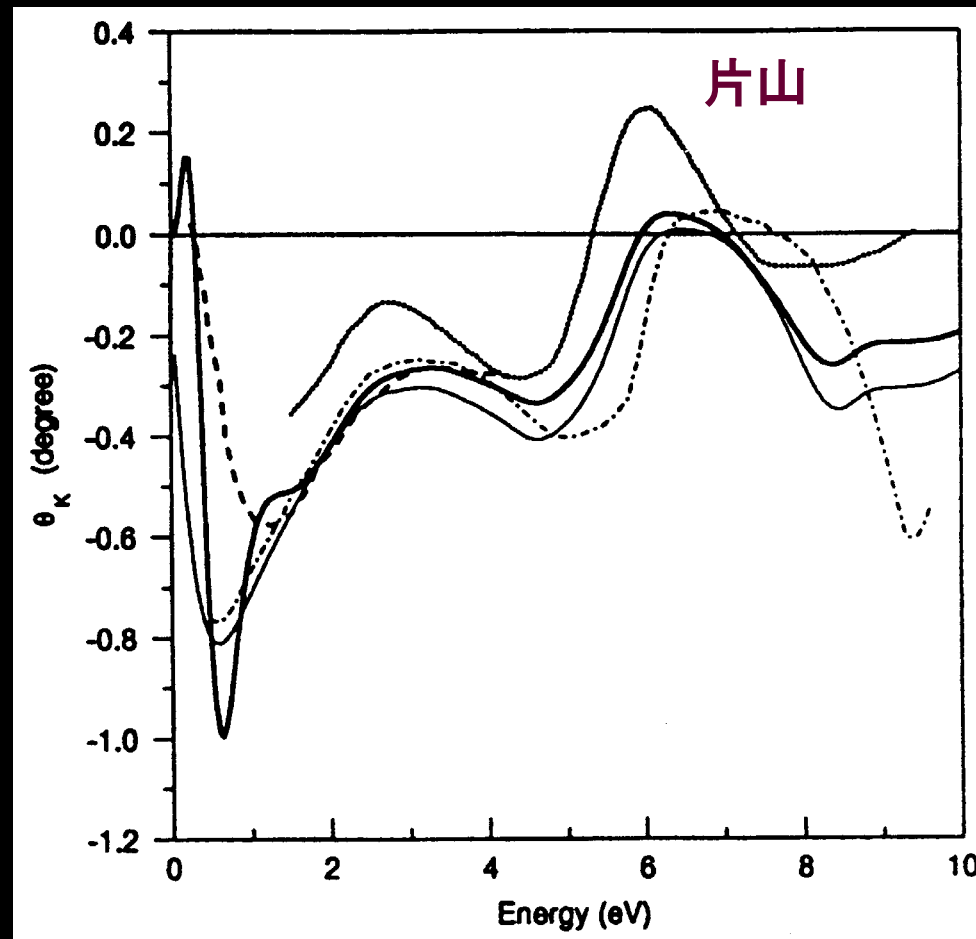
Table 5.6. Parameters used for calculation of Faraday rotation spectrum

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 $\text{Bi}_{0.3}\text{Y}_{2.7}\text{IG}$



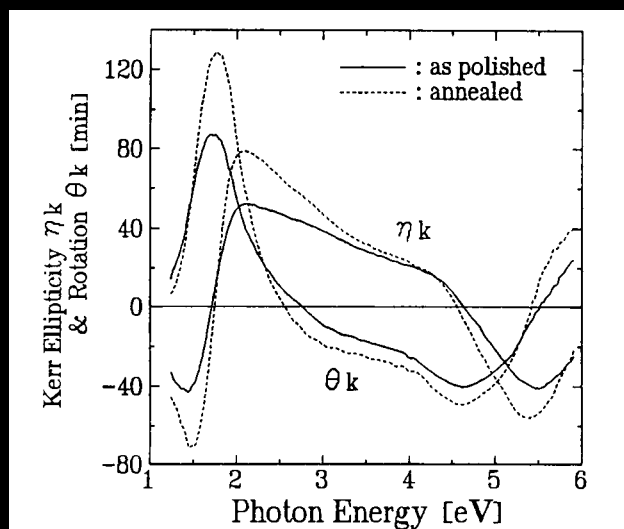
Feのカー回転スペクトルの 理論と実験



PtMnSbの磁気光学スペクトル

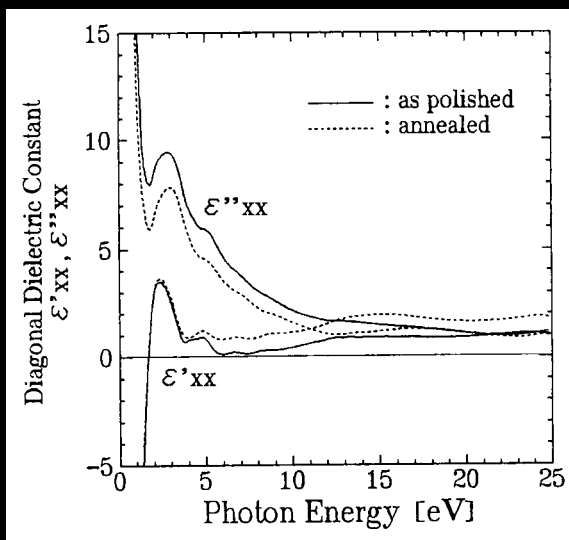
$$\Theta_K = \frac{\epsilon_{xy}}{\sqrt{\epsilon_{xx}(1-\epsilon_{xx})}}$$

カー一回転と楕円率



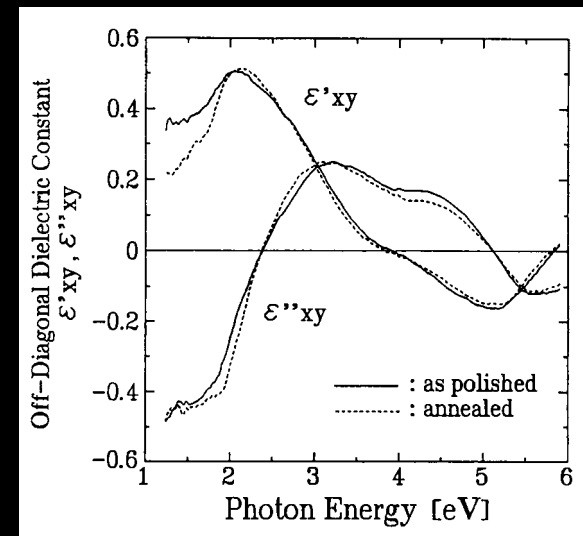
(a)

誘電率対角成分



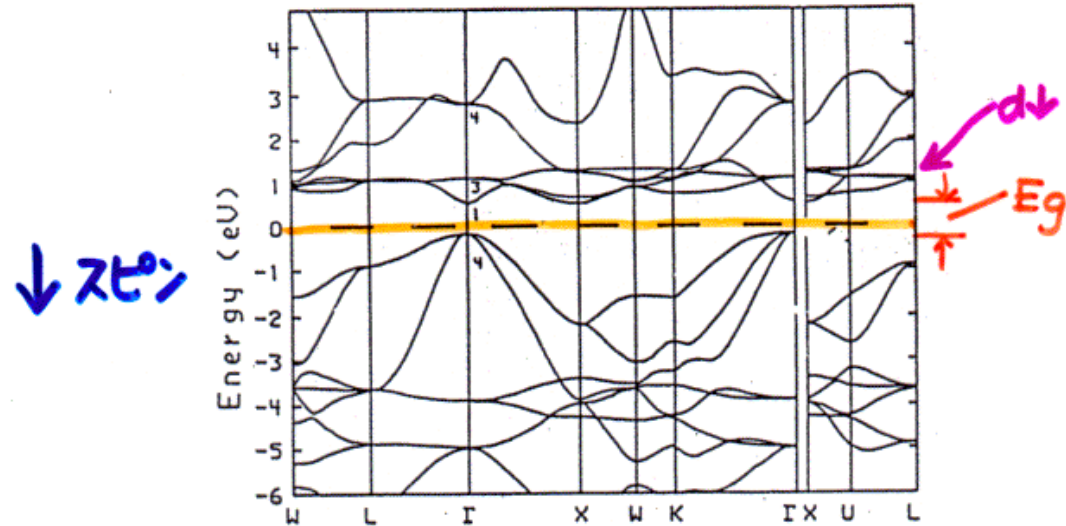
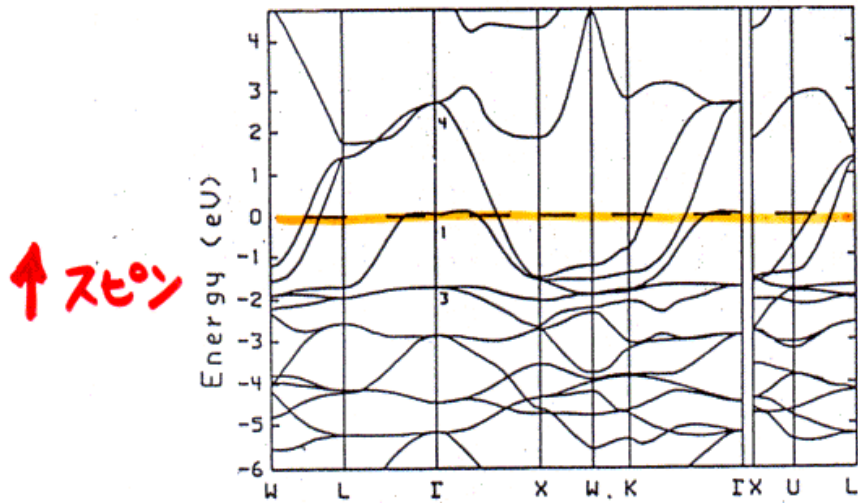
(b)

誘電率非対角成分



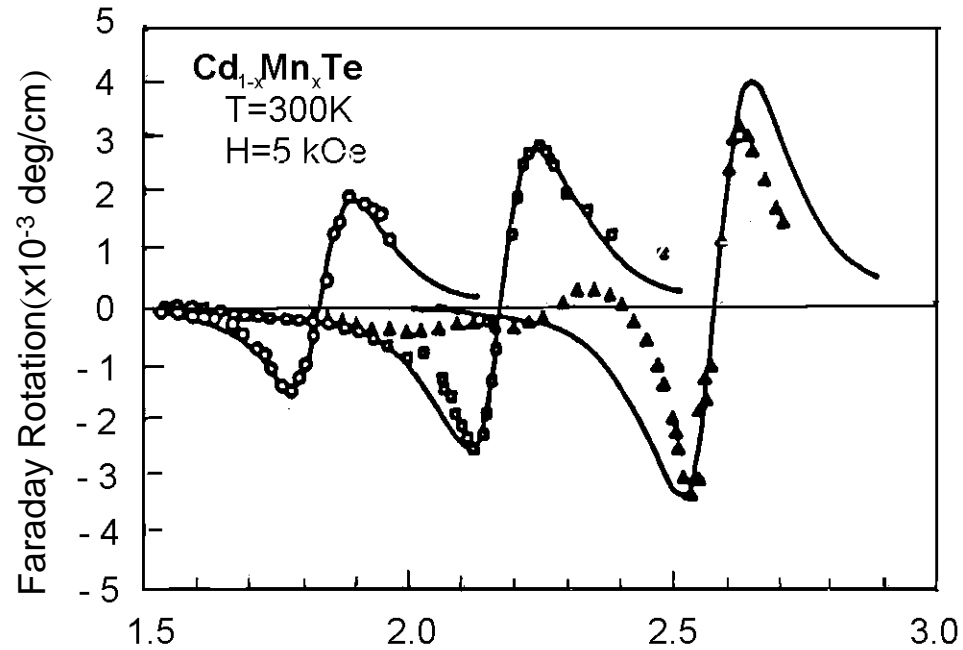
(c)

ハーフメタル: PtMnSb

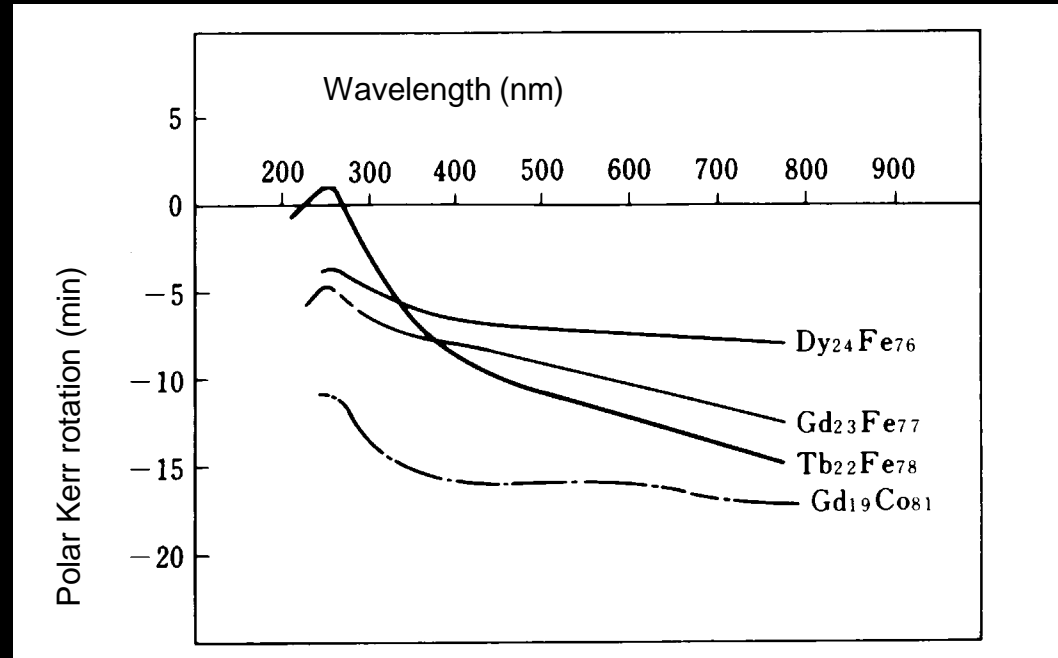


- ↑ スピンは金属、↓ スピンは半導体

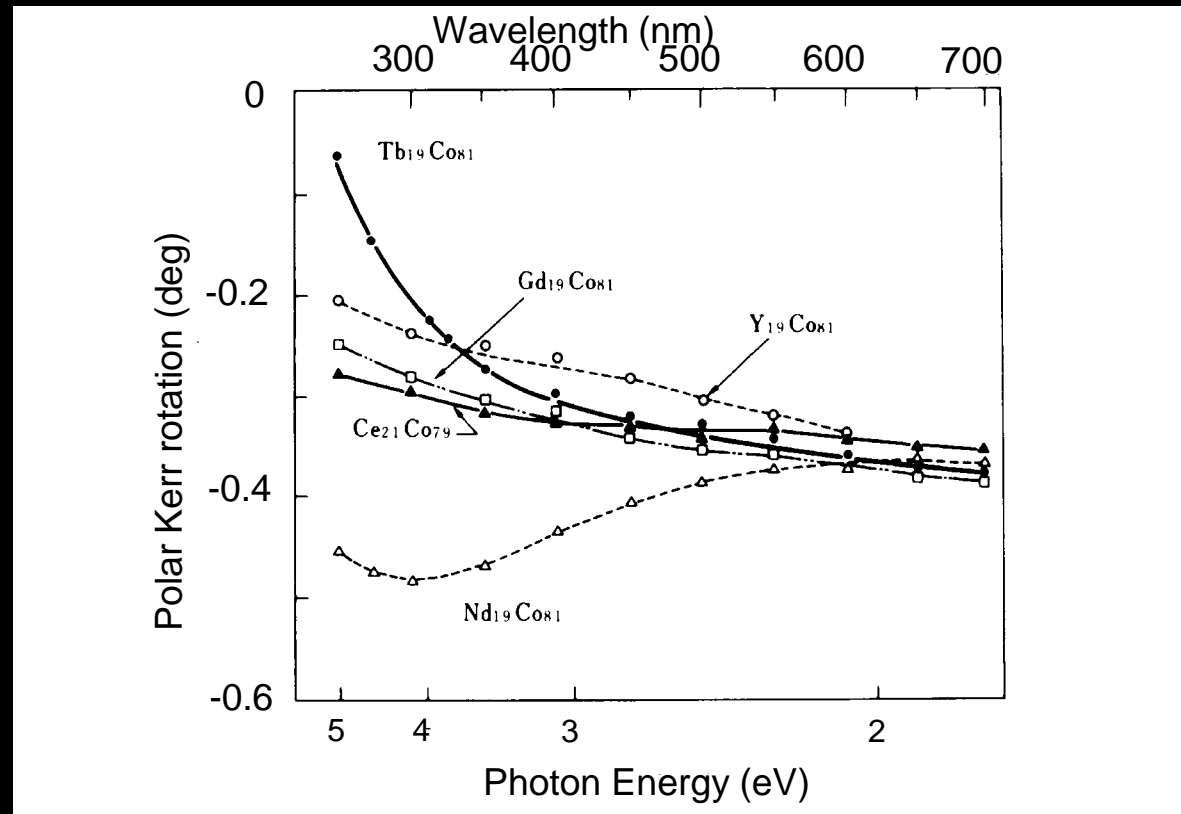
希薄磁性半導体CdMnTe



アモルファスRT膜の磁気光学効果



アモルファスRT膜の磁気光学効果



人工構造膜の磁気光学効果

- 固溶系と非固溶系

- TM/Cu, Ag, Au → 非固溶系: 界面急峻
- TM/Pt, Pd → 固溶系: 界面合金化

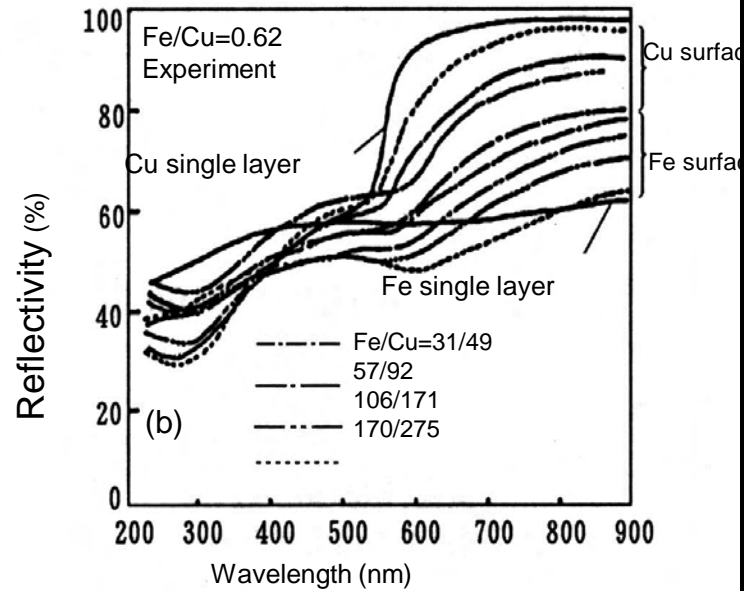
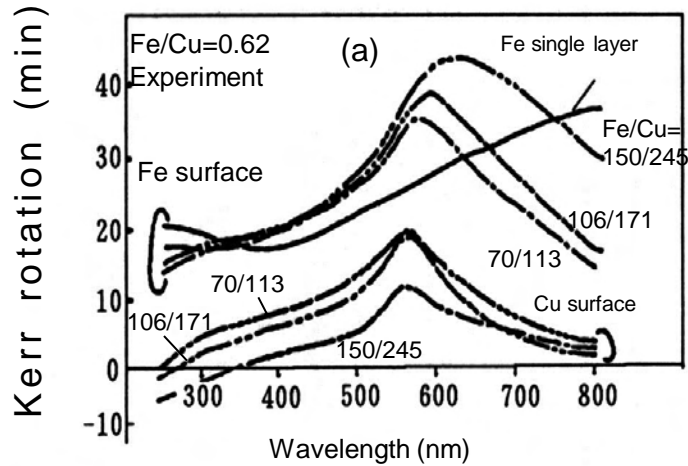
- 人工格子・多層膜と特性長

- $L^* \sim \lambda$ (媒質中の光の波長): MOエンハンス効果
- $L^* \sim d_s$ (界面の荒さ) → 相互拡散、合金化
- $L^* \sim \lambda_D$ (電子のドブロイ波長) → 量子閉じこめ
- $L^* \sim a$ (原子のサイズ) → バンドの改変、近接効果

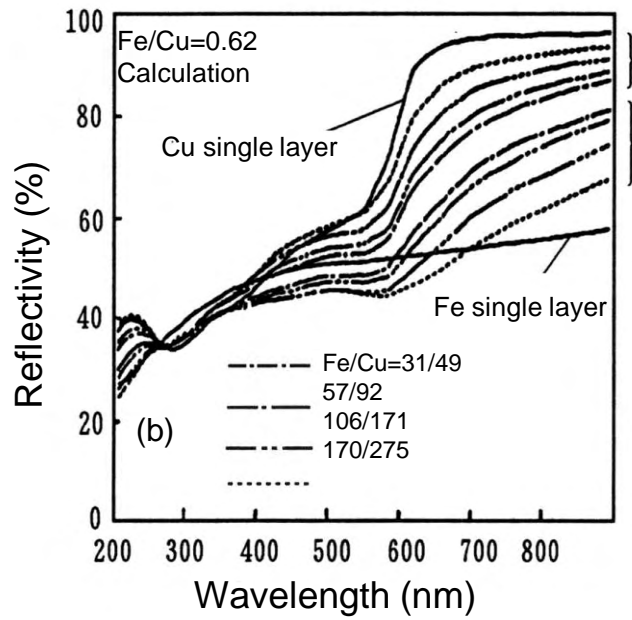
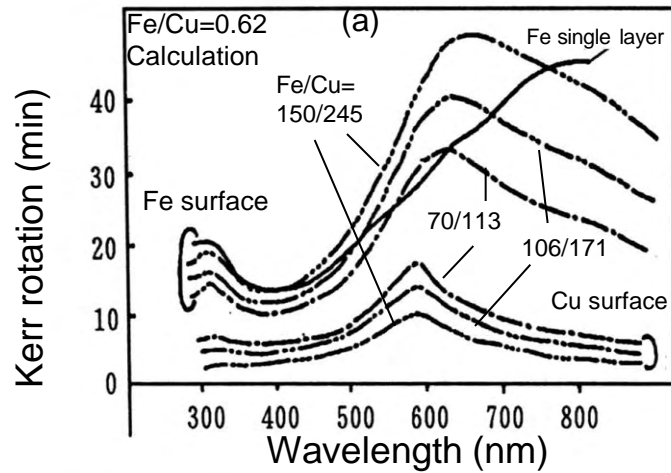
Fe/Cu, Fe/Au組成変調多層膜の 磁気光学効果

- 媒体中の波長のオーダーの層厚
 - 貴金属のプラズマ端でのエンハンス効果
 - 近似的には実効誘電率で説明可能
 - 変調周期依存性は多重反射・干渉効果で説明可能
 - 変調周期が数nm以下になると説明できなくなる
(界面の凹凸や界面付近の相互拡散が無視できない:合金化などが起きる)

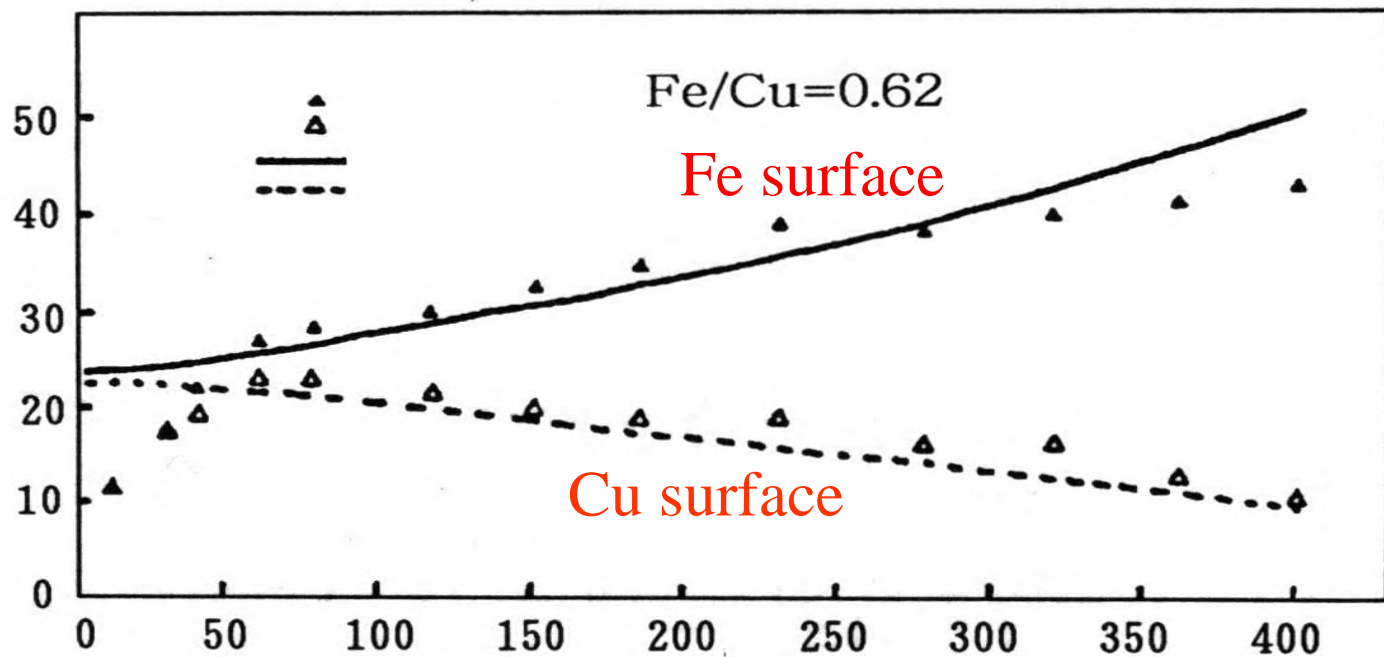
種々の層厚をもった Fe/Cu組成変調多層膜 の磁気光学スペクトル および反射スペクトル (実験値)



種々の層厚をもった Fe/Cu組成変調多層膜の磁 気光学スペクトルおよび 反射スペクトル（計算 値）



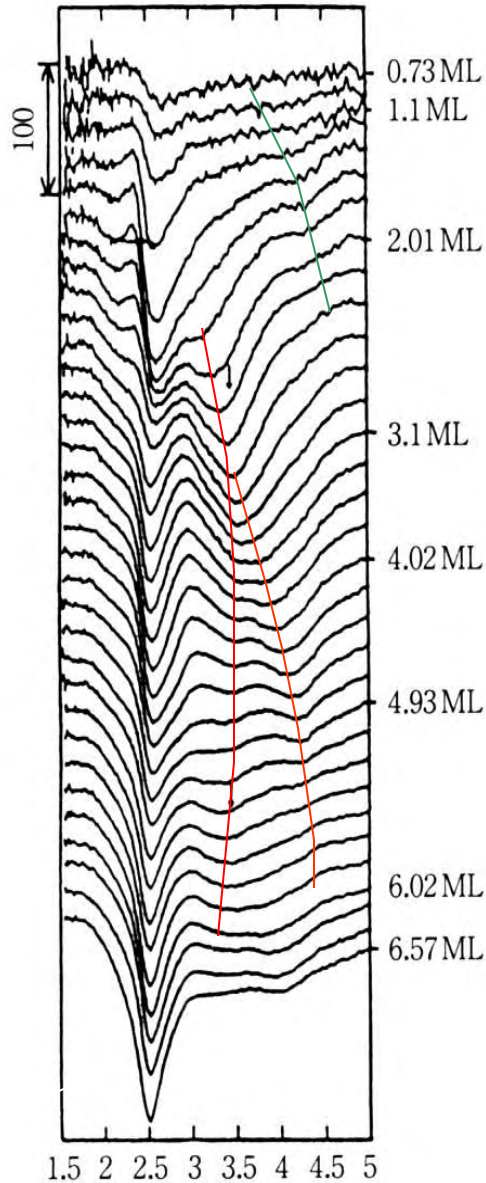
Fe/Cu組成変調多層膜のカー回転角の変調周期依存性。▲△実験値、実線および点線：計算値



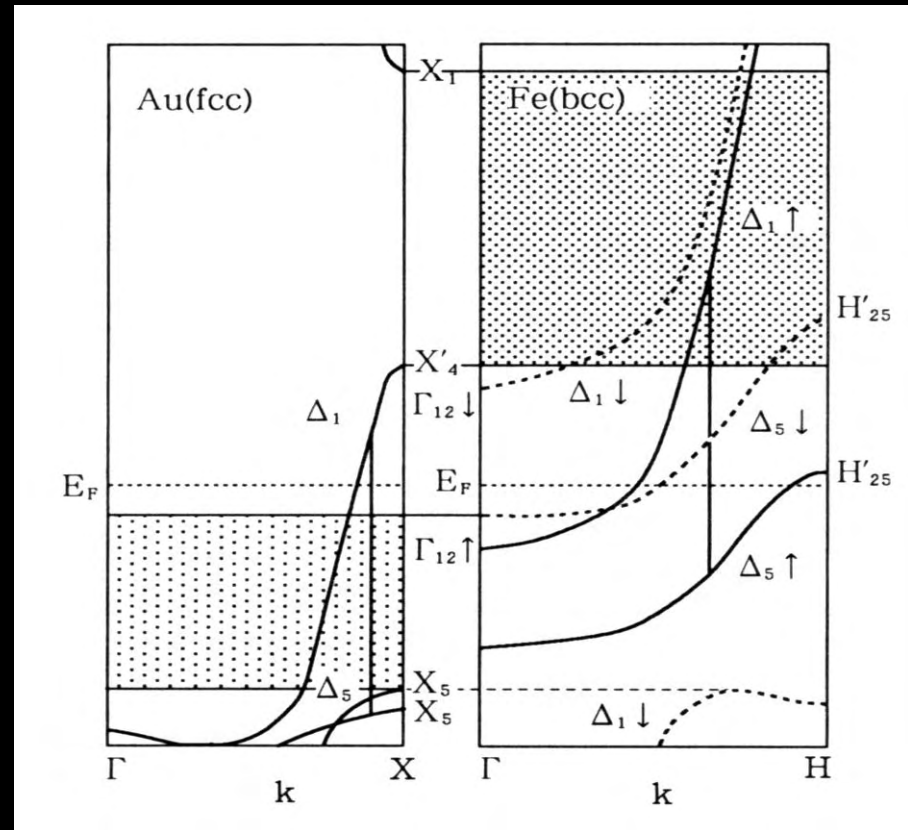
Fe/Au磁性超薄膜の磁気光学効果

- MBE法でMgO基板上にエピタキシャル成長したAu(100)薄膜の上にFe超薄膜を作製し、その上に保護層としてAuの薄いキャップ層をかぶせた三層膜における新しい光学遷移
- 当初：2Dのバンドによると同定→その後、Fe層内での電子の量子閉じこめによるとして説明された。

Au/Fe/Au超薄膜の磁気光学カー回転スペクトルのFe層厚依存性

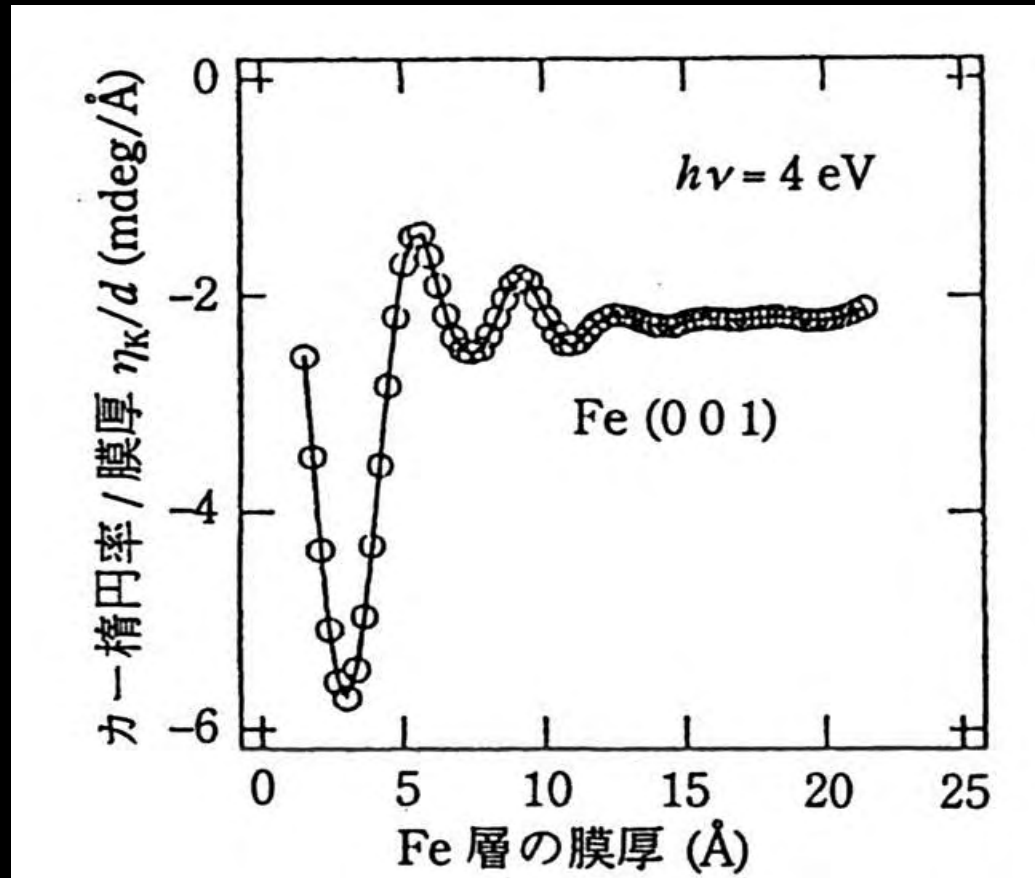


Auの
プラズマ

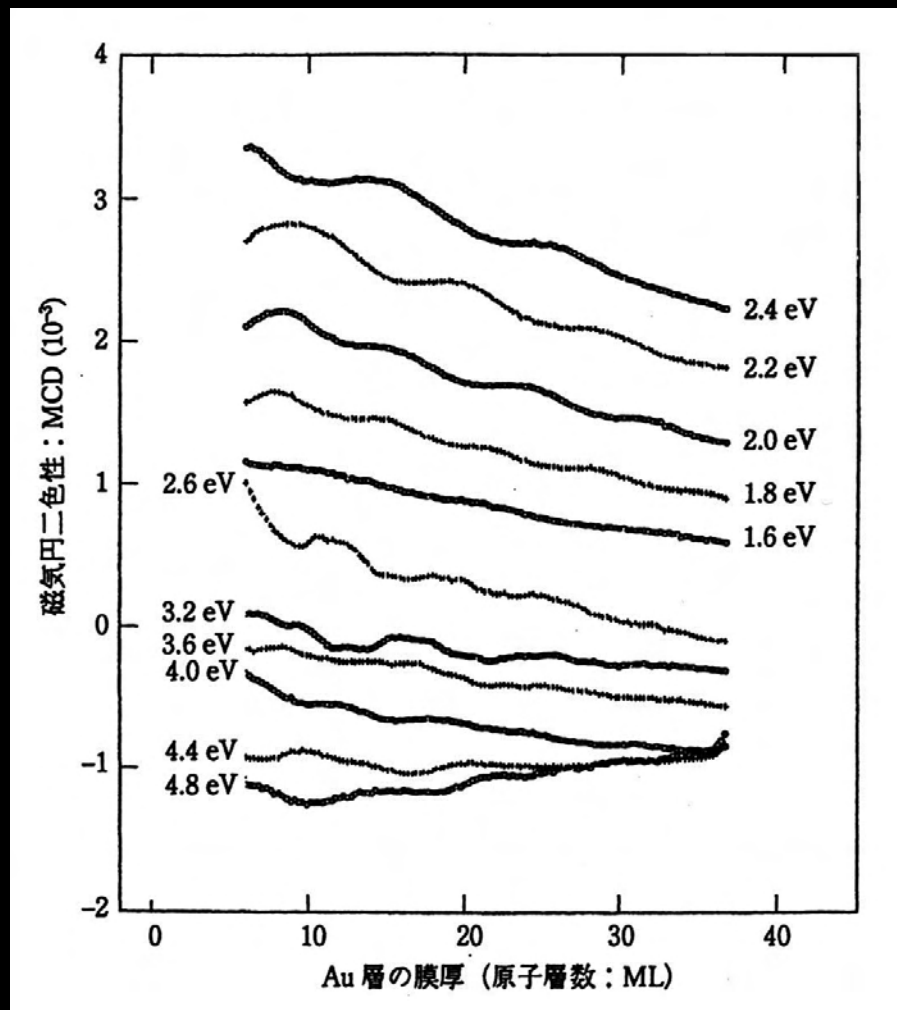


Au/Fe接合におけるバンド構造の関係

4eVにおける1層あたりのカー楕円率の Fe層厚依存性



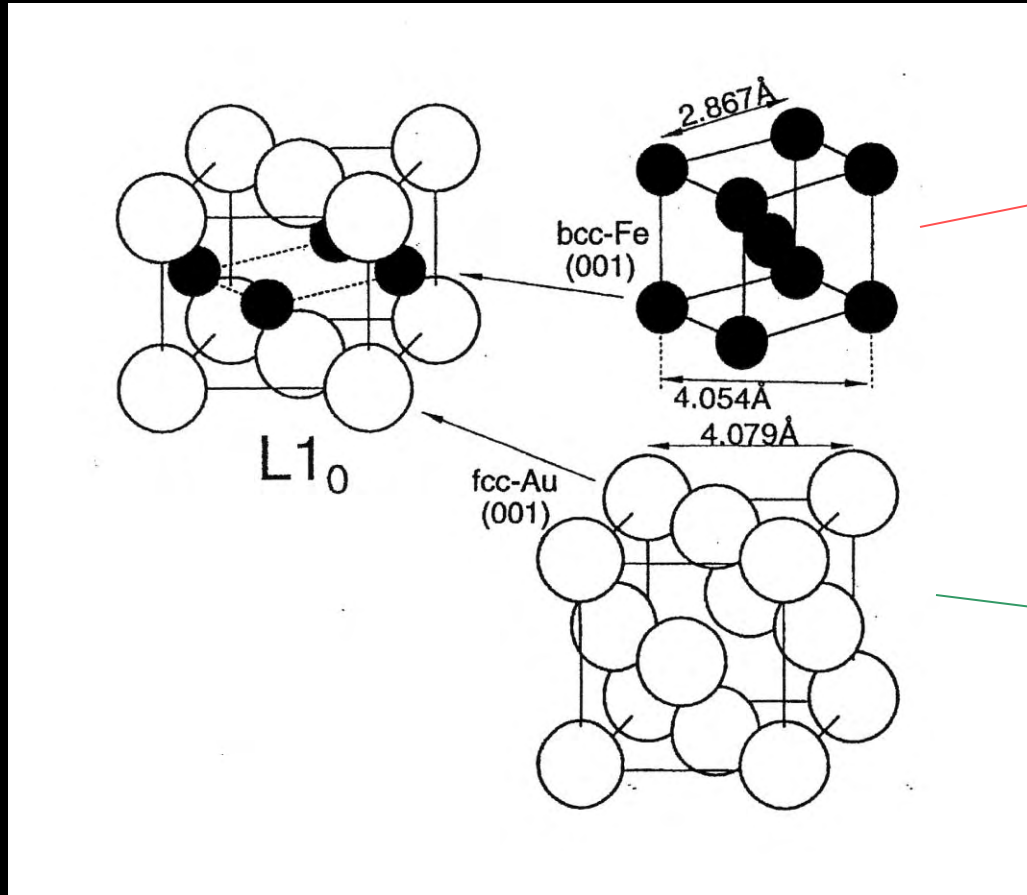
Co/Au/Coの磁気光学効果のAu層厚依存性



Fe/Au人工規則合金

- $[\text{Fe}(1\text{ML})/\text{Au}(1\text{ML})]_N$ は天然には存在しない $L1_0$ 型の規則合金である。
Fe($x\text{ML}$)/Au($x\text{ML}$) $_N$ においても、Fe層とAu層の界面には $L1_0$ 型Fe(1ML)/Au(1ML)が存在
- FeとAuの間には電子の重なり・混成が生じ、もはやFe層, Au層の単なる積層では説明できない新しいバンド構造が出現している

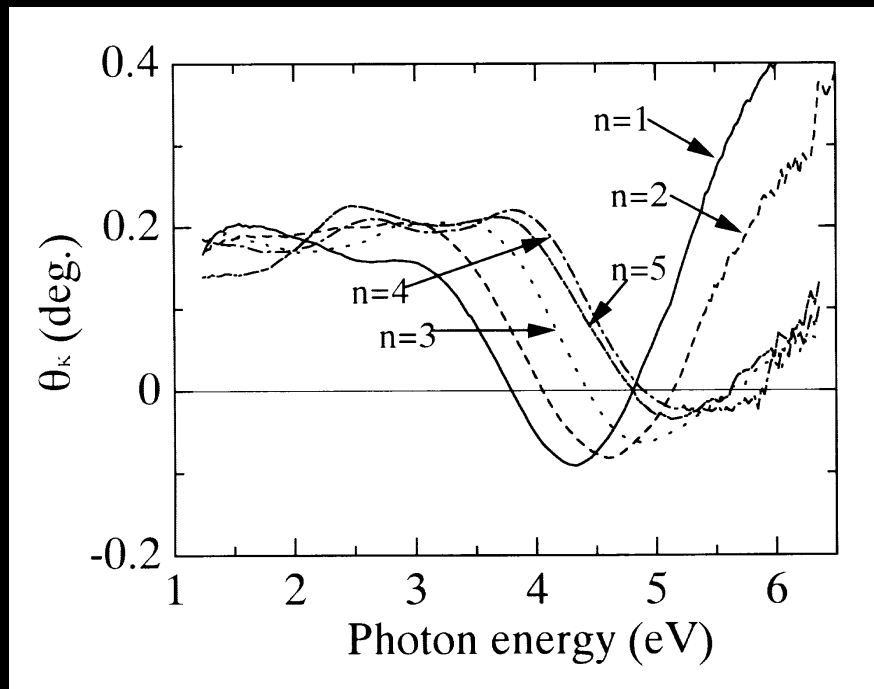
Fe(1ML)/Au(1ML)人工規則合金



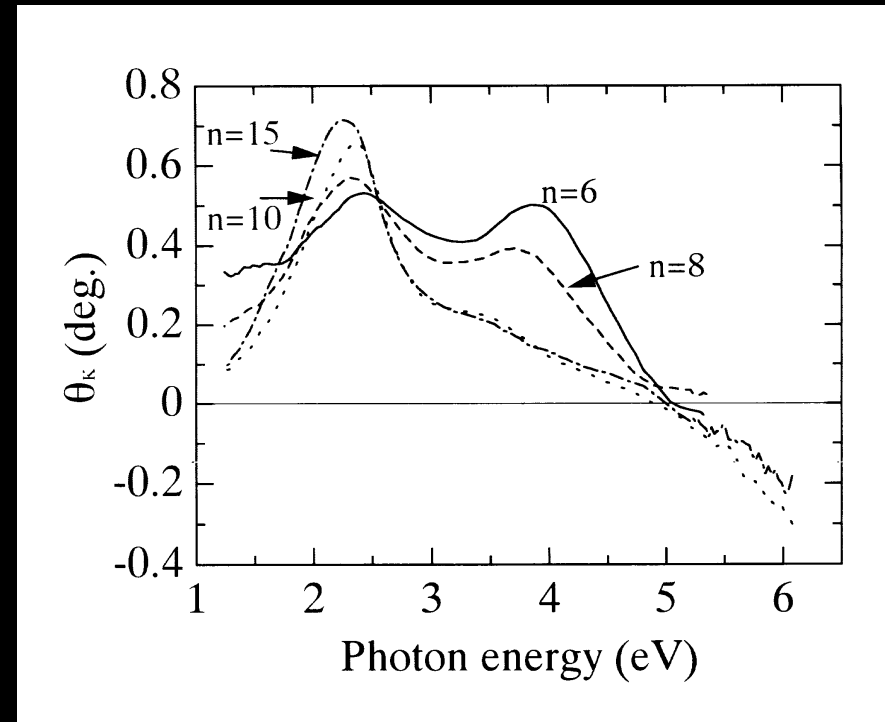
bcc Fe

fcc Au

Fe(xML)/Au(xML)人工格子における 磁気光学カー回転角のスペクトル

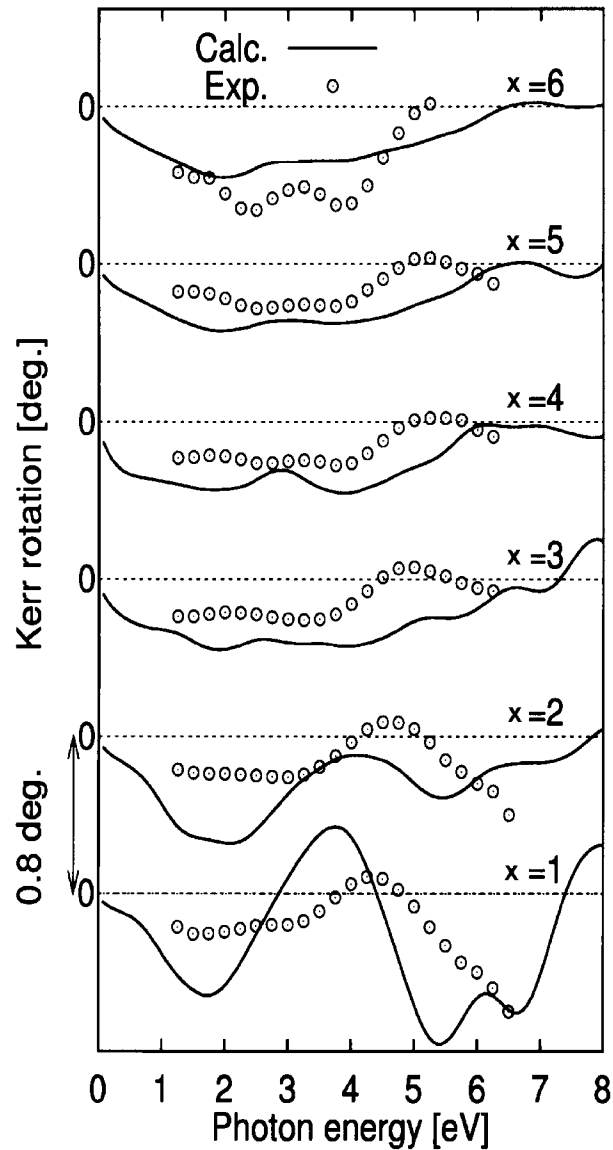


x=1~5



x=6~15

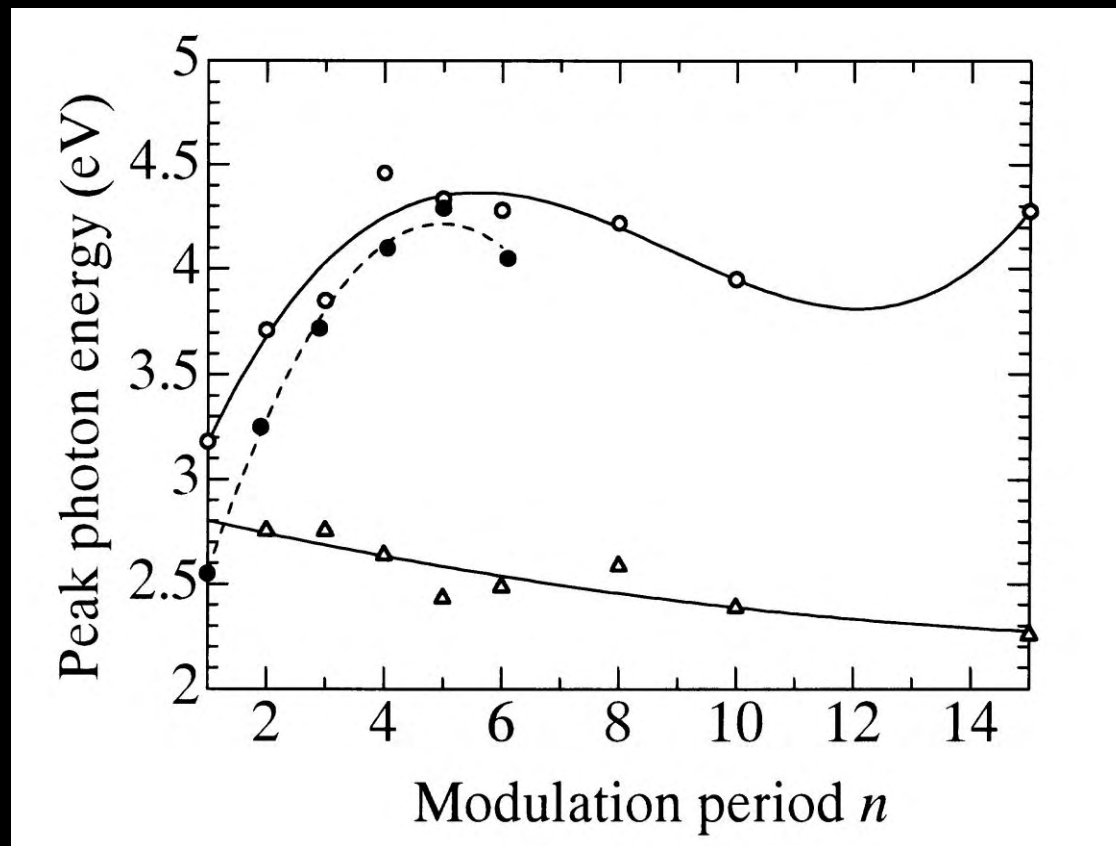
第1原理バンド計算による Fe(xML)/Au(xML)人工格子 子の磁気光学スペクトル (山口による)



4eV付近に見られる構造は、
Au 5d↓バンドからAu 5f↓バ
ンドへの遷移である。Auの
5f↓バンドはFeの3d↓バンドと
強く混成しており、実質的に
はAu(5d↓)→Fe(3d↓)遷移と見
なせる。

Fe/Au人工格子の磁気光学スペクトルのピーク位置 の変調周期に対するプロット。

点線は、超薄膜における量子閉じ込め
ピークの変調周期依存性

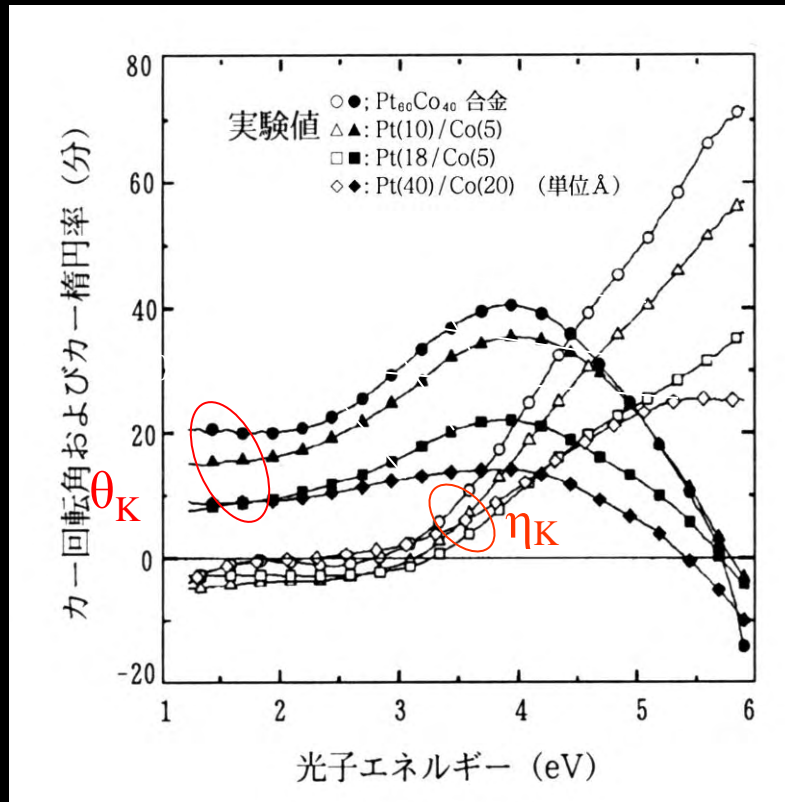


Pt, Pdと遷移金属の人工格子

- PtCo, PdCo等合金: 永久磁石材料
- 合金薄膜: 面内磁気異方性
- 人工格子→垂直磁気異方性
- 短波長用MO媒体として注目。
- 人工格子界面に合金形成
- 近接効果によりPt, Pdに磁気モーメント誘起
→磁気光学への寄与？

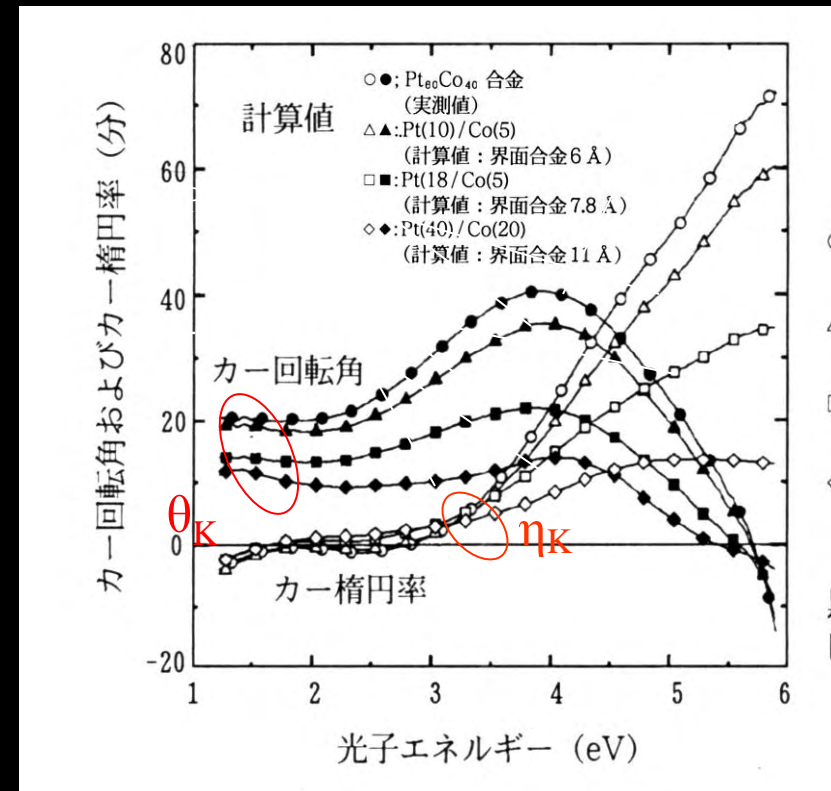
Pt/Co人工格子および対応するPt-Co合金のカー回転 及びカー楕円率のスペクトル

(a)実験値, (b)実験値を最もよく再現する計算値



(a) Experiment

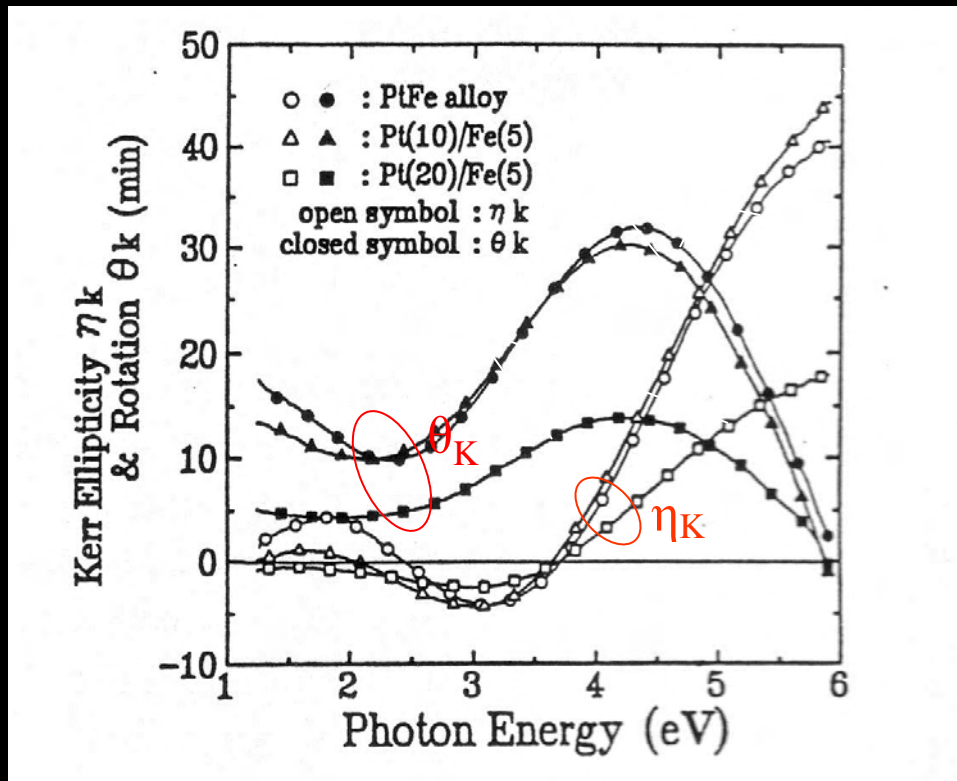
(b)



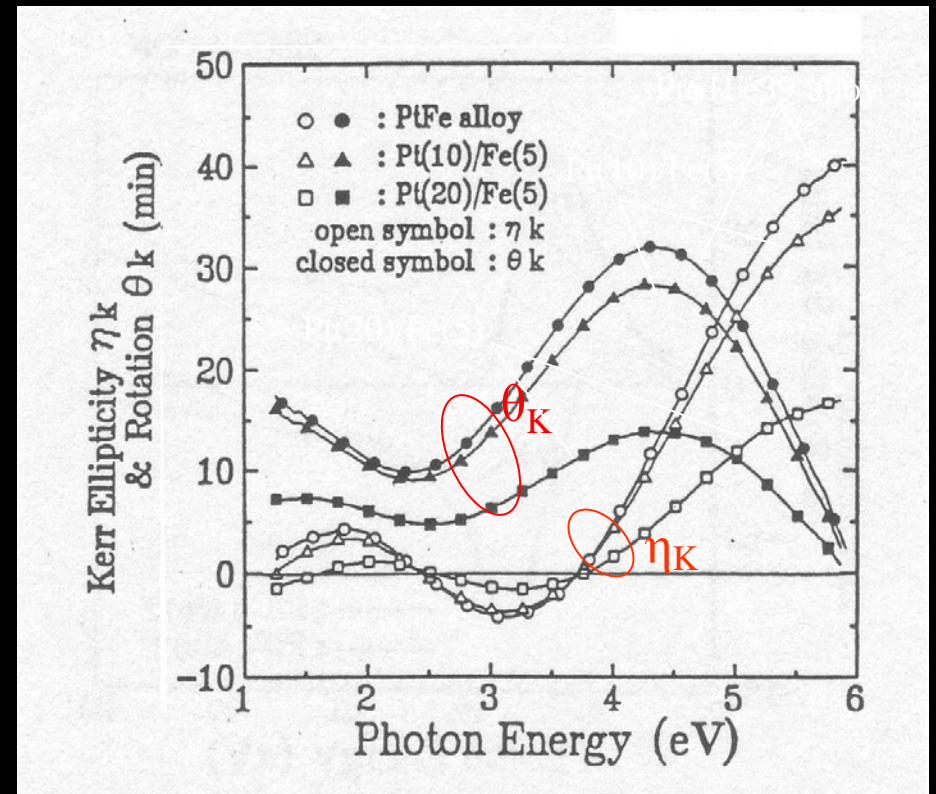
(b) Simulation

Pt/Fe人工格子および対応するPt-Fe合金のカー回転 及びカー楕円率のスペクトル

(a)実験値, (b)実験値を最もよく再現する計算値



(a) Experiment

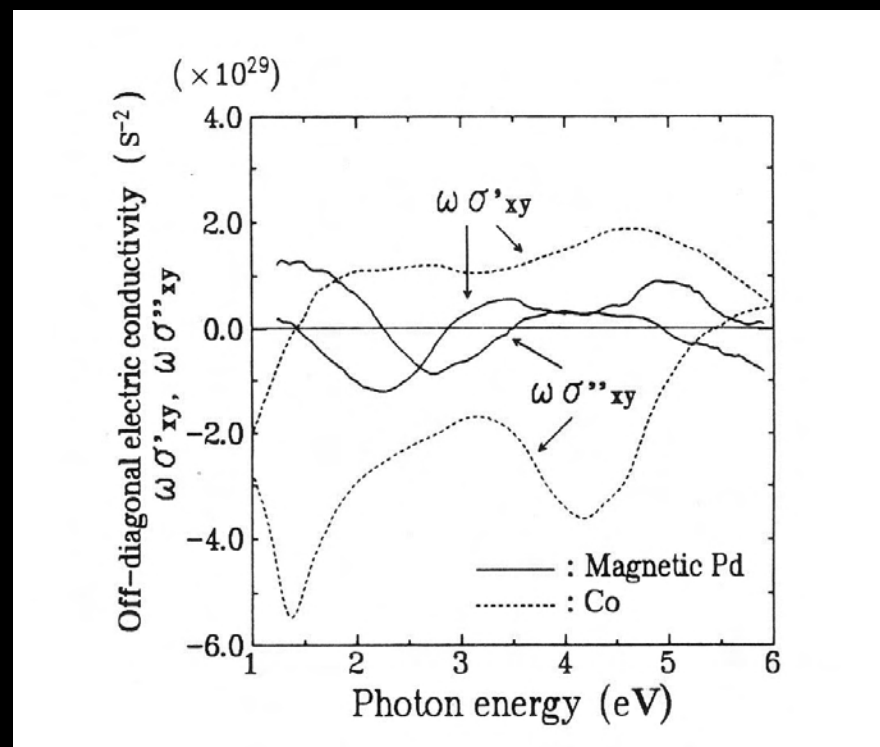
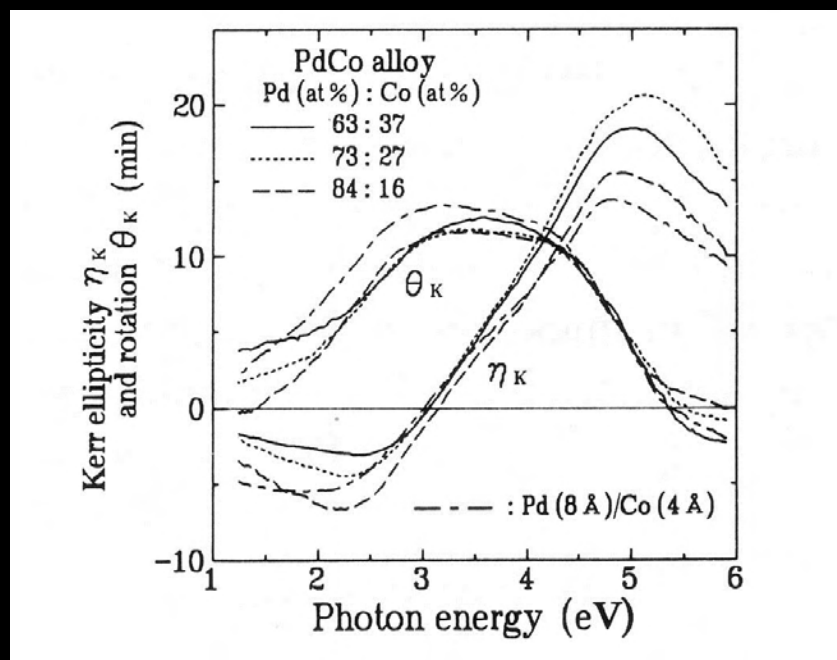


(b) Simulation

Pd/Co人工格子

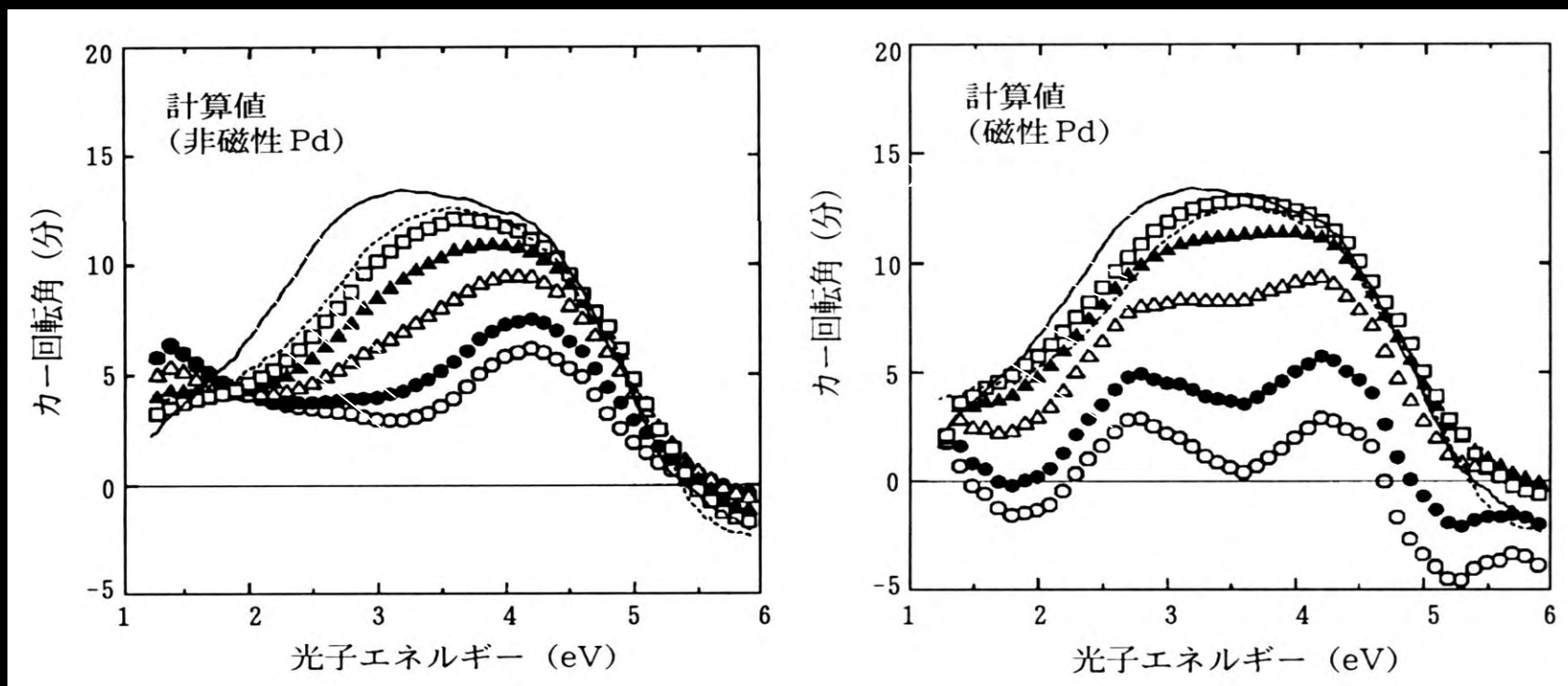
- Pd(8 Å)/Co(4 Å)人工格子
- 界面にPdCo合金を形成：
 - 合金層だけではスペクトル形状説明できない。
- 合金化しなかったPdが磁性を持つと仮定
- 磁性Pdの磁気光学効果を組成の異なるPdCoから見積もる
- Mag-Pd/PdCo/Coでシミュレーション
 - Y.Tosaka et al.: J.Magn.Soc.Jpn.18,389(1994)

「磁性Pd」の磁気光学スペクトル



Pd/Coの磁気光学スペクトルの実験値と、界面PdCoに加えて(a)非磁性Pd、(b)仮想的磁性Pdを仮定した計算値の比較。

(a)



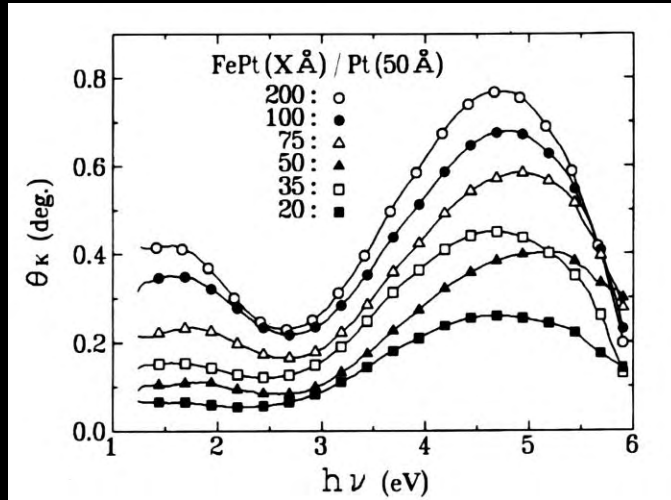
(a) Nonmagnetic Pd

(b) Magnetic Pd

FePt/Pt人工格子

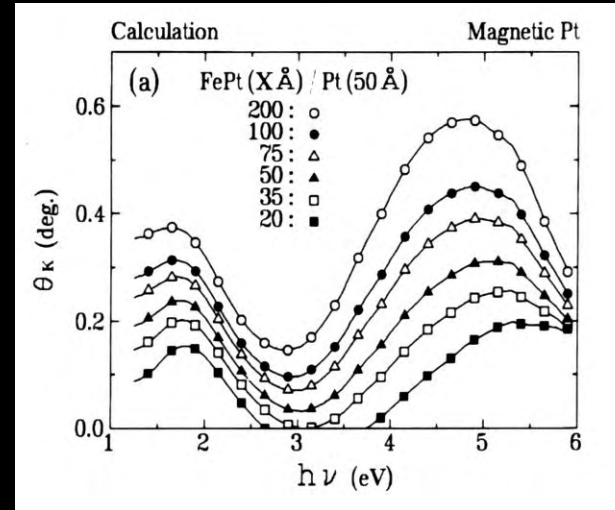
- Fe/Ptは界面にL1₀型のFePt合金を形成する。
- そこで、はじめからFePt合金を作り、これとPtの人工格子を作るとどうなるかを調べた。

FePt($x\text{\AA}$)/Pt($x\text{\AA}$)人工格子の 磁気光学カー回転スペクトル

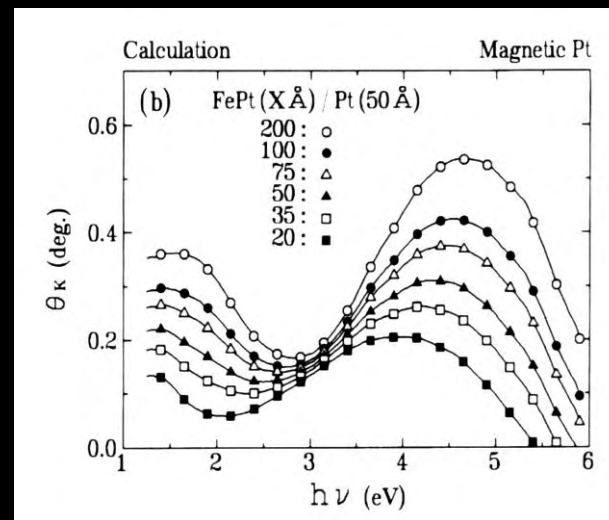


Experiment

FePt厚 $>50\text{\AA}$: 強磁性結合
FePt厚 $<50\text{\AA}$: 反強磁性結合



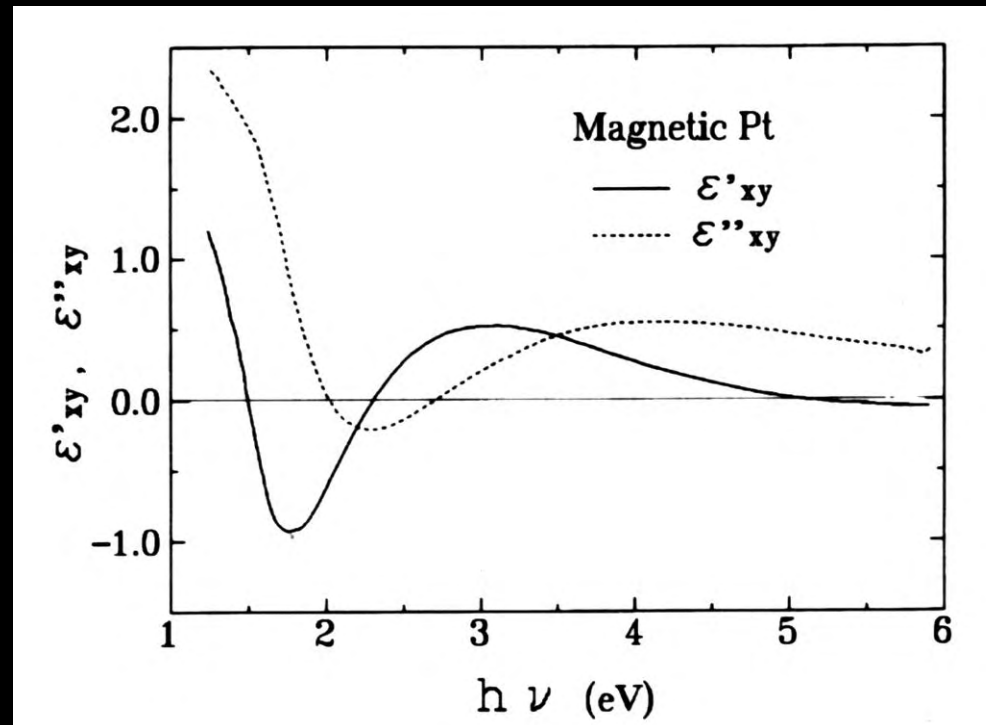
FePtと磁性Ptが
強磁性的に結合
と仮定

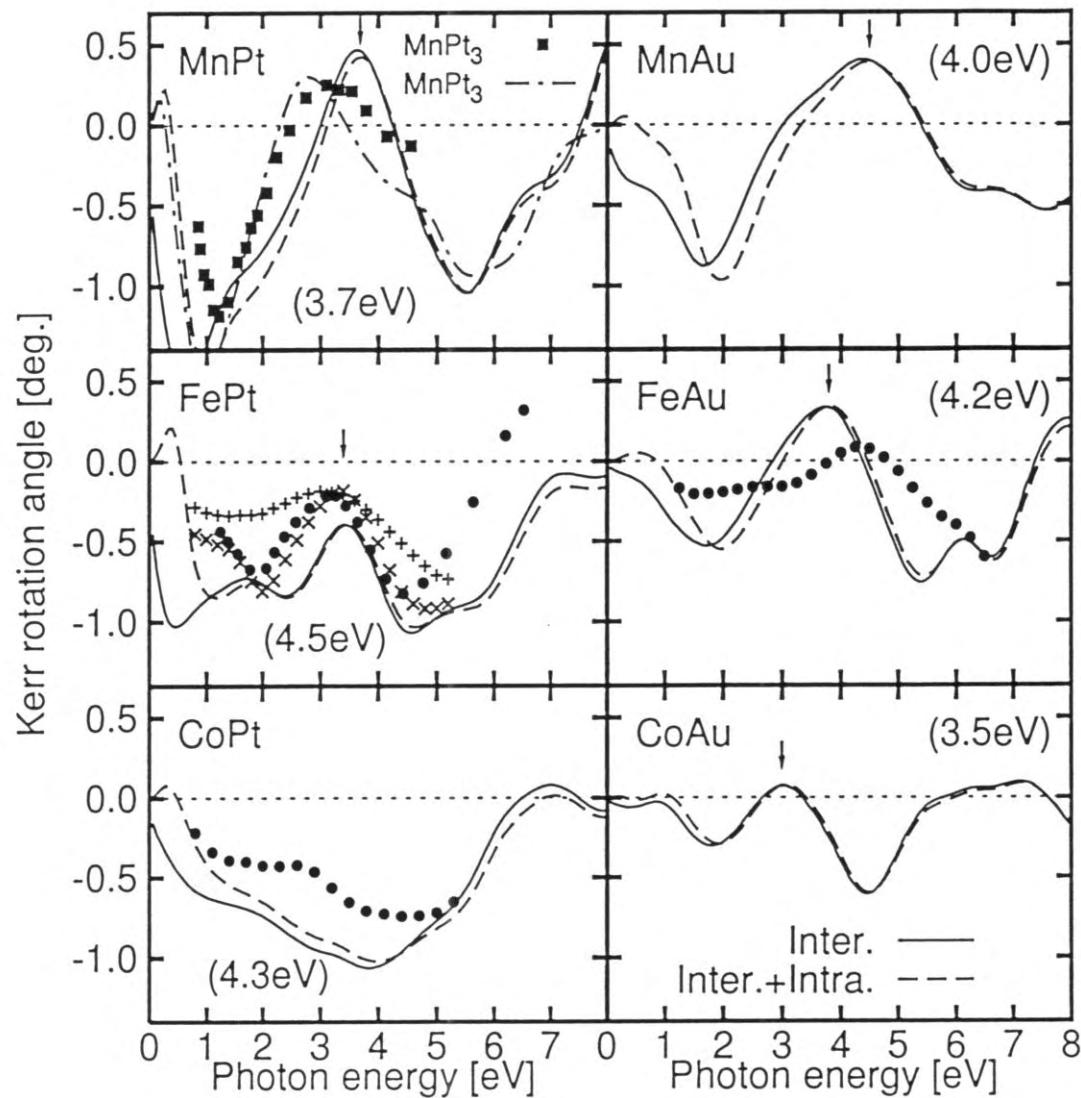


FePtと磁性Ptが
反強磁性的に結合
と仮定

Simulation

仮想的な「磁性Pt」の磁気光学スペクトル (誘電率テンソルの非対角成分)

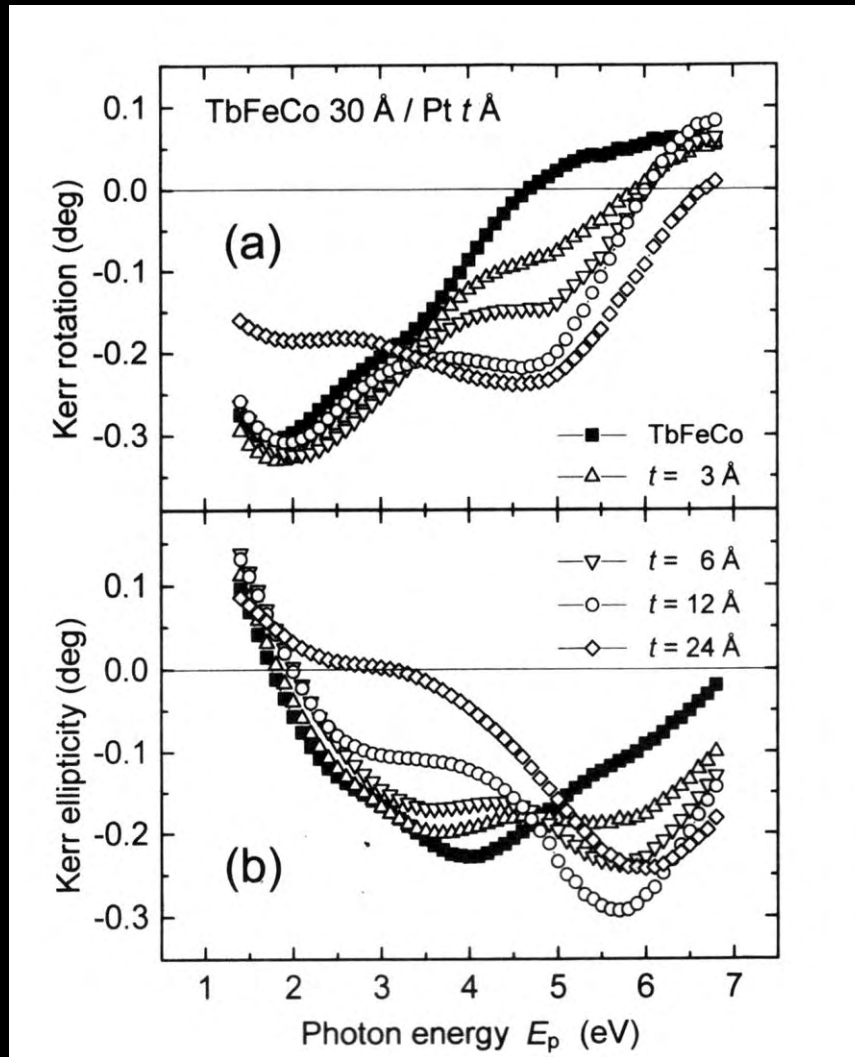




スペクトル形状は
貴金属で決まり、
 遷移金属を変えても
 余り変化しない。
 3dバンドが電子で
 埋まっていくに従い、
 磁気光学効果の大きさは弱くなる

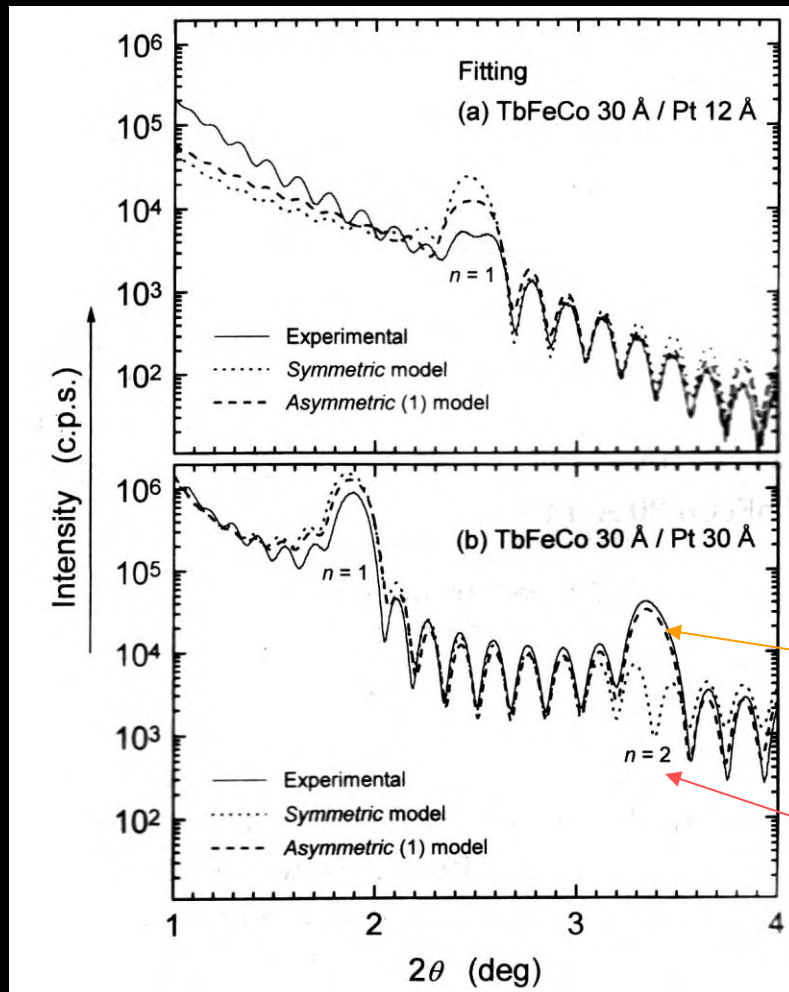
← 山口による

TbFeCo/Pt人工格子



Y.Itoh et al.:J. Magn.
Soc. Jpn. 24, 1371
(2000)

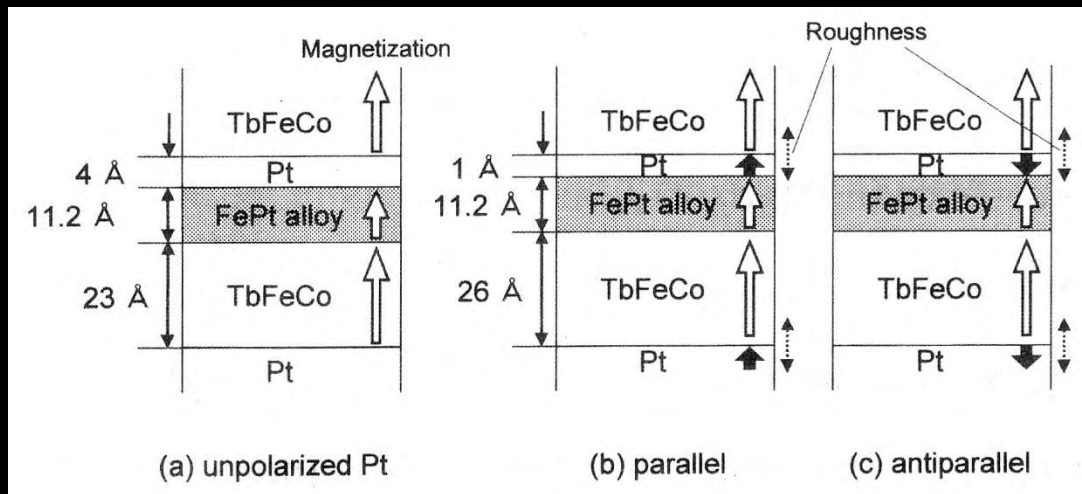
[TbFeCo/Pt]人工格子の構造モデル



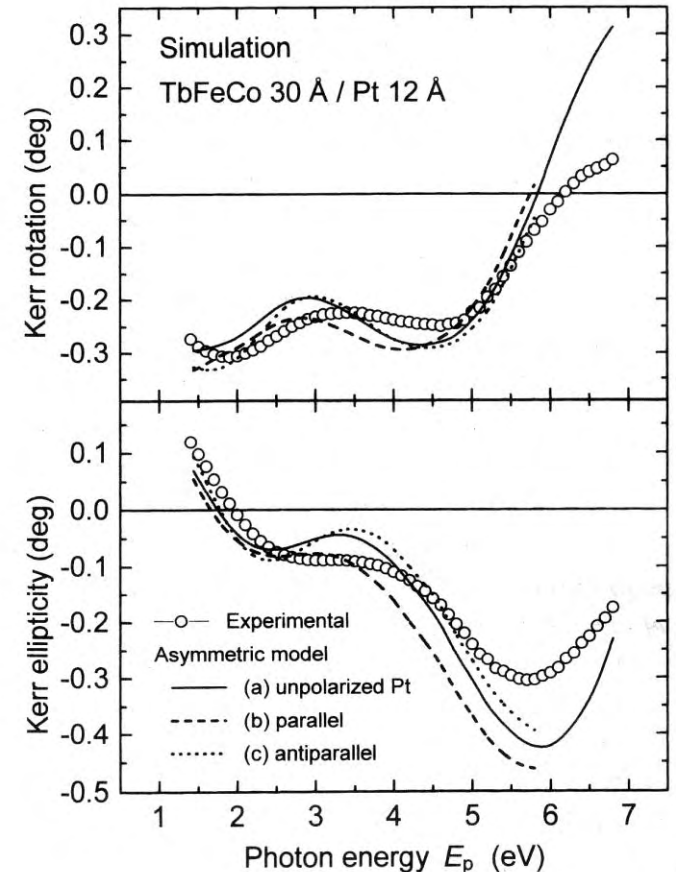
非対称モデル(破線)とよく合う。

対称モデル(点線)では説明できない

磁性Ptを考慮したシミュレーション



Ptの磁化とFePtの磁化が反平行とした方が実験をよく説明する



磁気光学効果の応用



光記録の分類

- 光ディスク
 - 再生専用のもの
 - CD, CD-ROM, DVD-ROM
 - 記録可能なもの
 - 追記型
 - CD-R, DVD-R
 - 書換型
 - 光相変化 CD-RW, DVD-RAM, DVD-RW, DVD+RW, DVR
 - 光磁気: MO, GIGAMO, MD, MD-Data, AS-MO, iD-Photo
- ホログラフィックメモリ、ホールバーニングメモリ

光記録の特徴

- リムーバブル
- 大容量・高密度
 - 現行のもの:ハードディスク(20Gbit/in²)に及ばない
 - 超解像、短波長、近接場を利用して100Gbit/in²をめざす
- ランダムアクセス
 - 磁気テープに比し圧倒的に有利;カセットテープ→MD,
VTR→DVD
 - ハードディスクに比べるとシーク時間がかかる
- 高信頼性
 - ハードディスクに比し、ヘッドの浮上量が大きい

DVDファミリー

	DVD-ROM	DVD-R	DVD-RAM	DVD-RW	DVD+RW
容量	4.7 / 9.4	3.95 / 7.9	2.6 / 5.2	4.7	3.0
形状	disk	disk	cartridge	disk	disk
マーク形成材料	ピット形成	熱変形型 有機色素	相変化型 GeSbTe系	相変化型 AgInSbTe系	相変化型 AgInSbTe系
レーザ波長 レンズNA	650/635 0.6	650/635 0.6	650 0.6	638/650 0.6	650 0.65
マーク長	0.27	0.293	0.41-0.43	0.267	
トラック幅	0.74	0.8	0.74 L/G	0.74 G	0.74 G
書き換え可能回数	—	—	10 ⁵	10 ³ -10 ⁴	10 ³ -10 ⁴

光相変化記録

相変化を利用

- **書換可能型** 成膜初期状態のアモルファスを熱処理により結晶状態に初期化しておきレーザー光照射により融点 T_m (600°C)以上に加熱後急冷させアモルファスとして記録。消去は結晶化温度 T_{cr} (400°C)以下の加熱緩冷して結晶化。

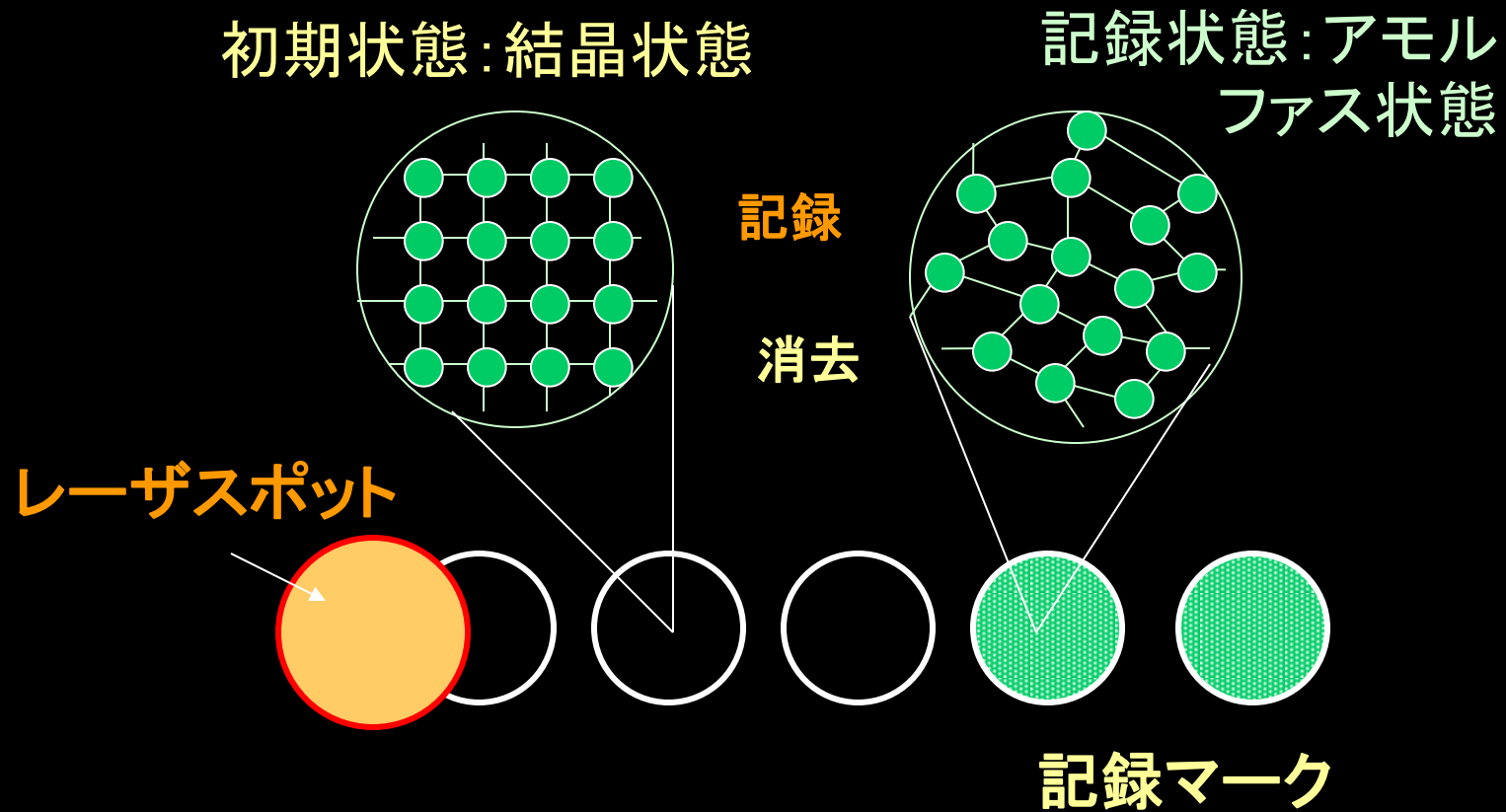
– Highレベル: T_m 以上に加熱→急冷→アモルファス

– Lowレベル: T_{cr} 以上に加熱→緩冷→結晶化

DVD-RAM: GeSbTe系

DVD±RW: Ag-InSbTe系

相変化と反射率



光磁気記録

- 記録： 熱磁気(キュリー温度)記録
 - 光を用いてアクセスする磁気記録
- 再生： 磁気光学効果
 - 磁化に応じた偏光の回転を電気信号に変換
- MO, MDに利用
- 互換性が高い
- 書き替え耐性高い: 1000万回以上
- ドライブが複雑(偏光光学系と磁気系が必要)
- MSR, MAMMOSなど新現象の有効利用可能

光磁気ディスク

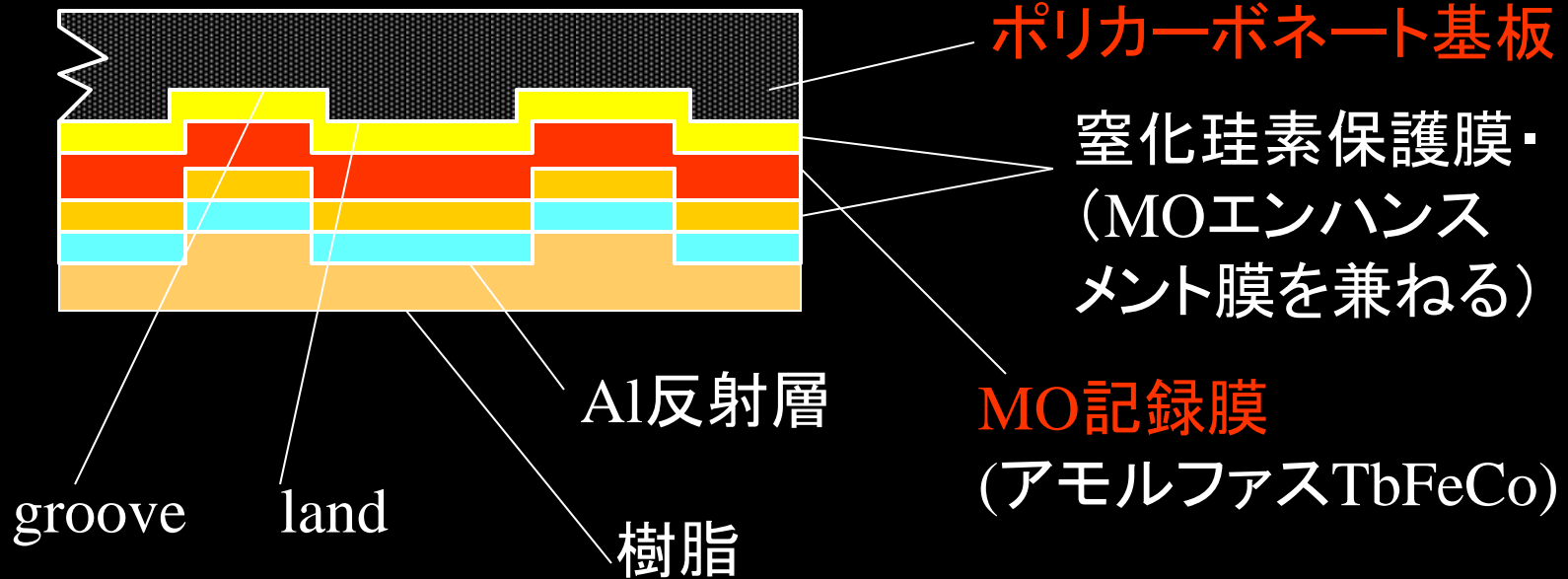
- 記録： 熱磁気(キュリー温度)記録
- 再生： 磁気光学効果
- MO: 3.5”
128→230→650→1.3G→2.3G
- MD(6cm)
- iD-Photo, Canon-Panasonic(5cm)

光磁気記録の歴史

- 1962 Conger, Tomlinson 光磁気メモリを提案
- 1967 Mee Fan ビームアドレス方式の光磁気記録の提案
- 1971 Argard (Honeywel) MnBi薄膜を媒体としたMOディスクを発表
- 1972 Suits(IBM) EuO薄膜を利用したMOディスクを試作
- 1973 Chaudhari(IBM) アモルファスGdCo薄膜に熱磁気記録(補償温度記録)
- 1976 Sakurai(阪大) アモルファスTbFe薄膜にキュリー温度記録
- 1980 Imamura(KDD) TbFe系薄膜を利用したMOディスクを発表
- 1981 Togami(NHK) GdCo系薄膜MOディスクにTV動画像を記録
- 1988 各社 5”MOディスク(両面650MB)発売開始
- 1989 各社 3.5”MOディスク(片面128MB)発売開始
- 1991 Aratani(Sony) MSR(磁気誘起超解像)を発表
- 1992 Sony MD(ミニディスク)を商品化
- 1997 Sanyo他 ASMO(5”片面6GB:L/G, MFM/MSR)規格発表
- 1998 Fujitsu他 GIGAMO(3.5”片面1.3GB)発売開始
- 2001 Sanyo デジカメ用iD-Photo(2”, 780MB)発売
- 2002 Canon-松下 ハンディカメラ用2.5”3GBディスク発表

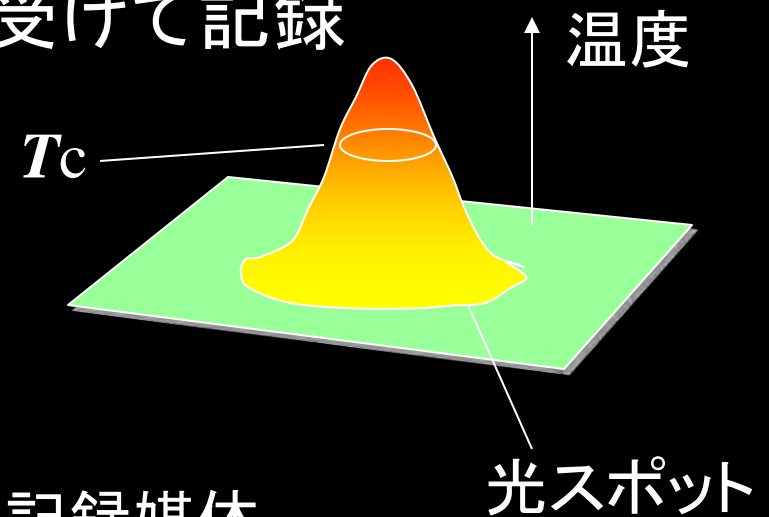
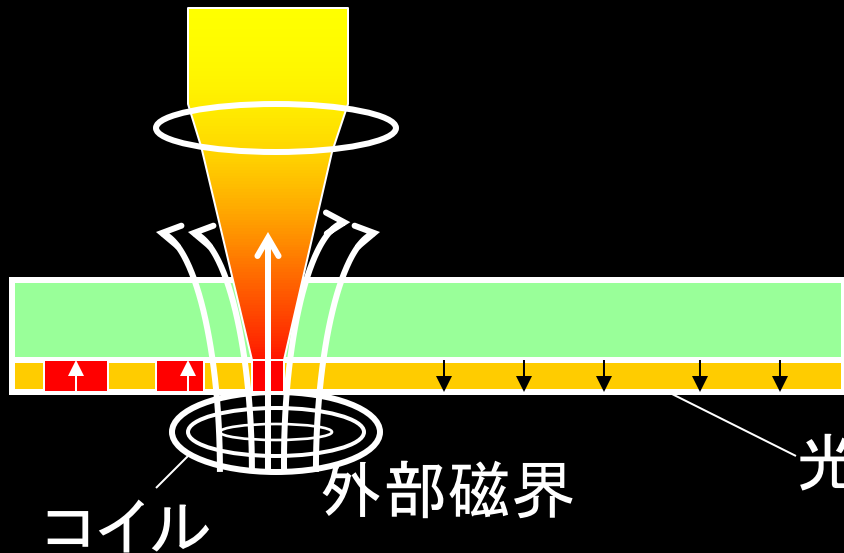
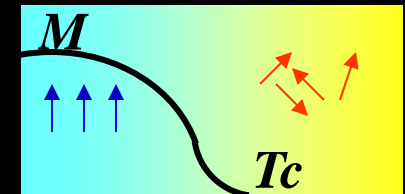
光磁気記録

• MOディスクの構造



光磁気記録 情報の記録(1)

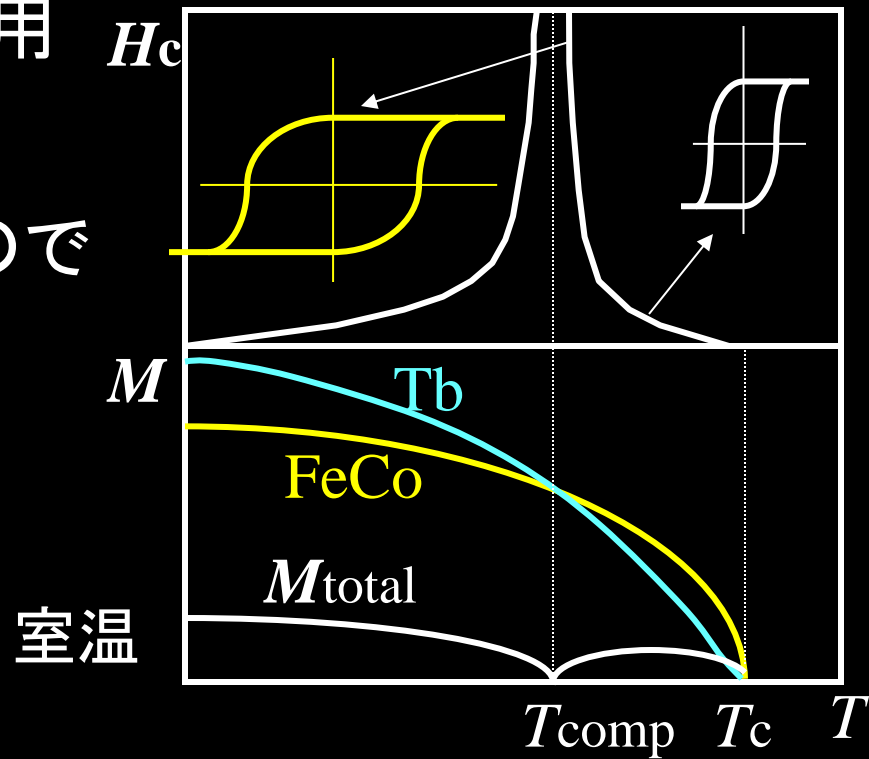
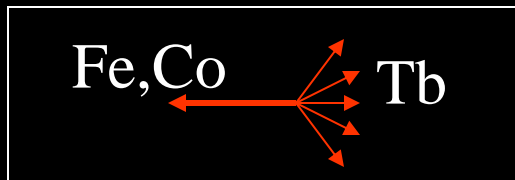
- レーザ光をレンズで集め磁性体を加熱
- キュリー温度以上になると磁化を消失
- 冷却時にコイルからの磁界を受けて記録



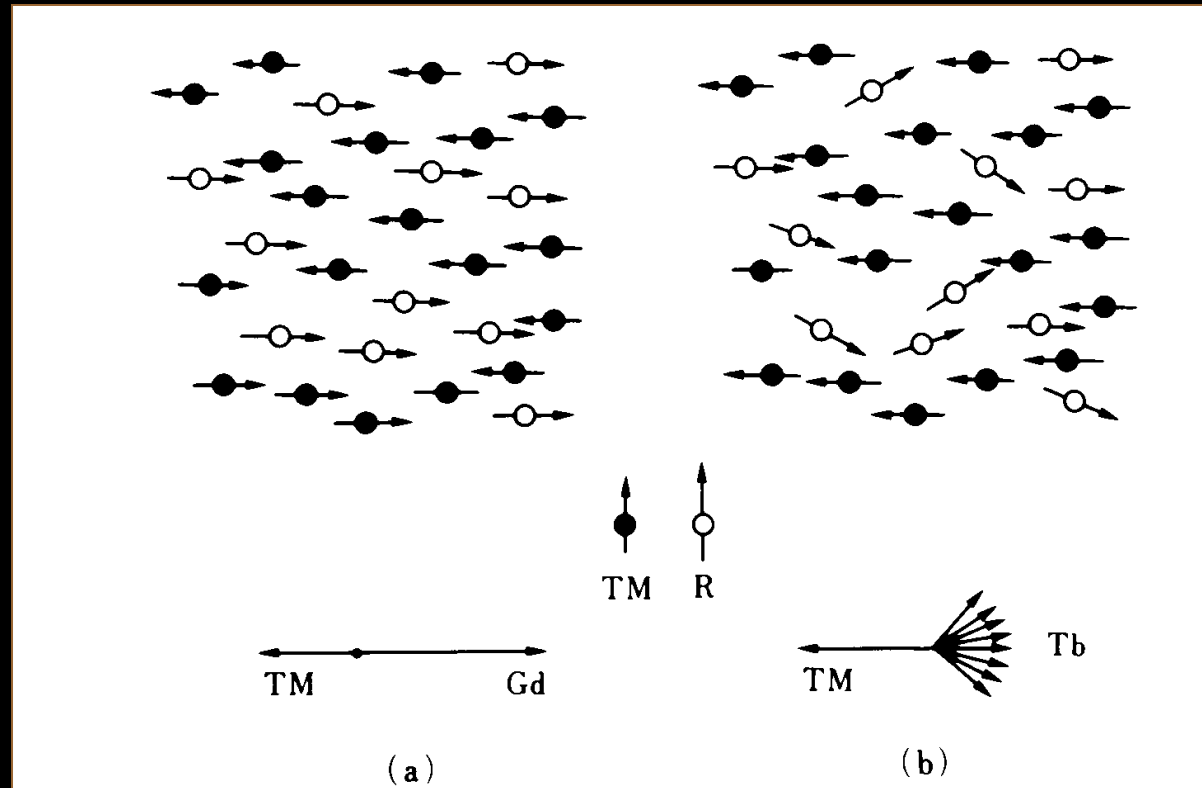
光磁気記録媒体

光磁気記録 情報の記録(2)

- 補償温度(T_{comp})の利用
- アモルファスTbFeCoは一種のフェリ磁性体なので補償温度 T_{comp} が存在
- T_{comp} で H_c 最大:
 - 記録磁区安定

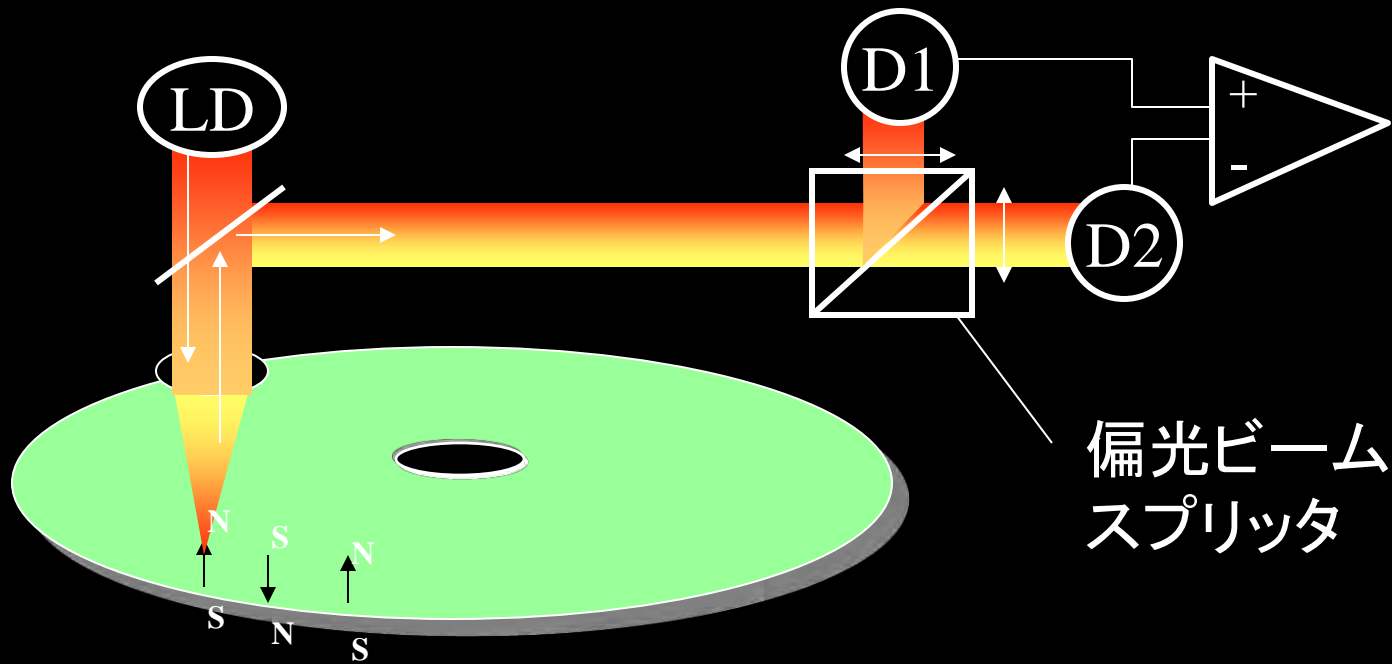


アモルファスR-TM合金

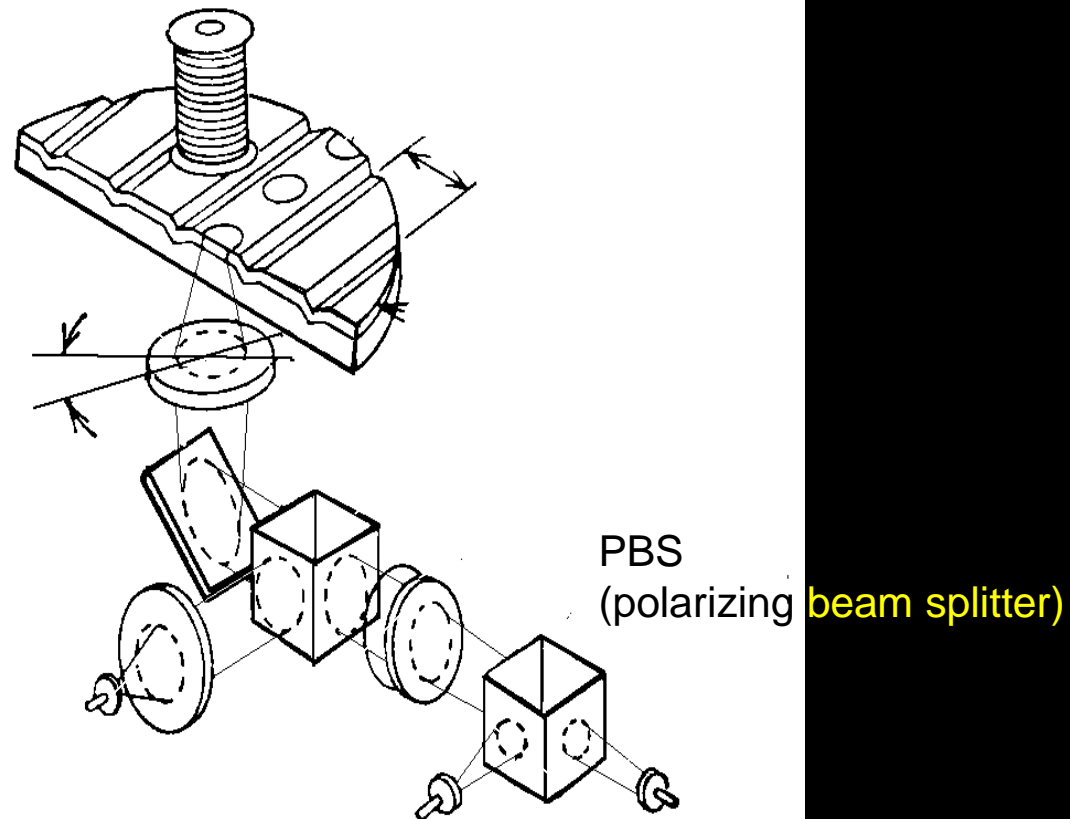


光磁気記録 情報の読み出し

- 磁化に応じた偏光の回転を検出し電気に変換



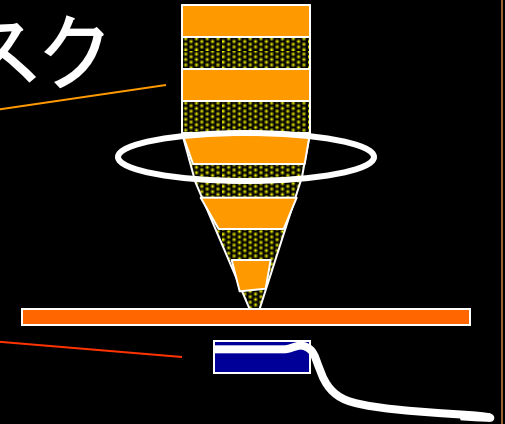
MOドライブの光ヘッド



2種類の記録方式

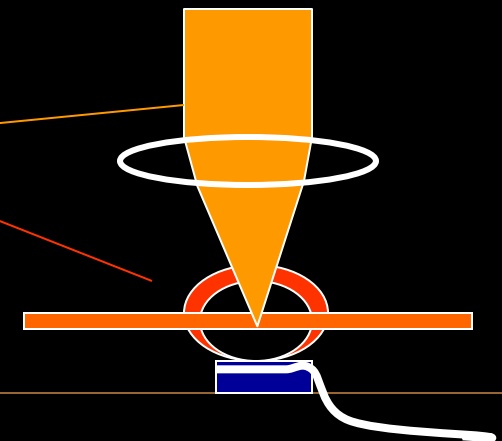
- **光強度変調(LIM)**: 現行のMOディスク

- 電気信号で光を変調
- 磁界は一定
- ビット形状は長円形

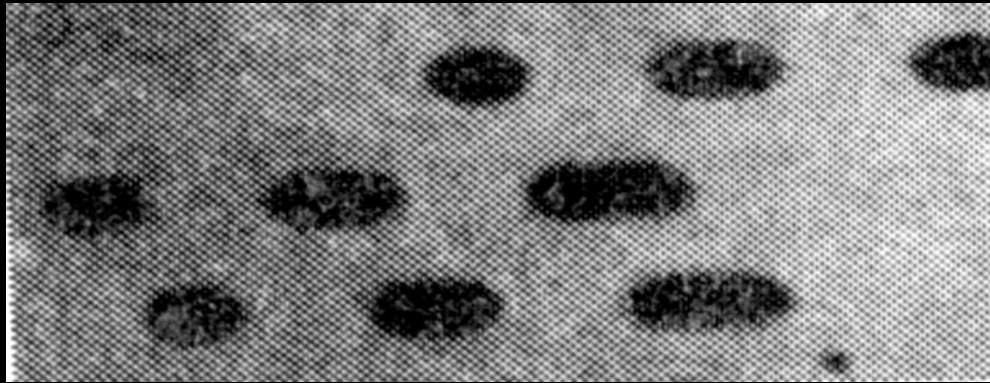


- **磁界変調(MFM)**: 現行MD, iD-Photo

- 電気信号で磁界を変調
- 光強度は一定
- ビット形状は矢羽形



記録ビットの形状

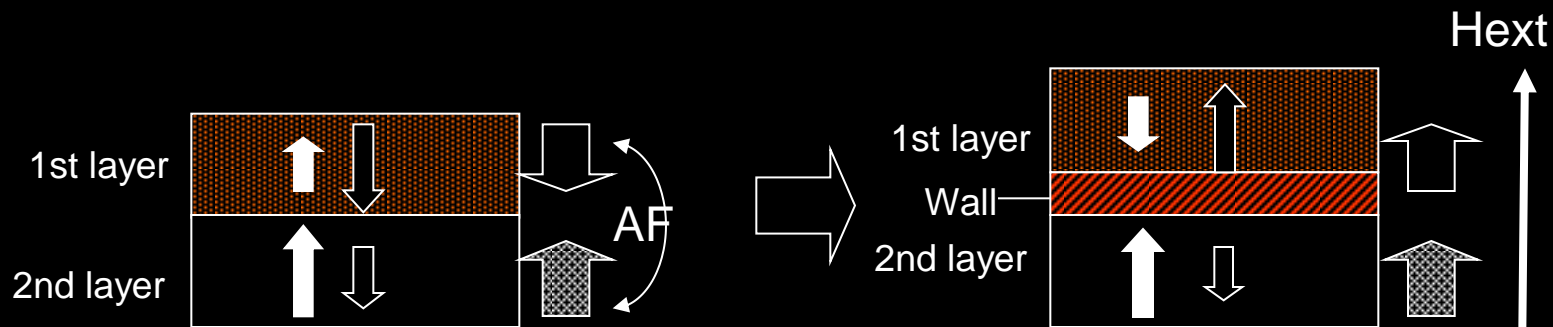


(a)



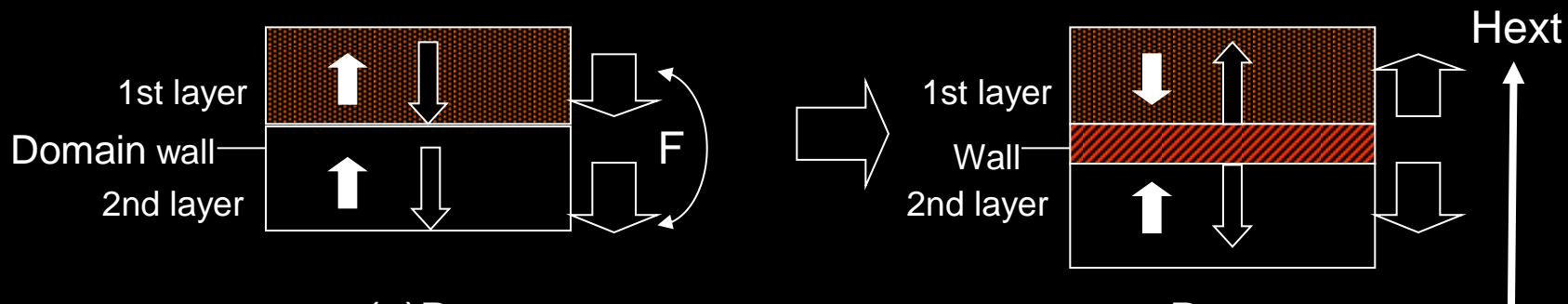
(b)

交換結合膜



(a)A-type

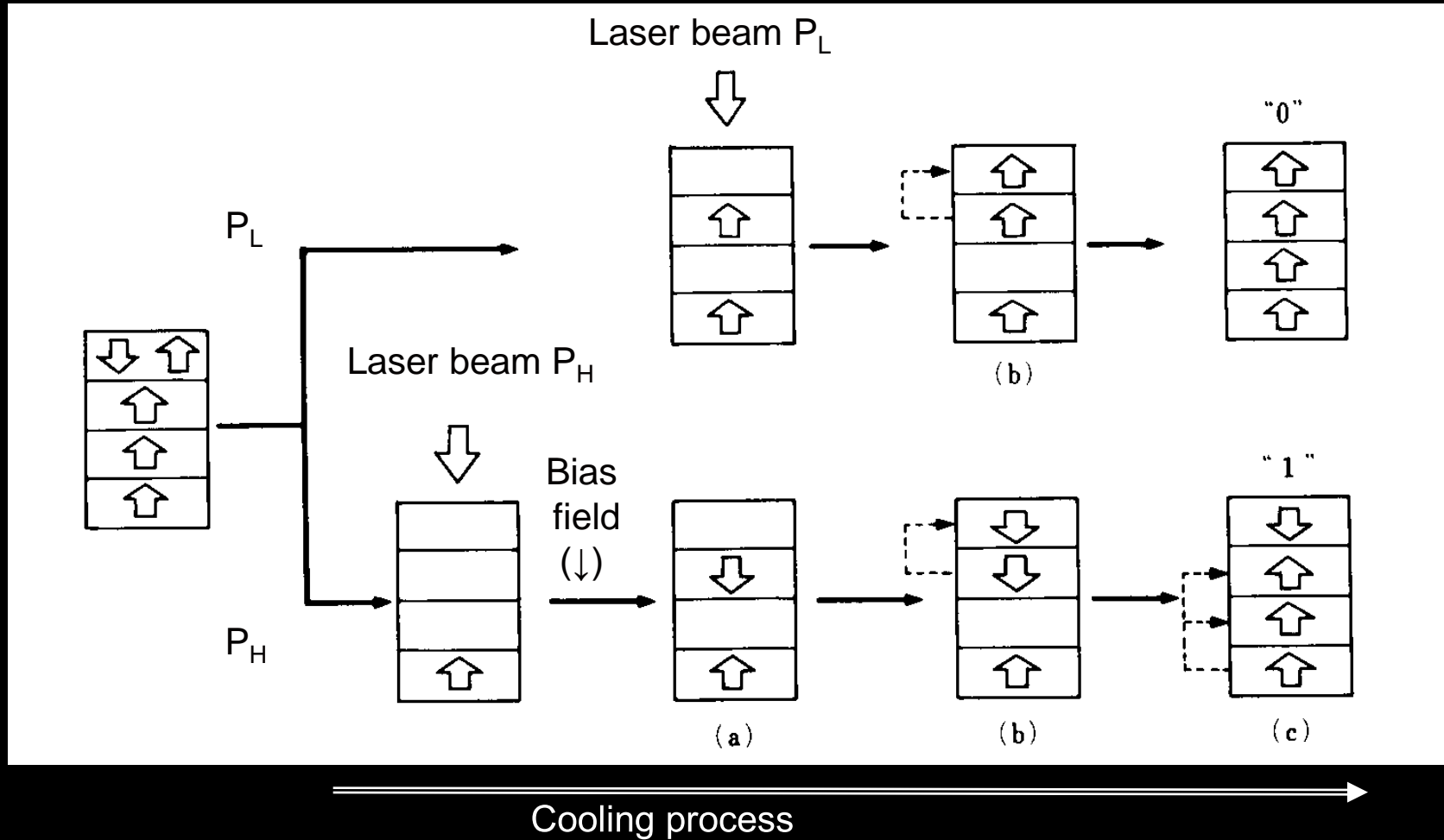
(b)A-type



(a)P-type

P-type

LIMDOW (オーバーライト)



超高密度光ディスクへの展開

1. 超解像

1. MSR/MAMMOS
2. Super-RENS (Sb)

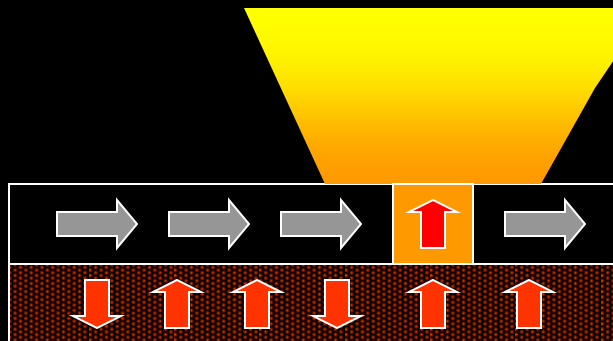
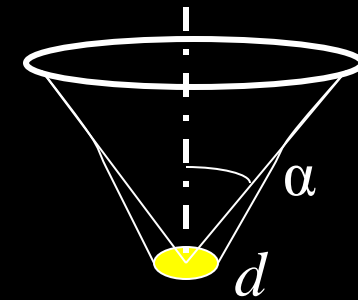
2. 短波長化

3. 近接場

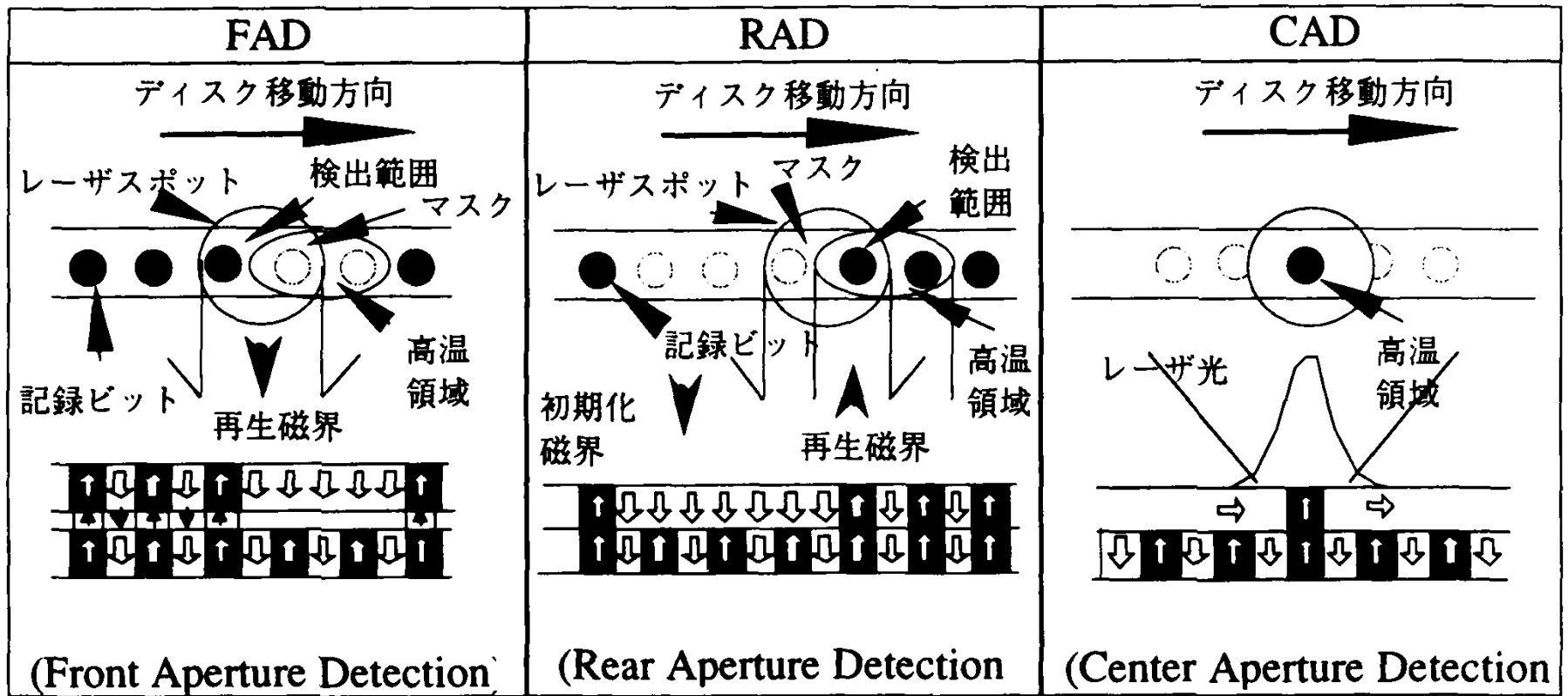
1. SIL
2. Super-RENS (AgO_x)

MSR(磁気誘起超解像)

- 解像度は光の回折限界から決まる
 - $d=0.6\lambda/NA$ (ここに $NA=n \sin\alpha$)
 - 波長以下のビットは分解しない
- 記録層と再生層を分離
- 読み出し時のレーザーの強度分布を利用
 - ある温度を超えた部分のみを再生層に転写する



MSR方式の図解



MSRの分類

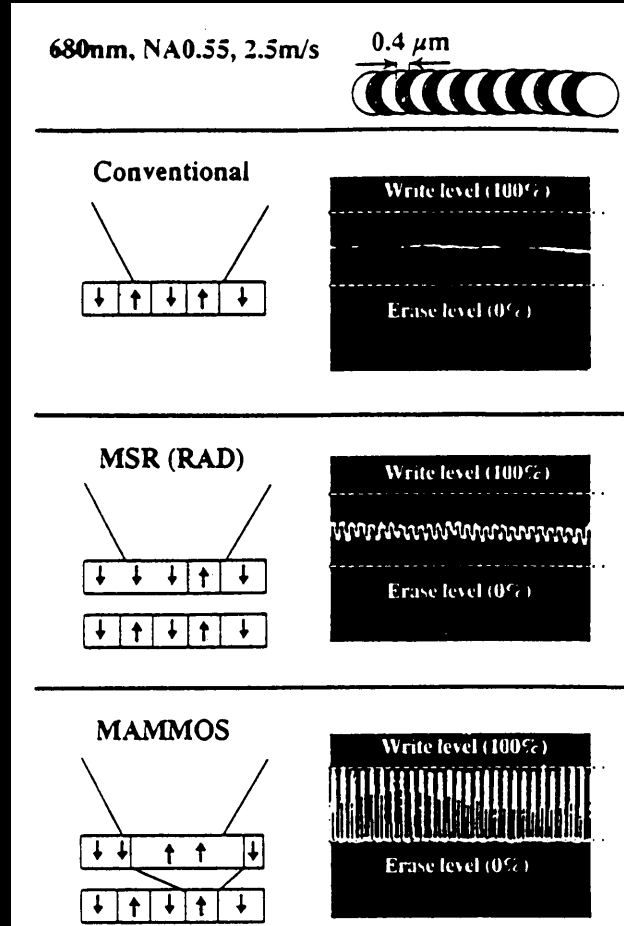
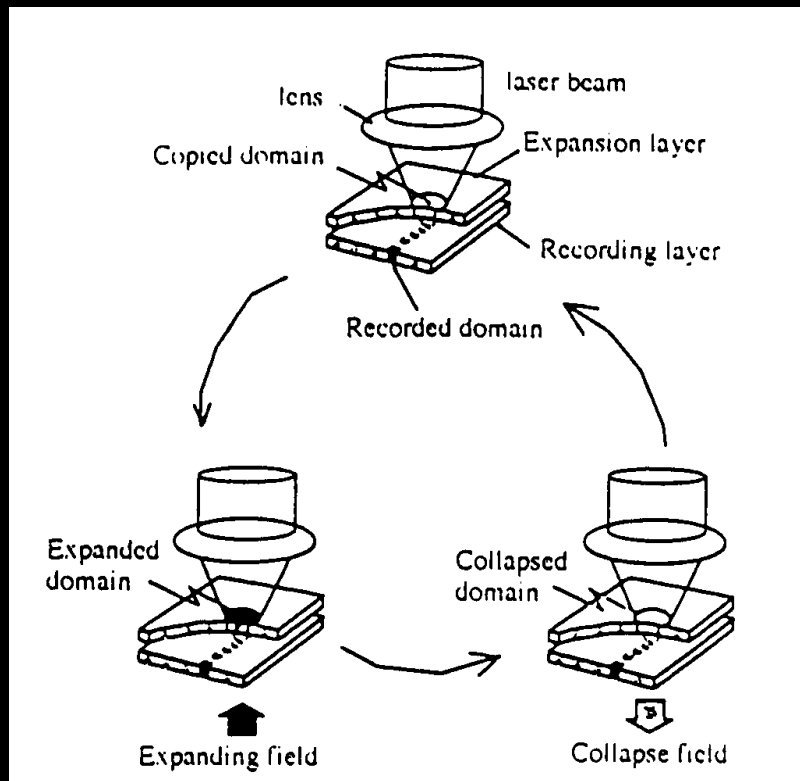
- 高温部が光スポットのやや後方に偏ることを利用
 - **FAD** (front aperture detection) 読み出し層の記録マークの後ろの部分をマスクして、開口を小さくする。
 - **RAD** (rear aperture detection) 読み出し層を磁界によって消去しておき、高温部で記録層から転写する。
- **CAD** (center aperture detection) 記録層の上に面内磁気異方性をもつ読み出し膜を重ねておき、レーザ光で加熱すると中心部のみの異方性が変化し、交換結合により記録層から読み出し層に転写

ASMO Technologies

LD wavelength	650 nm
NA	0.6
Disk diameter	120 mm
Thickness	0.6 mm
Track pitch	0.6 μ m Land/Groove
Recording method	MO & CAD-MSR
Modulation	Laser pumped MFM
Signal processing	PRML bit density 0.235 μ m) PR(1,1) or PR(1,2,1)
Velocity control	ZCAV/ZCLV
Code	NRZI+ (DC suppressed)

MAMMOS

(magnetic amplification MO system)



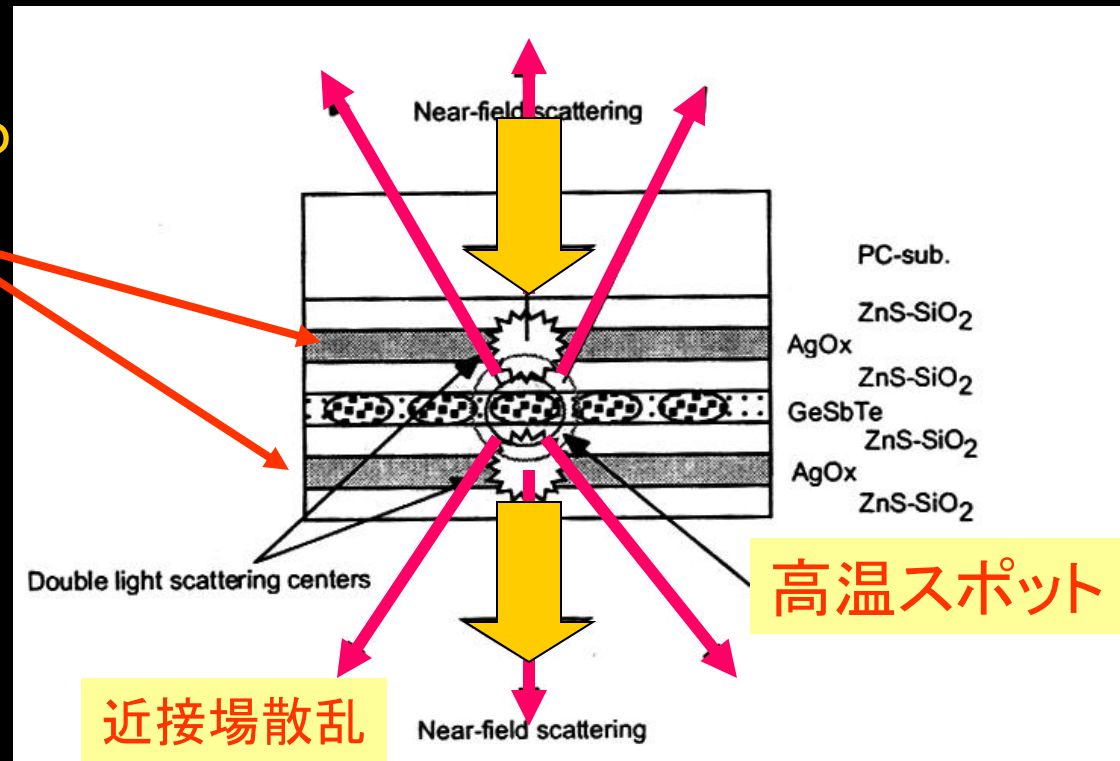
光磁気記録をもたらしたものの

- 長期にわたる研究の積み重ね
- アモルファス希土類遷移金属膜の発見
- 半導体レーザーの進歩・短波長化・低価格化
- 光エレクトロニクス技術(例えばサーボ技術)
- 信号処理技術の進歩(例えばMDの圧縮技術)
- パソコンの大容量化による**市場のニーズ**
- 厳しい競争(HDD, ZIP, CD-R, CDRW, DVD-RW)

Super-RENS

super-resolution near-field system

- Sb膜: 光吸収飽和
 - 波長より小さな窓を開ける
- AgOx膜: 分解・Ag析出
 - 散乱体→近接場
 - Agプラズモン→光増強
 - 可逆性あり。
- 相変化媒体だけでなく光磁気にも適用可能



短波長化

- **DVD-ROM**:405nmのレーザを用い、track pitch =0.26 μ m、mark length=0.213 μ mのdisk(容量25GB)を NA=0.85のレンズを用いて再生することに成功^[i]。

[i] M. Katsumura, et al.: *Digest ISOM2000, Sept. 5-9, 2000, Chitose*, p. 18.

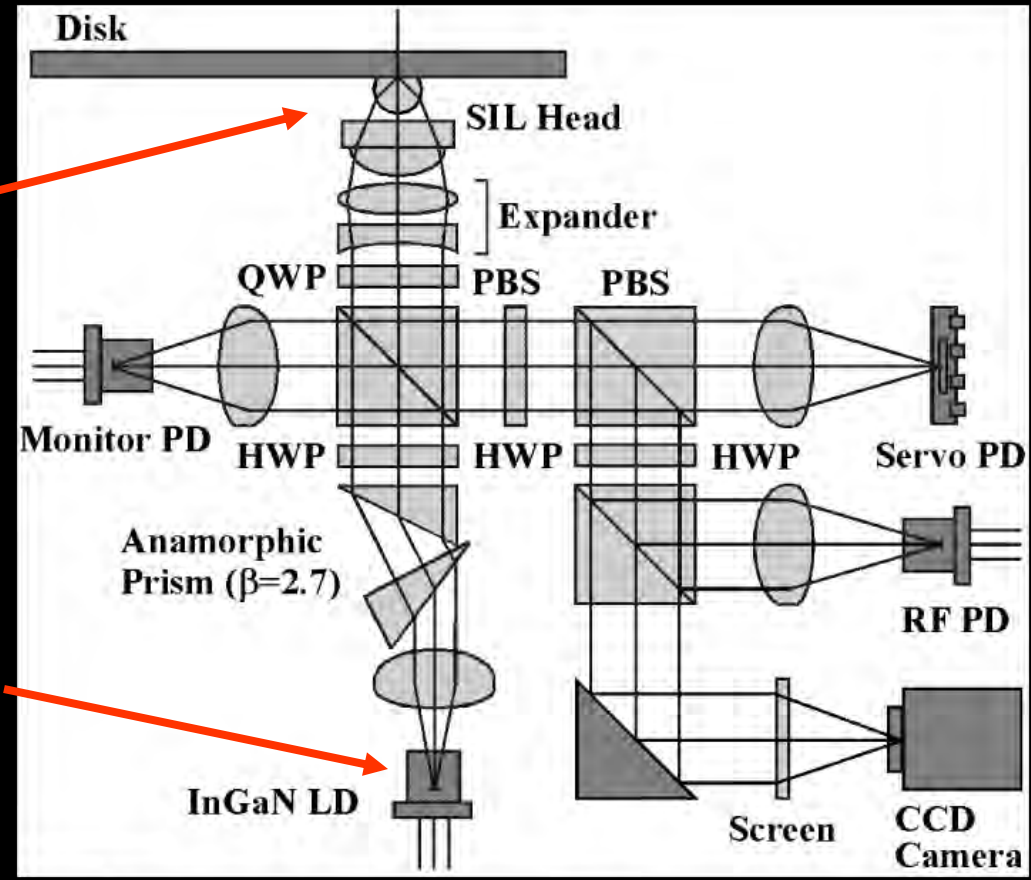
- **DVD-RW**:405nmのレーザを用い、 track pitch=0.34 μ m、mark length=0.29 μ m、層間間隔35 μ mの2層ディスク(容量27GB)のNA=0.65のレンズで記録再生を行い、33Mbpsの転送レートを達成^[ii]。

[ii] T. Akiyama, M. Uno, H. Kitaura, K. Narumi, K. Nishiuchi and N. Yamada: *Digest ISOM2000, Sept. 5-9, 2000, Chitose*, p. 116.

青紫レーザーとSILによる記録再生

SILヘッド

青紫色レーザー

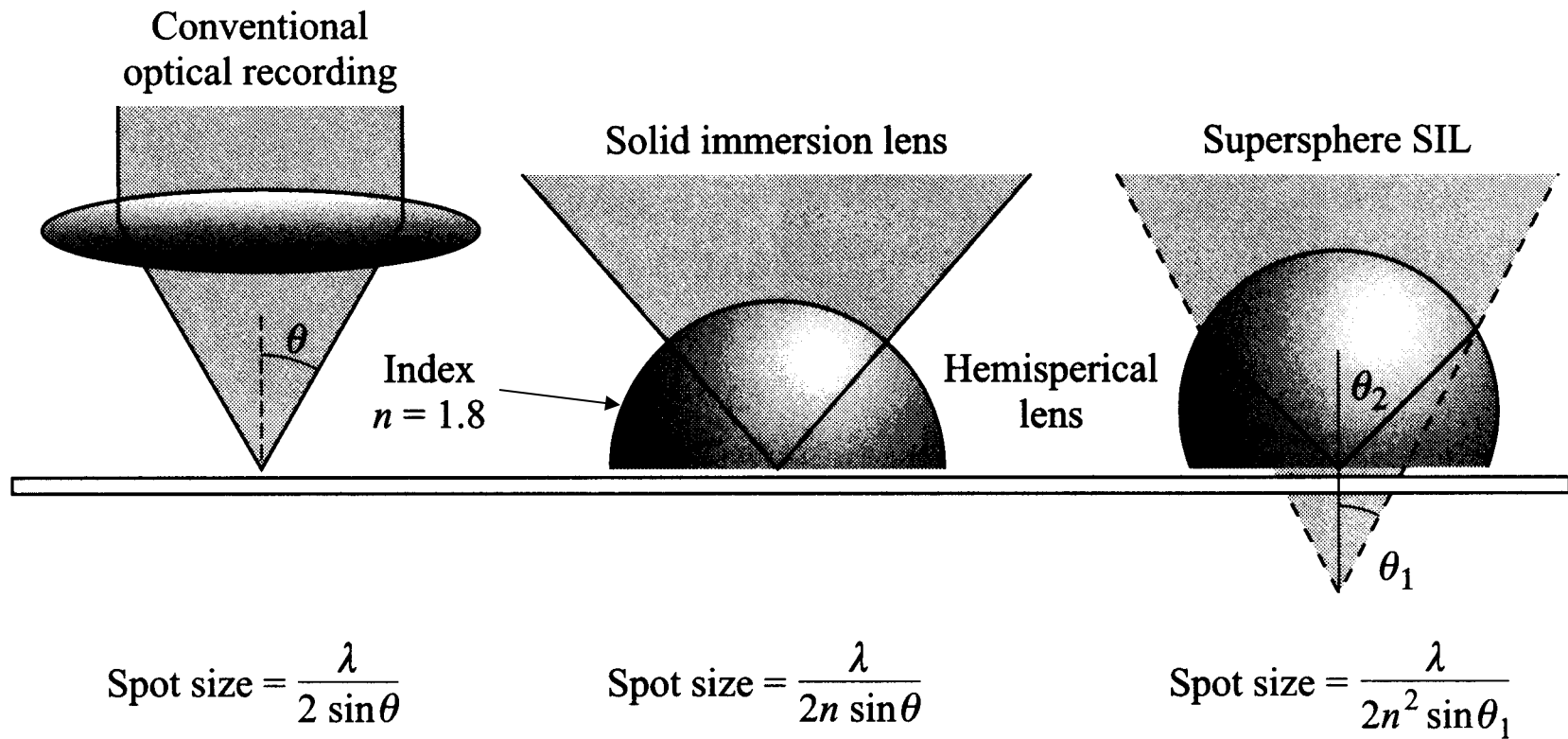


NA=1.5
405nm
80nm mark
40GB

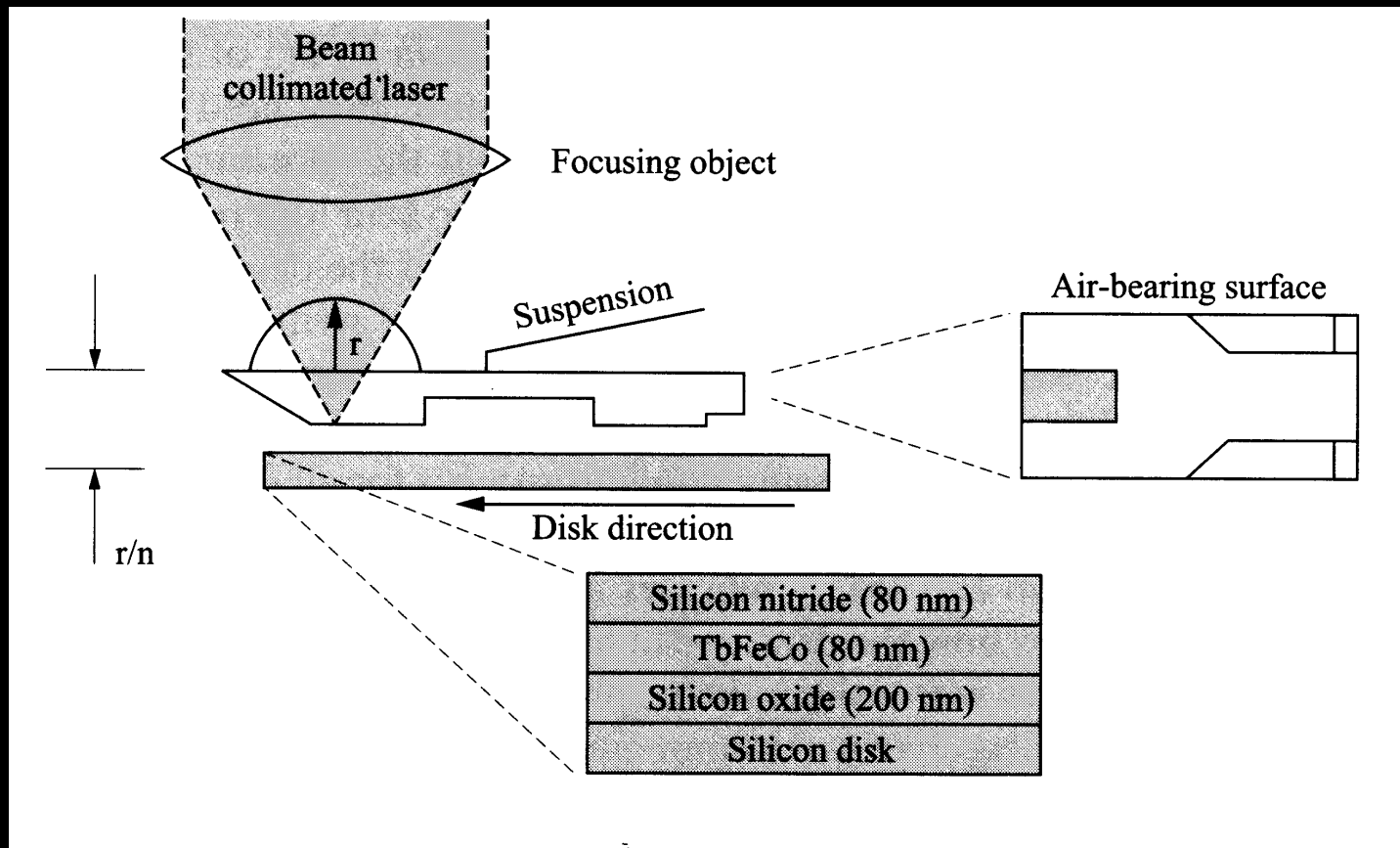
I. Ichimura et. al.
(Sony),
ISOM2000
FrM01

Fig. 1. Schematic diagram of the optical block.

SIL (solid immersion lens)

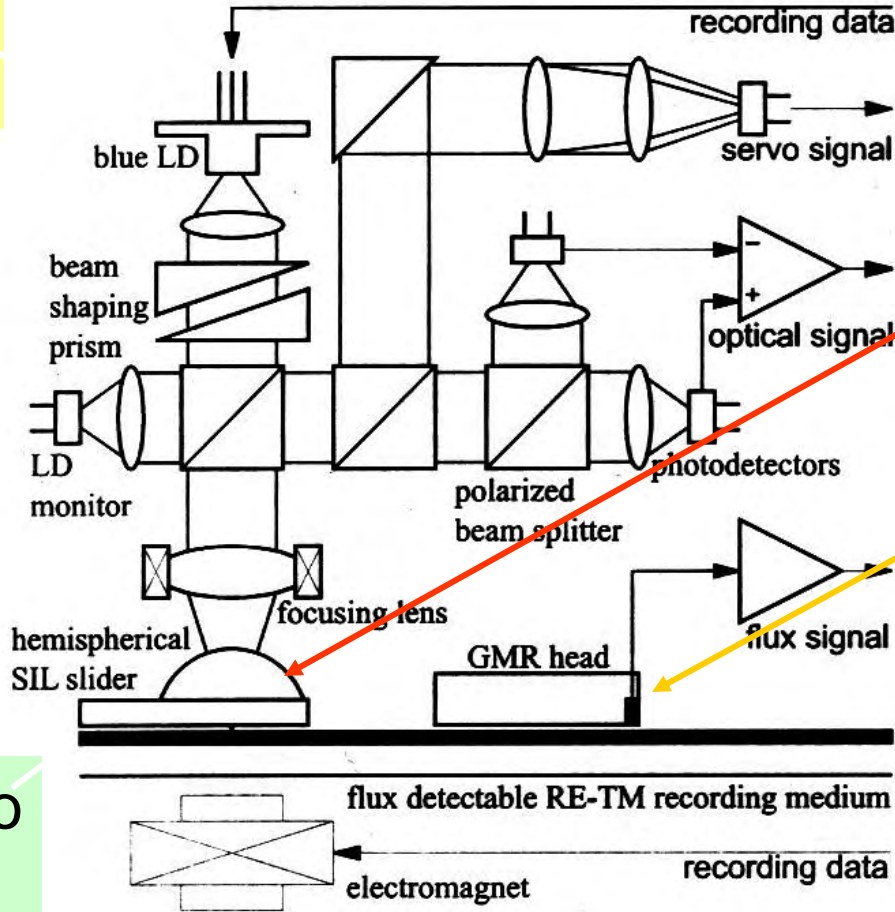


SILを用いた光記録



光アシストハードディスク

青紫色
レーザ



記録用
光ヘッド
(SIL)

再生用
磁気ヘッド

60Gbit/in²を達成

H. Saga et al. Digest
MORIS/APDSC2000,
TuE-05, p.92.

TbFeCo
disk

革新的技術をめざして(1)

・ 体積ホログラフィ

- 干渉を利用して光の位相情報を記録
- 位置のシフトにより、異なる情報を体積的に記録
- フトリフラクティブ結晶、フotpリマーの開発
- 空間光変調器(SLM)の進歩：
 - ・ デジタルマイクロミラー(DMD)など
- 高感度光検出器アレーの出現：
 - ・ CMOS型アクティブピクセルデテクタ(APD)

革新的技術をめざして(2)

- ホールバーニングメモリ

- 波長多重記録

- 不均一吸収帯内の特定波長の吸収を消滅して記録

- 無機物：

- アルカリハライドの色中心の電子励起とトラッピング

- 絶縁物中の希土類イオンや遷移金属イオンの電子励起吸収帯

- $\text{Eu}^{+3}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$ を用いてホールバーニングによるホログラフィック動画記録に成功している^[i]。

^[i]光永正治, 上杉 直, 佐々木 浩子, 唐木 幸一 :応用物理, **64** (1995) 250.

- 有機物：

- 光互変異性、水素結合の光最配位、光イオン化などの光吸収帯

- 常温で動作する材料開発が課題

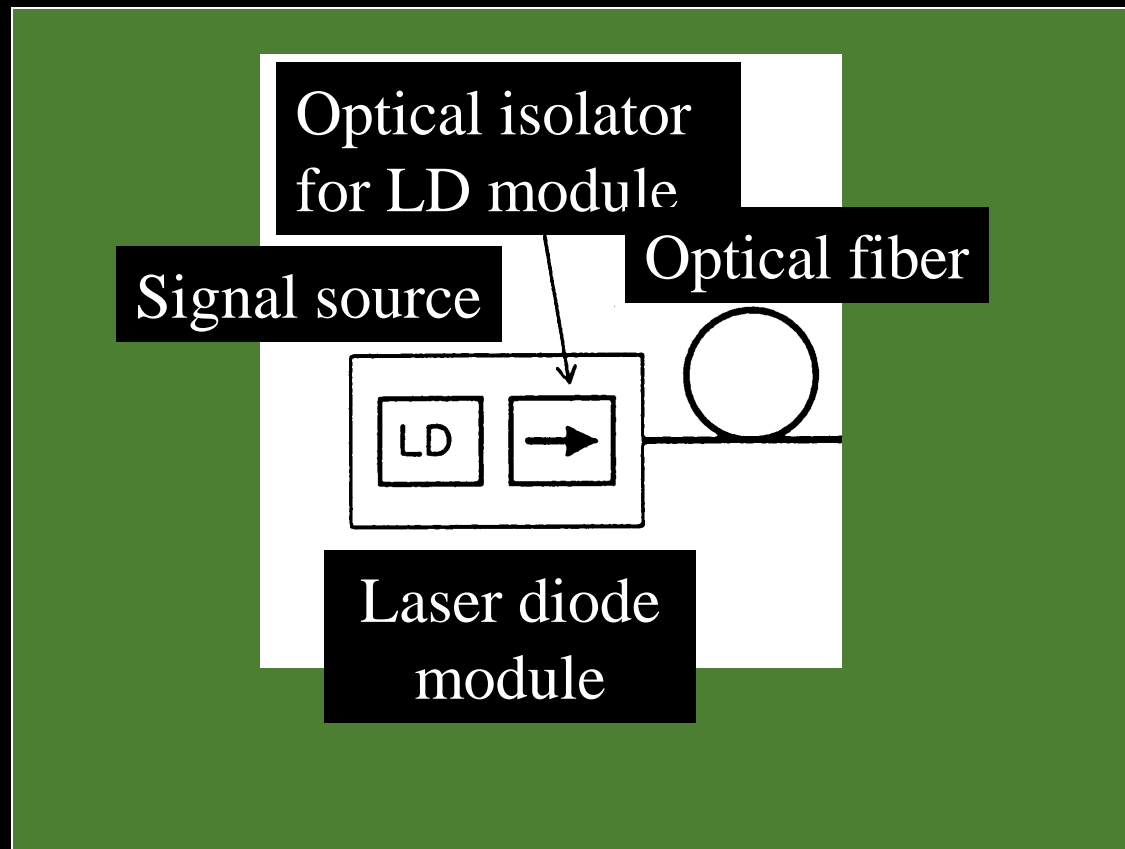
光通信と磁気光学



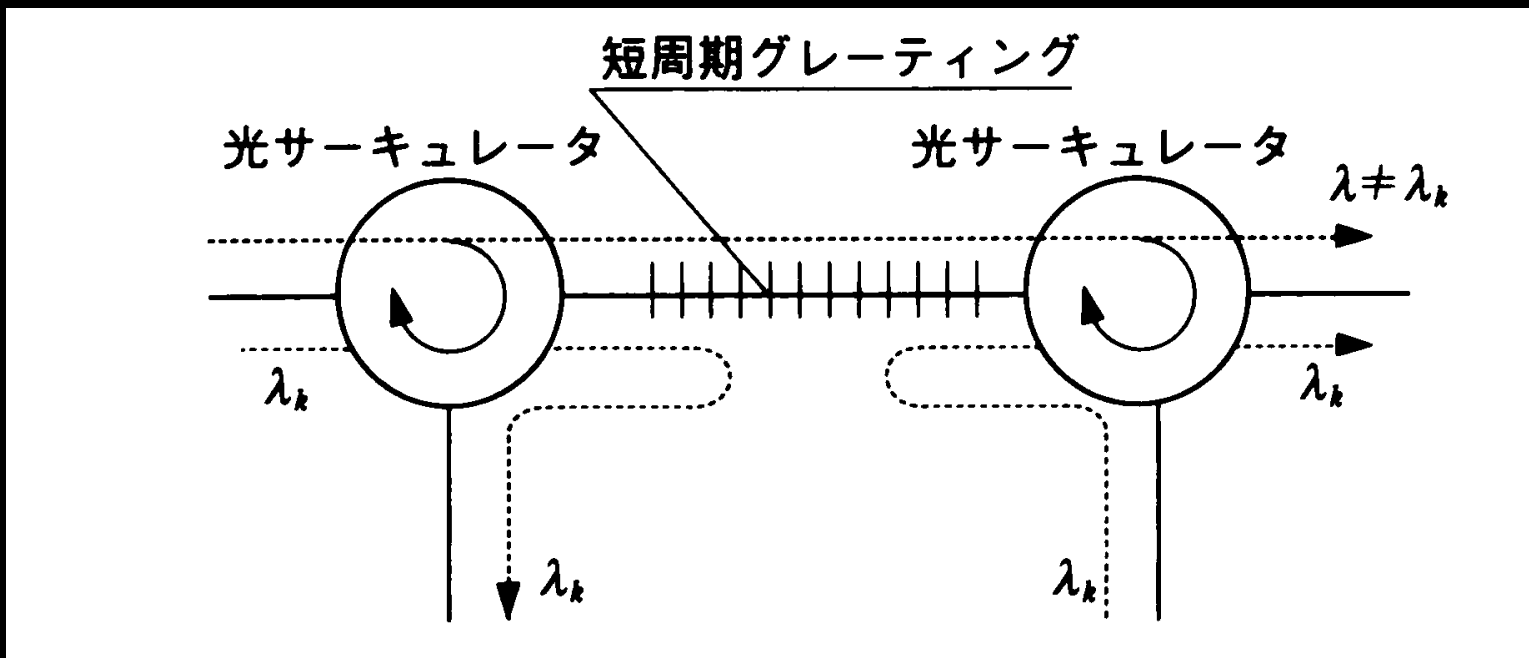
光通信における 磁気光学デバイスの位置づけ

- 戻り光は、LDの発振を不安定にしノイズ発生原因になる→アイソレータで戻り光を阻止。
- WDMの光アドドロップ多重(OADM)においてファイバグレーティングと光サーキュレータ
特定波長を選択
- EDFAの前後にアイソレータを配置して動作を安定化。ポンプ用レーザについても戻り光を阻止
- 光アッテネータ、光スイッチ

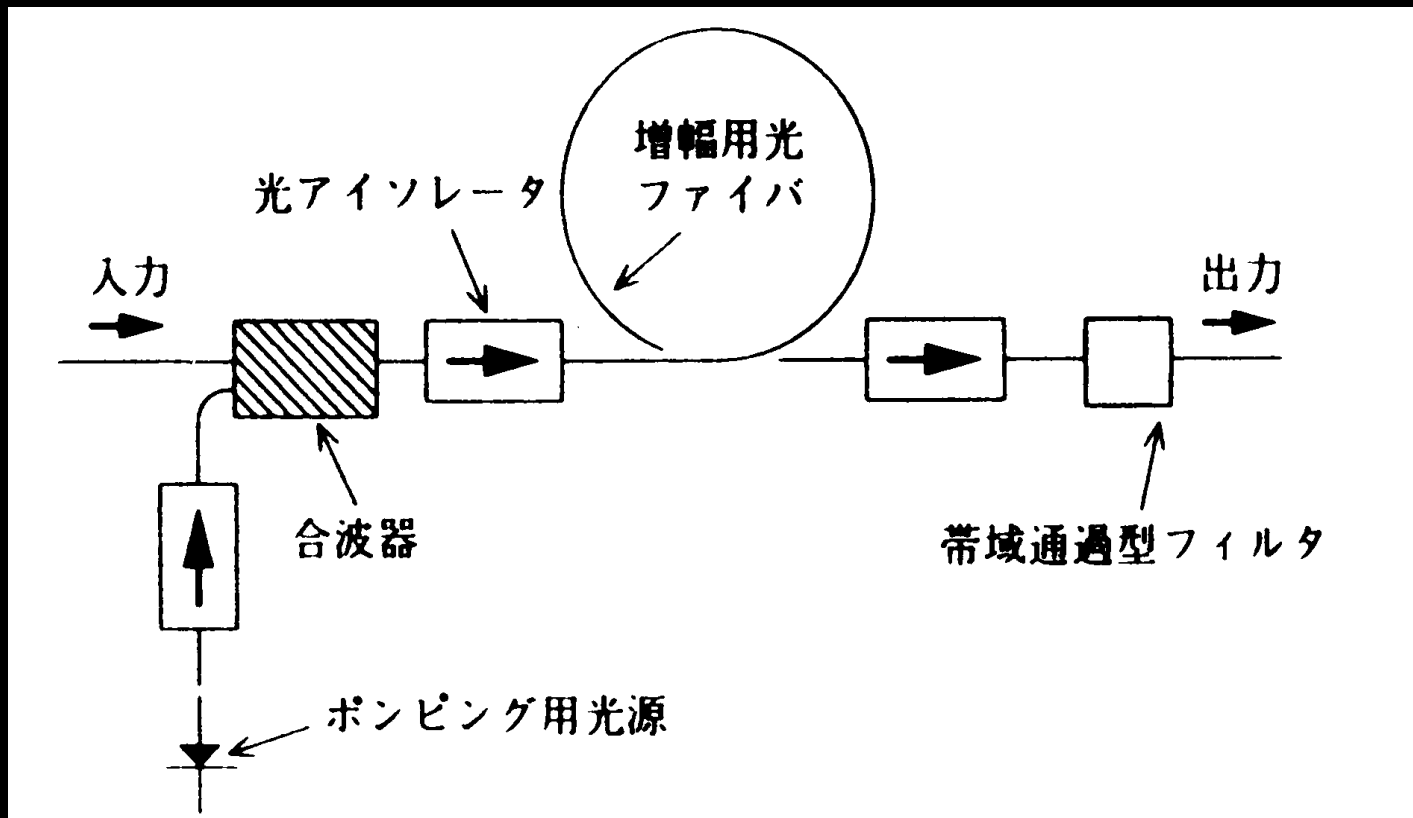
半導体レーザーモジュール用アイソレータ



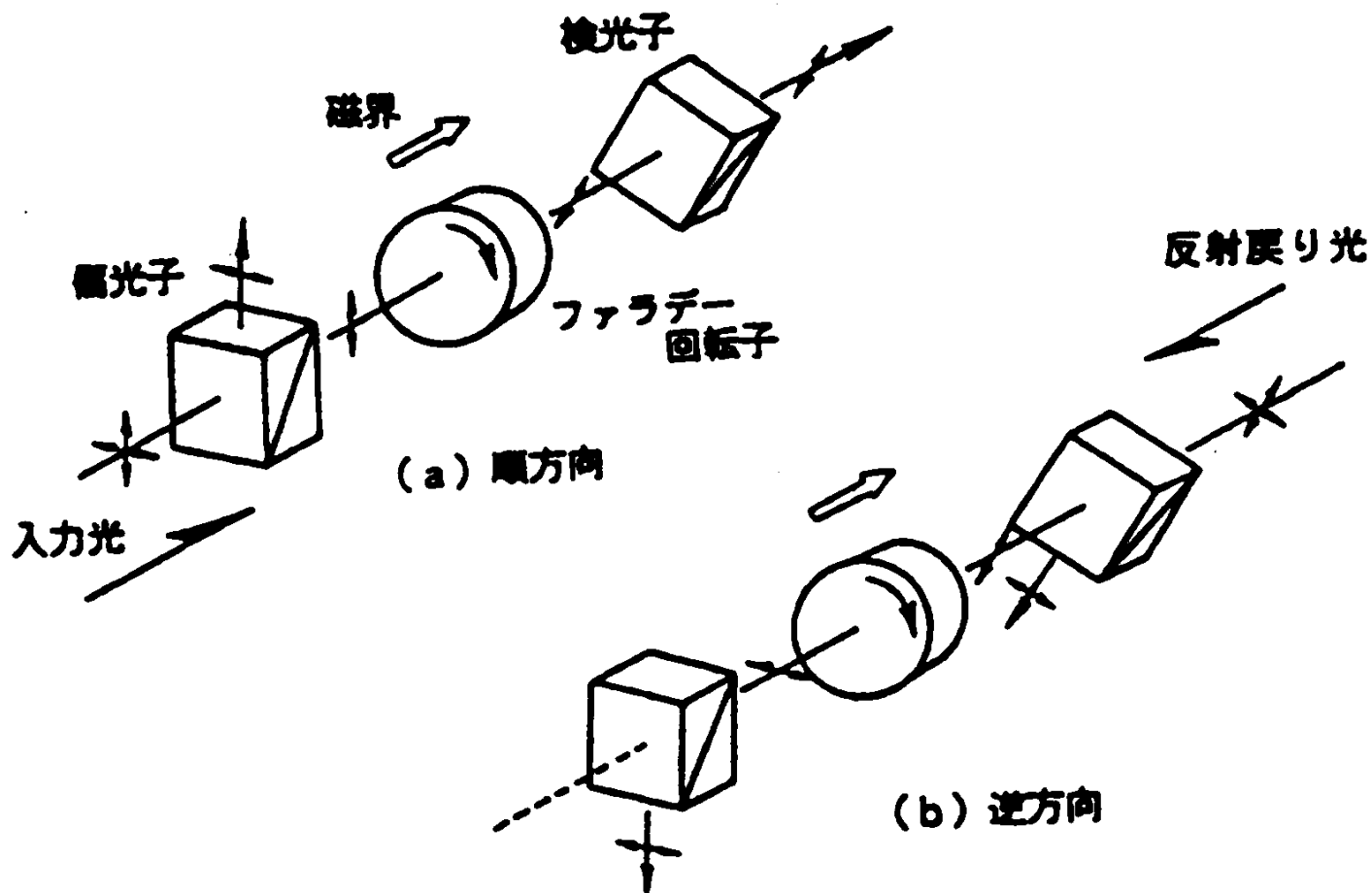
光アドドロップとサーキュレータ



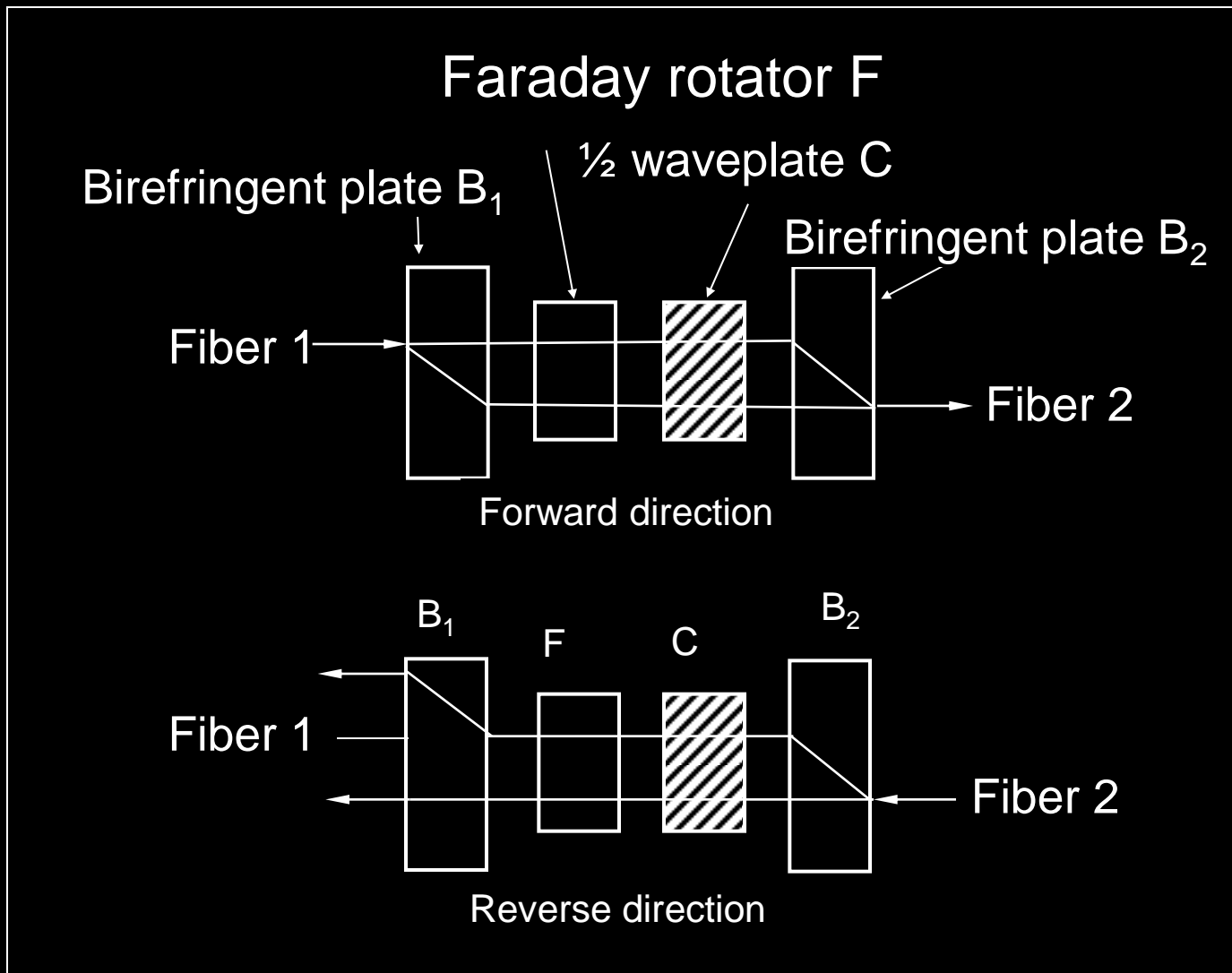
光ファイバ増幅器と アイソレータ



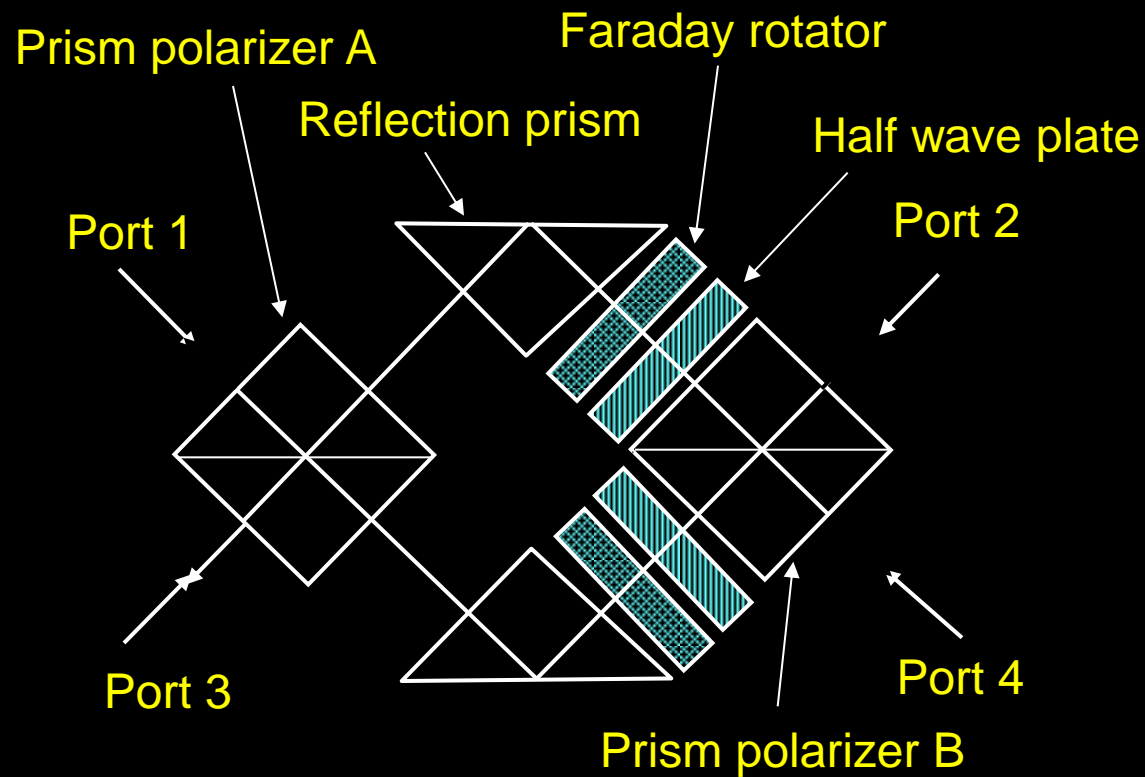
偏光依存アイソレータ



偏光無依存アイソレータ



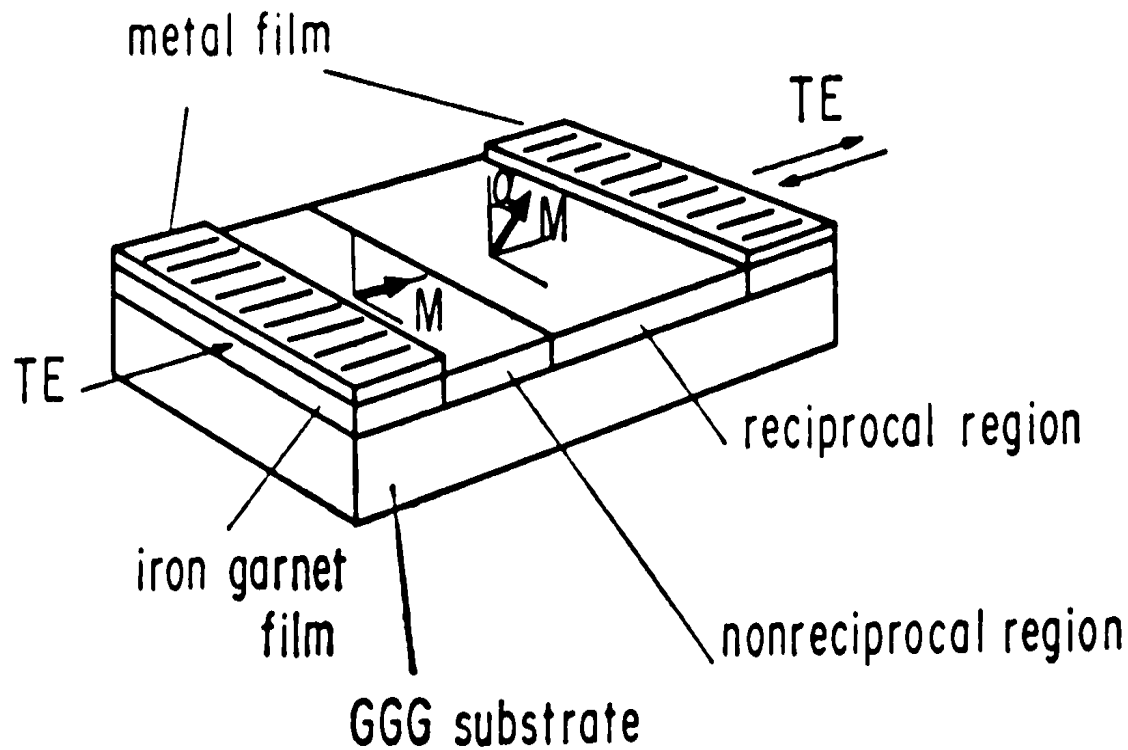
磁気光学サーキュレータ



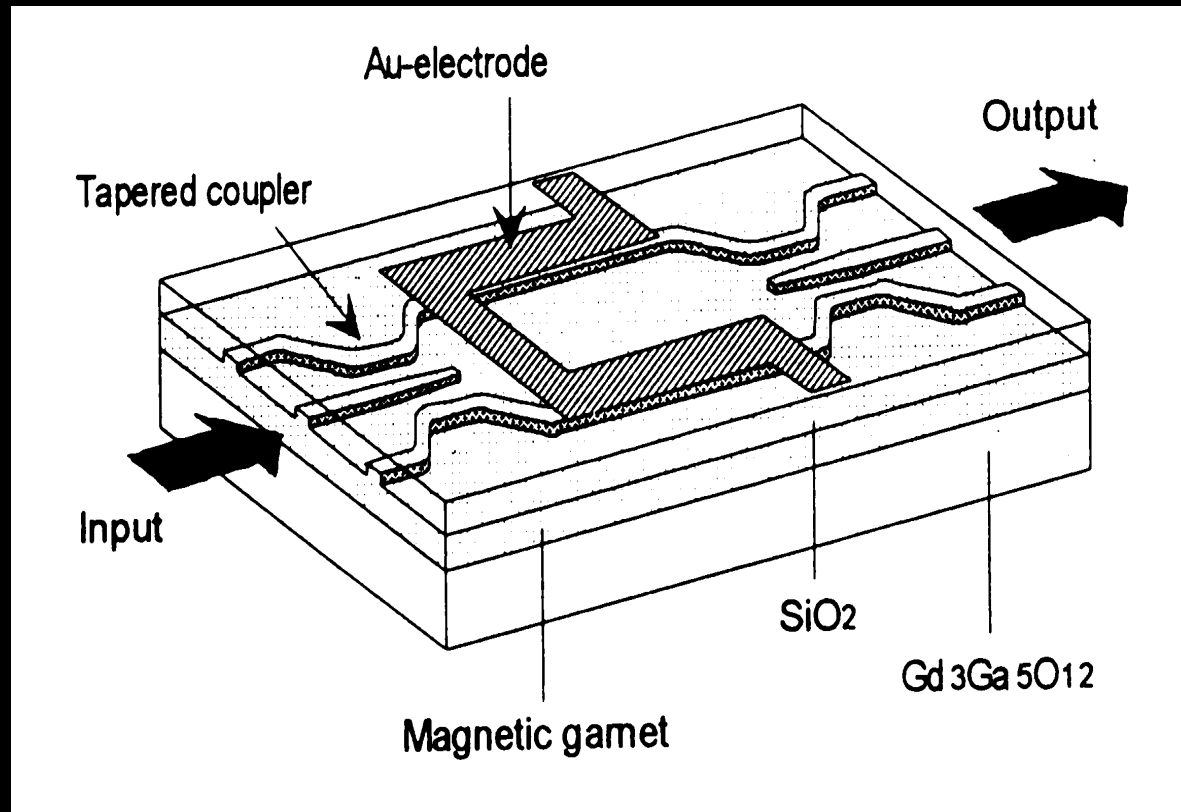
アイソレータの今後の展開

- ・ 小型・軽量・低コスト化
- ・ 半導体レーザとの一体化
- ・ サイズ：波長と同程度→薄膜/空気界面、あるいは、薄膜/基板界面の境界条件重要
- ・ タイプ：
 - 磁気光学材料導波路形：材料の高品質化重要
 - リブ形
 - 分岐導波路形

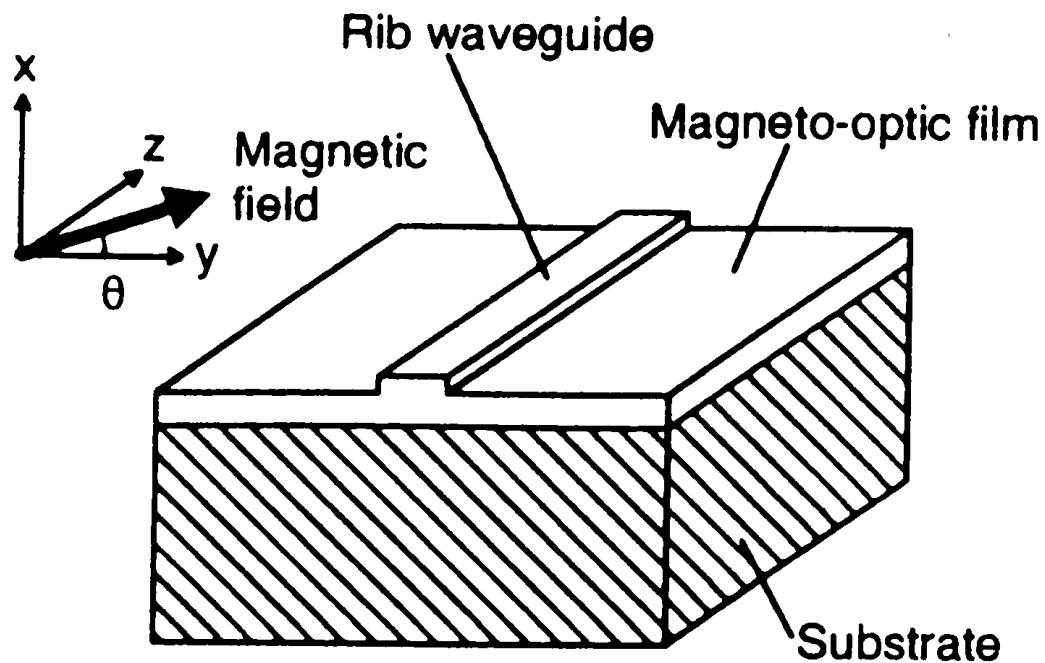
導波路形アイソレータ



マツハツェンダー形アイソレーター



リブ形アイソレータ



半導体とアイソレータの一体化

- 貼り合わせ法

- 半導体上に直接磁性ガーネット膜作製→格子不整合のため困難
- ガーネット膜を作っておき、半導体基板に貼り合わせる方法が提案されている

- 希薄磁性半導体の利用

- DMSの結晶構造:GaAsと同じ閃亜鉛鉱型→
- 半導体レーザとの一体化の可能性。
- 導波路用途の面内光透過の良質の薄膜作製

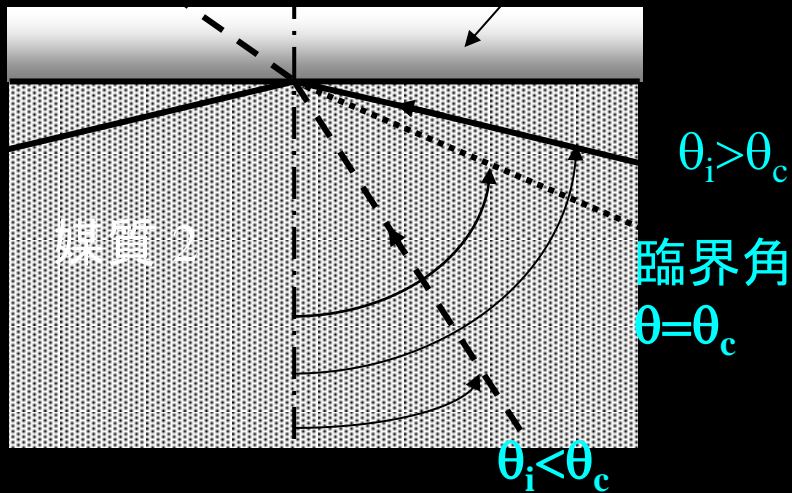
MBE法でCdMnTe

バッファ層 : ZnTe, CdTe層

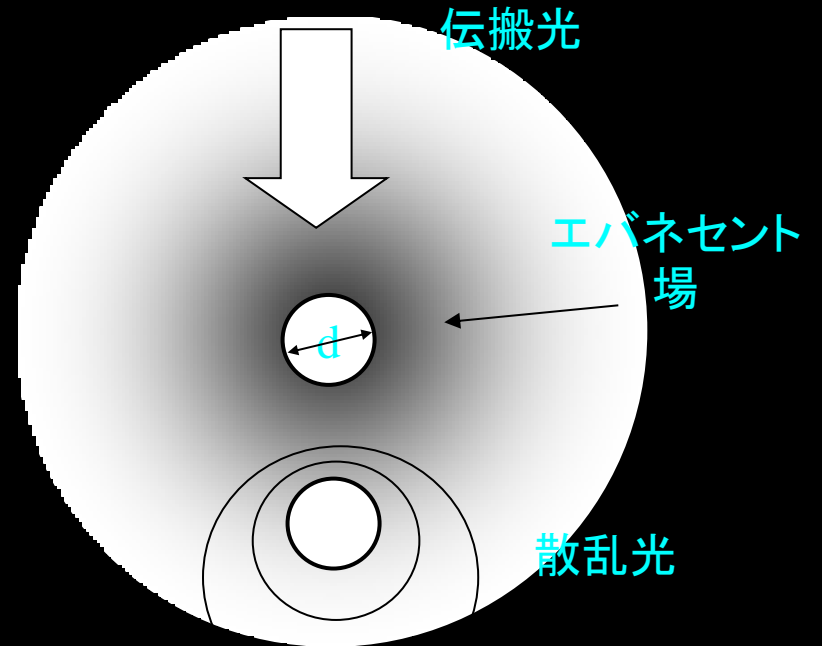
磁気光学効果の最近の展開



近接場とは

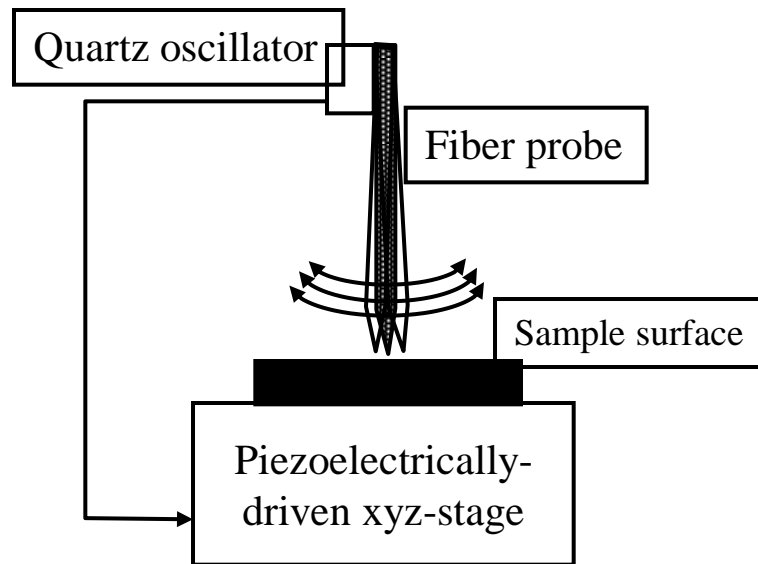


全反射とエバネセント波

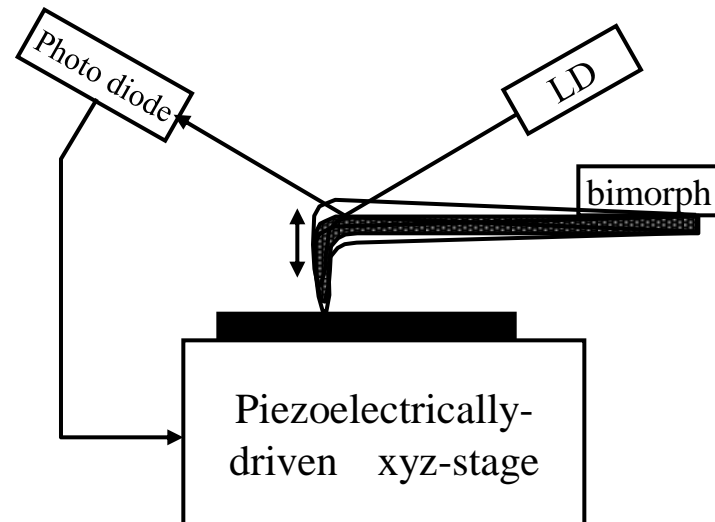


微小物体の周りのエバネセント場に置かれたもう1つの微小物体による散乱光

プローブの高さ制御

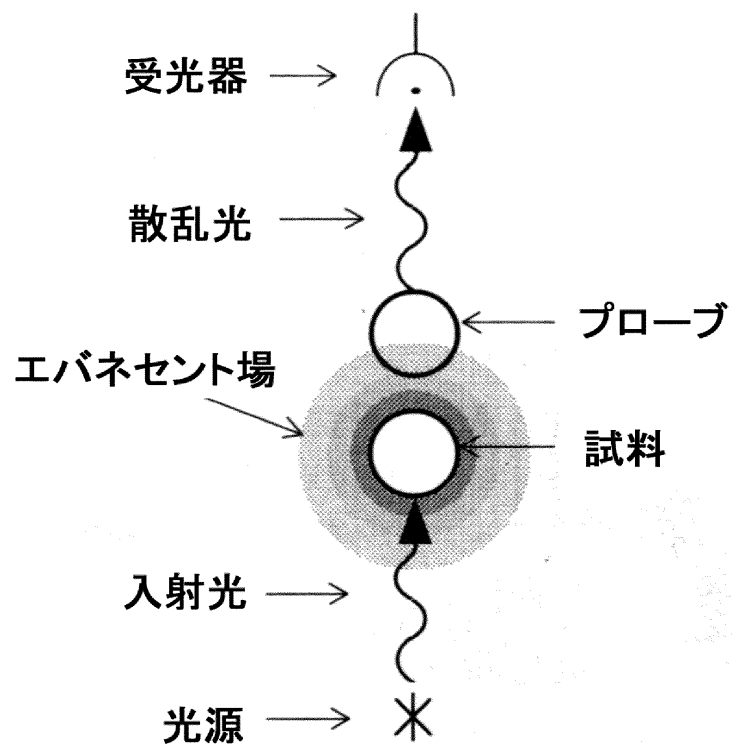


Shear force(剪断力)方式

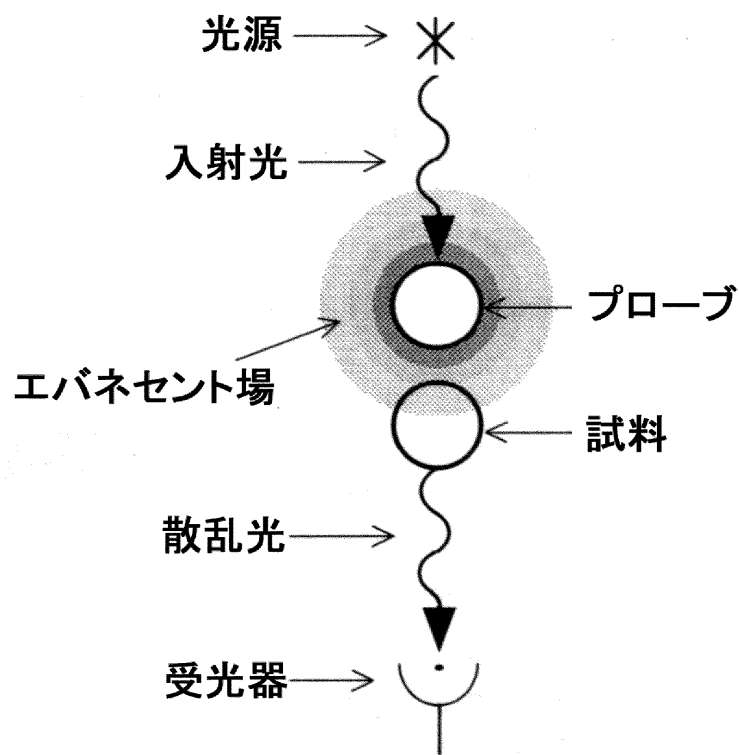


カンチレバー方式

集光モード(a)と照射モード(b)



(a)



(b)

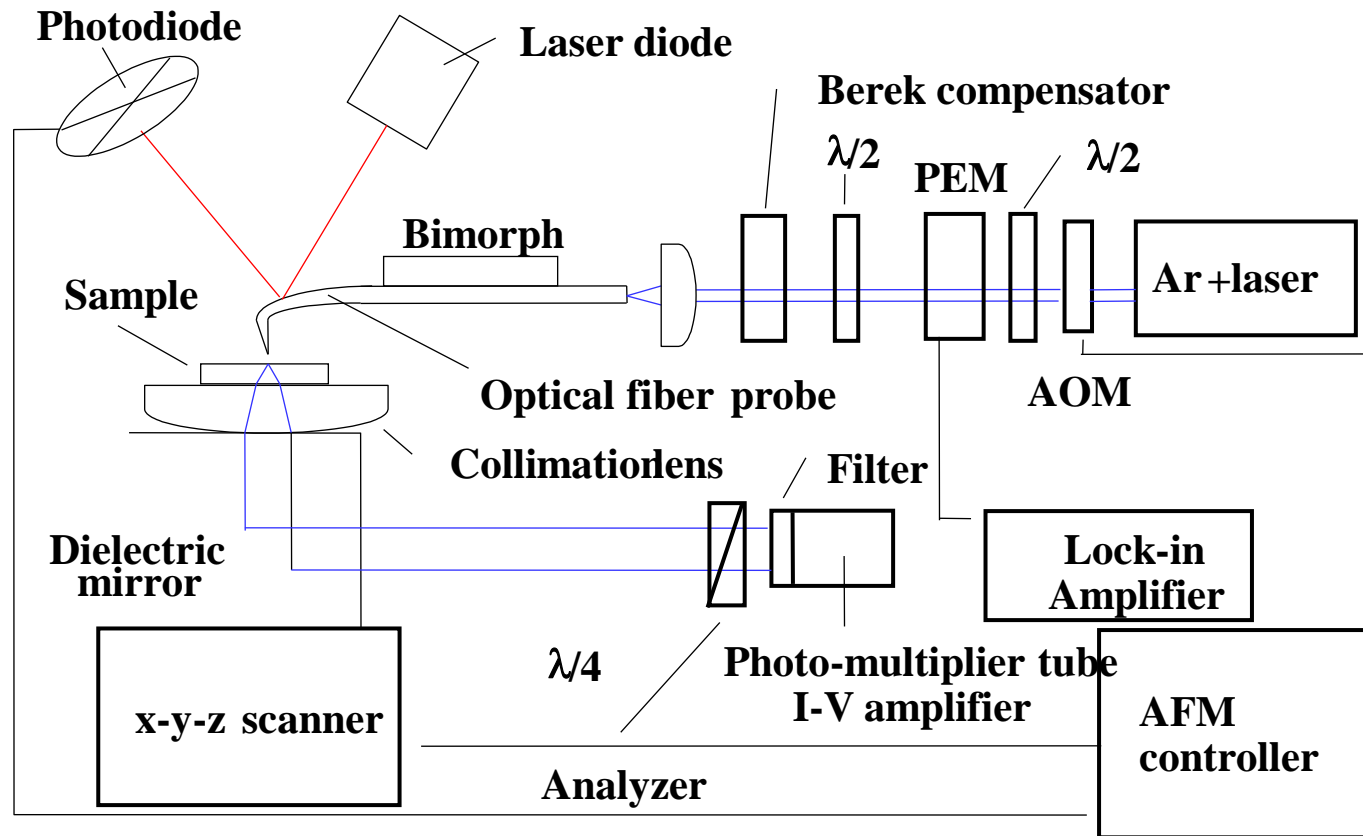
SNOMによる磁気光学測定

- ・ 1991 Betzig : 光ファイバーをテーパー状に細めたプローブ で光磁気記録・再生に成功
- ・ 1992 Betzig: 超微細加工した金属細線リングの偏光像
- ・ 多くの研究あるが、高解像度のMO-SNOM像は得られていない
- ・ 偏光をファイバを通して伝えるのが困難

SNOM-AFM

- SNOM-AFMモードを利用
- はじめ:クロスニコル法→コントラスト比とれない
- 解決法:PEMによる偏光変調
- ファイバー特性の測定とよいプローブの選別
- 偏光伝達特性の補償
- 約 $0.1\mu\text{m}$ の解像度を達成

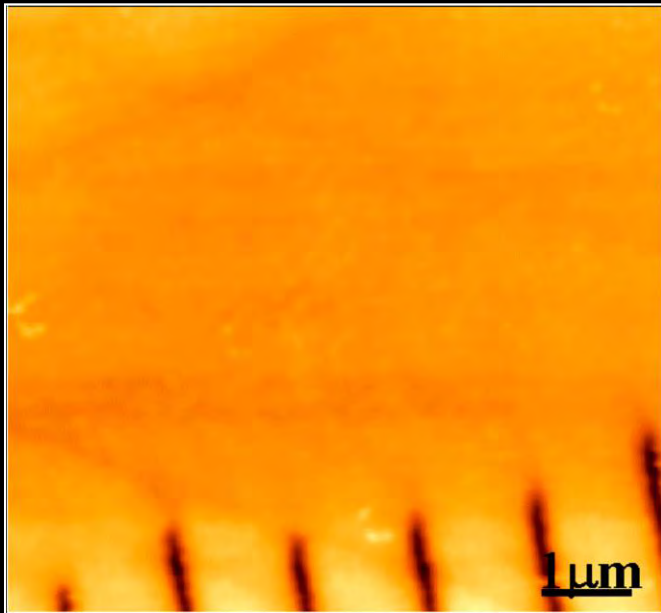
MO- SNOM (polarization modulation technique)



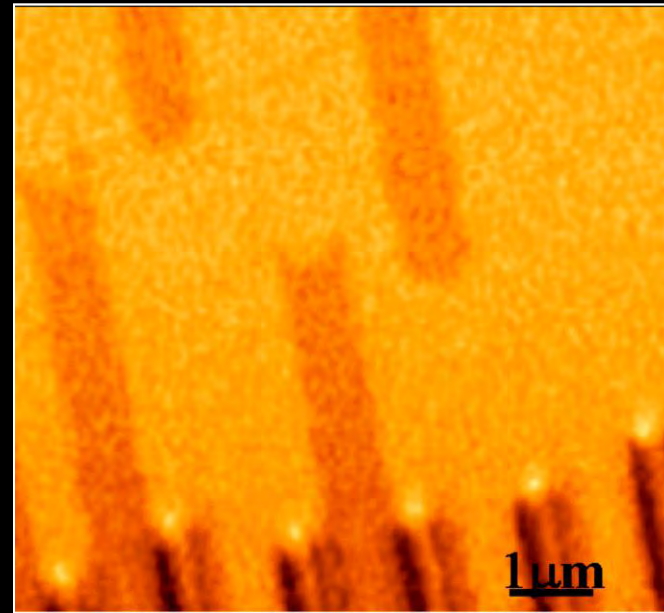
ベントファイバプローブ



**Images obtained by MO-SNOM
(polarization modulation technique)**



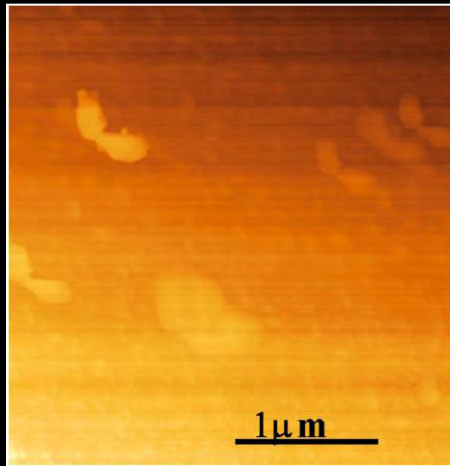
Topography



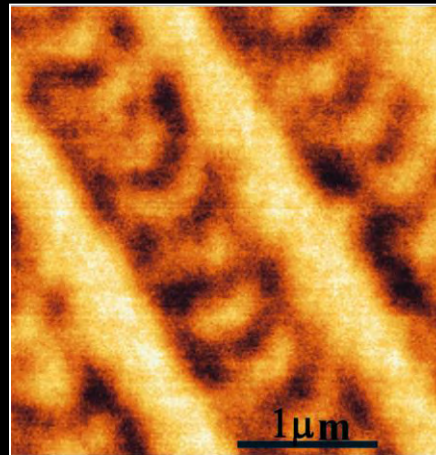
MO image

0.2 μm マークのトポ像と磁気光学像

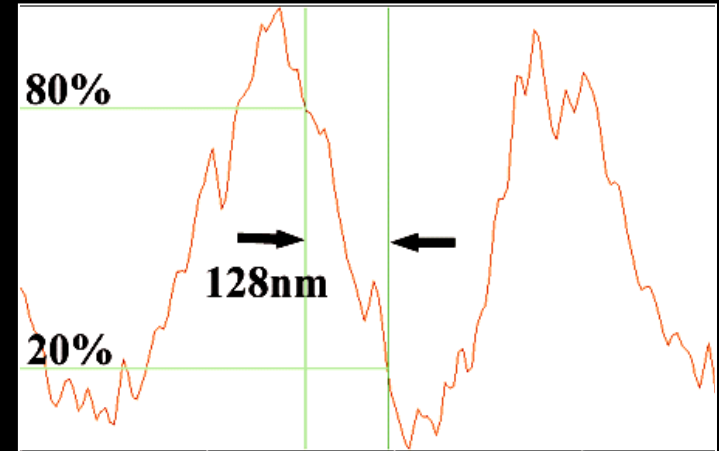
解像度の定義



トポ像



MO 像



ラインプロファイル

非線形磁気光学効果

- 非線形光学効果とは
第2高調波光に対する磁気光学効果
- 非線形カー回転とは？
P偏光が入射したとき、SH光にはP成分とS成分が生じ、入射面から回転する。
- 中心対称のある物質(Fe, Auなど)では、電気双極子によるSHGは起きない。表面界面に敏感

理論的予言と実験的検証

- 非線形磁気光学効果は、線形の磁気光学効果よりも大きな効果が生じる可能性が予言され¹⁾、これを検証するために多くの実験が試みられ最近になって明確に検証された^{2,3)}。

1) W. Hübner and K.-H. Bennemann: Phys. Rev. **B40**, 5973 (1989)

2) Th. Rasing et al.: J. Appl. Phys. **79**, 6181 (1996)

3) Th. Rasing: J. Mag. Soc. Japan **20** (Suppl. S1), 13 (1996)

非線形磁気光学効果の表面敏感性

•非線形磁気光学効果の応用

表面界面の
対称性の破れ
に敏感



磁性人工格子の層間
相互作用の評価、
磁区のイメージング

この効果は、記録技術としては実用に直結するとは考えられないが、新しい観測手段として見た場合、線形磁気光学効果にはない多くの情報を提供するので、磁性の基礎研究者から注目を集めている。

非線形光学効果

- For weak incident laser field $E(\omega)$:

$$P_i^{(1)} = \chi_{ij}^{(1)} \varepsilon_0 E_j$$

linear

Nonlinear
response

- For strong incident laser field $E(\omega)$:

$$P_i = \varepsilon_0 (\chi_{ij}^{(1)} E_j + \chi_{ijk}^{(2)} E_j E_k + \chi_{ijkl}^{(3)} E_j E_k E_l + \dots)$$

Third rank tensor is not allowed in centrosymmetric materials.

- Nonlinear polarization $P^{(2)}$ for incident field of $E = E_0 \sin \omega t$

$$P^{(2)} = \varepsilon_0 \chi^{(2)} \frac{E_0}{2} + \varepsilon_0 \chi^{(1)} E_0 \sin \omega t - \varepsilon_0 \chi^{(2)} \frac{E_0^2}{2} \cos 2\omega t + \dots$$

2次の非線形分極

$$P_i^{(2)}(t) = \int d\tau_1 d\tau_2 \chi_{ijk}^{(2)}(\tau_1, \tau_2) E_j(t - \tau_1) E_k(t - \tau_2)$$

$$E_j(t) = \{ E_{1j} \exp(i\omega_1 t) + E_{2j} \exp(i\omega_2 t) + c.c. \} / 2$$



parametric process

$$P_i^{(2)}(t) = P_i^{(2)}(\omega_1 + \omega_2) \exp\{i(\omega_1 + \omega_2)t\} + P_i^{(2)}(\omega_1 - \omega_2) \exp\{i(\omega_1 - \omega_2)t\}$$

$$+ P_i^{(2)}(0) + P_i^{(2)}(2\omega_1) \exp(i2\omega_1 t) + P_i^{(2)}(2\omega_2) \exp(i2\omega_2 t) + c.c$$

光整流

SHG process

非線形感受率の定義

$$P_i^{(2)}(\omega_1 + \omega_2) = \chi_{ijk}^{(2)}(\omega_1 + \omega_2; \omega_1, \omega_2) E_j(\omega_1) E_k(\omega_2)$$

$$P_i^{(2)}(\omega_1 - \omega_2) = \chi_{ijk}^{(2)}(\omega_1 - \omega_2; \omega_1, \omega_2) E_j(\omega_1) E_k(\omega_2)$$

$$P_i^{(2)}(0) = (1/2) \chi_{ijk}^{(2)}(0; \omega, -\omega) E_j(\omega) E_k(\omega) \quad (\omega = \omega_1, \omega_2)$$

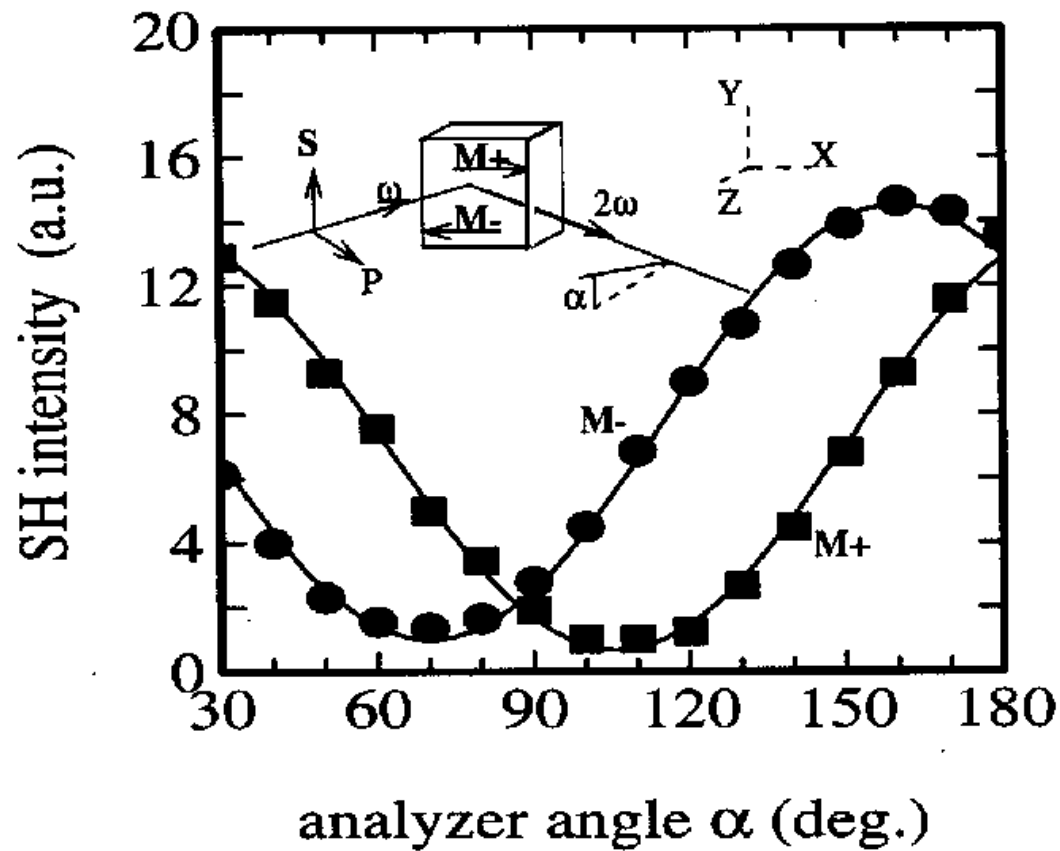
$$P_i^{(2)}(2\omega) = (1/2) \chi_{ijk}^{(2)}(2\omega; \omega, \omega) E_j(\omega) E_k(\omega) \quad (\omega = \omega_1, \omega_2)$$

反転対称をもつ物質  $\chi_{ijk}^{(2)}$ のすべての成分は消滅

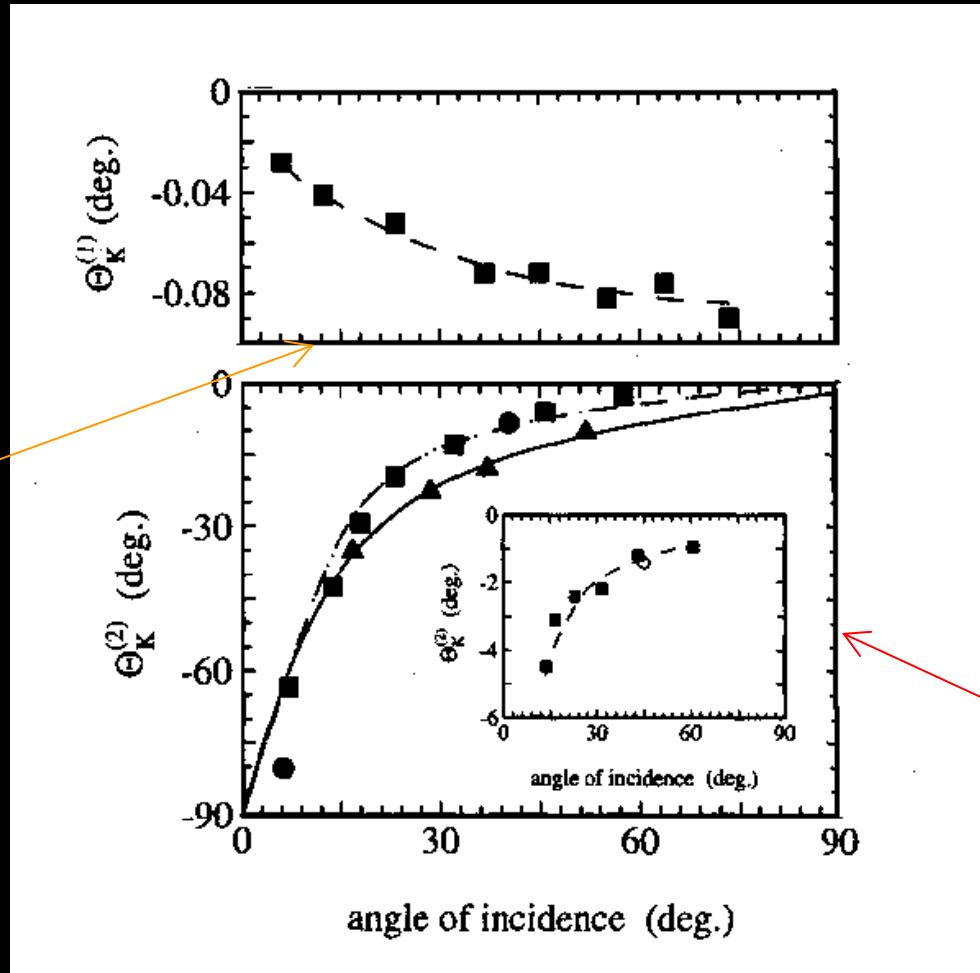
(対称操作から)

表面や界面  対称性の破れ  反転対称をもつ物質でも
有限の非線形感受率を示す

Feの非線形力一回転



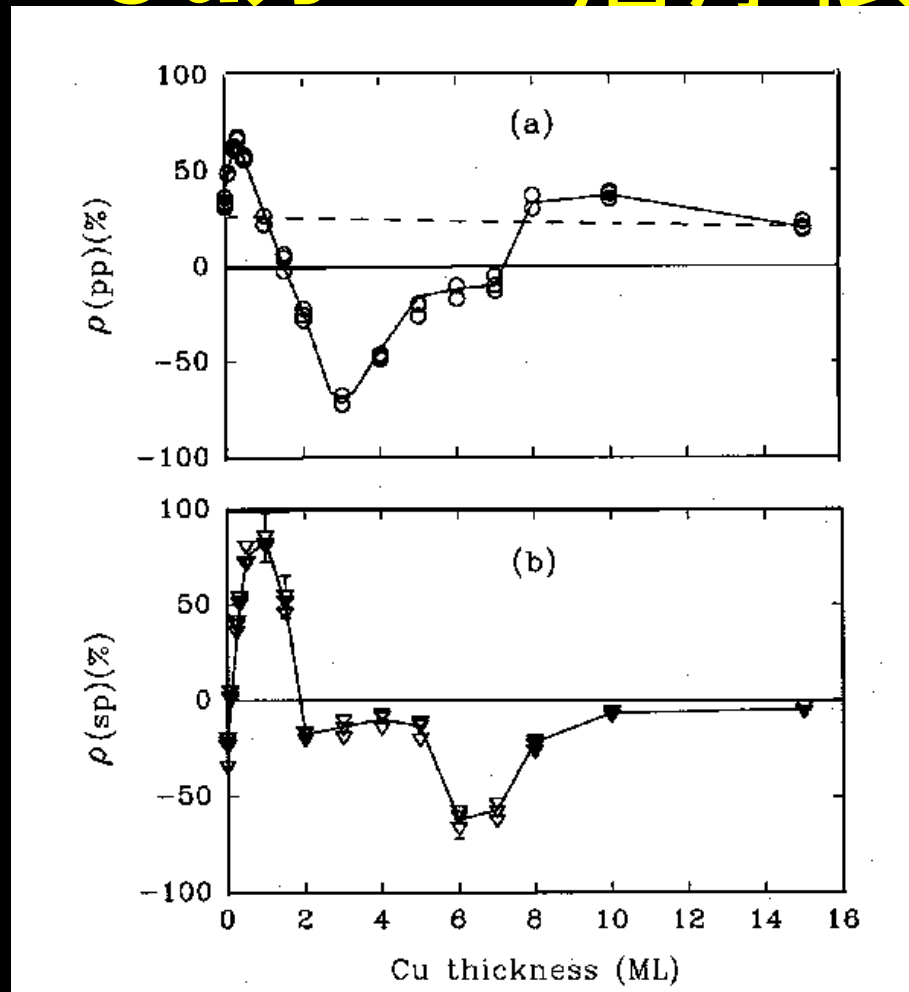
非線形力一回転角の入射角依存性



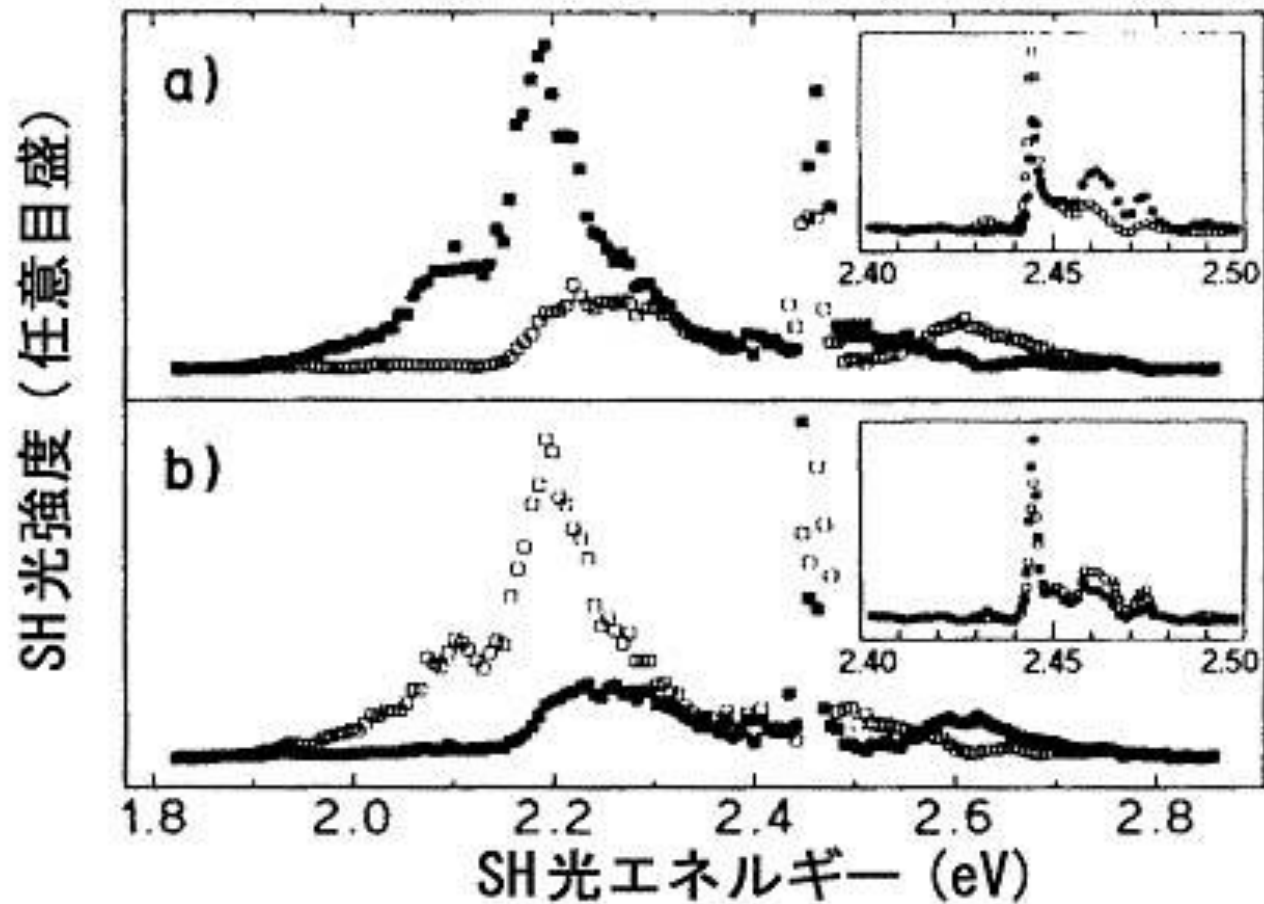
線形力一効果

非線形力一効果

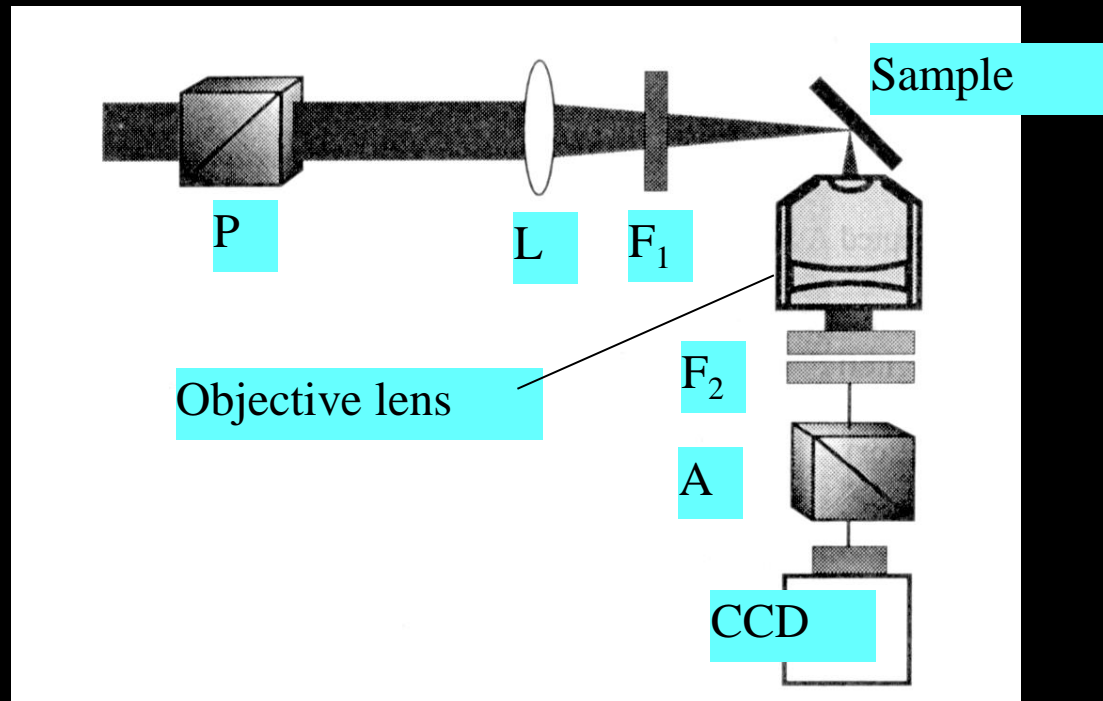
Co10MLの非線形カー効果の Cuカバー層厚依存性



Cr₂O₃のMSHG

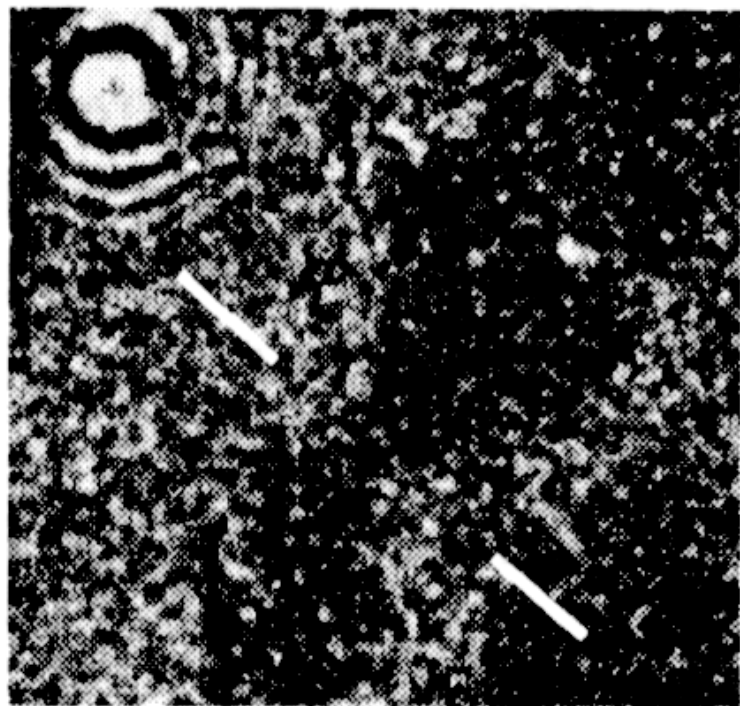


非線形磁気光学顕微鏡

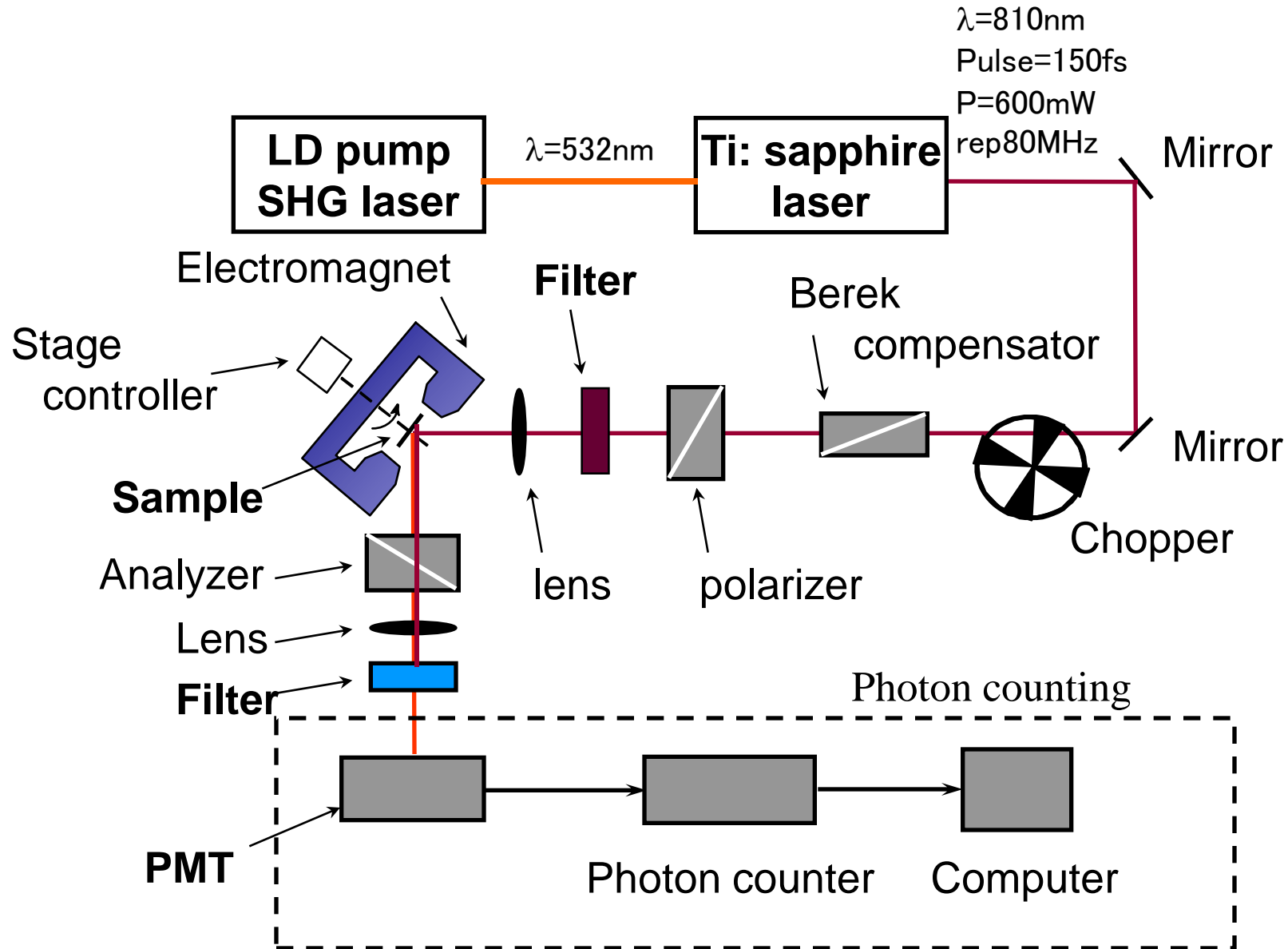


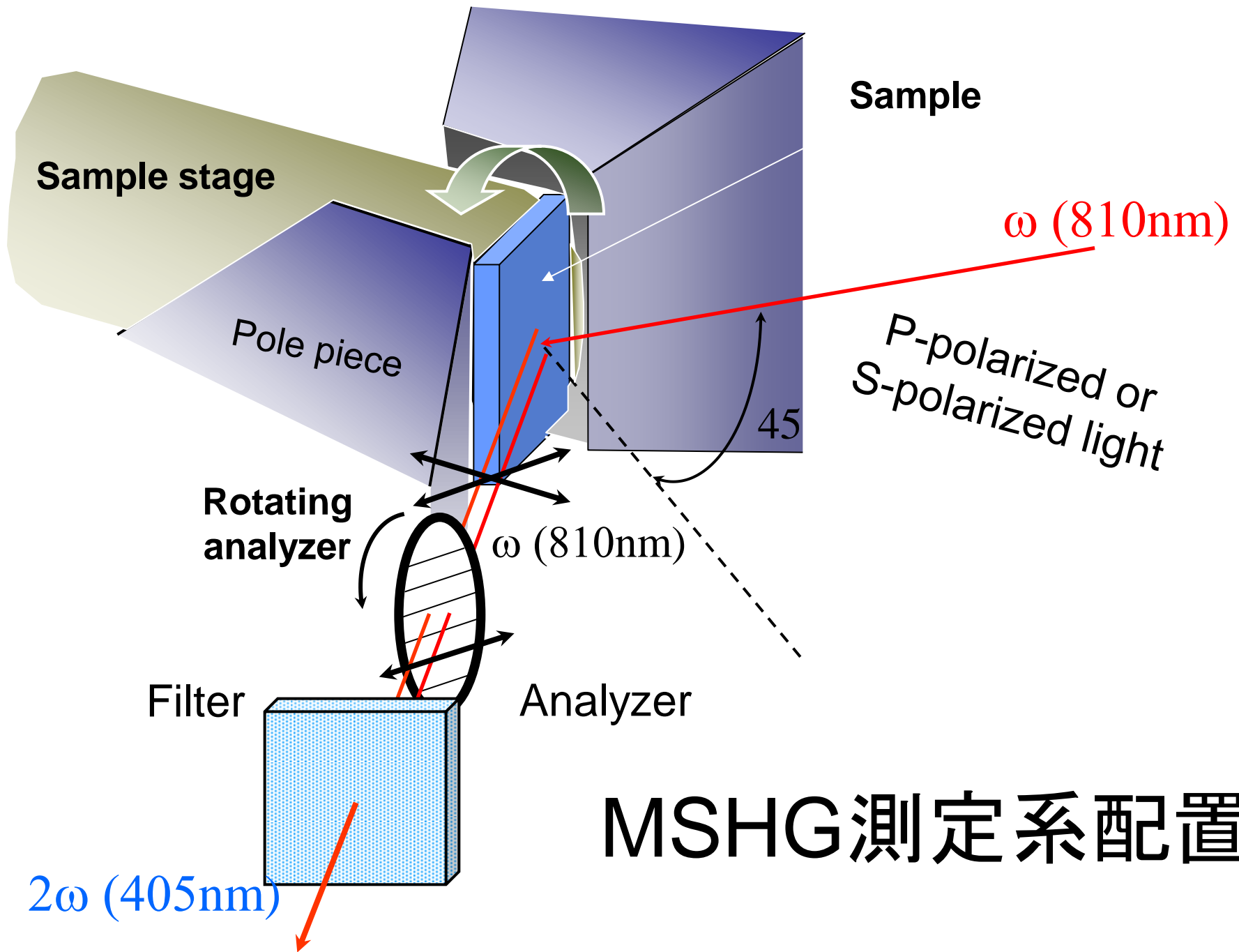
非線形磁気光学顕微鏡の模式図

非線形磁氣光学顯微鏡像



非線形磁気光学効果測定系

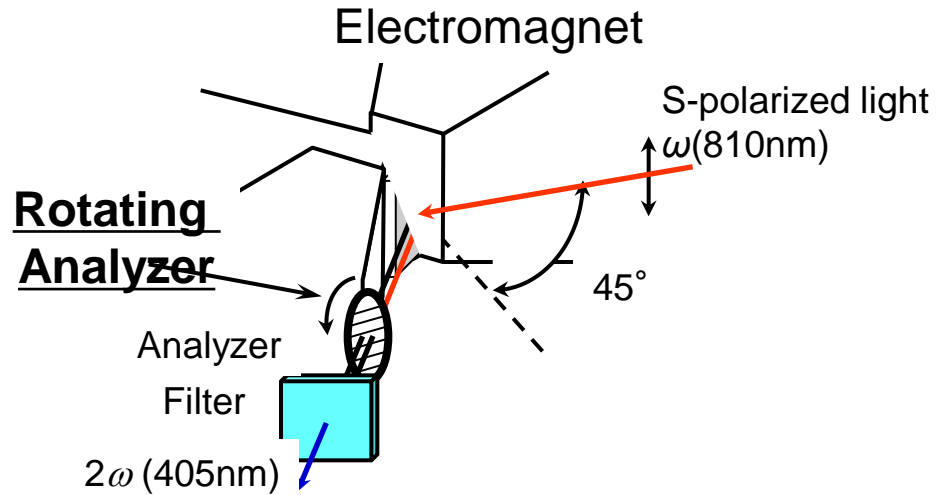
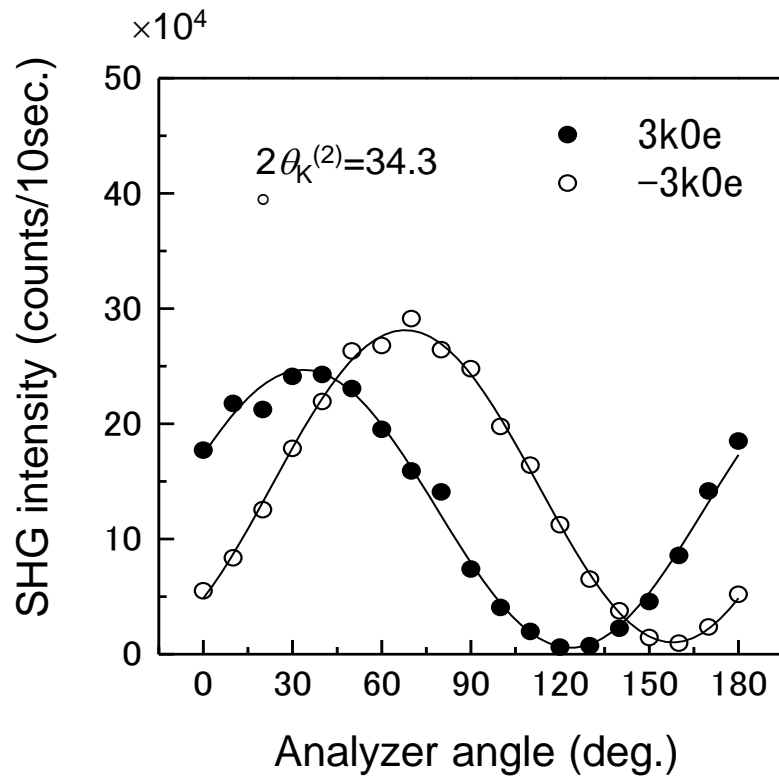




MSHG測定系配置

Result

MSHGの検光子角依存性



The curves show a shift for two opposite directions of magnetic field

$$\eta_K^{(2)} = \frac{1}{2} \left[\tan^{-1} \left(\frac{I_{MAX}^{(+)}}{I_{MIN}^{(+)}} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{I_{MAX}^{(-)}}{I_{MIN}^{(-)}} \right) \right]$$

Analyzer angle-dependence for
[Fe(3.5ML)/Au(3.5ML)] superlattice (Sin)

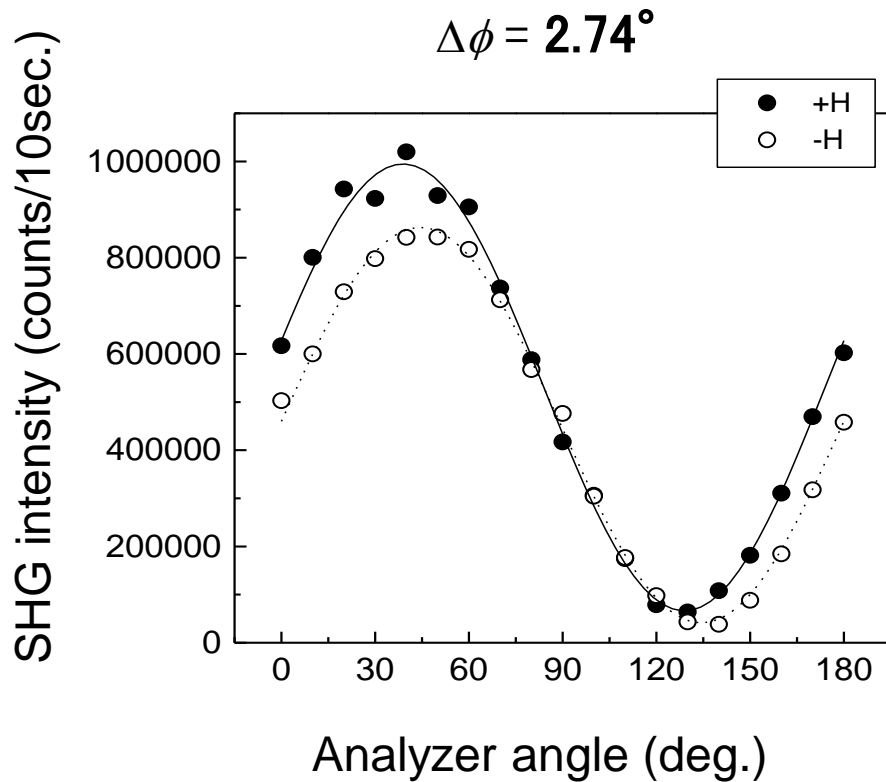
Nonlinear Kerr rotation & ellipticity

$$\theta_K^{(2)} = 17.2^\circ$$

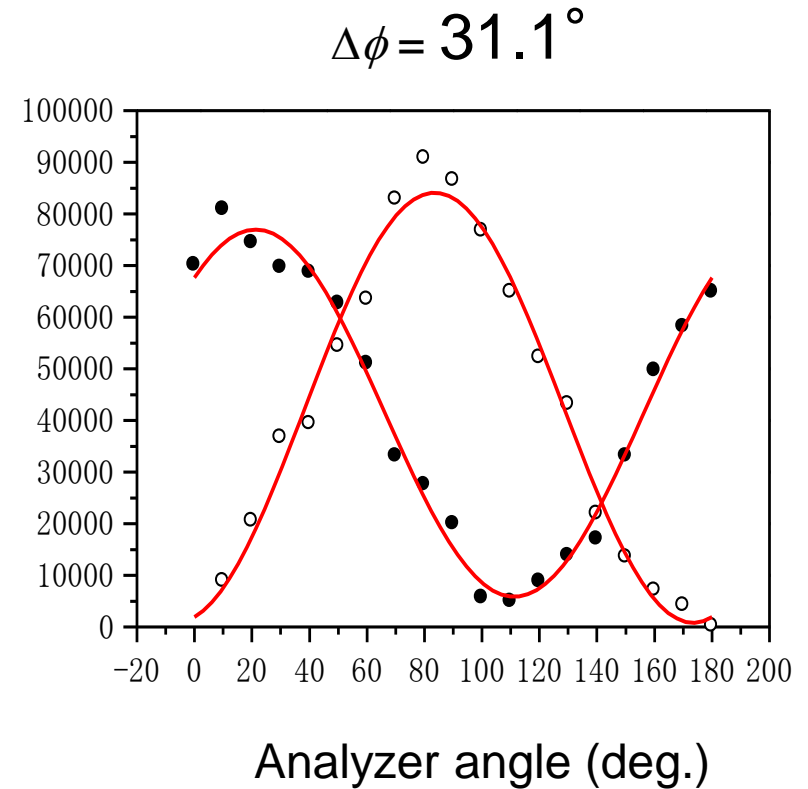
$$\eta_K^{(2)} = 3^\circ$$

Result

Fe/Auの非線形形力一回転角



(a) Fe(1ML)/Au(1ML) Pin

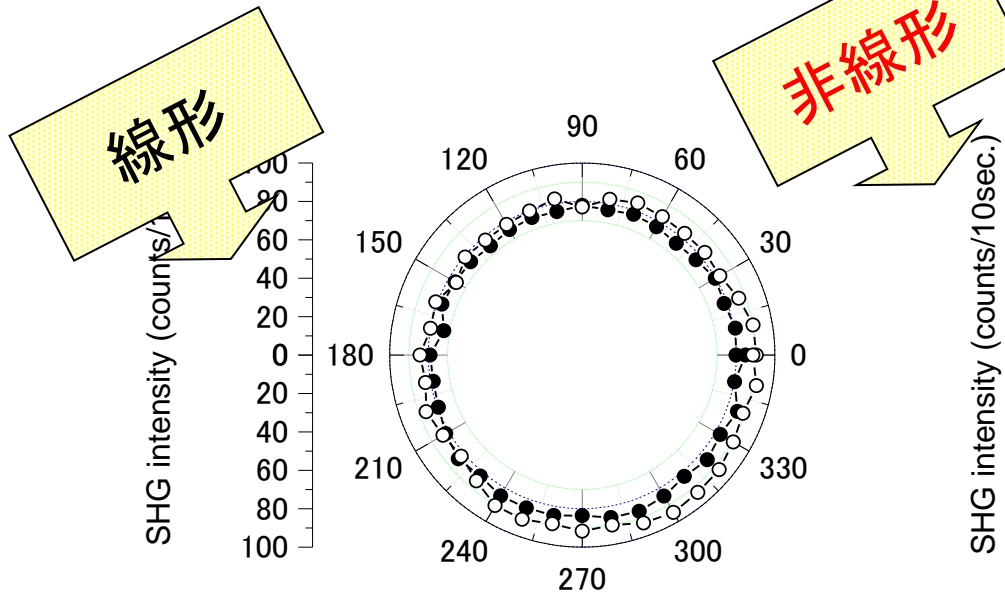
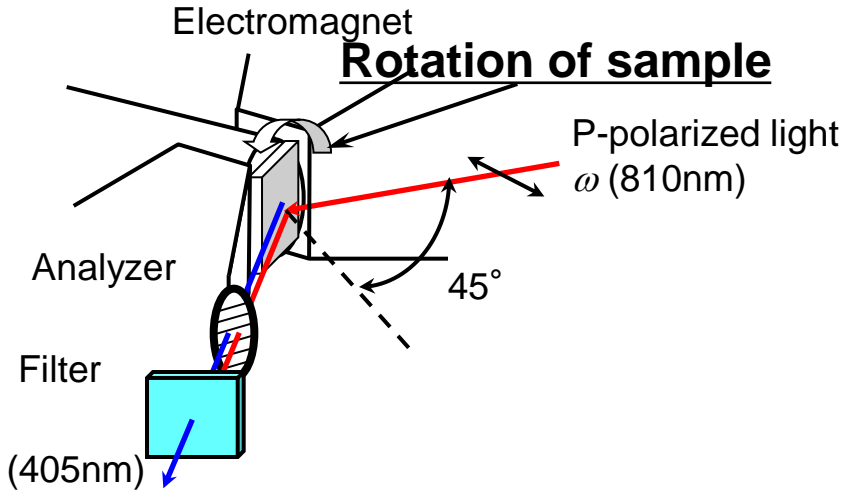


(b) Fe(1.75ML)/Au(1.75ML) Sin

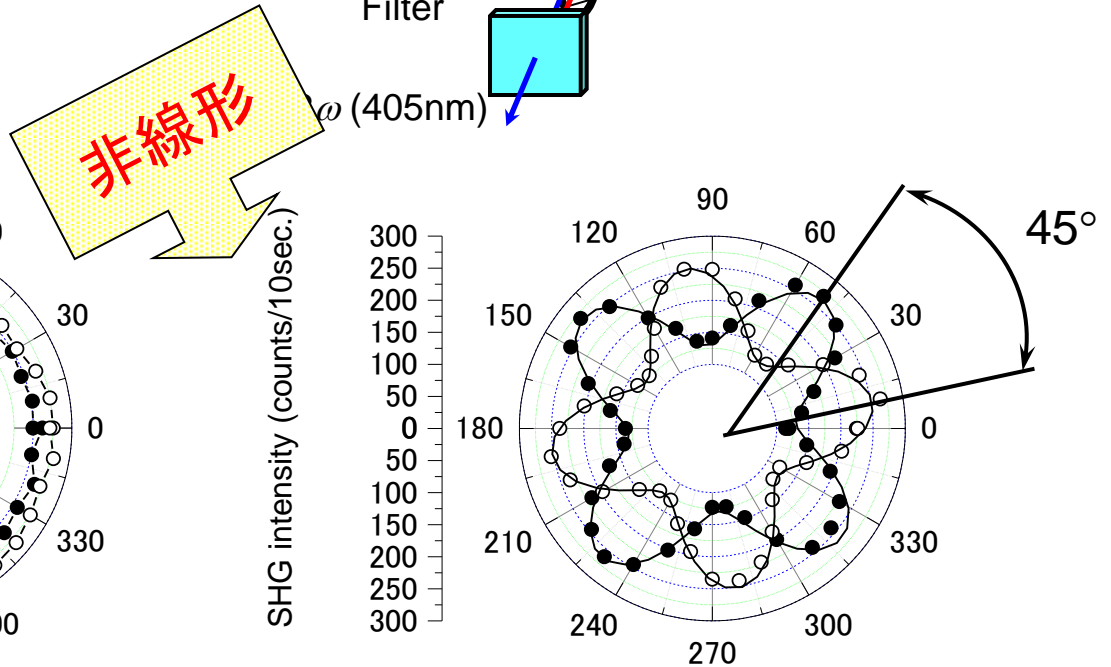
Analyzer angle dependence

MSHGの試料方位依存性

- Linear optical response ($\lambda=810\text{nm}$)
 - The isotropic response for the azimuthal angle
- Nonlinear optical response ($\lambda=405\text{nm}$)
 - The 4-fold symmetry pattern
 - Azimuthal pattern show 45° -rotation by reversing the magnetic field



(a) Linear (810nm)



(b) SHG (405nm)

Azimuthal angle-dependence of MSHG intensity for [Fe(3.75ML)/Au(3.75ML)] superlattice.
 (P_{in} P_{out})

2次の非線形分極

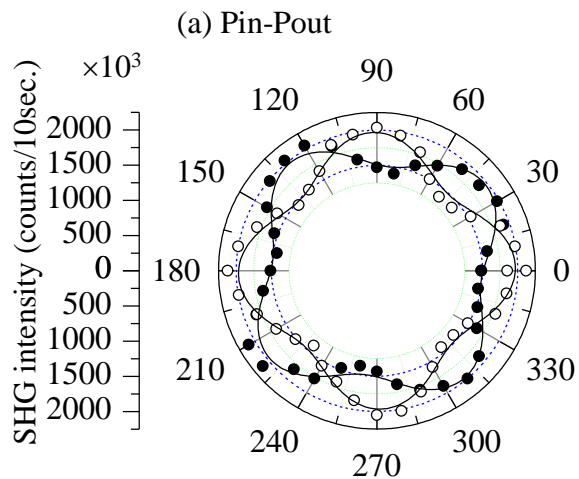
$$P_i^{(2)}(M) = \chi_{ijk}^{(D)}(M) E_j E_k + \chi_{ijkl}^{(Q)}(M) E_j \nabla_l E_k$$
$$= \chi_{ijk}^{(D)}(0) E_j E_k + X_{ijkL}^{(D)} E_j E_k M_L + \chi_{ijkl}^{(Q)} E_j \nabla_l E_k$$

Surface
nonmagnetic
(dipole term)

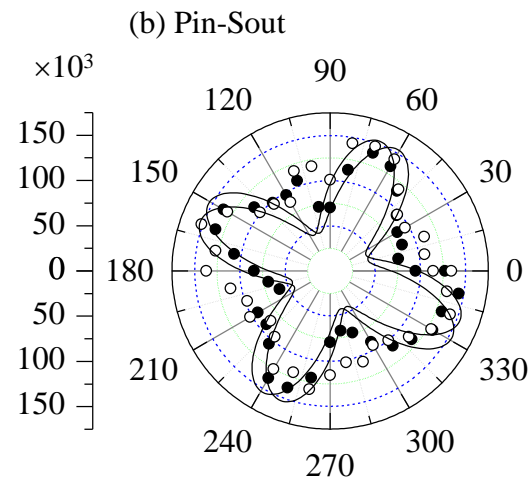
Surface
Magnetic
(dipole term)

Bulk
nonmagnetic
(quadrupole)

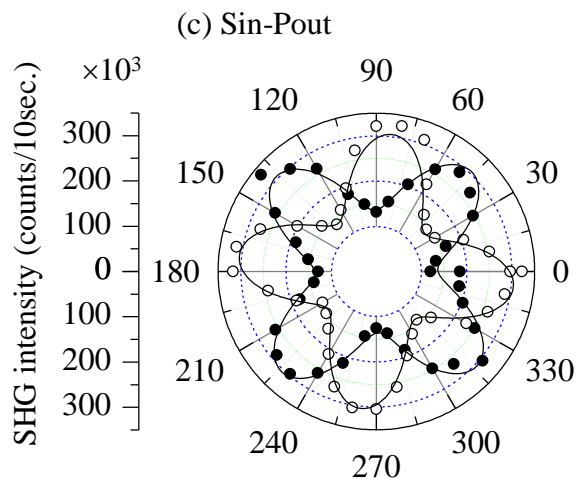
MSHG方位角依存性のシミュレーション



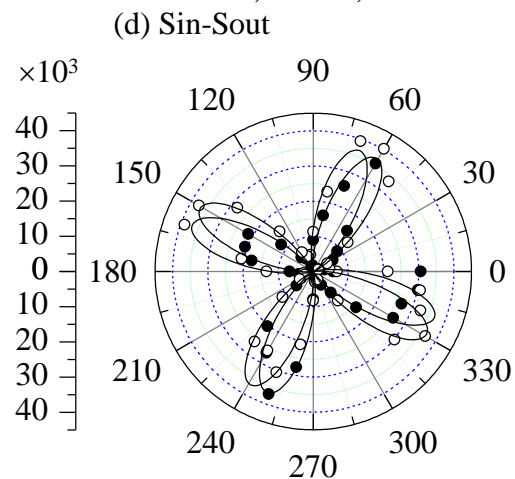
$$A^{PP}=1310, B=26, C=-88$$



$$A^{PS}=-300, B=26, C=-88$$

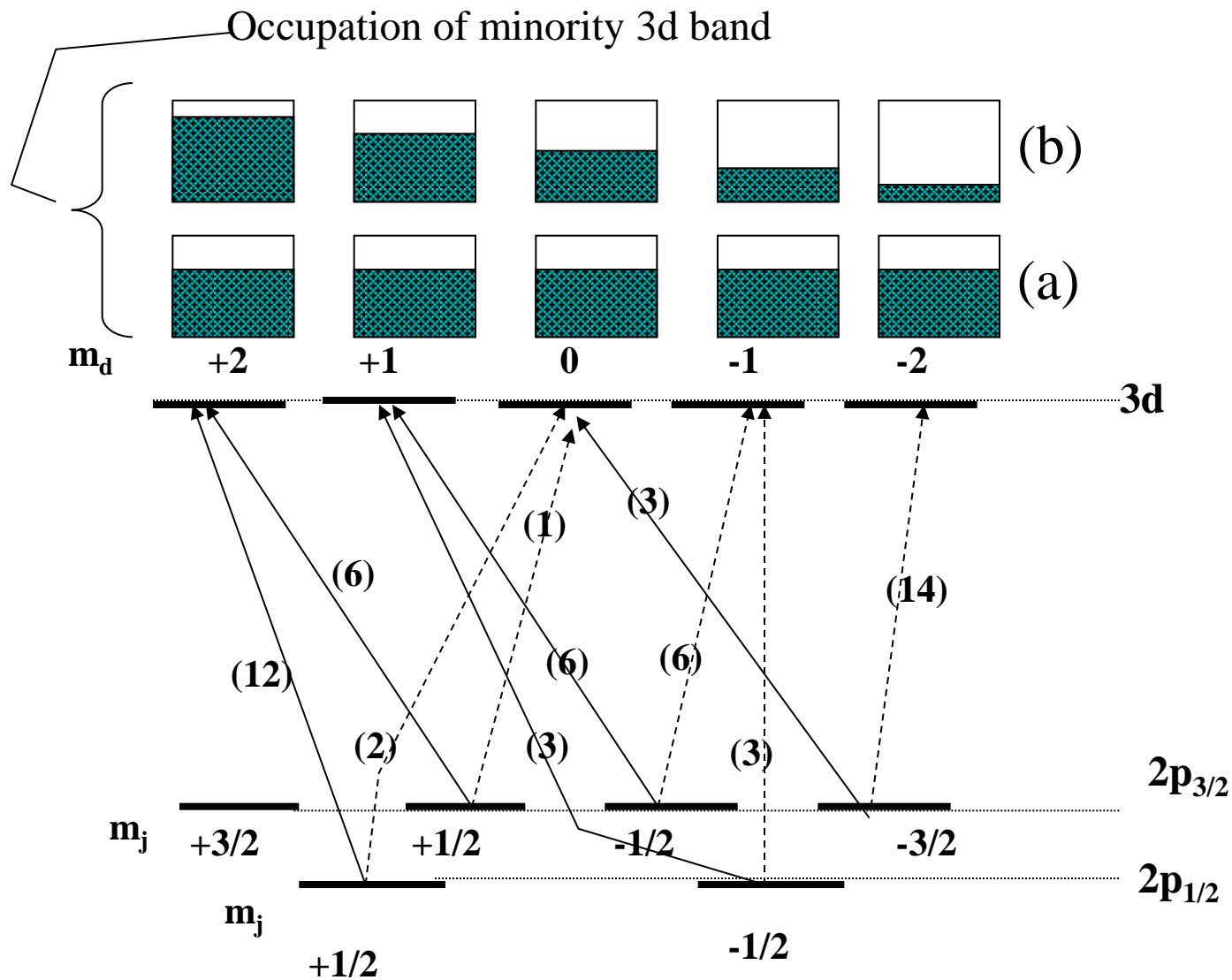


$$A^{SP}=460, B=26, C=-88$$

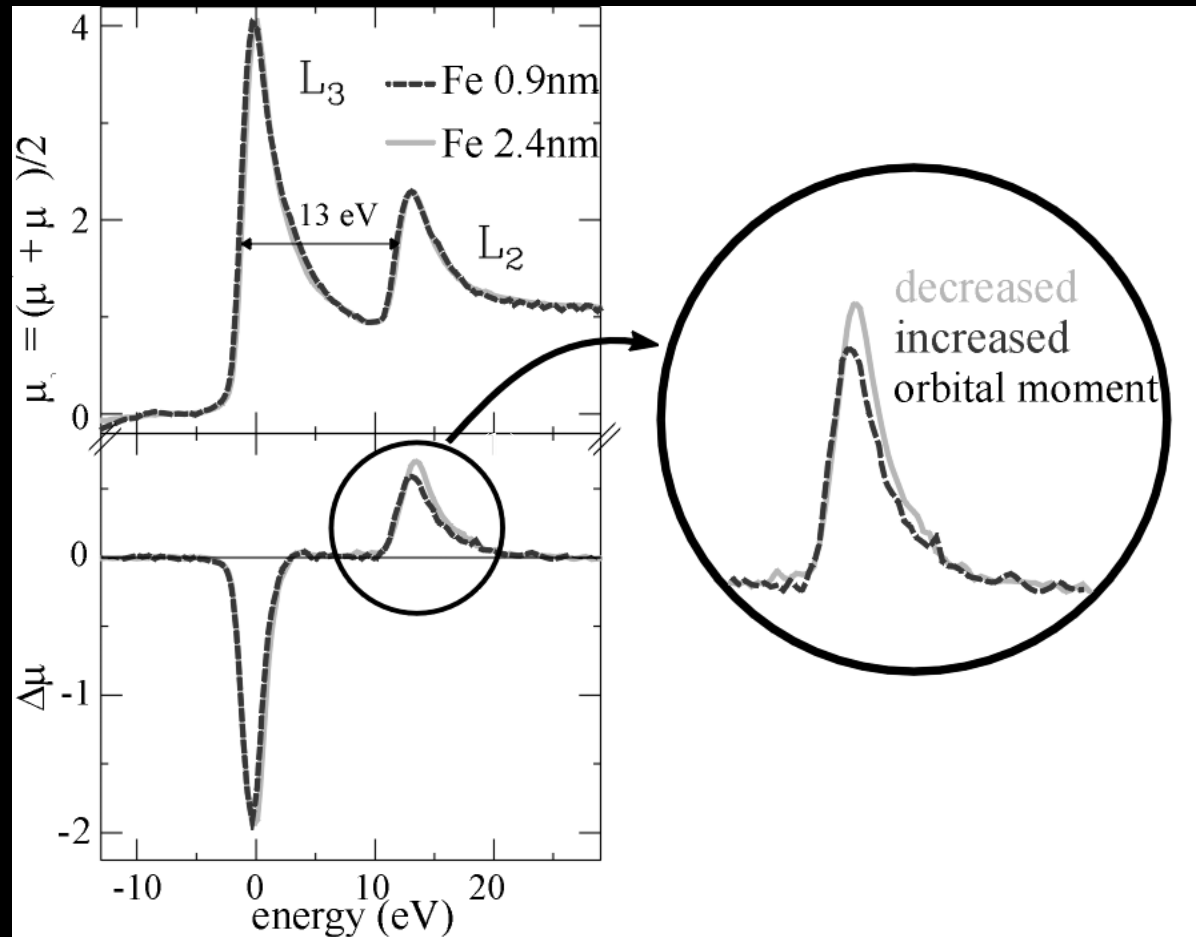


$$A^{SS}=100, B=26, C=-88$$

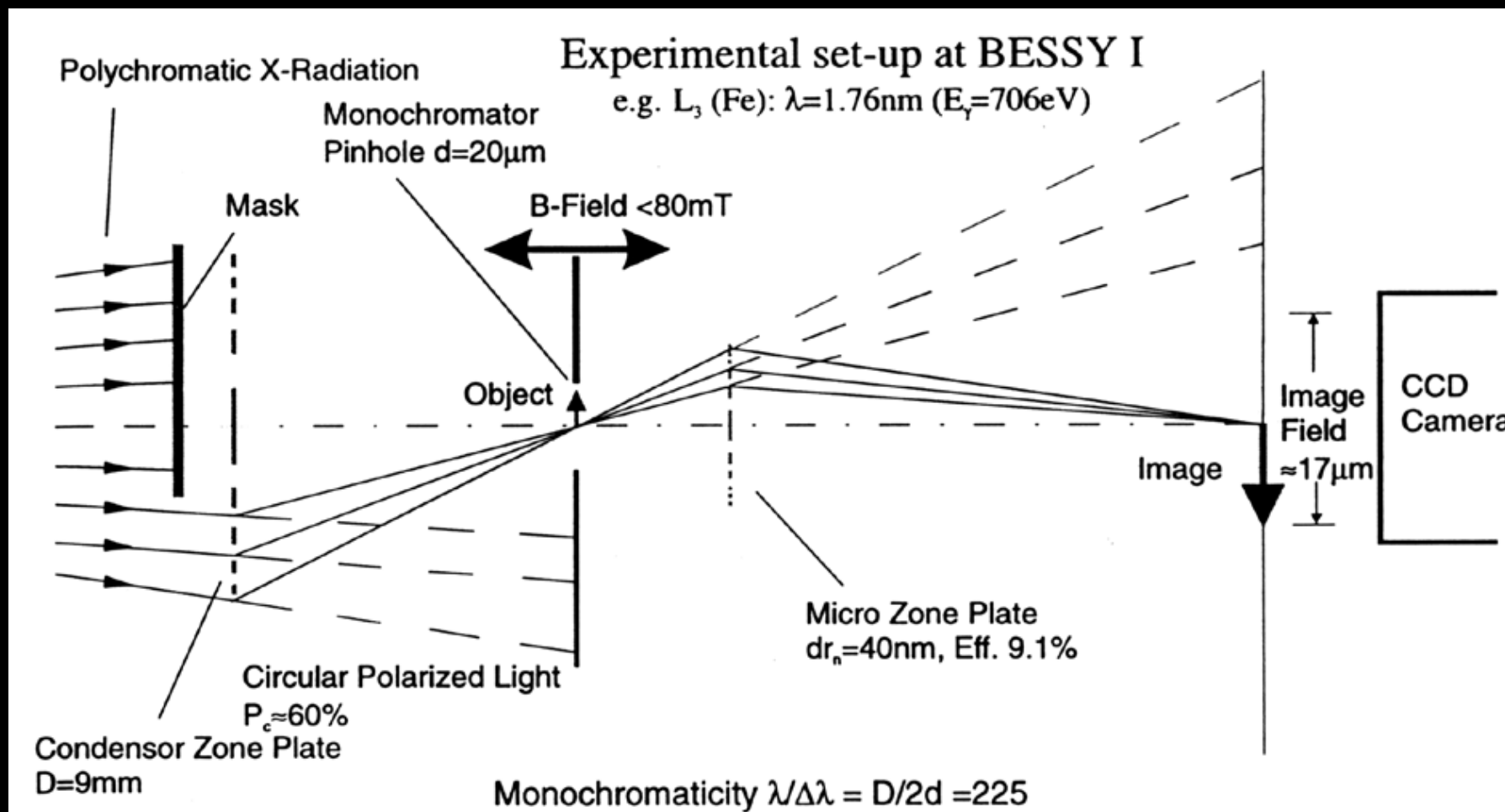
X線磁気光学効果



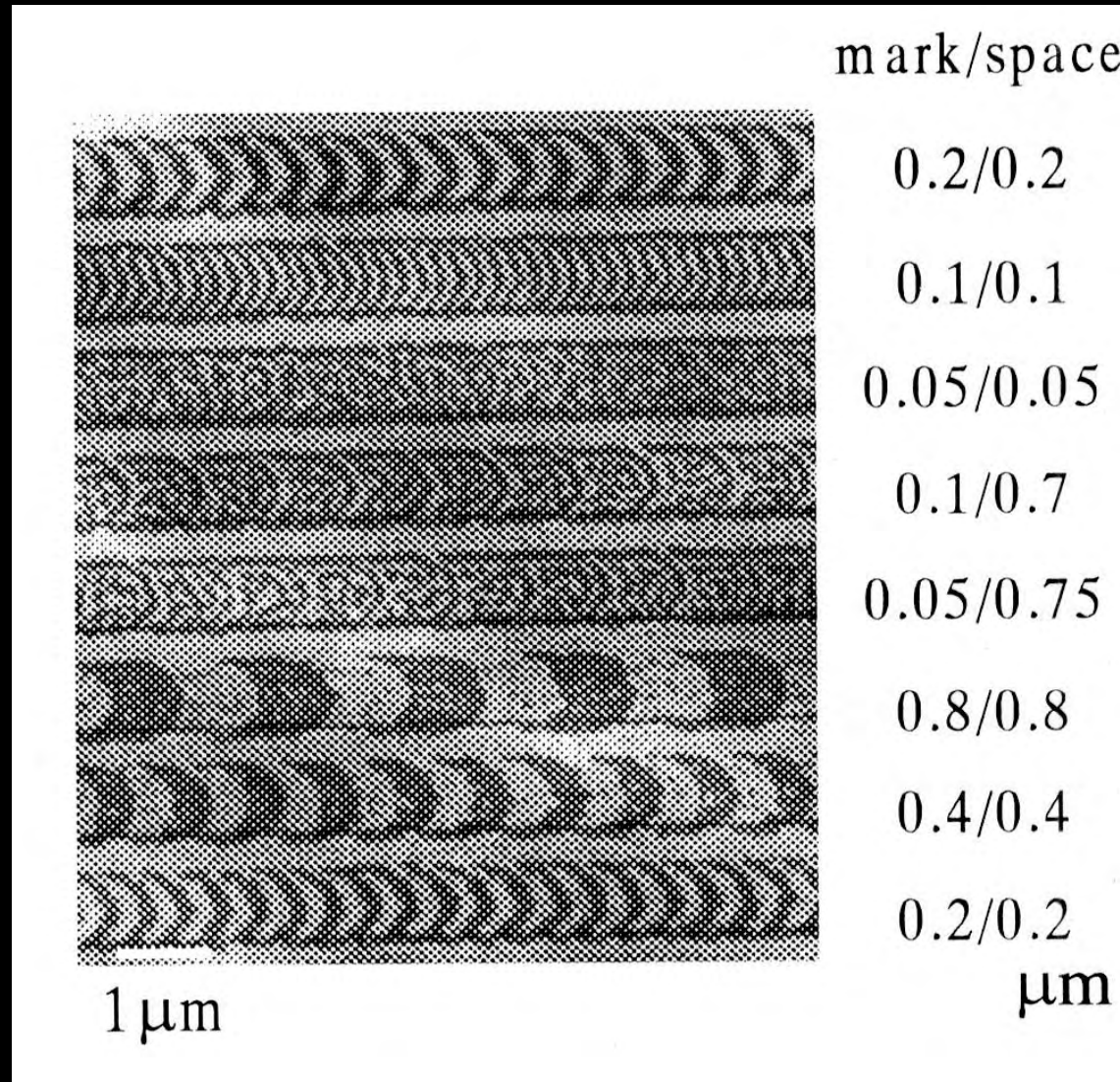
L吸収端の磁気円二色性



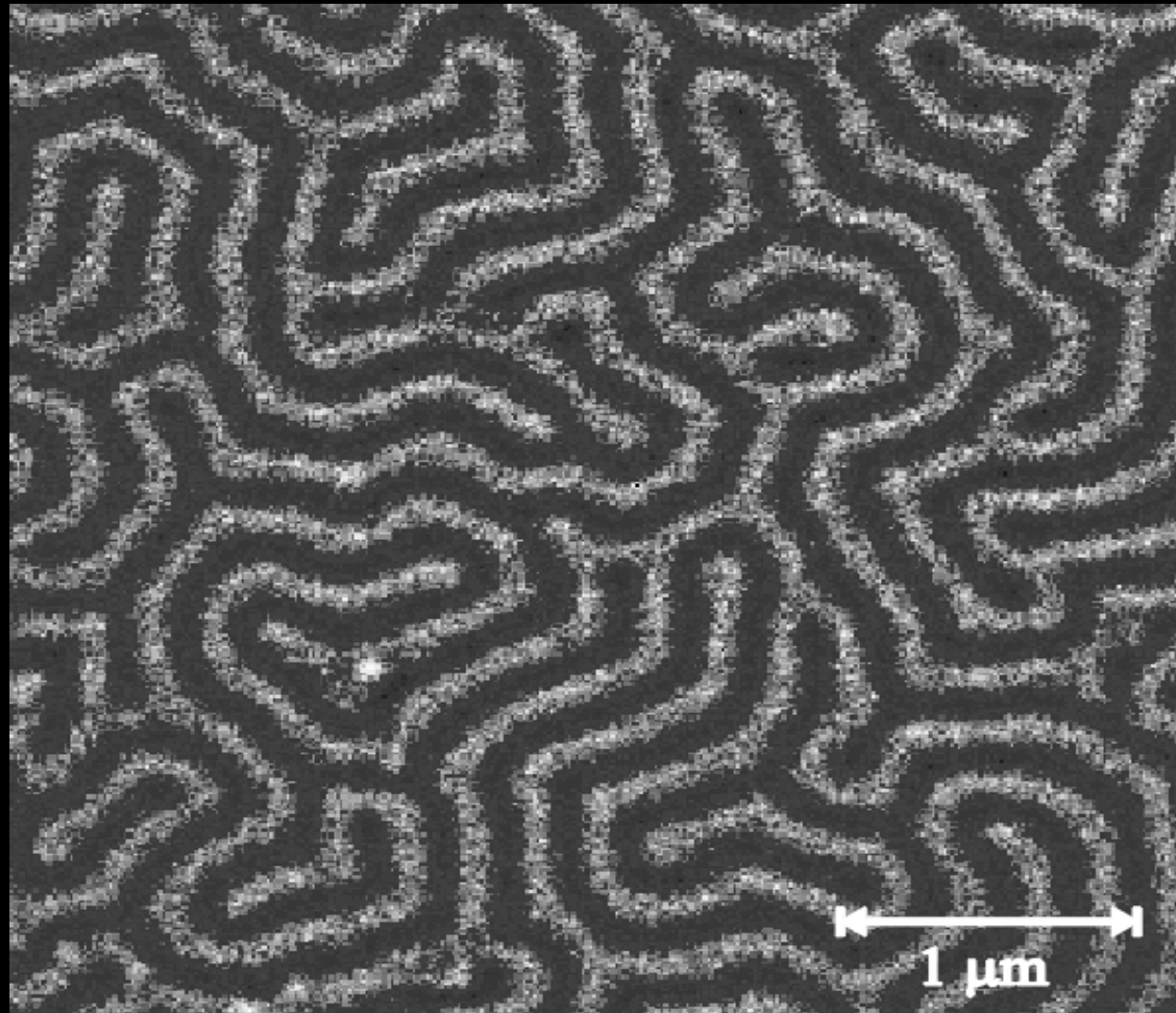
XMCD顯微鏡



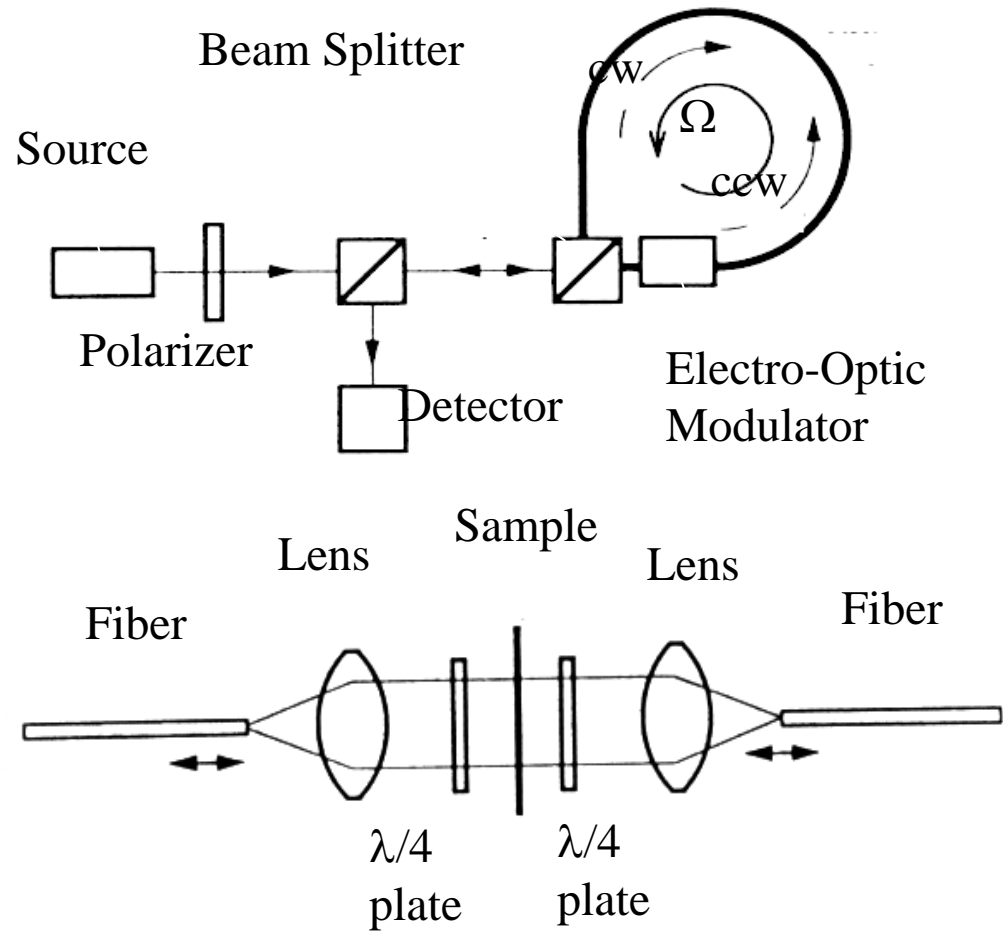
X線顕微鏡によるMO膜観測



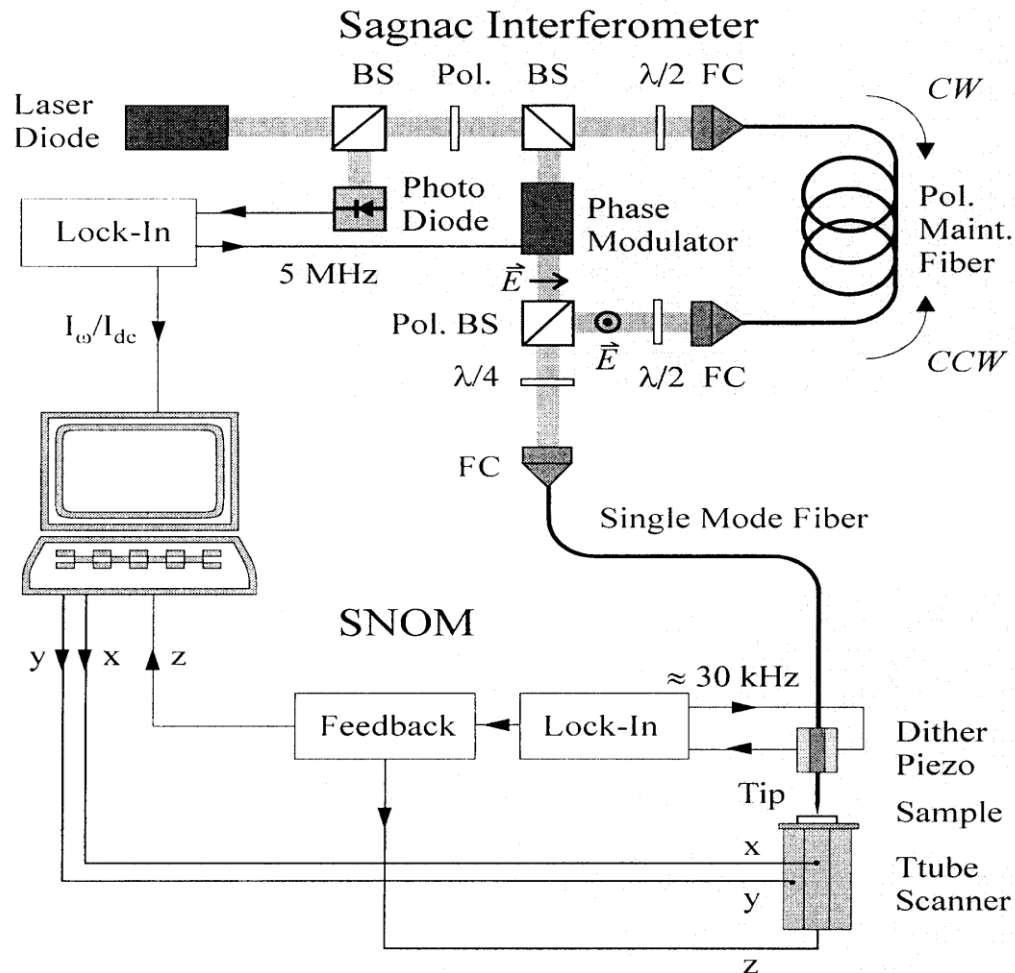
X線顕微鏡で観察したGdFeの磁区



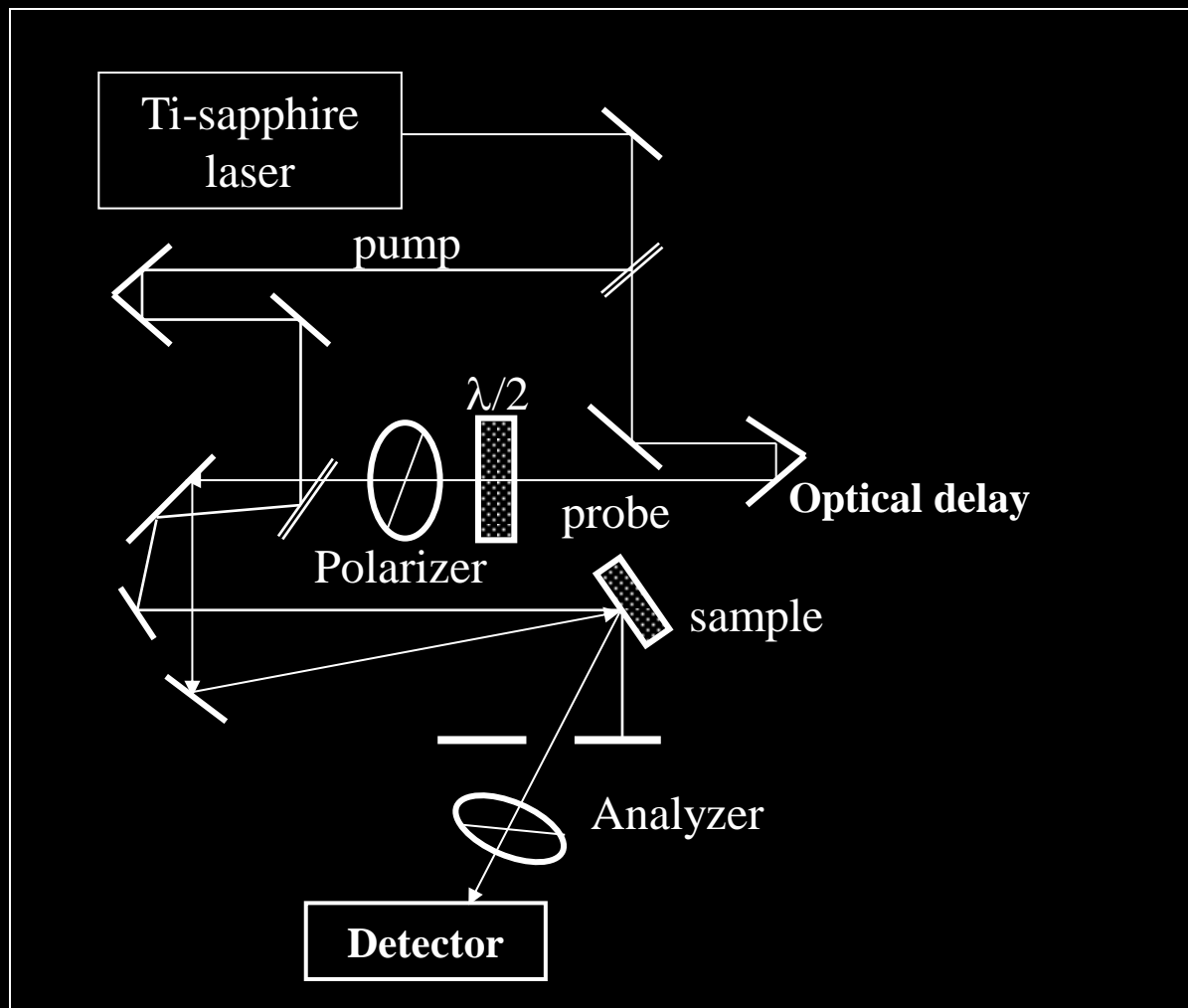
サニャック干渉計



サニャックSNOM



ポンププローブ磁気光学測定



まとめ

- 磁気光学効果の基礎を、電磁気学的アプローチでのべた。この効果が誘電率テンソルの非対角成分から生じることがわかった。
- 誘電率テンソルの非対角成分は、量子論に基づいて電子エネルギー準位間の光学遷移により説明できることがわかった。
- 磁気光学スペクトルの実例を示し、それらが、電子構造から予測可能であることを示した。