

千葉大学理学部物理学科特別講義
2007.6.4-6.5

第2日
磁気光学の基礎と最近の展開(6)

佐藤勝昭
東京農工大学特任教授



6.磁気光学効果研究の最近の展開

6.1 近接場磁気光学効果

6.2 非線形磁気光学効果

6.3 その他の磁気光学効果

X線磁気円二色性

サニャック干渉計

ポンププローブ法による時間分解磁気光学測定



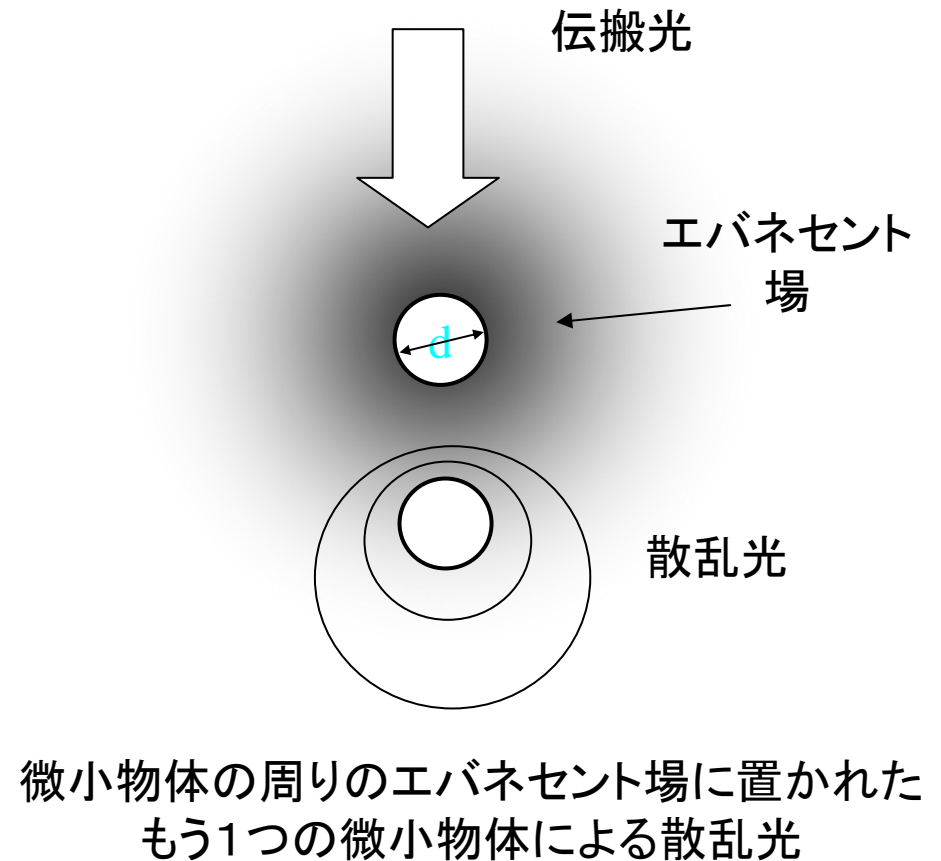
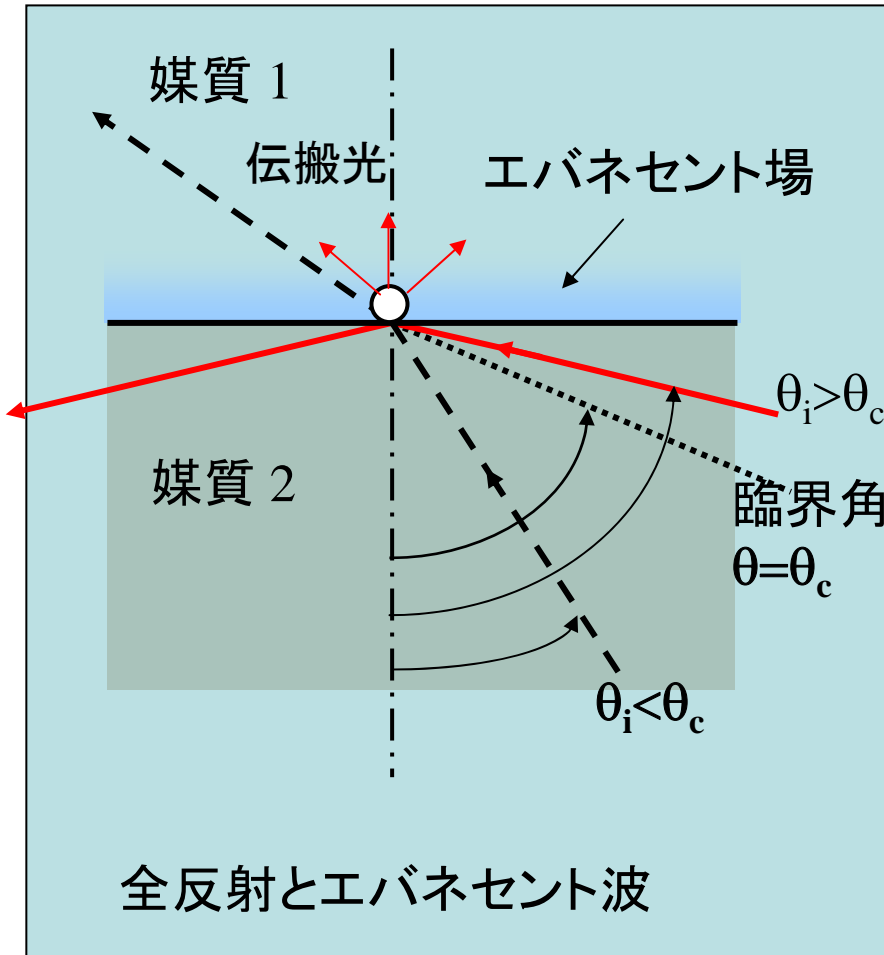
1. 近接場磁気光学顕微鏡 (MO-SNOM)

- 近接場とは
- 近接場顕微鏡(SNOM)の歴史
- 近接場磁気光学顕微鏡(MOSNOM)の開発
- MOSNOMによる光磁気記録データの観察

SNOM=scanning near-field optical microscope(近接場光学顕微鏡)



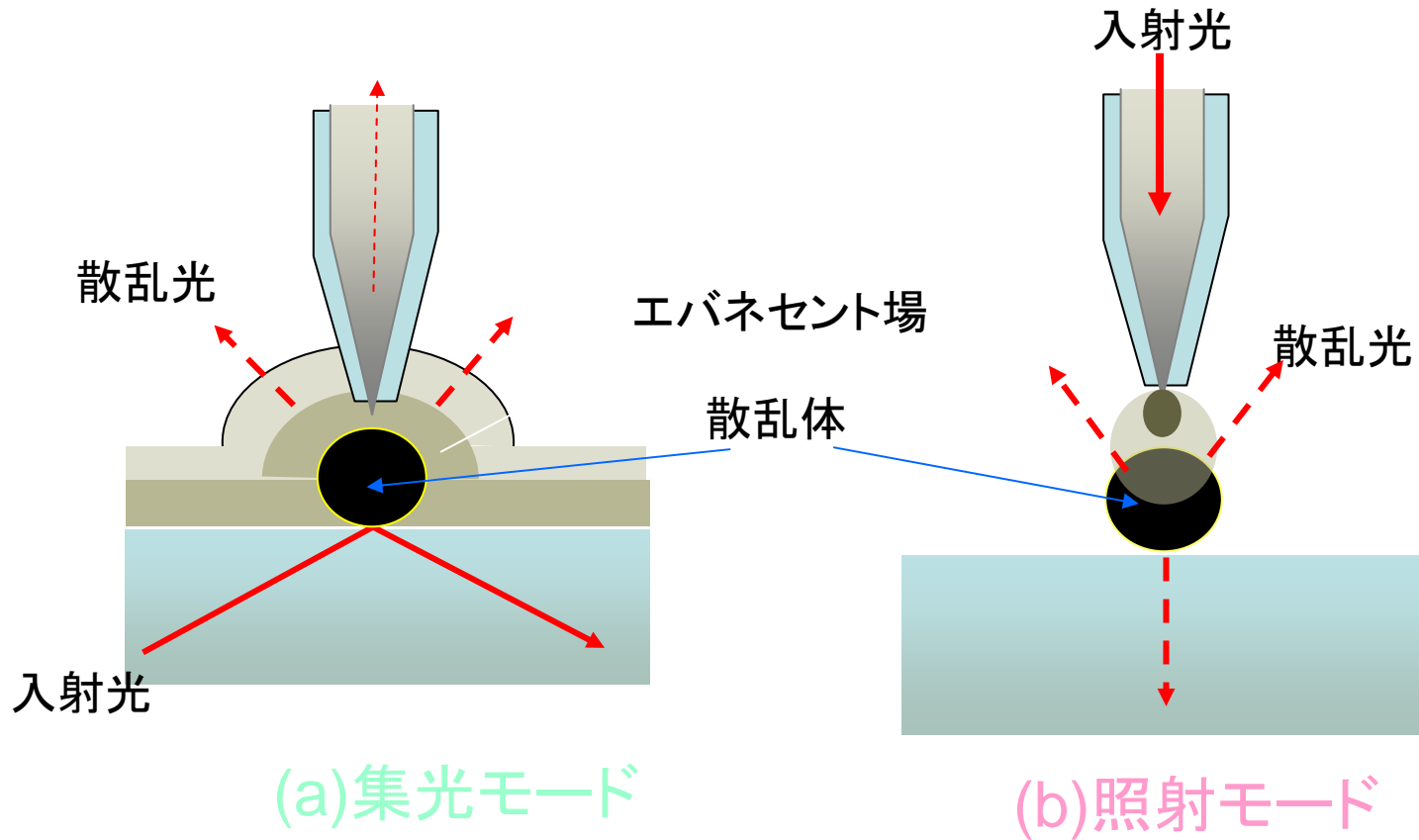
近接場とは



SNOMの歴史

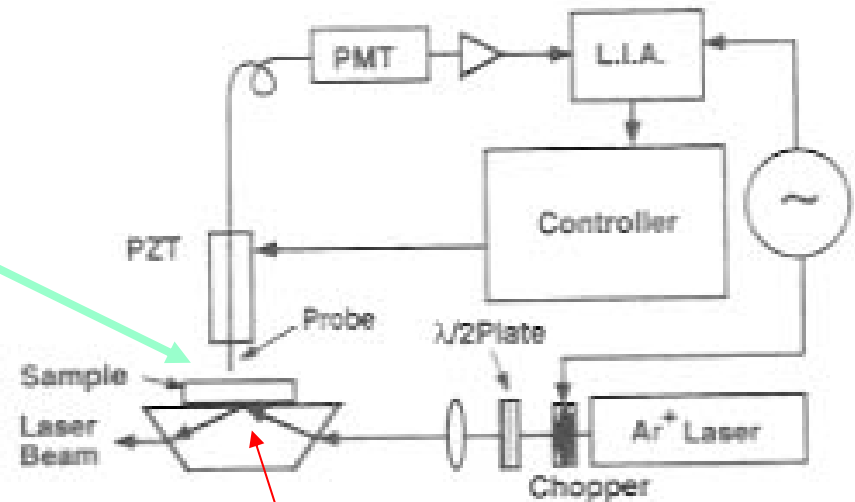
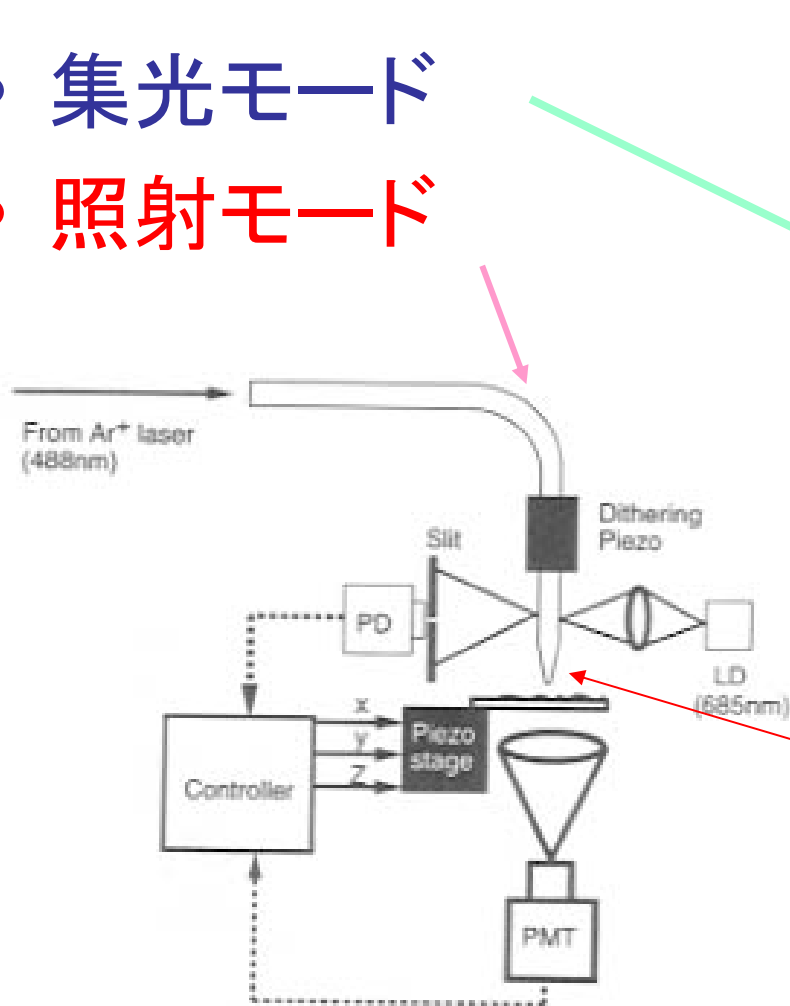
- 近接場の概念 : 電磁気学において古くから知られる
 - Hertz : Dipoleの近くの電場は $1/r$ ではなく $1/r^2$:かなり強い
 - Sommerfeld: Dipole antenna近傍の近接場を導出
- 1928 Syngge(英):近接場顕微鏡のアイデアを提案
- 1972 Ash:マイクロ波で波長の $1/60$ の解像度達成
- 1982 Pohl: SNOMの原形
- 1985 Pohl: 20nmの分解能達成
- 1991 Betzig:マイクロピペットを使って実用性の高いSNOMを開発;光磁気記録に成功

光ファイバプローブを用いたSNOM



集光モード、照射モードのSNOM

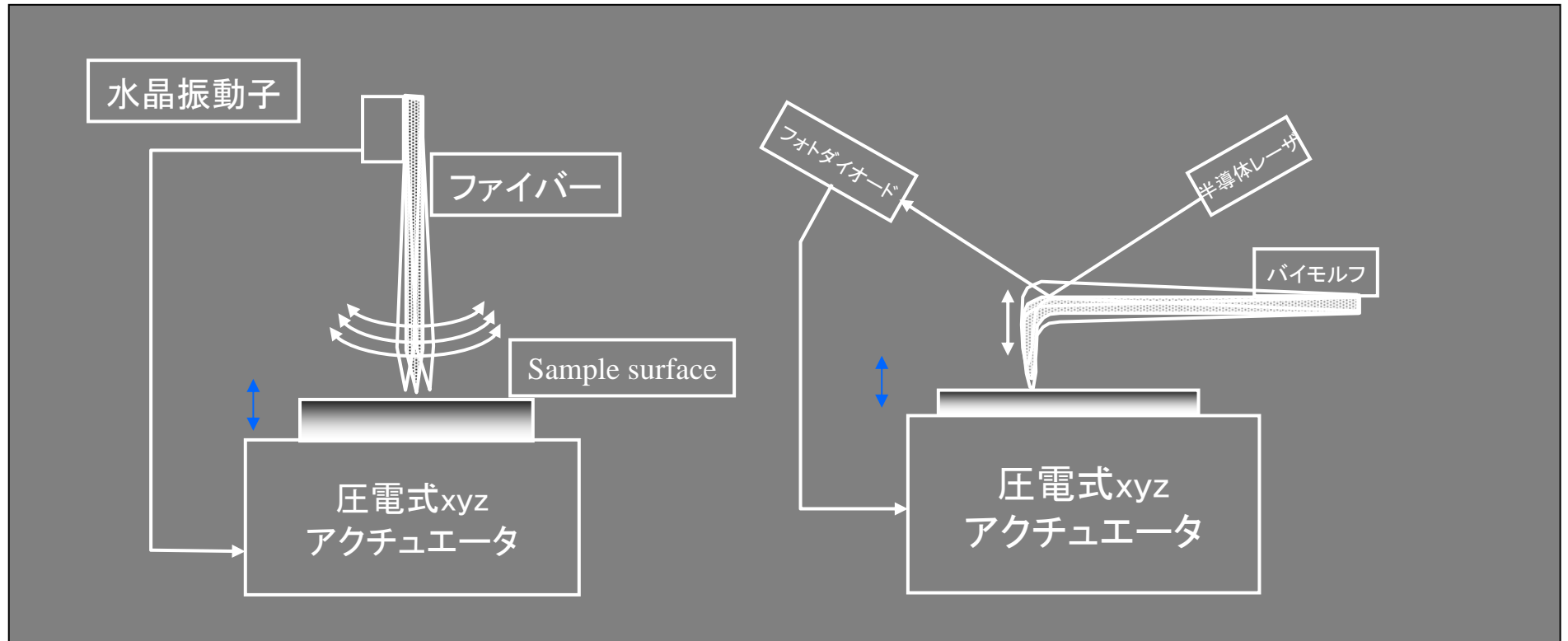
- 集光モード
- 照射モード



全反射光学系のエバネセント場に試料を置く。

先を細くした光ファイバープローブから近接場光を出射

プローブの高さ制御



シアフォース(剪断力)方式

カンチレバー方式

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
- 多くの研究があるが、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

Kottlerらの試み

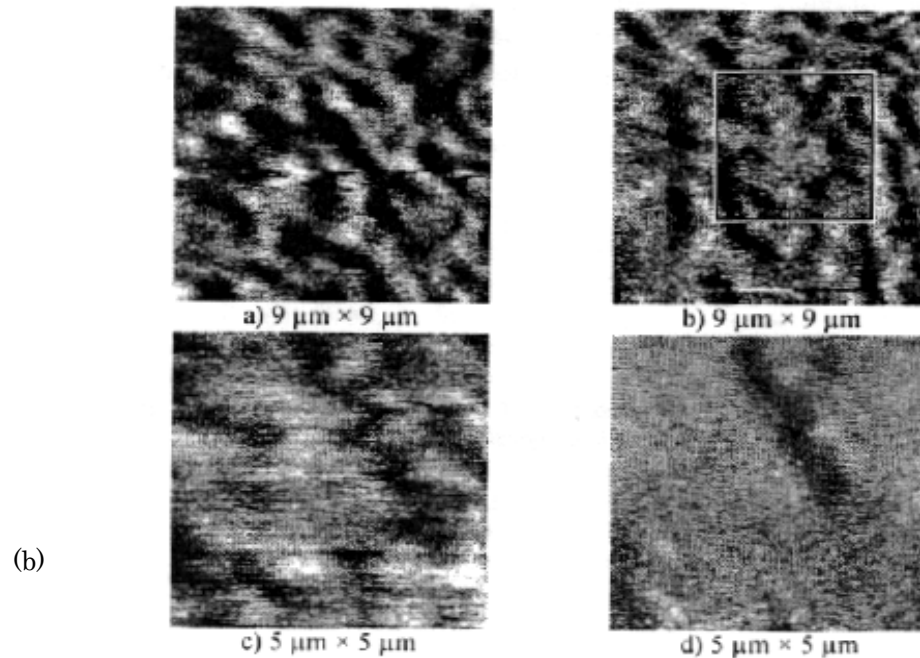
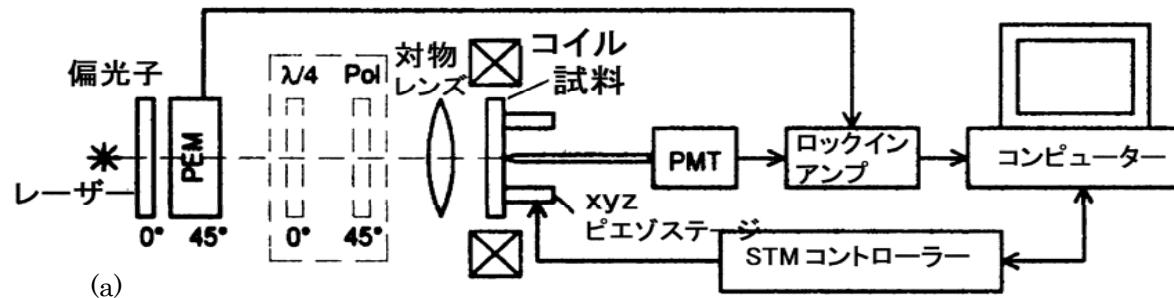
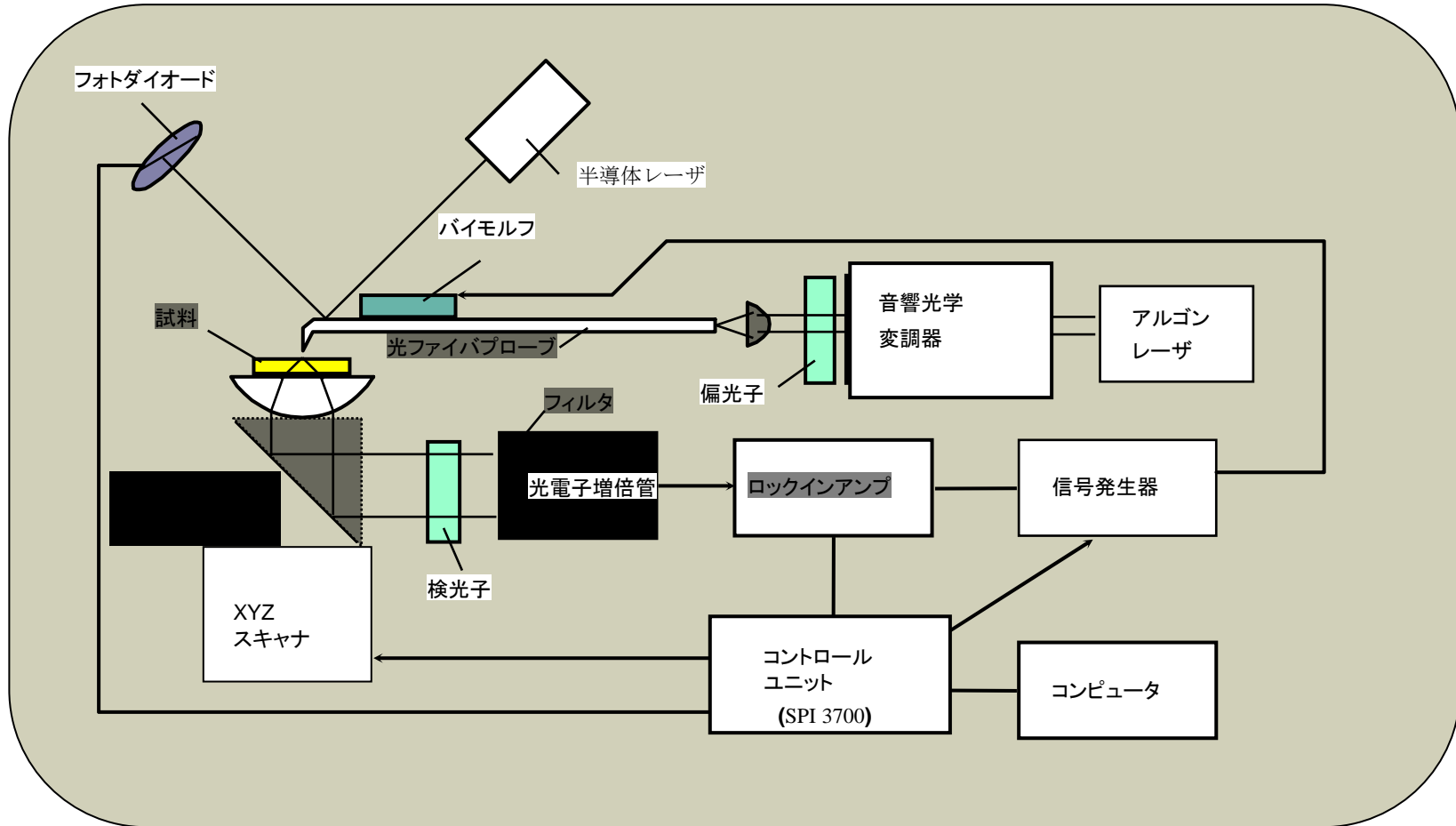


図6 (a) CD-SNOMシステムと(b)Pt/Coの磁区像 (Kottler²⁵)

筆者らの方法

- ・SNOM-AFMモードを利用
- ・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→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

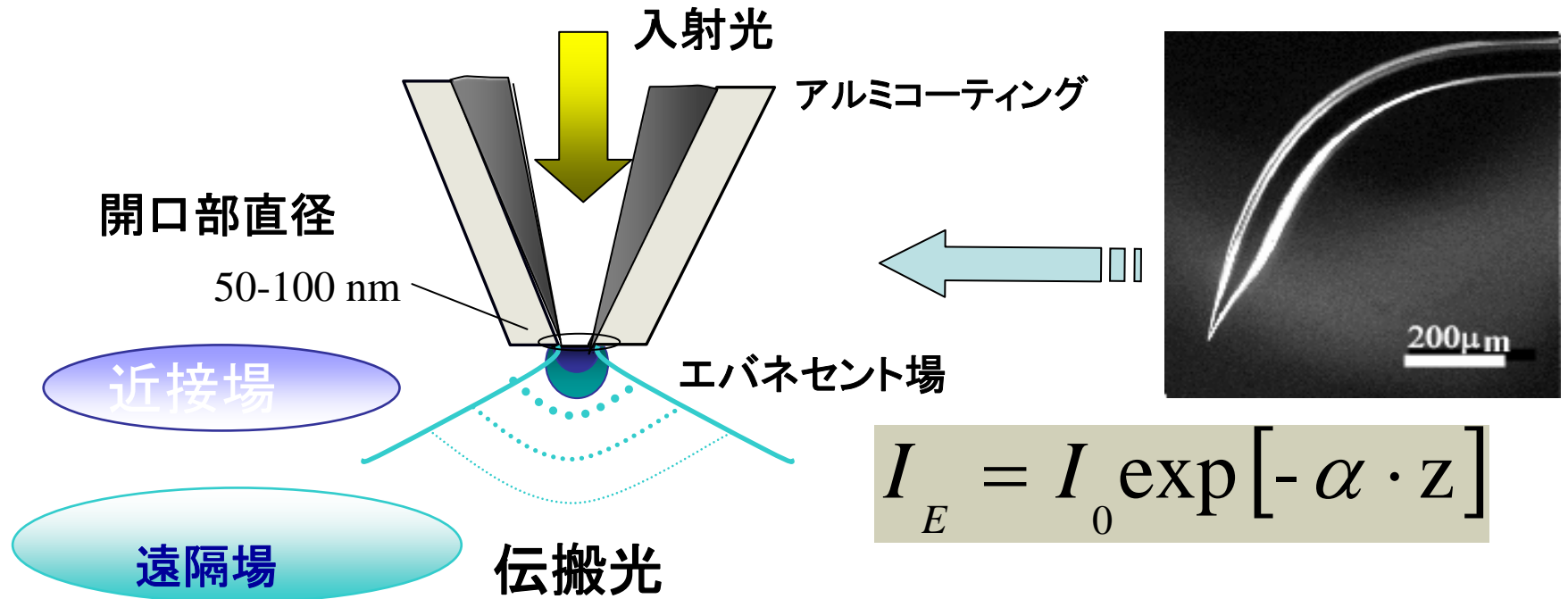
SNOMのブロック図



ベントファイバプローブ

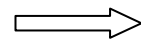


光ファイバークローブと近接場光学系



$$I_E = I_0 \exp[-\alpha \cdot z]$$

MO-SNOMへの応用



伝達特性

ファイバホルダー

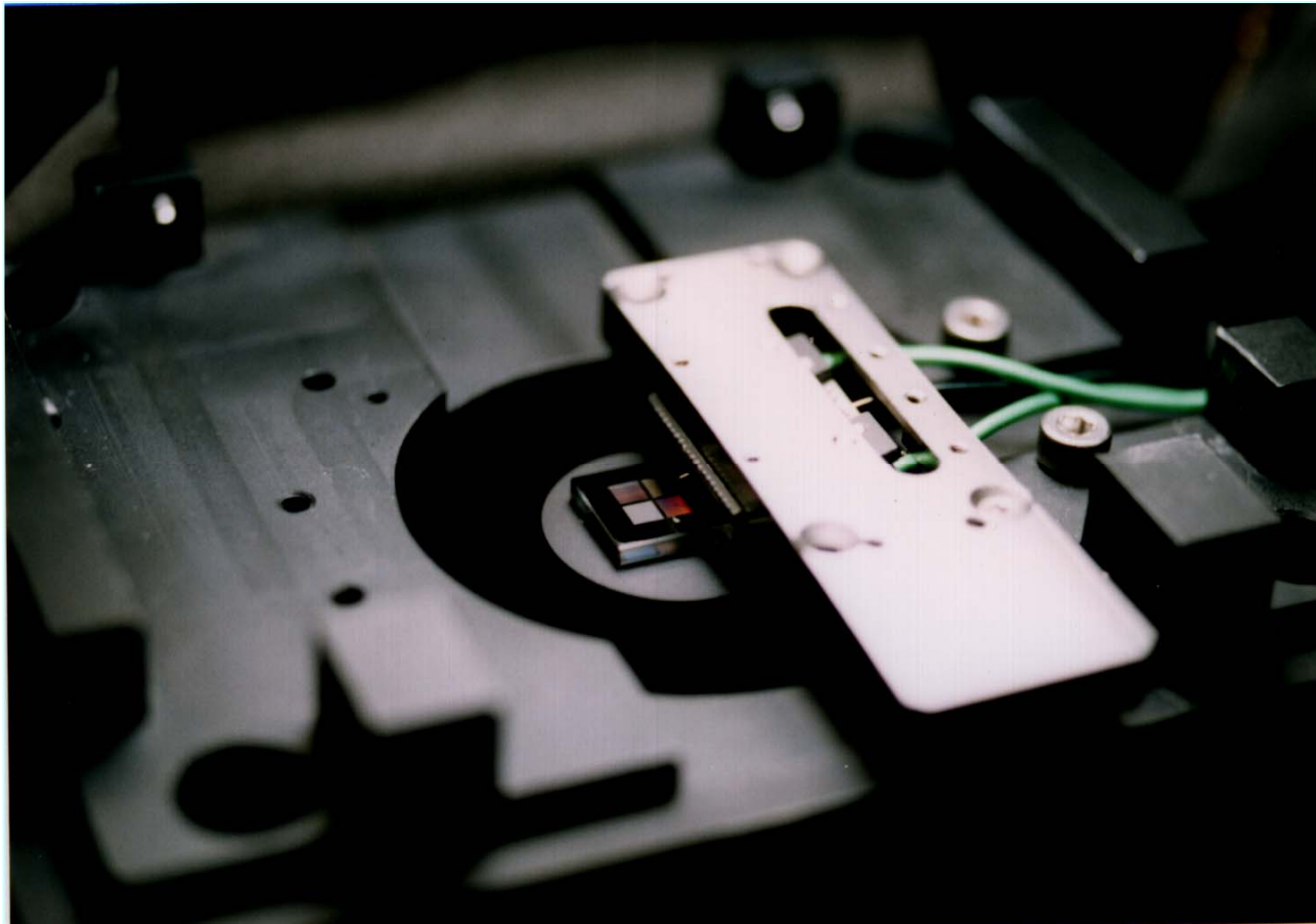
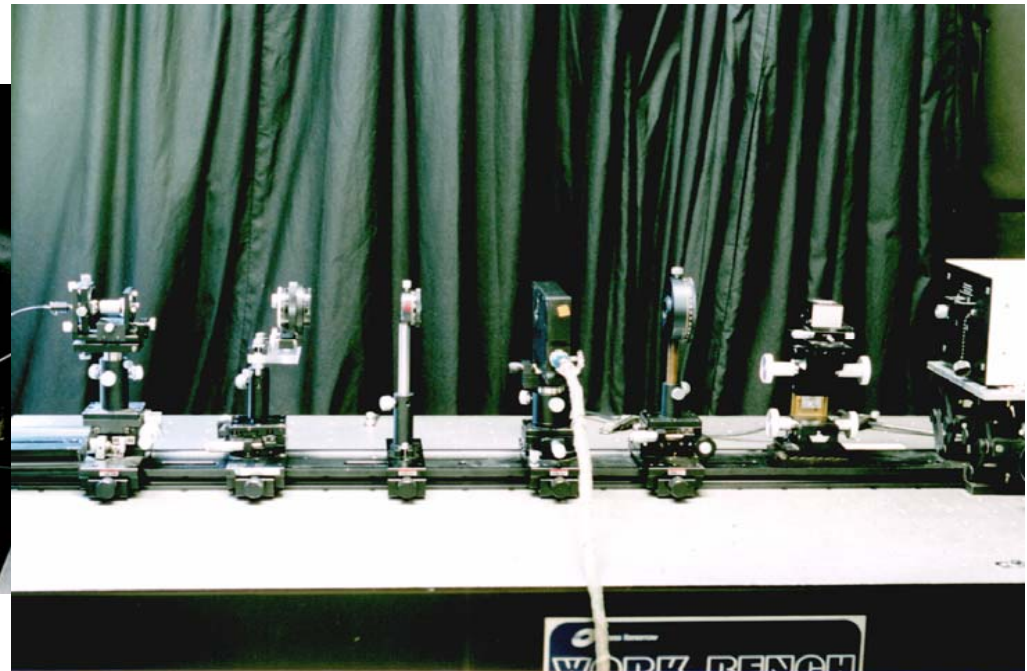


図3

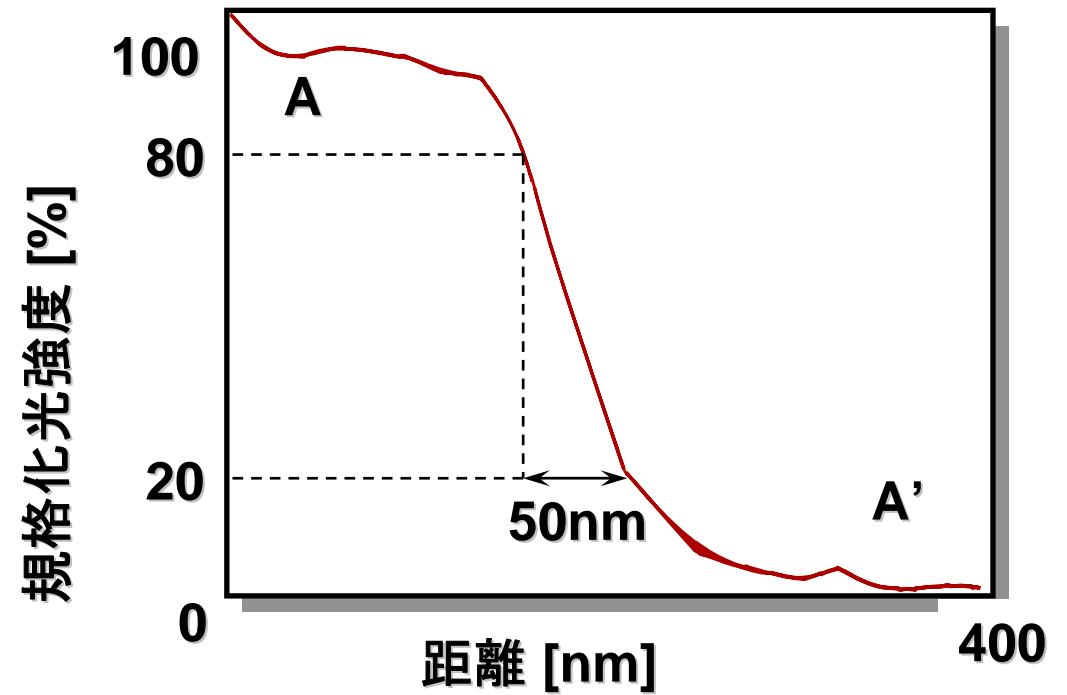
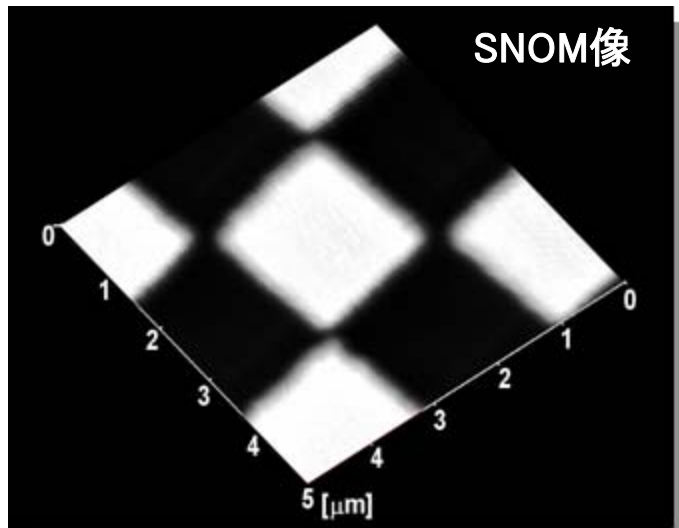
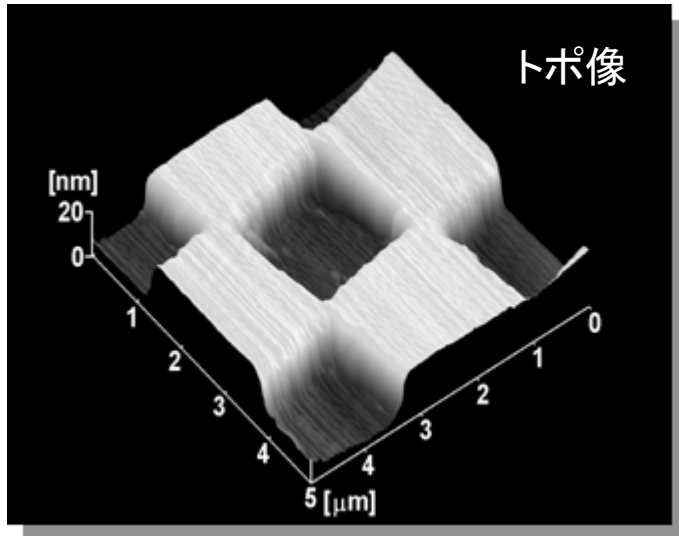
SNOMシステム



SNOMアセンブリ

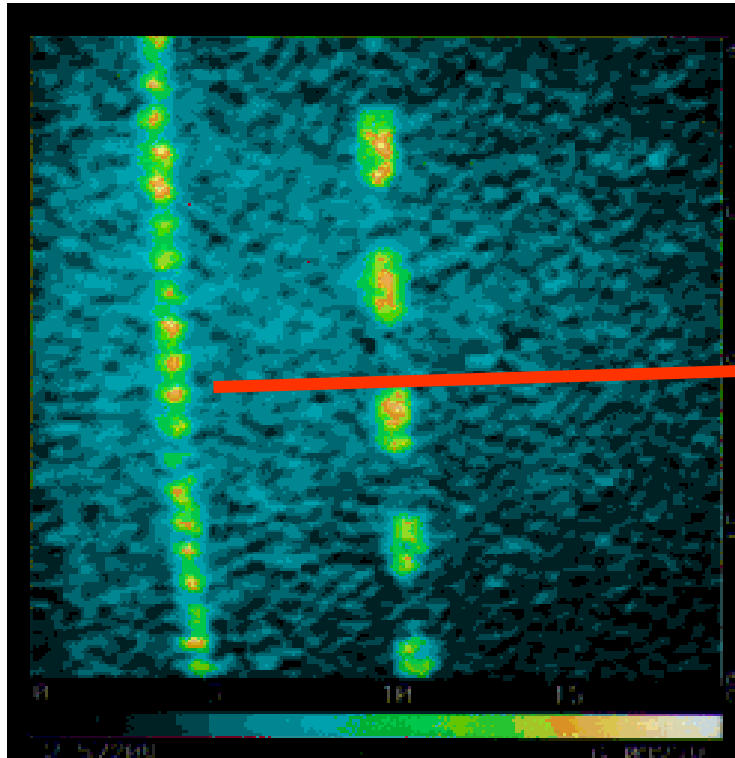


Cr市松模様^oのトポ像とSNOM像

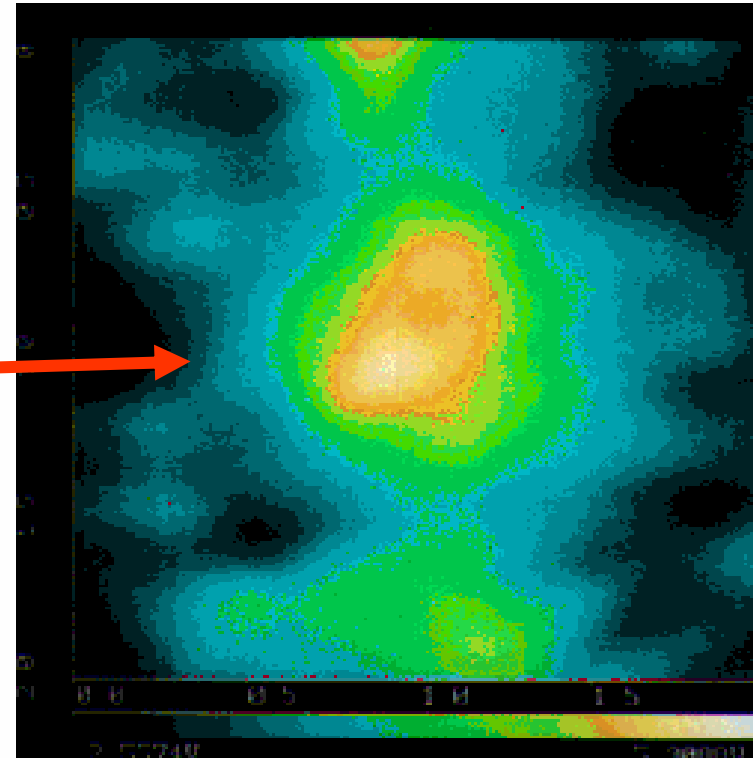


DyIGに記録されたマークの像

クロスニコル法によるイメージング



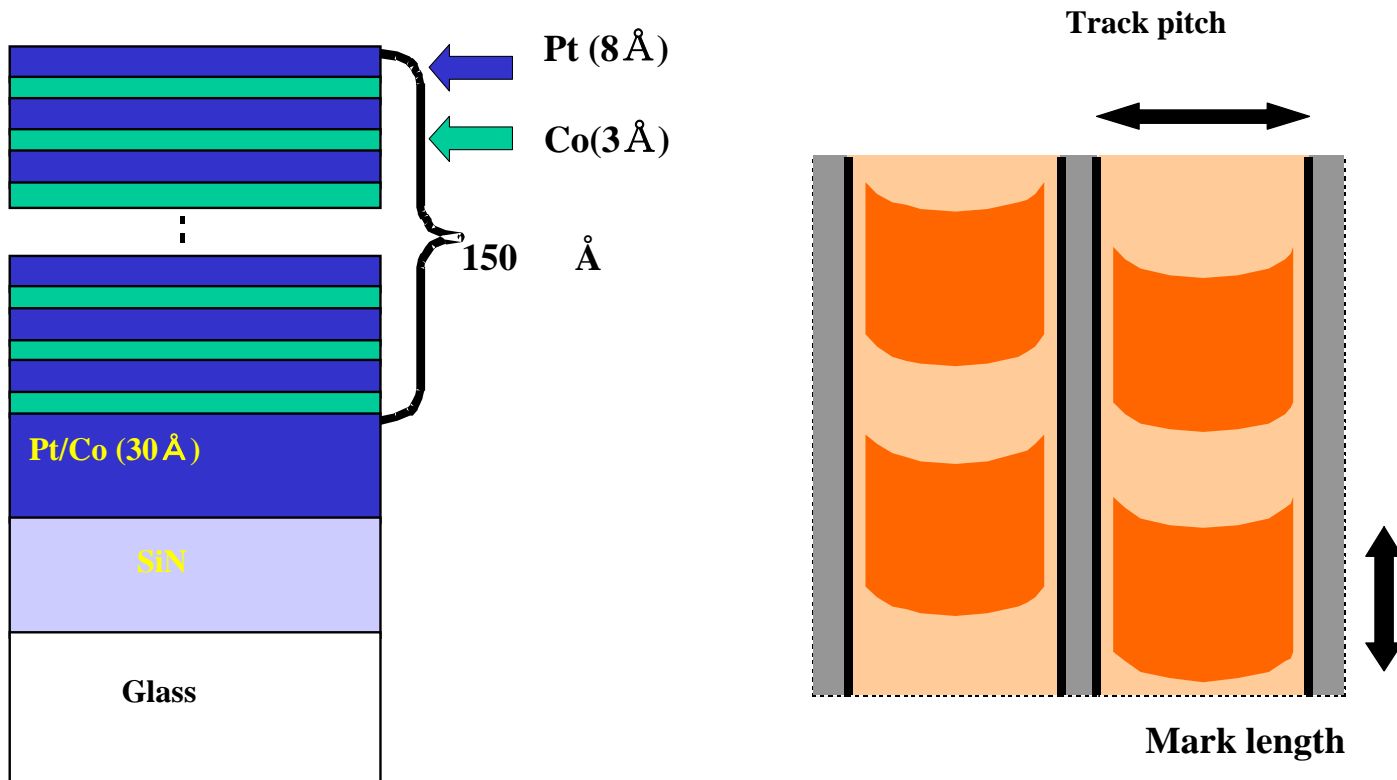
DyIG膜の記録マークの偏光像
(波長488nm)



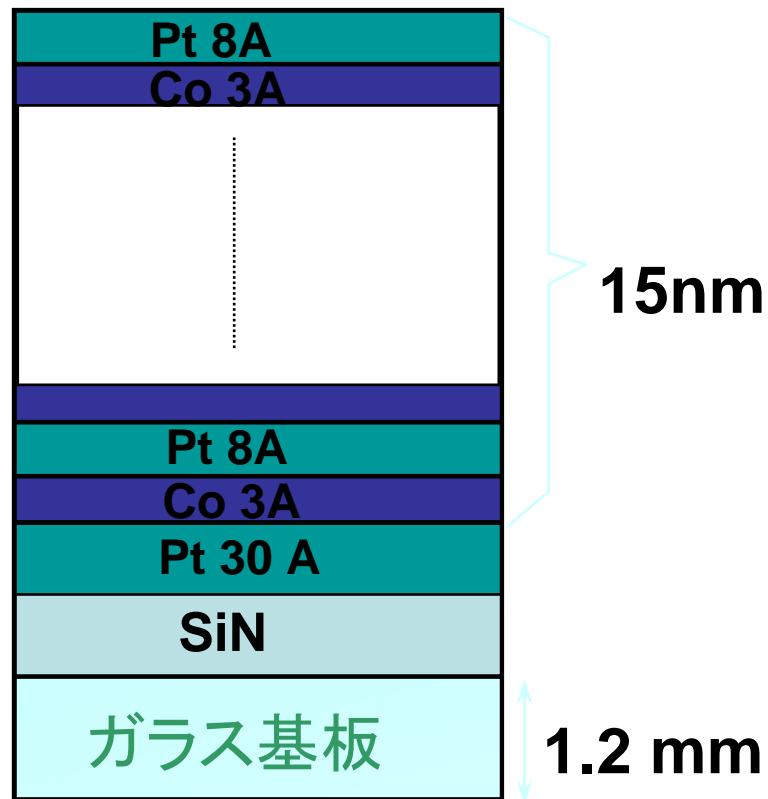
拡大図

試料: Pt/Co 多層膜ディスク

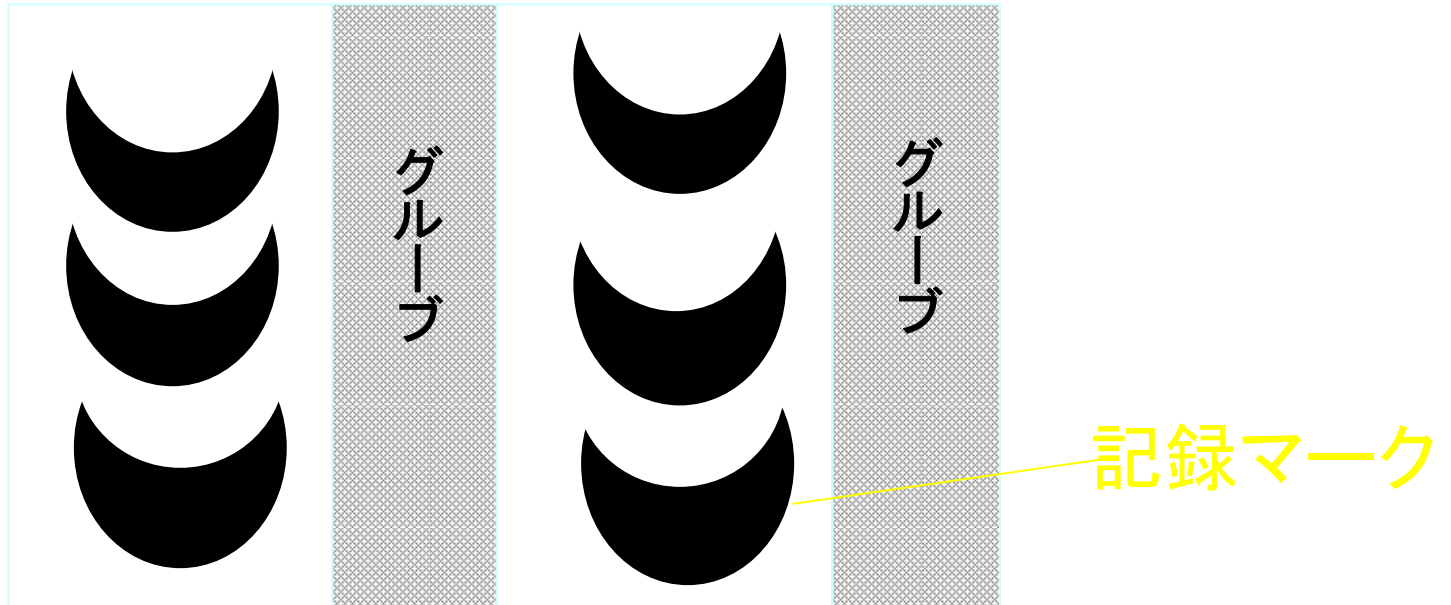
- Structure SiN/Pt(30Å)/[Pt(8Å)/Co(3Å)]₁₃ on glass
- Film thickness 150Å
- Recording System: Light pulse strobed MFM recording
- Track pitch : 1.6μm
- Mark Length : 0.1 ~ 6μm
- η_F, θ_F : $0.47^\circ, 0.74^\circ$



測定したPt/Co MOディスクの構造

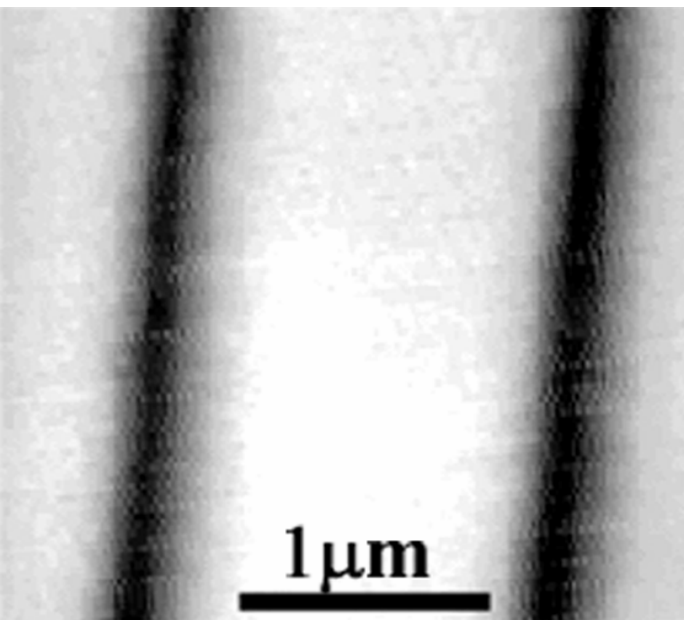


磁界変調記録の矢羽型記録マーク

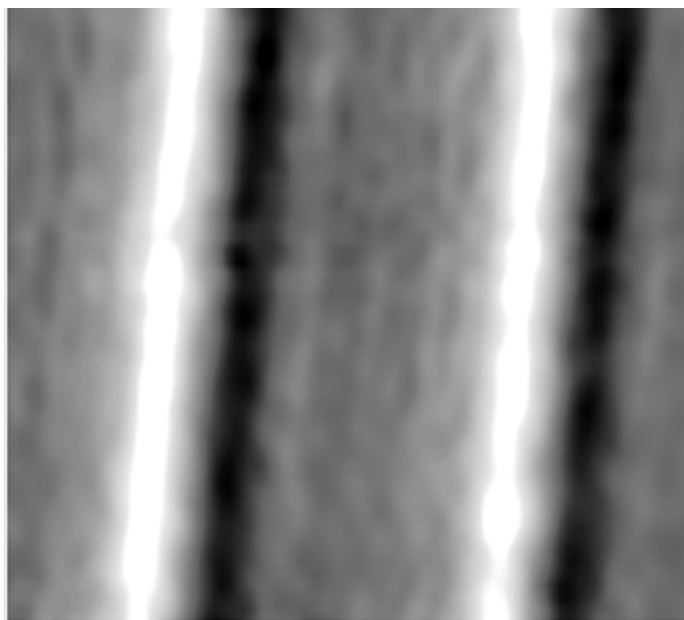


観測結果

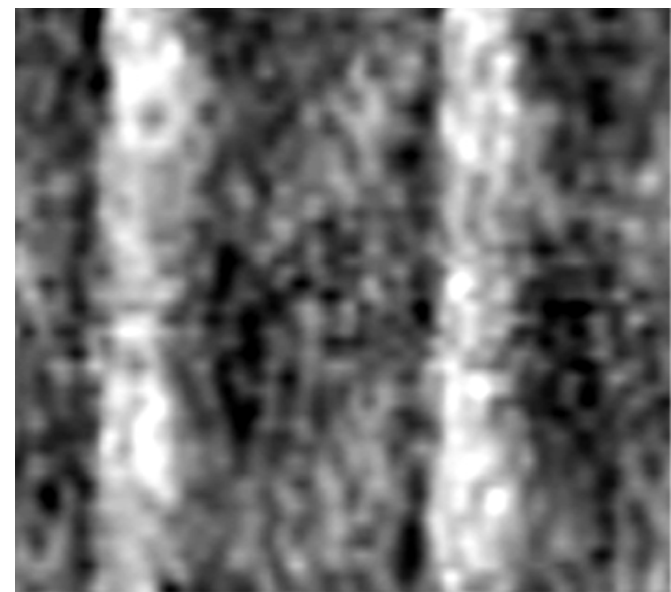
MO-SNOMによる記録マーク像 (クロスニコル法)



AFMトポ像

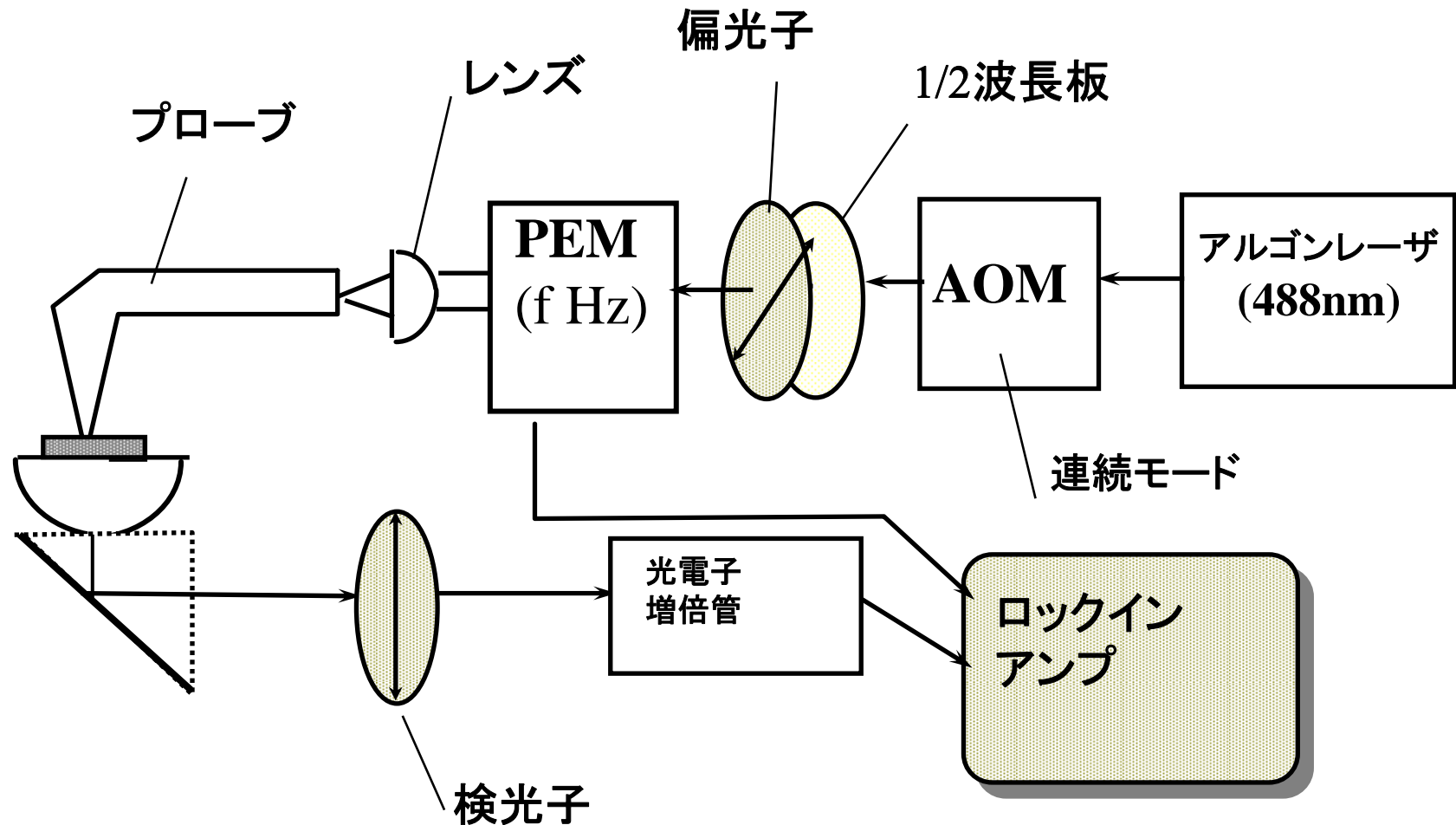


SNOM光学像

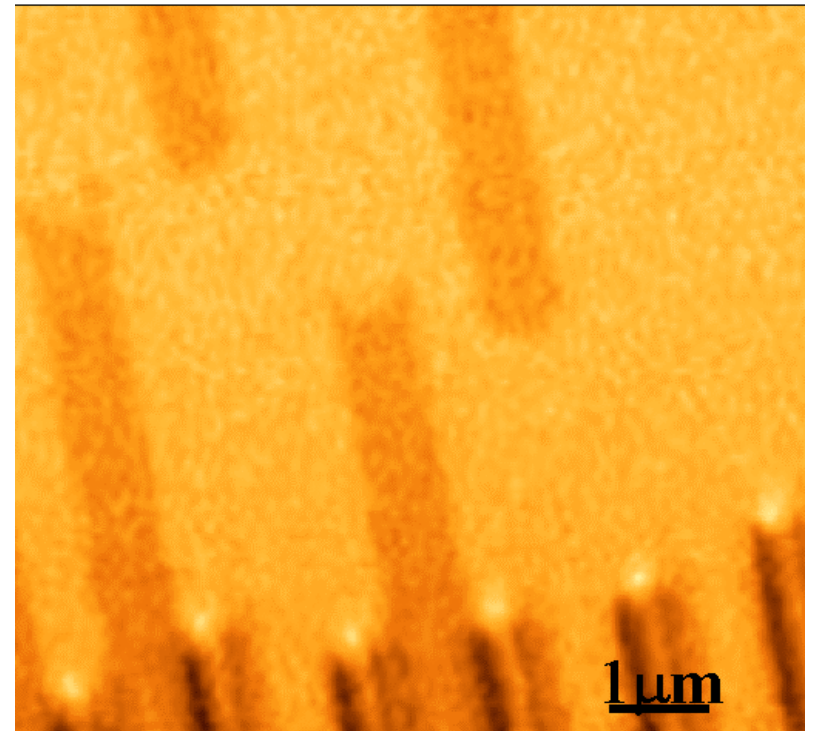
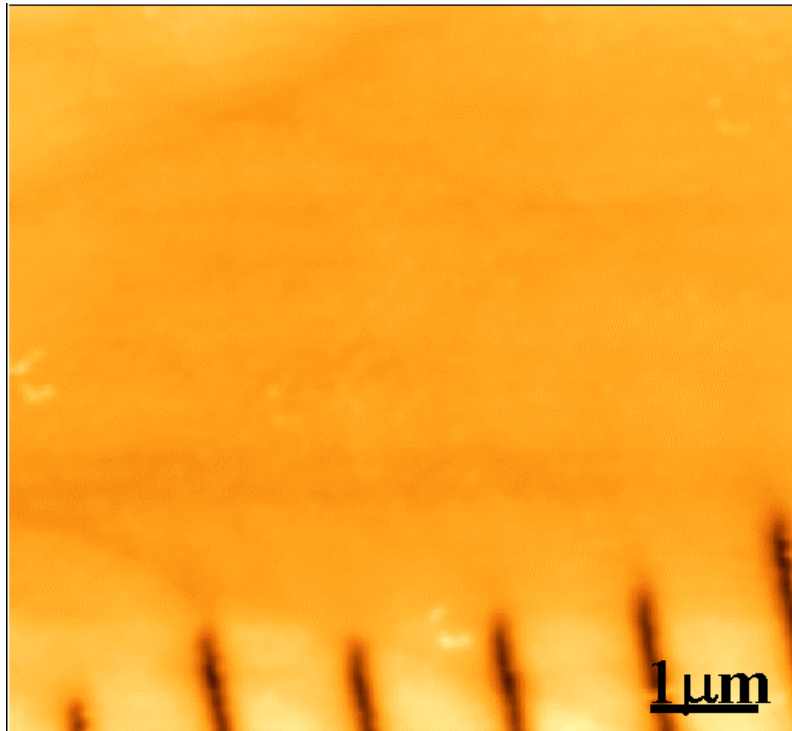


MO-SNOM像

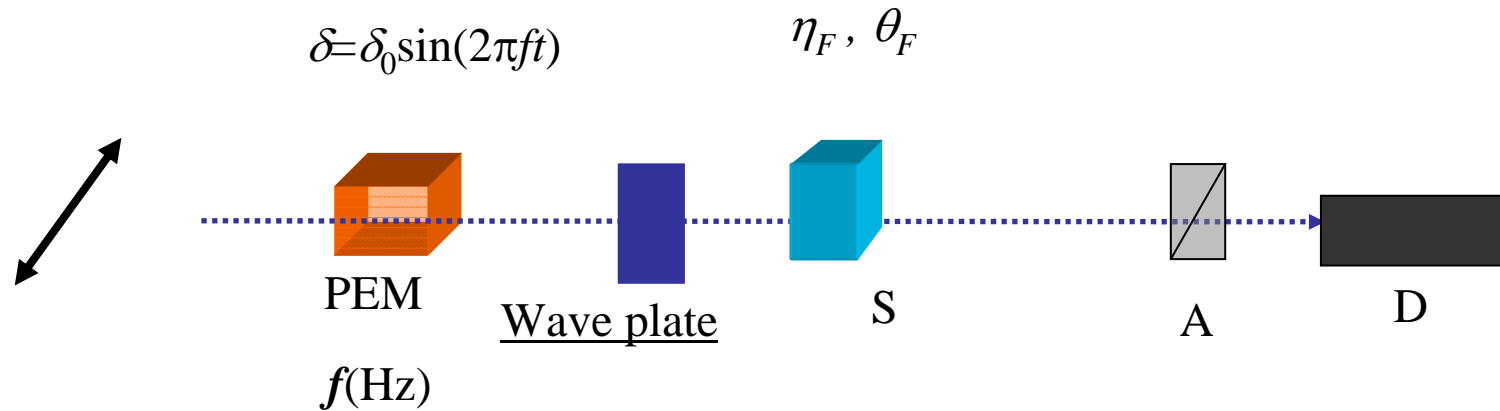
PEMを使ったSNOMシステム



Pt/Coディスクの記録マークの トポ像と磁気光学像



光ファイバーを光学遅延が Δ の波長板と見なし、円偏光変調法を考える。



$$I(0) \sim I_0 R \{1 + J_0(\delta_0) \sin 2\alpha\}$$

$$I(f) \sim I_0 R \cdot 4J_1(\delta_0) \{\cos \Delta \cdot \eta_F + \sin \Delta \cdot \theta_F\}$$

$$I(2f) \sim I_0 R \cdot 4J_2(\delta_0) \left\{ \frac{1}{2} \sin 2\alpha + \cos 2\alpha \sin \Delta \cdot \eta_F - \cos 2\alpha \cos \Delta \cdot \theta_F \right\}$$



$\Delta=0$ または $\Delta = \pi/4$ でない、
出力を分離できない



光ファイバー特性の補償が必要

ストークスパラメータ

$$\mathbf{E} = \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix}$$

Electric field vector of light

$$S_0 = \langle |E_x|^2 \rangle + \langle |E_y|^2 \rangle$$

Intensity of light

$$S_1 = \langle |E_x|^2 \rangle - \langle |E_y|^2 \rangle$$

Intensity of linearly polarized
light along x axis

$$S_2 = \langle E_x \cdot E_y^* \rangle + \langle E_x^* \cdot E_y \rangle$$

Intensity of linearly polarized
light oriented by 45 degrees

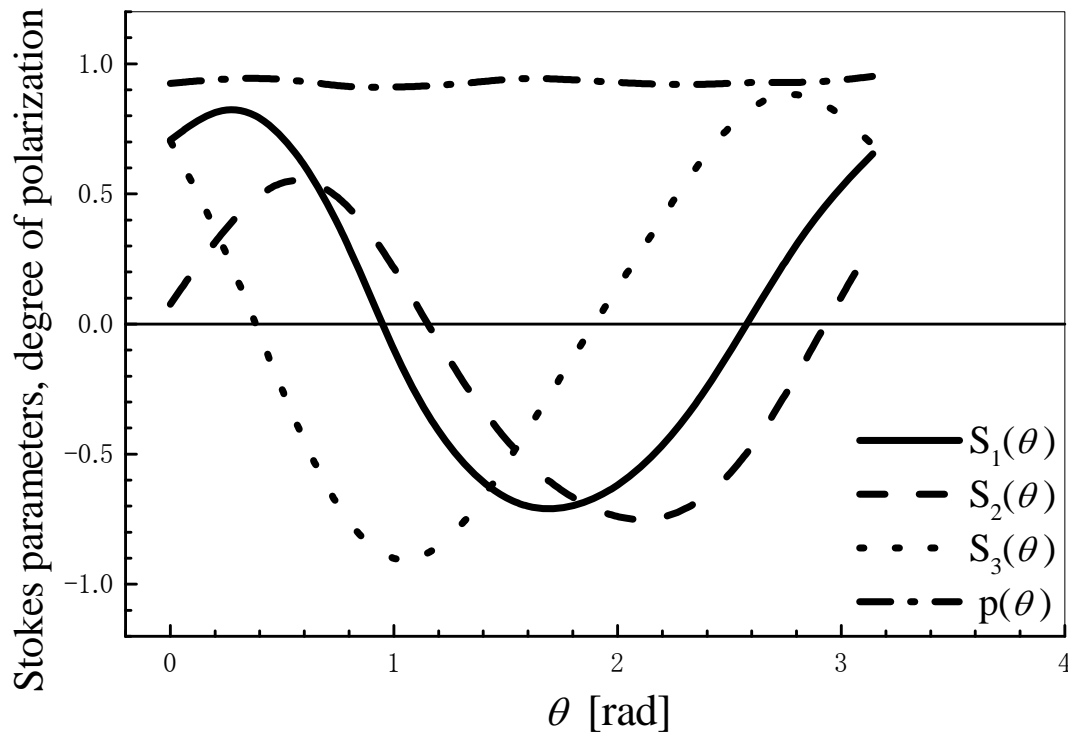
$$S_3 = -i \left[\langle E_x \cdot E_y^* \rangle - \langle E_x^* \cdot E_y \rangle \right]$$

Intensity of circularly
polarized light

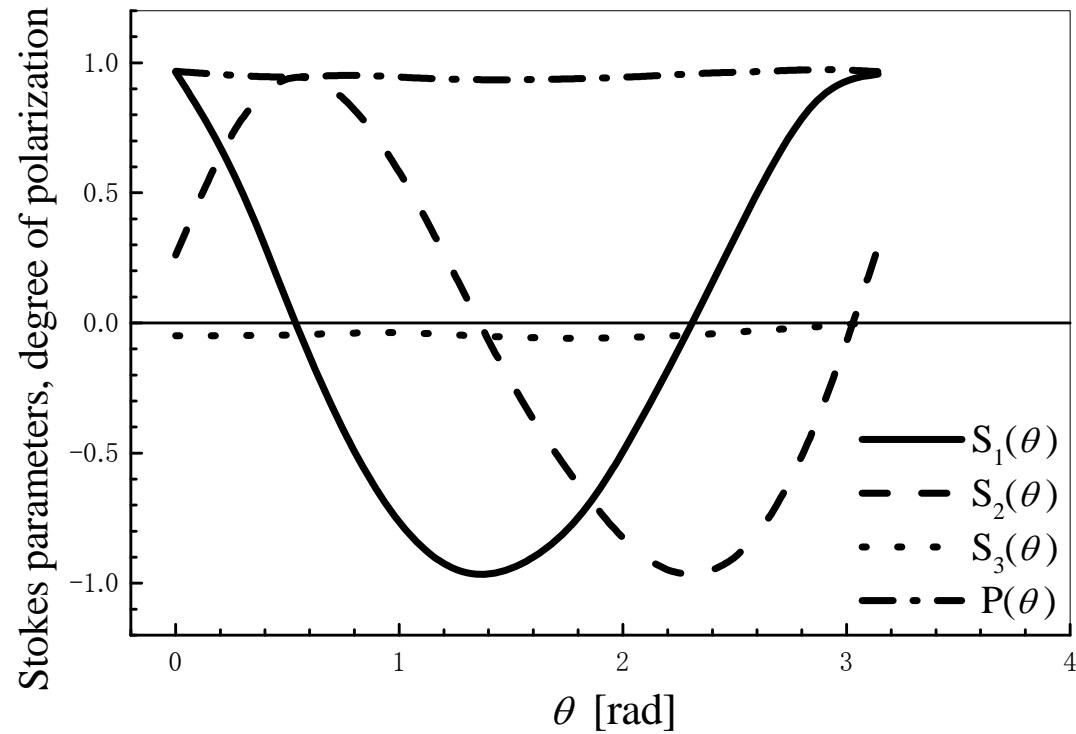
$$P = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0}$$

Degree of polarization

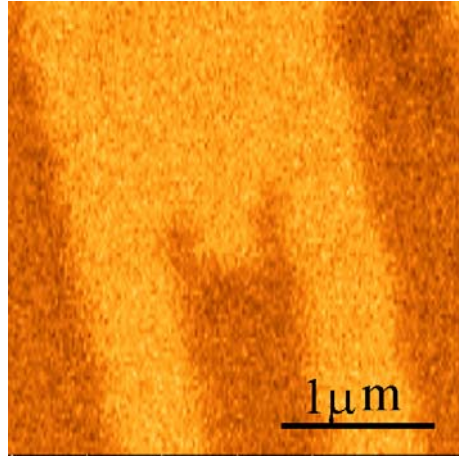
補償前のファイバプローブの ストークスパラメータ



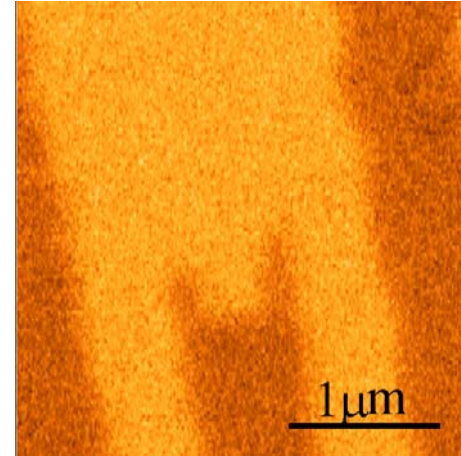
補償後のプローブの ストークスパラメータ



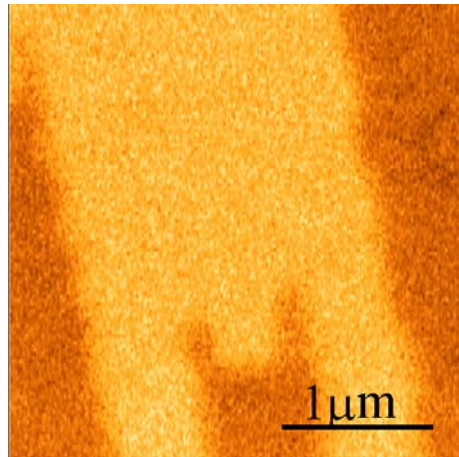
補償後の磁気光学像



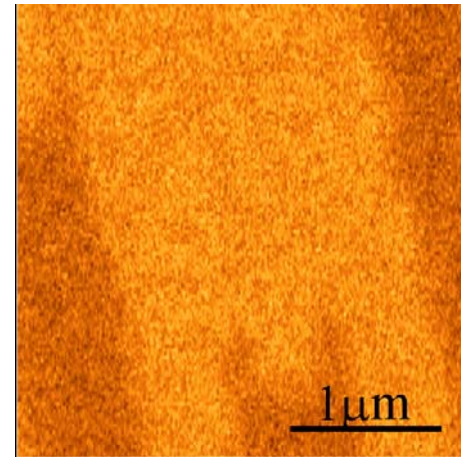
(a) 1f component ($\Delta=0$)



(b) 2f component ($\Delta=0$)

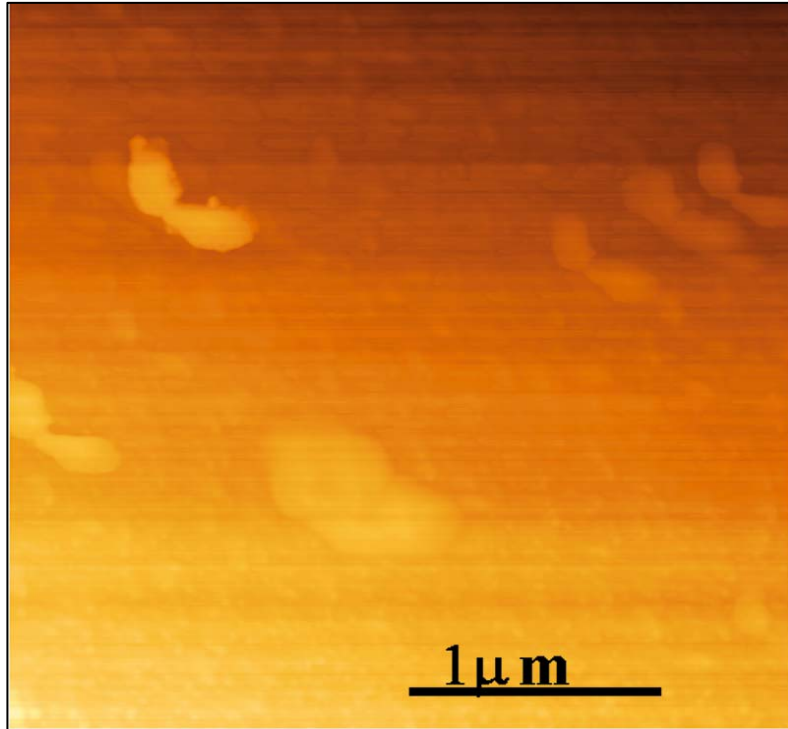


(c) 1f component ($\Delta=\pi/2$)

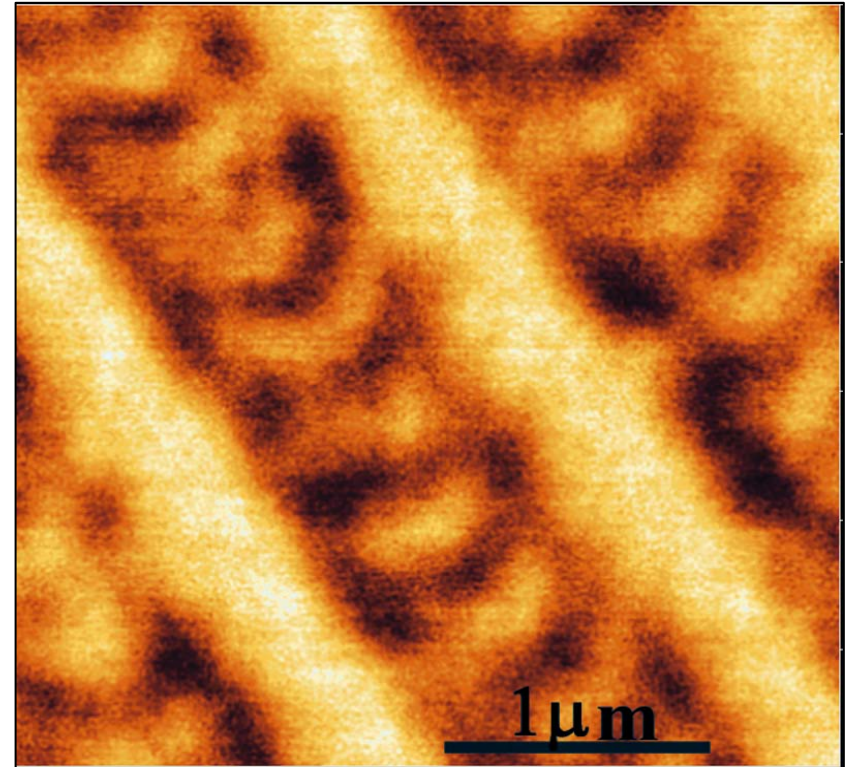


(d) 2f component ($\Delta=\pi/2$)

0.2 μm の記録マークのトポ像とMO像

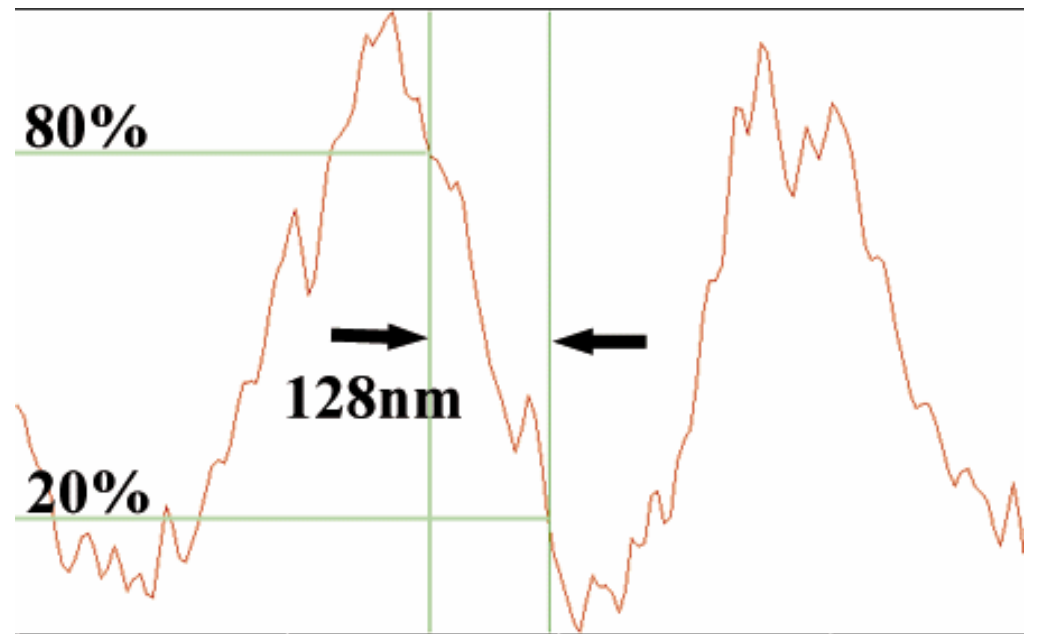
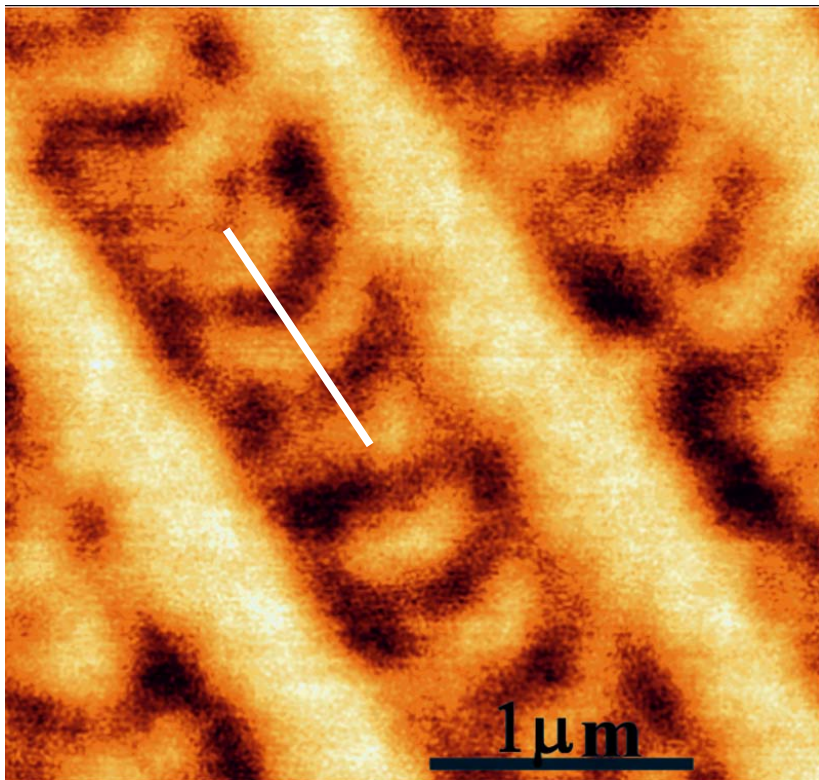


Topography

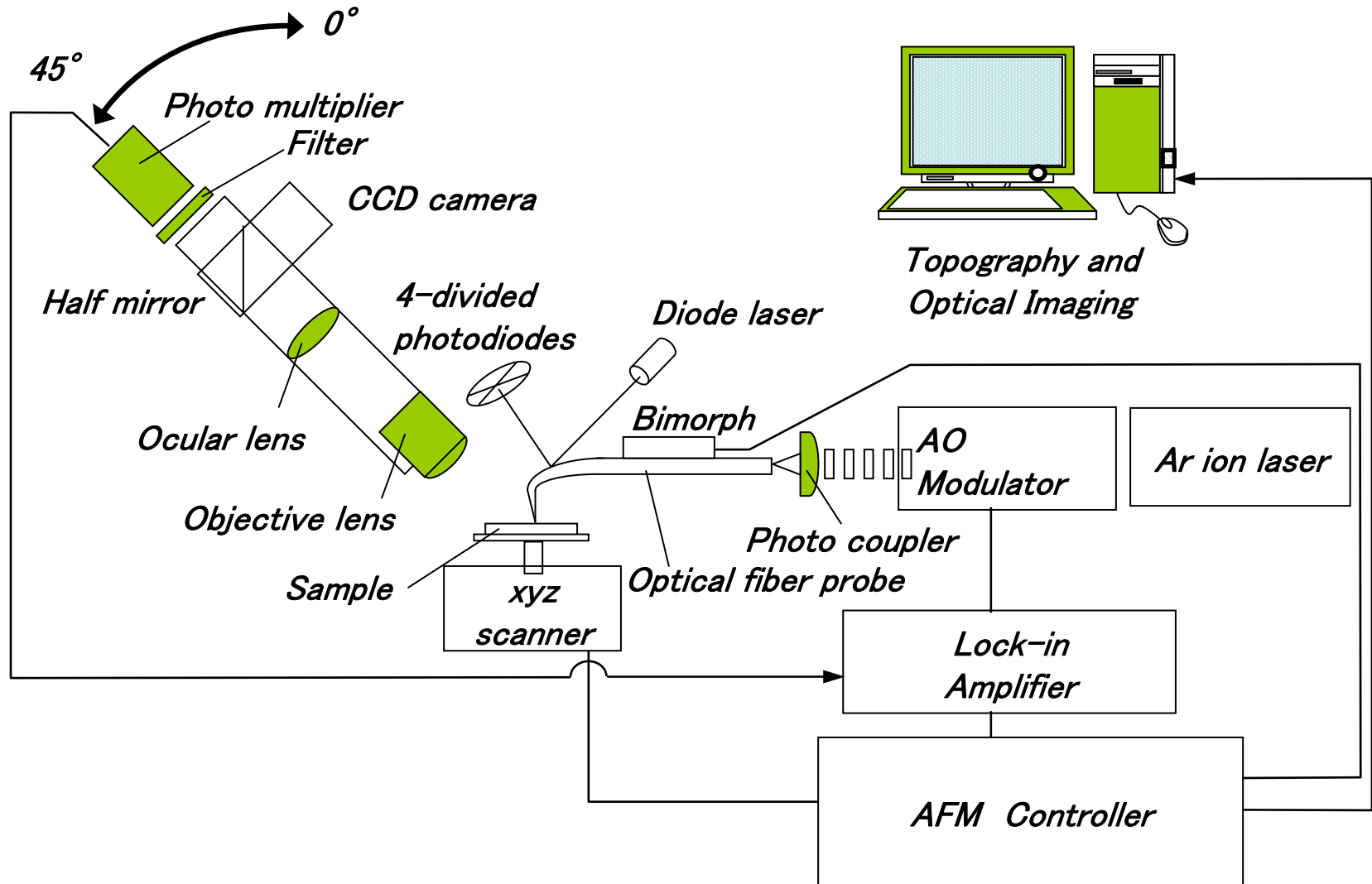


MO image

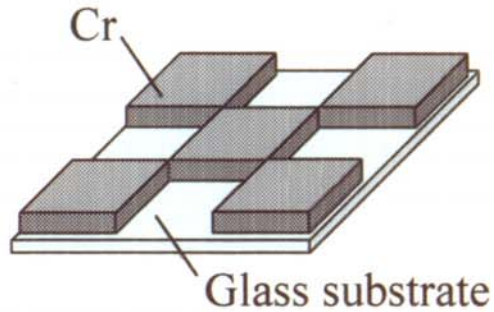
0.2 μm の記録マークのSNOM像



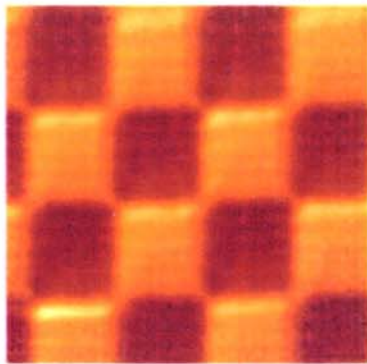
反射モードSNOM装置構成図



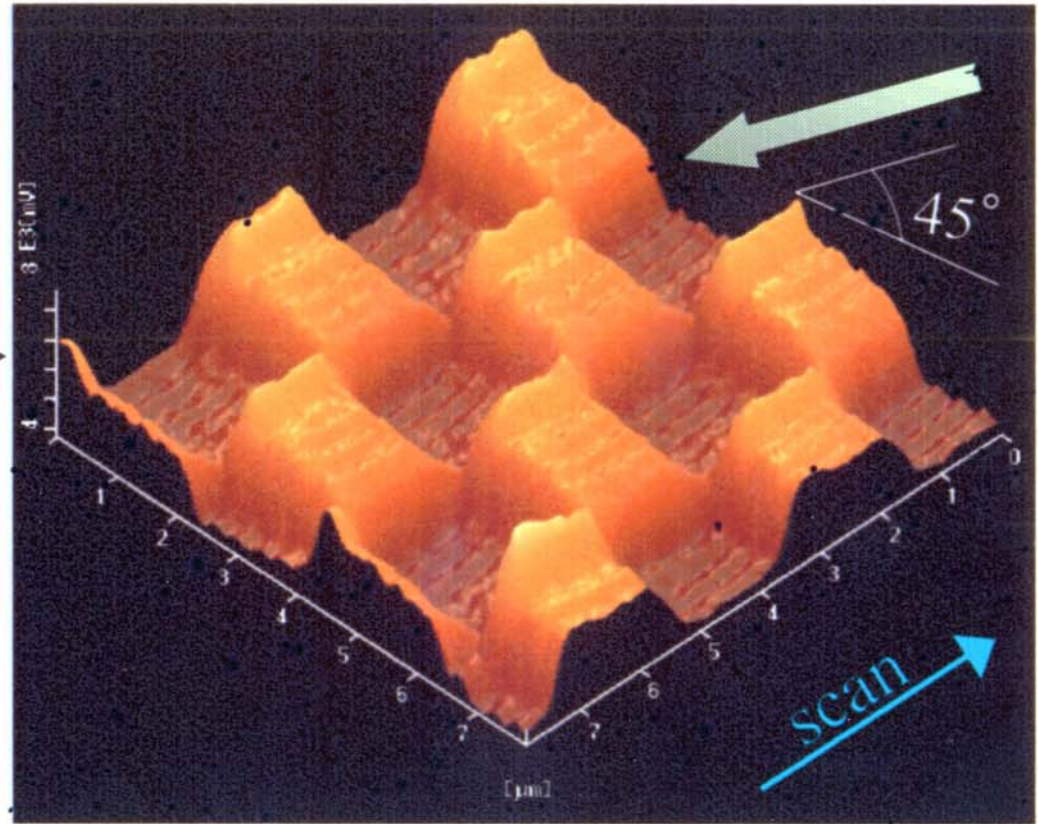
反射モードSNOM像



(a) Test sample



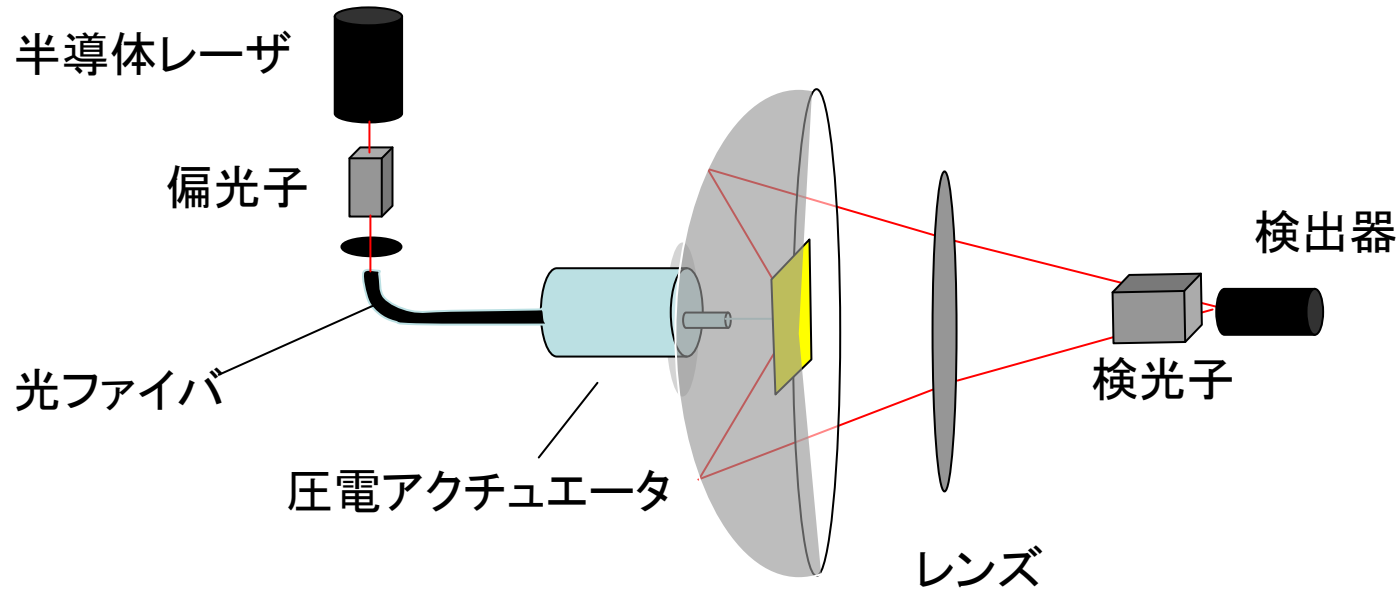
$2 \mu\text{m}$



(b) Reflective mode SNOM image ($8 \mu\text{m} \times 8 \mu\text{m}$).

凹面鏡を用いた反射SNOM

P. Fumagalli, A. Rosenberger, G. Eggers, A. Münnemann, N. Held, G. Günterodt: Appl. Phys. Lett. 72 (1998) 2803

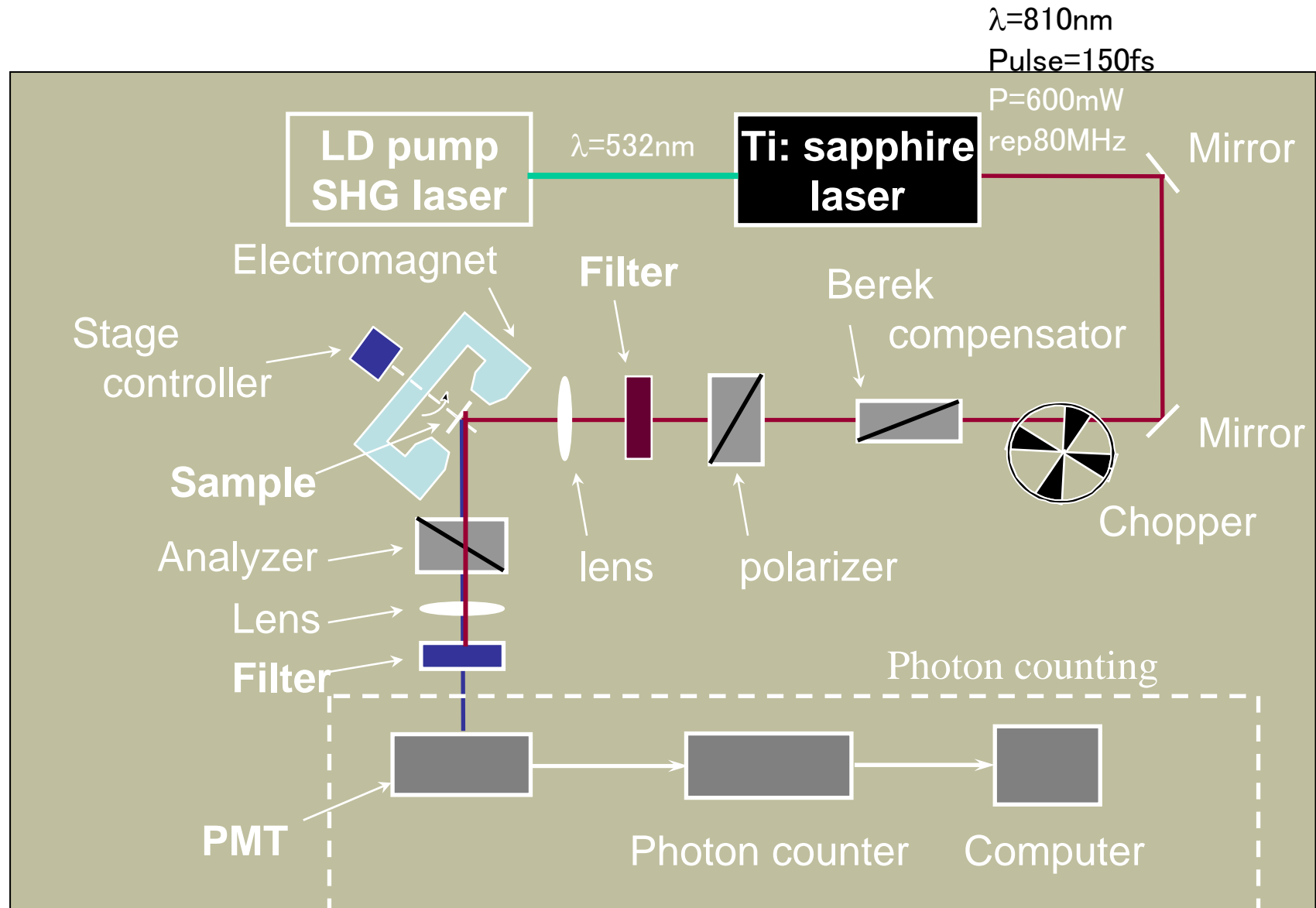


2. 非線形磁気光学効果

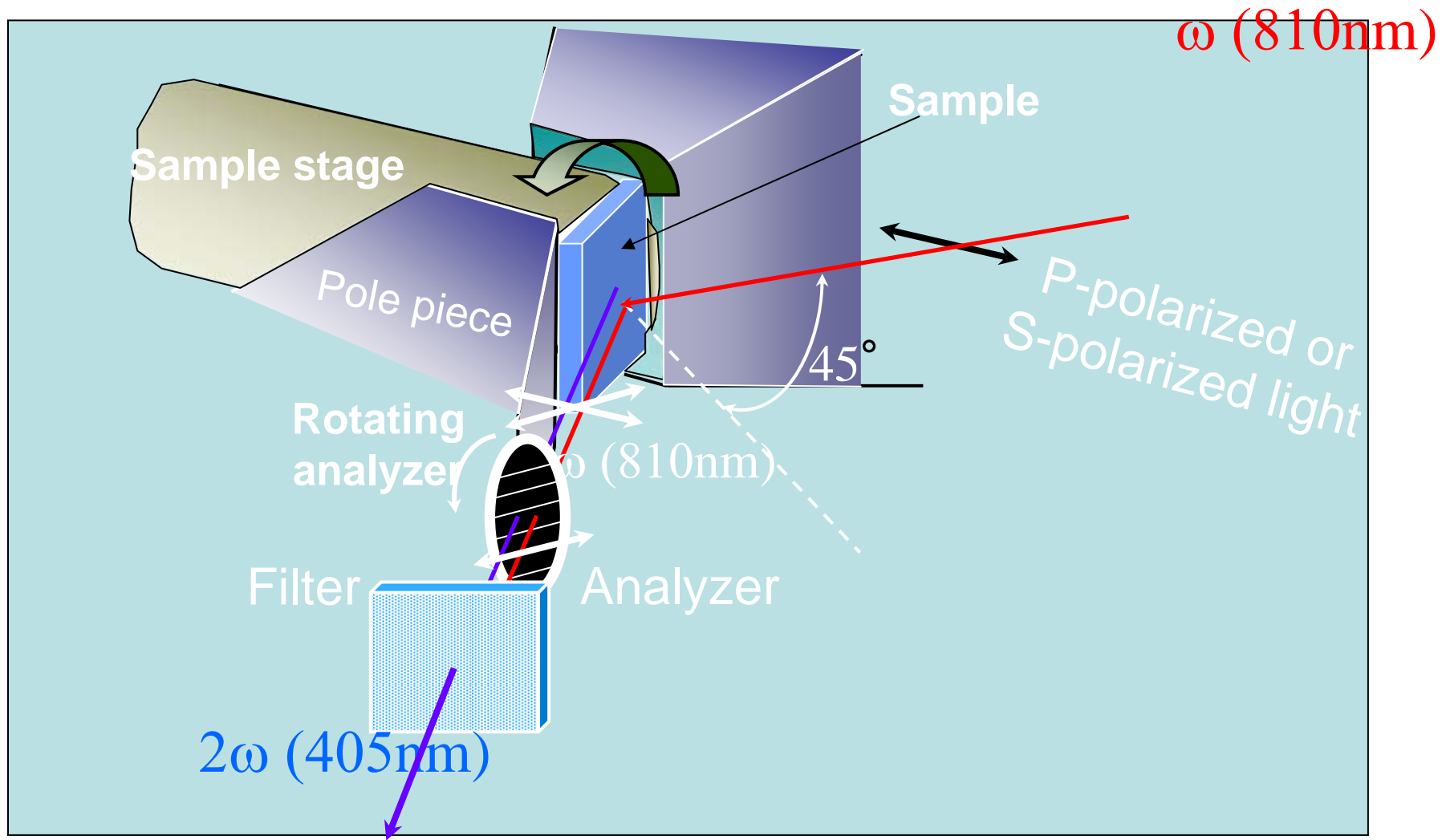
- 非線形光学効果とは「第2高調波光に対する磁気光学効果」のことです。
- 非線形カー回転とは「P偏光が入射したとき、SH光にはP成分とS成分が生じ、SHG光の偏光面が入射偏光面から傾く角度」のことです。
- 中心対称のある物質(Fe, Auなど)では、電気双極子によるSHGは起きません。表面界面では中心対称性が破れるのでSHGが起きます。

SHG=second harmonic generation(第2高調波発生)

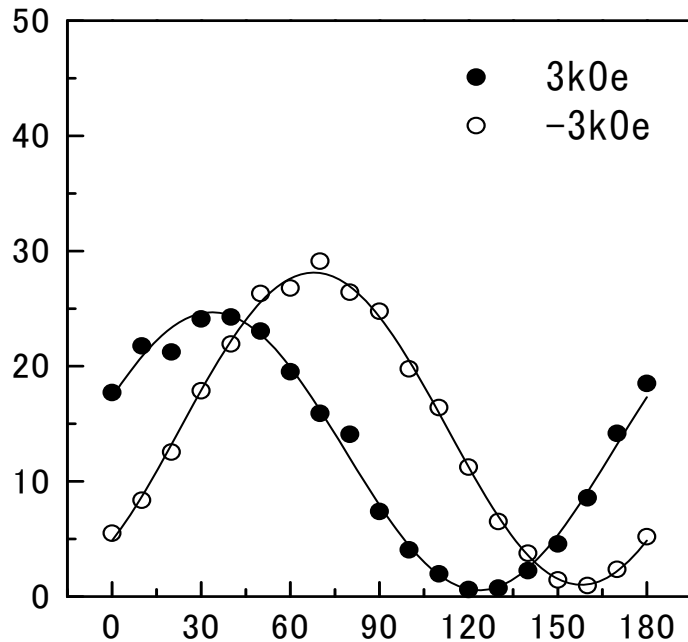
非線形磁気光学効果測定系



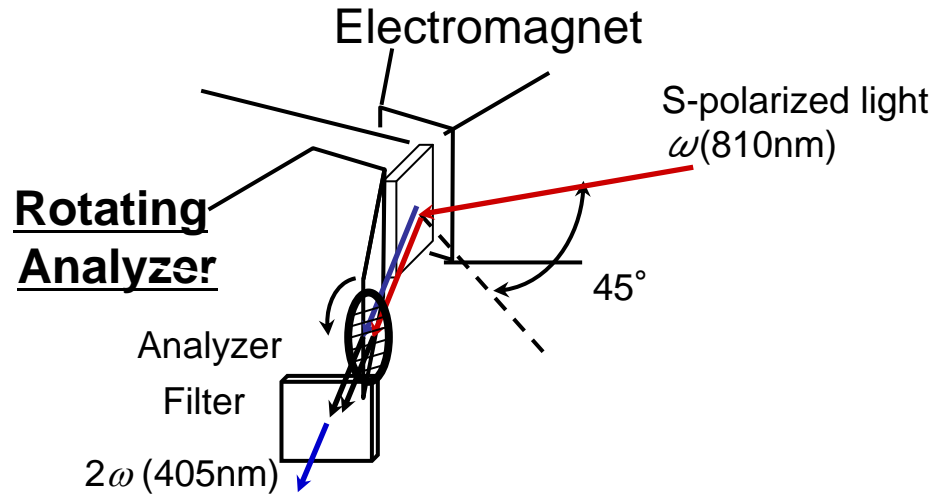
MSHG測定系配置



MSHGの検光子角依存性



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



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

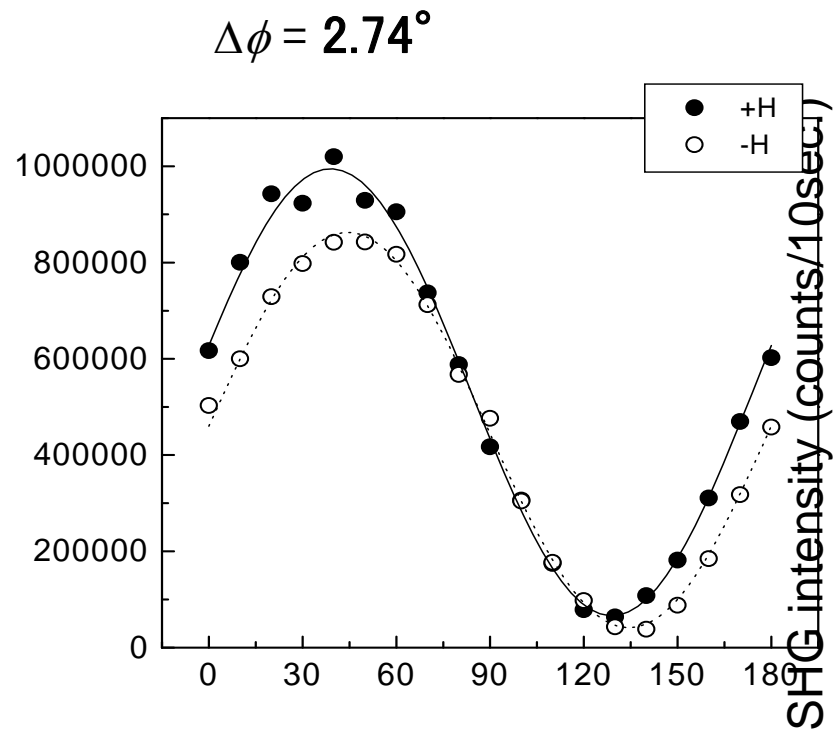
$$\eta_K^{(2)} = \frac{1}{2} \left[\tan^{-1} \left(\frac{I_{MAX}^{(+)}}{I_{MIN}^{(+)}} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{I_{MAX}^{(-)}}{I_{MIN}^{(-)}} \right) \right]$$

Nonlinear Kerr rotation & ellipticity

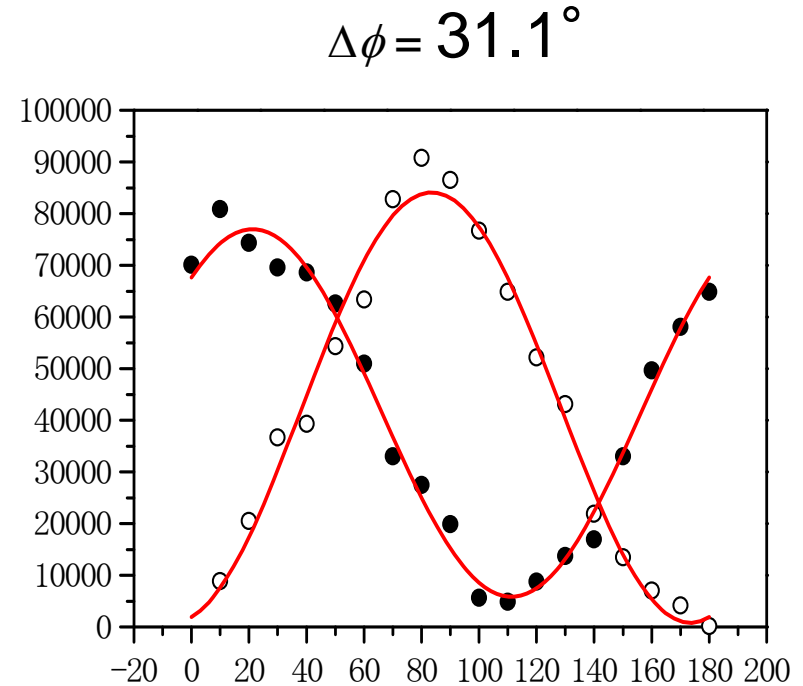
$$\theta_K^{(2)} = 17.2^\circ$$

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

Fe/Auの非線形形力一回転角



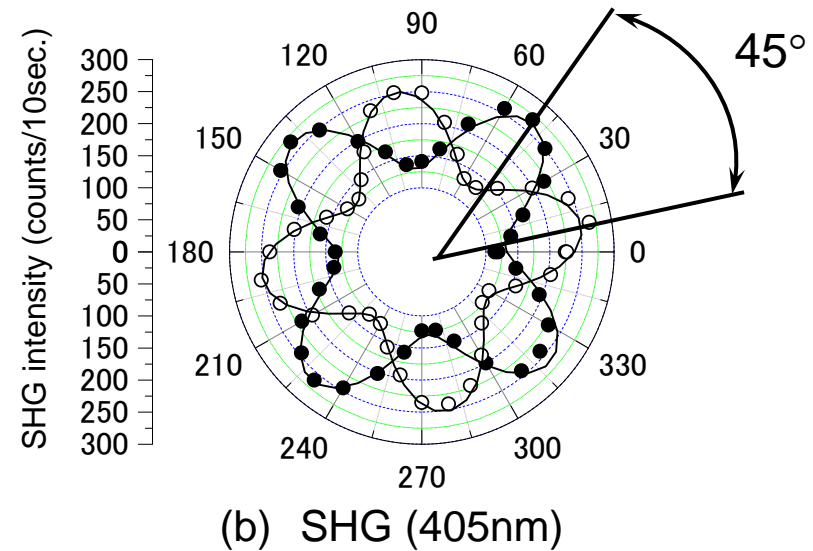
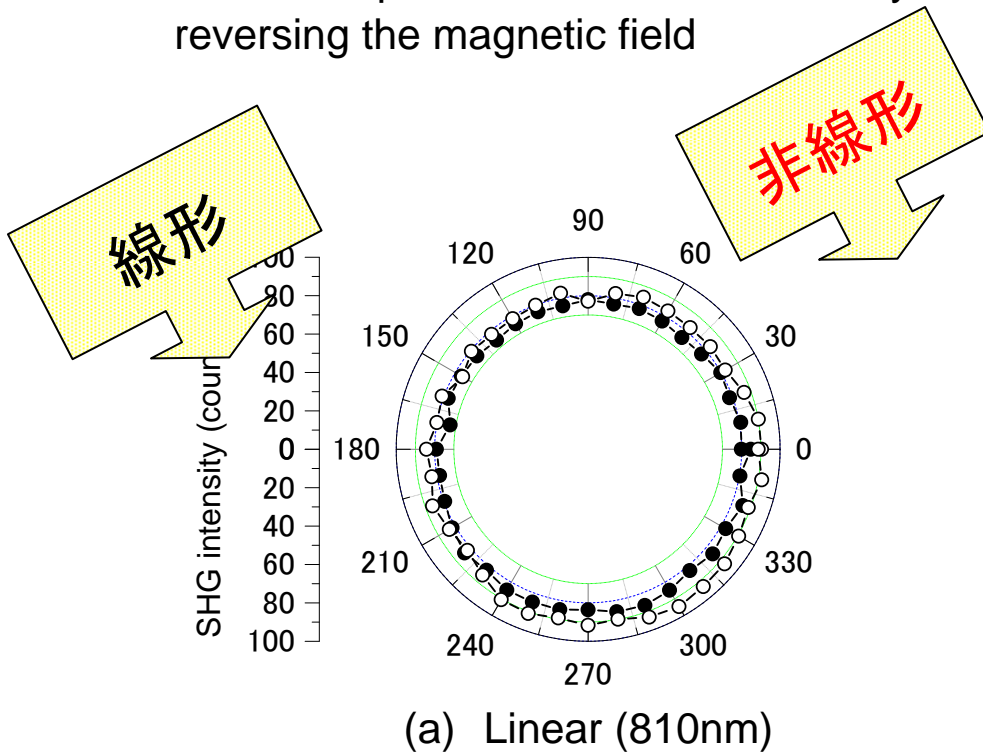
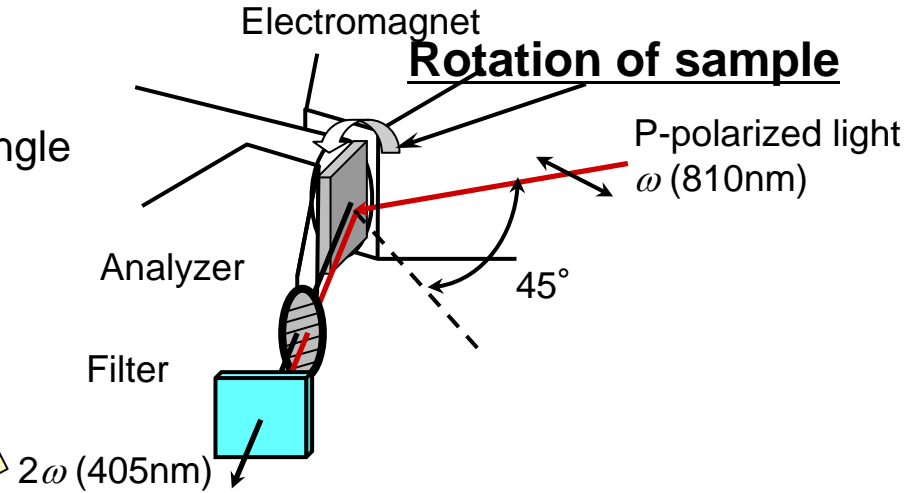
(a) Fe(1ML)/Au(1ML) Pin



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

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



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

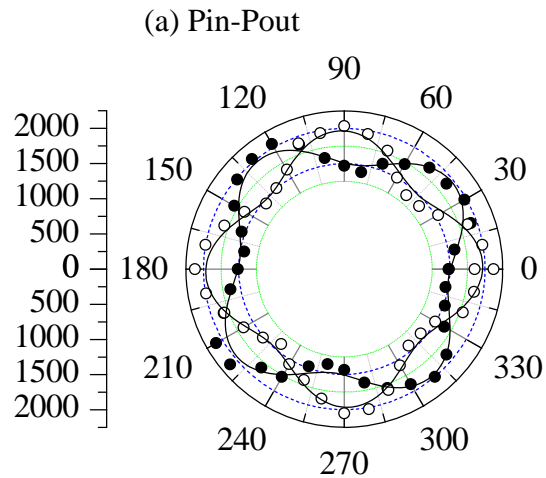
$$P_i^{(2)}(M) = \chi_{ijk}^{(D)}(M) E_j E_k + \chi_{ijkl}^{(Q)}(M) E_j \nabla_l E_k$$
$$= \chi_{ijk}^{(D)}(0) E_j E_k + X_{ijkL}^{(D)} E_j E_k M_L + \chi_{ijkl}^{(Q)} E_j \nabla_l E_k$$

Surface
nonmagnetic
(dipole term)

Surface
Magnetic
(dipole term)

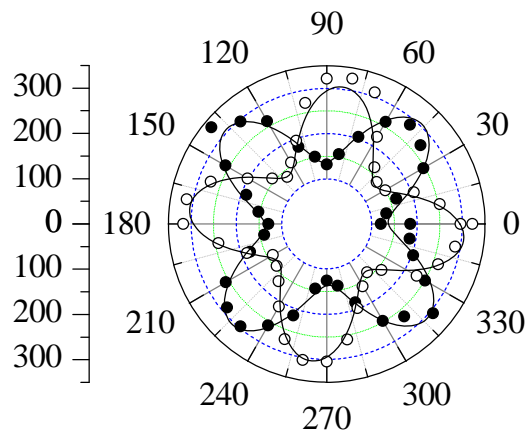
Bulk
nonmagnetic
(quadrupole)

MSHG方位角依存性のシミュレーション

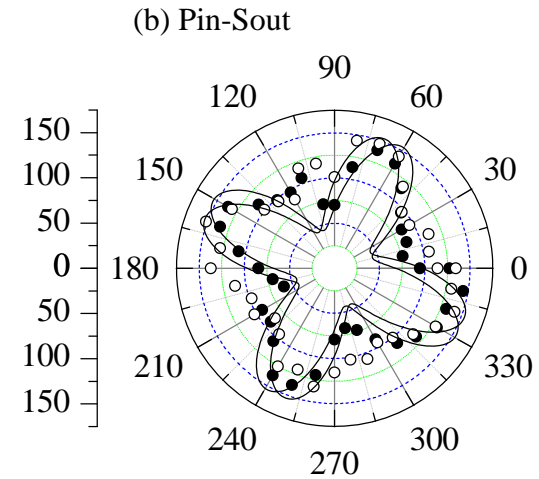


$$A^{PP}=1310, B=26, C=-88$$

(c) Sin-Pout

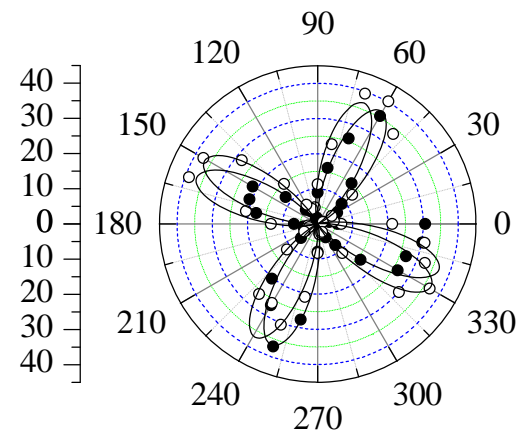


$$A^{SP}=460, B=26, C=-88$$



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

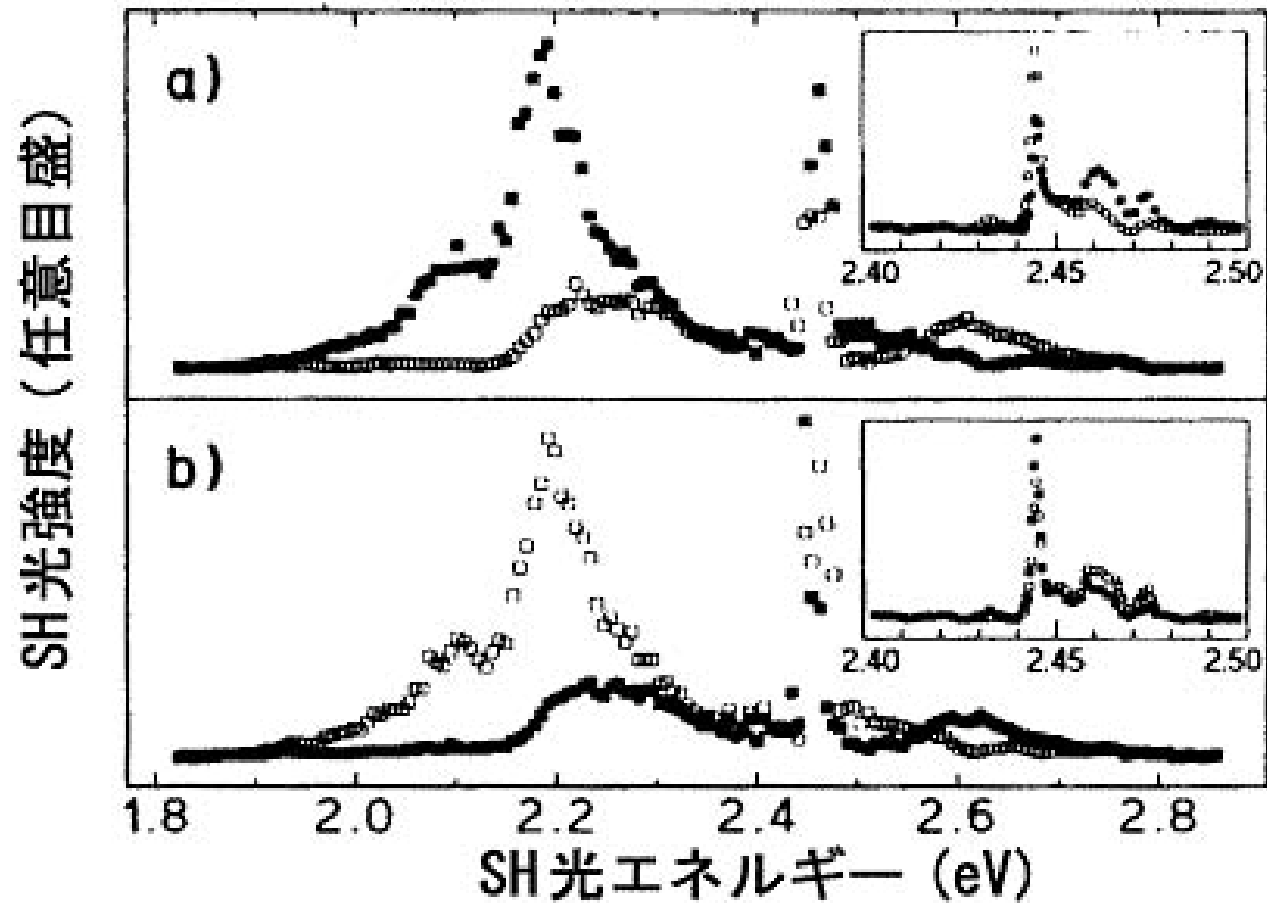
(d) Sin-Sout



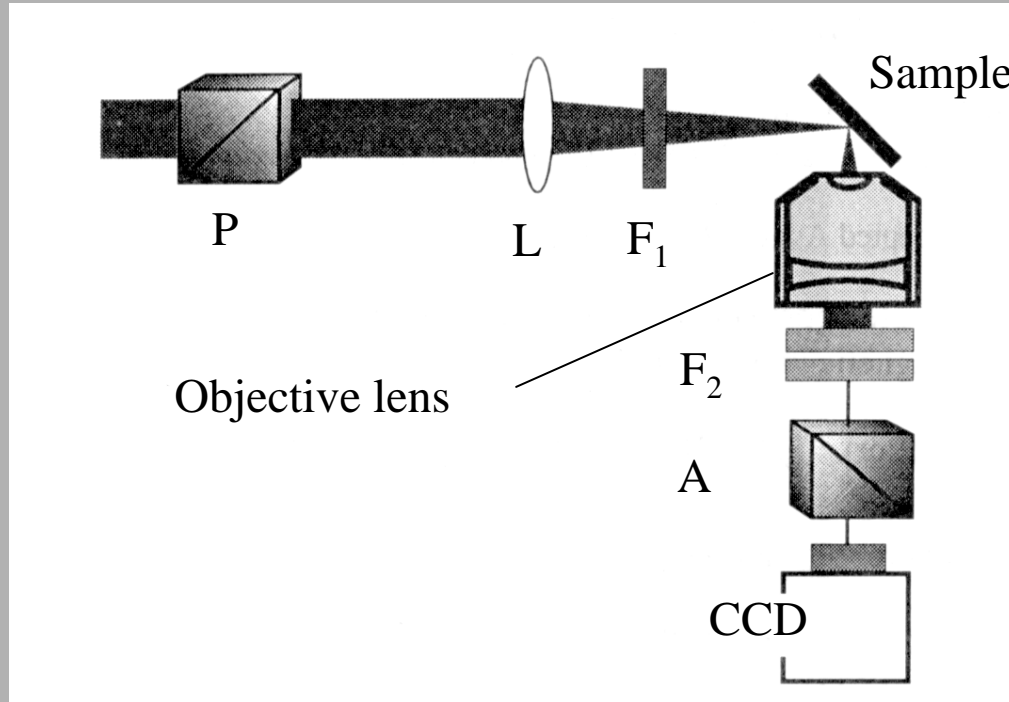
$$A^{SS}=100, B=26, C=-88$$

点: 実験
実線: 計算

Cr₂O₃のMSHG

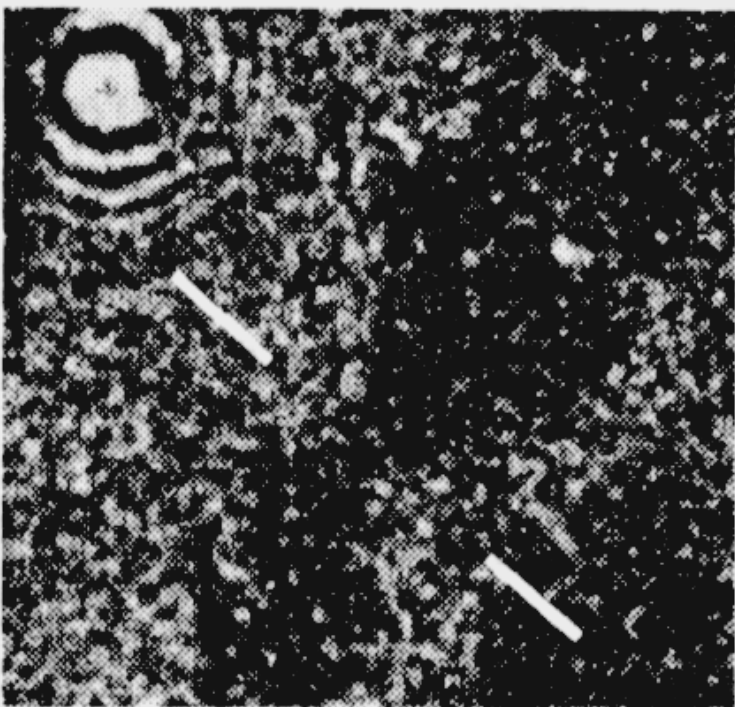


非線形磁気光学顕微鏡



非線形磁気光学顕微鏡の模式図

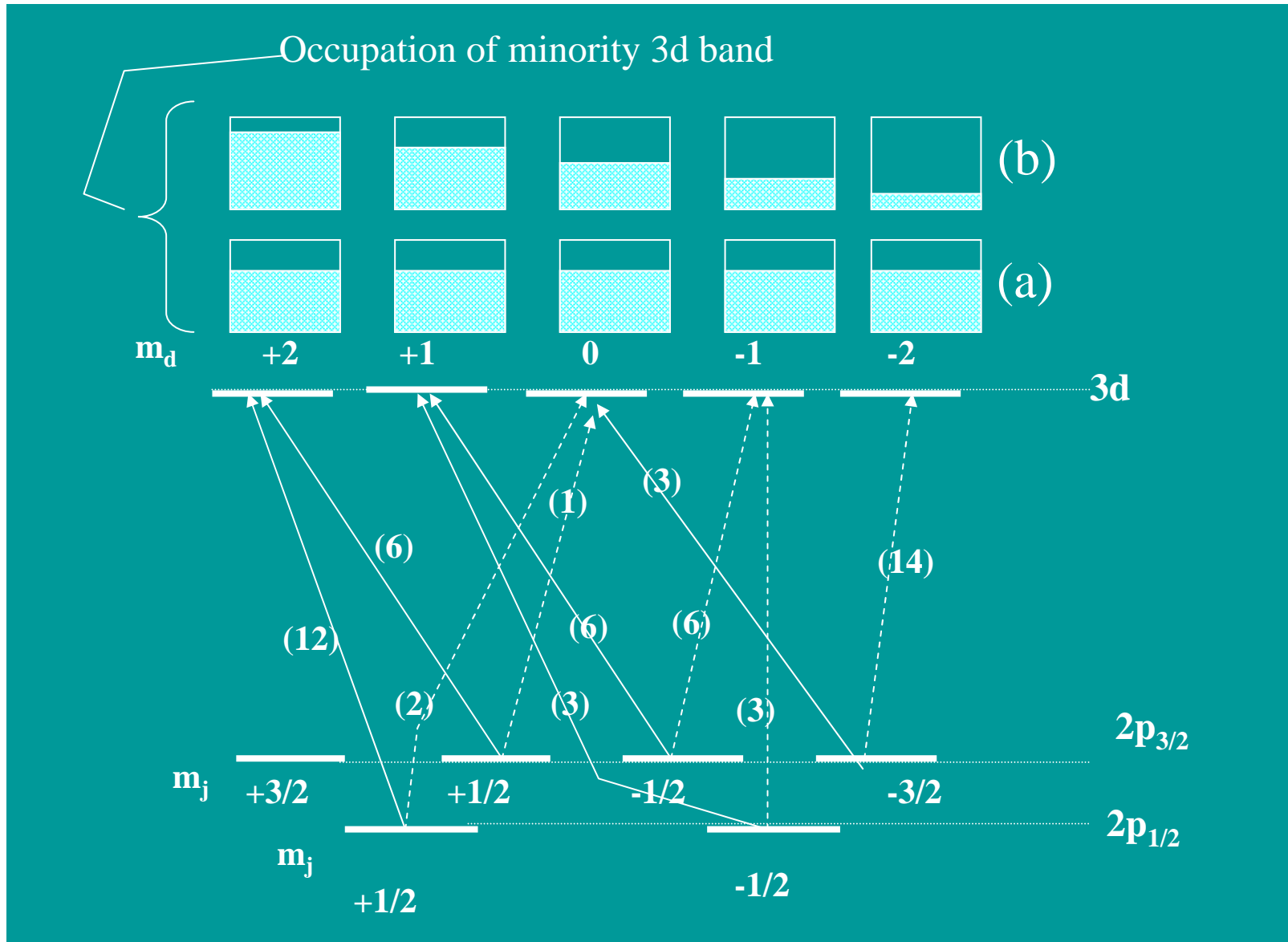
非線形磁氣光学顯微鏡像



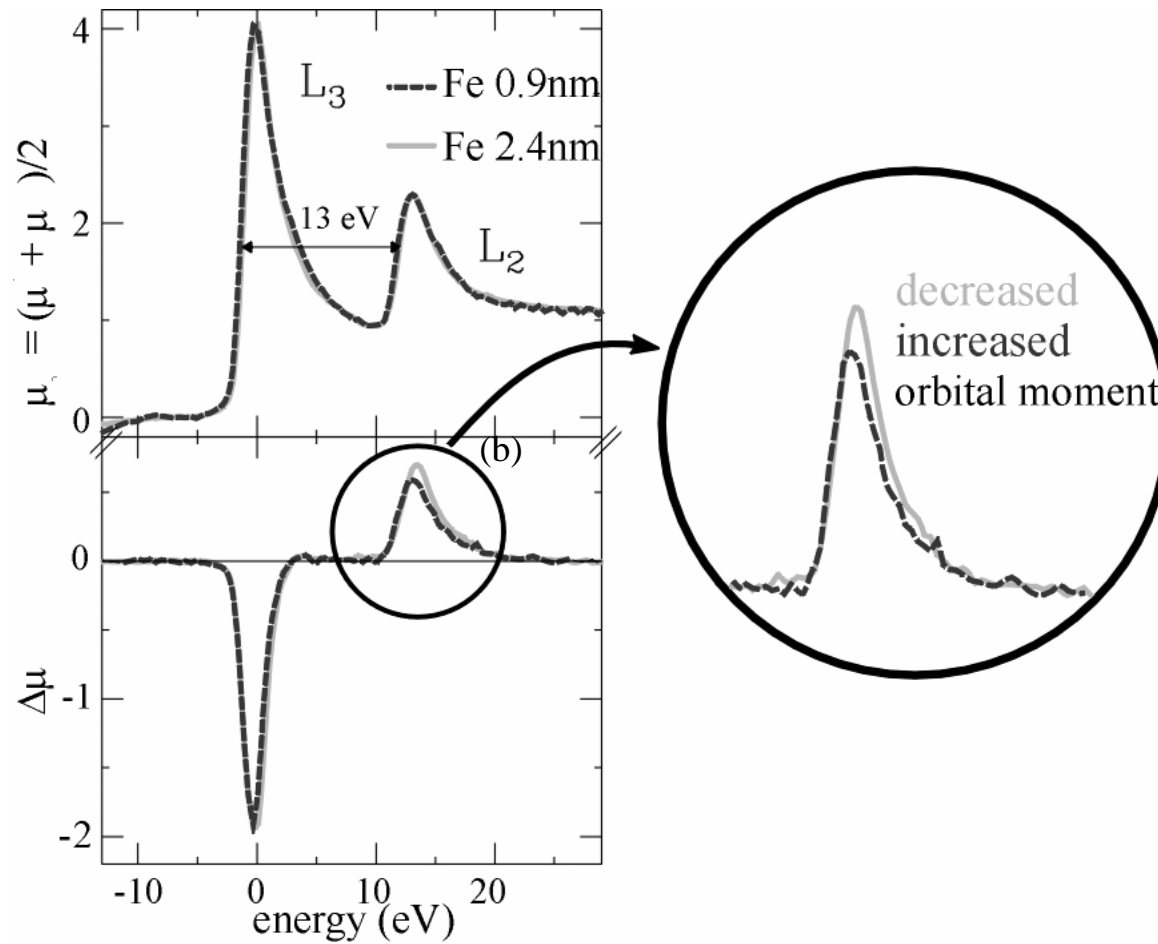
その他の磁気光学効果

- X線磁気光学顕微鏡
- Sagnac顕微鏡
- ポンププローブ法による動的磁化測定

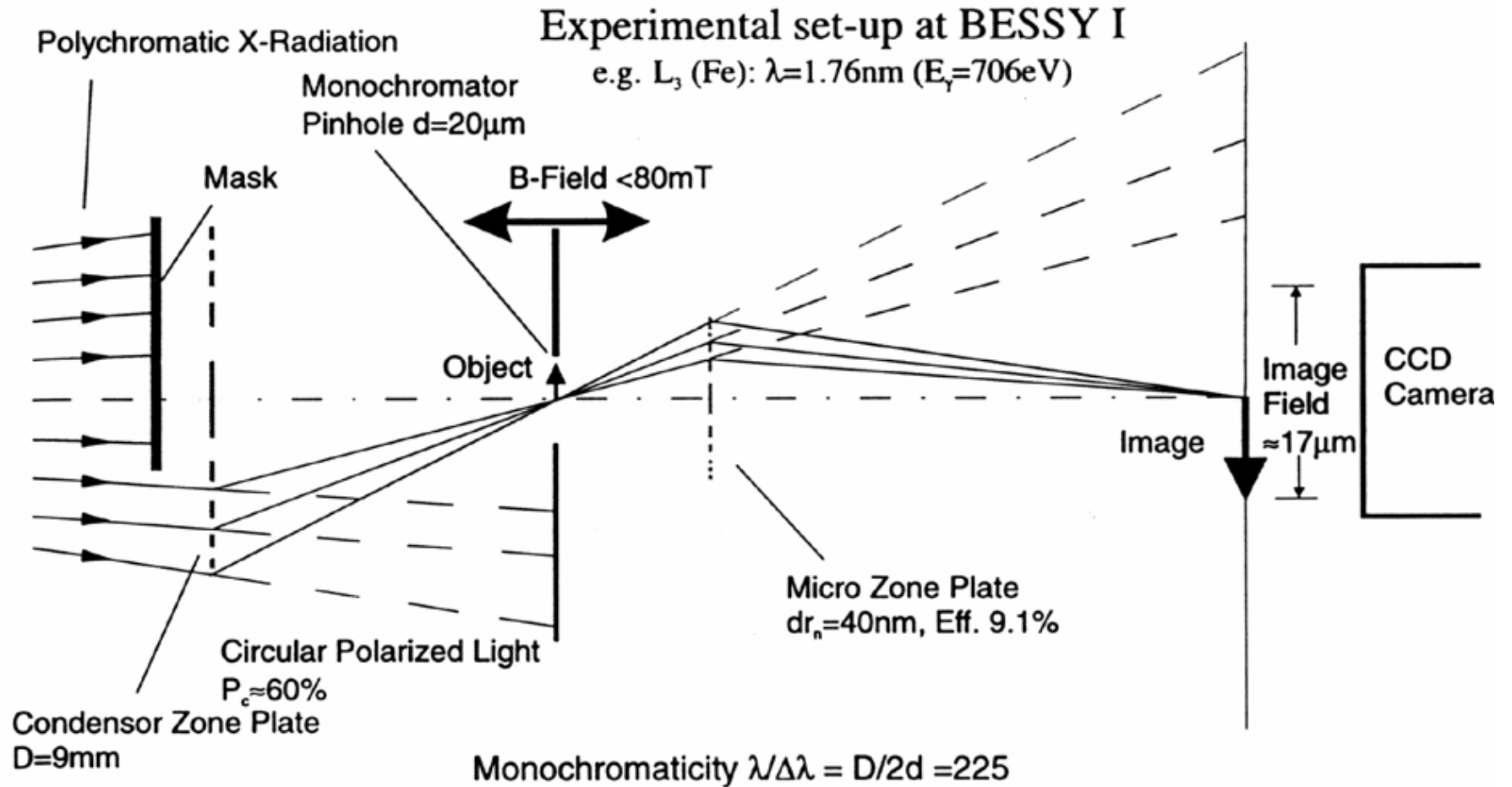
X線磁気光学効果



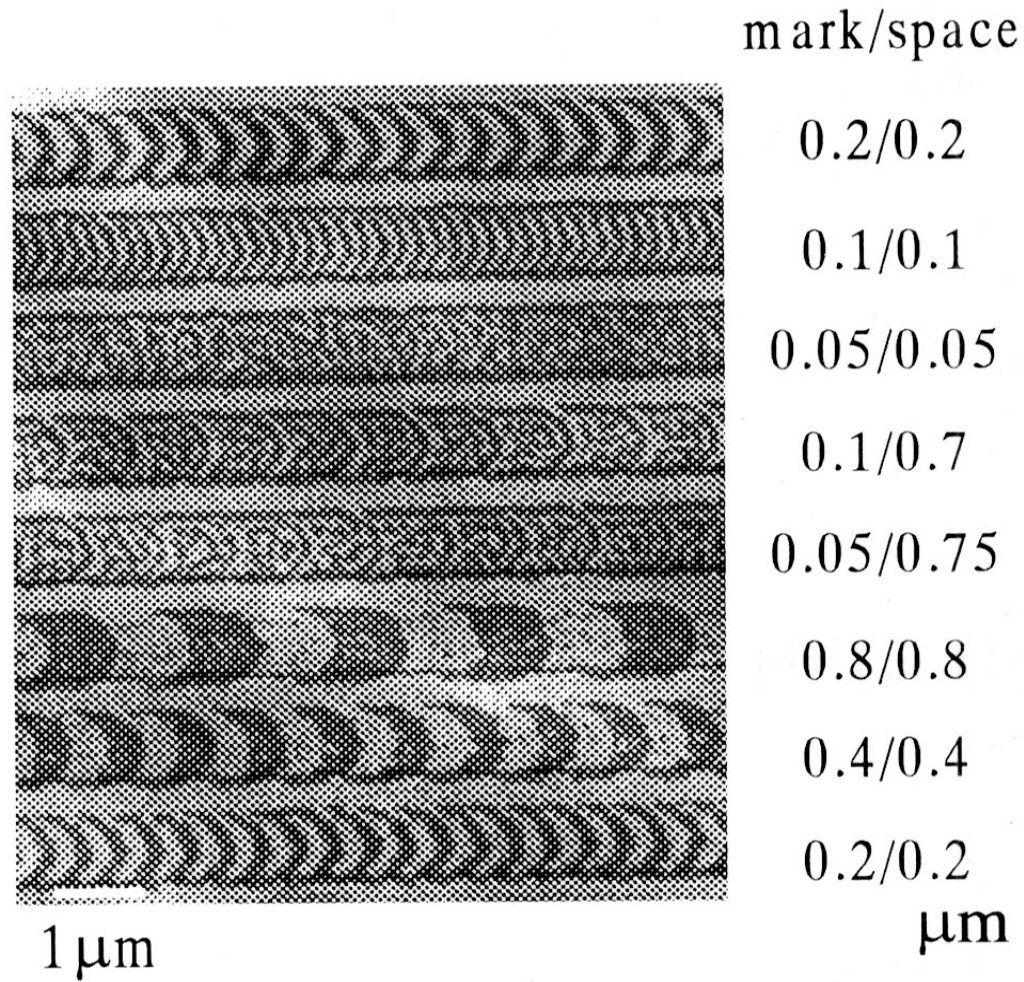
L吸収端の磁気円二色性



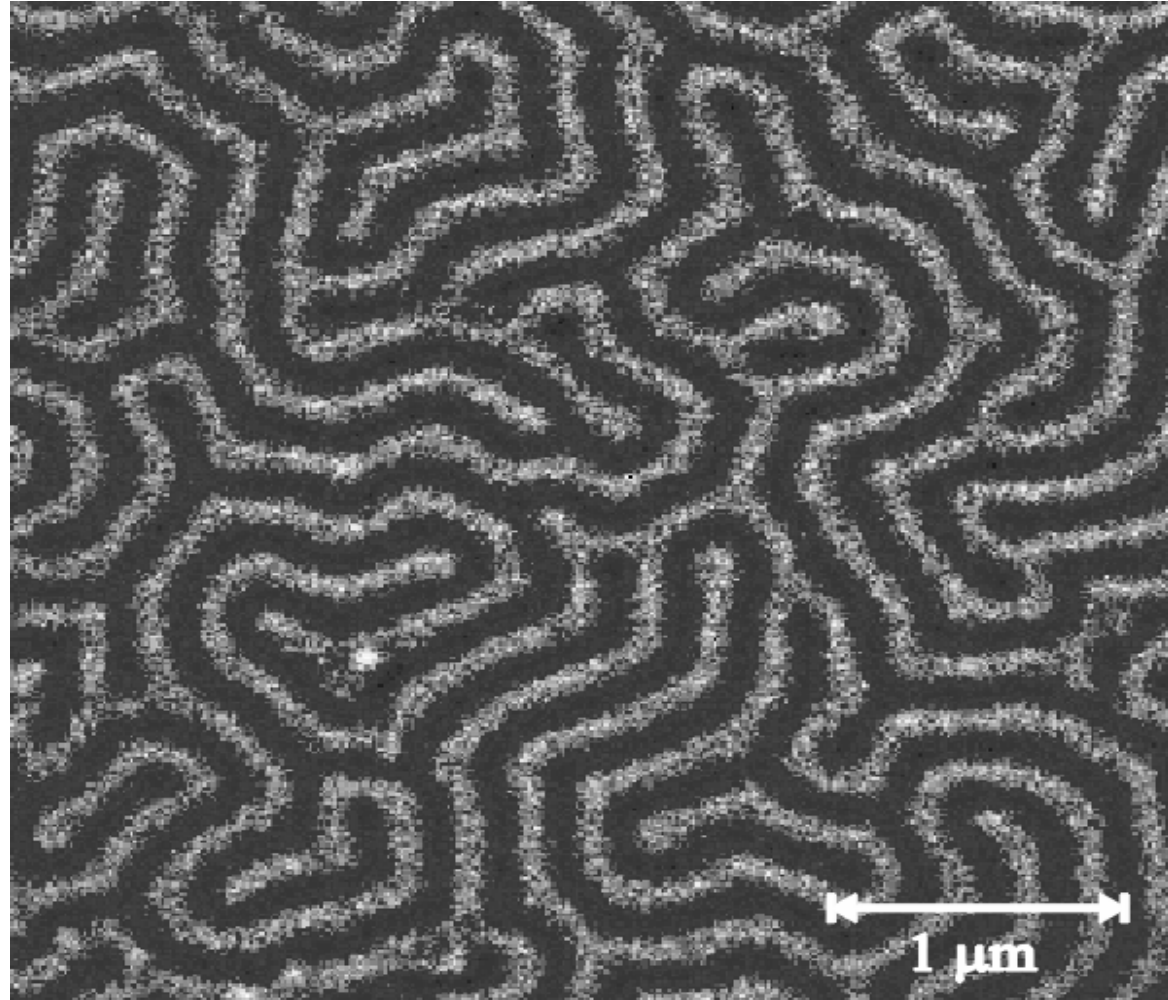
XMCD顯微鏡



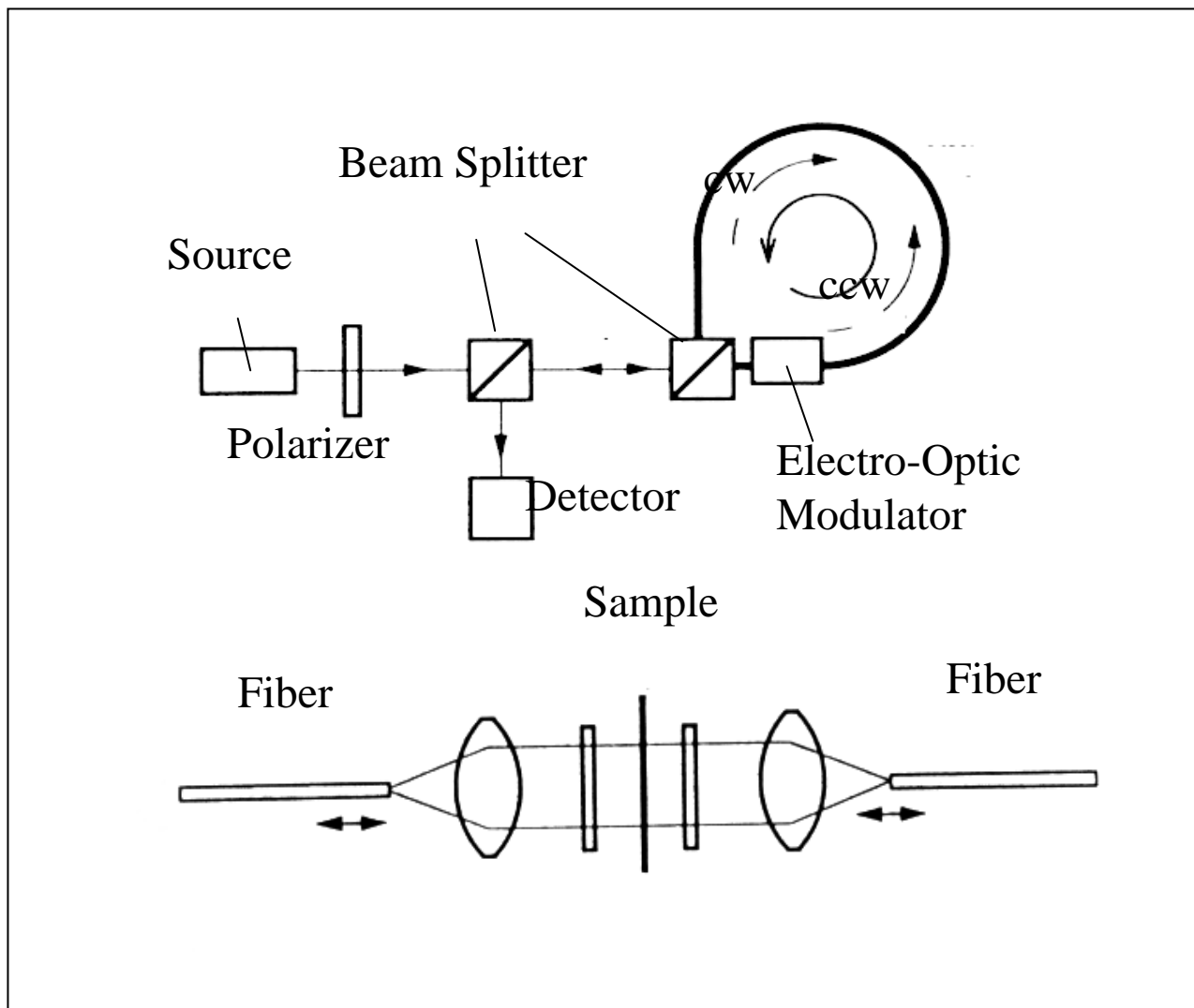
X線顕微鏡によるMO膜観測



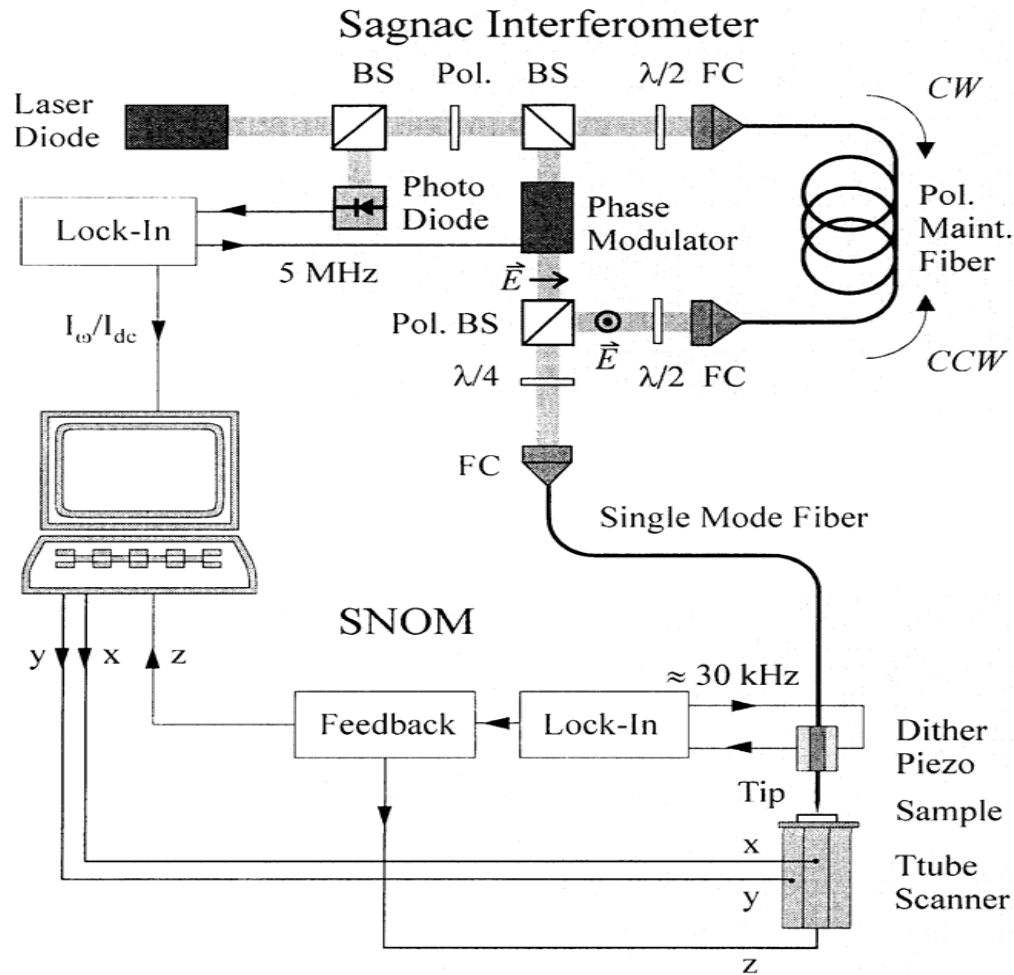
X線顕微鏡で観察したGdFeの磁区



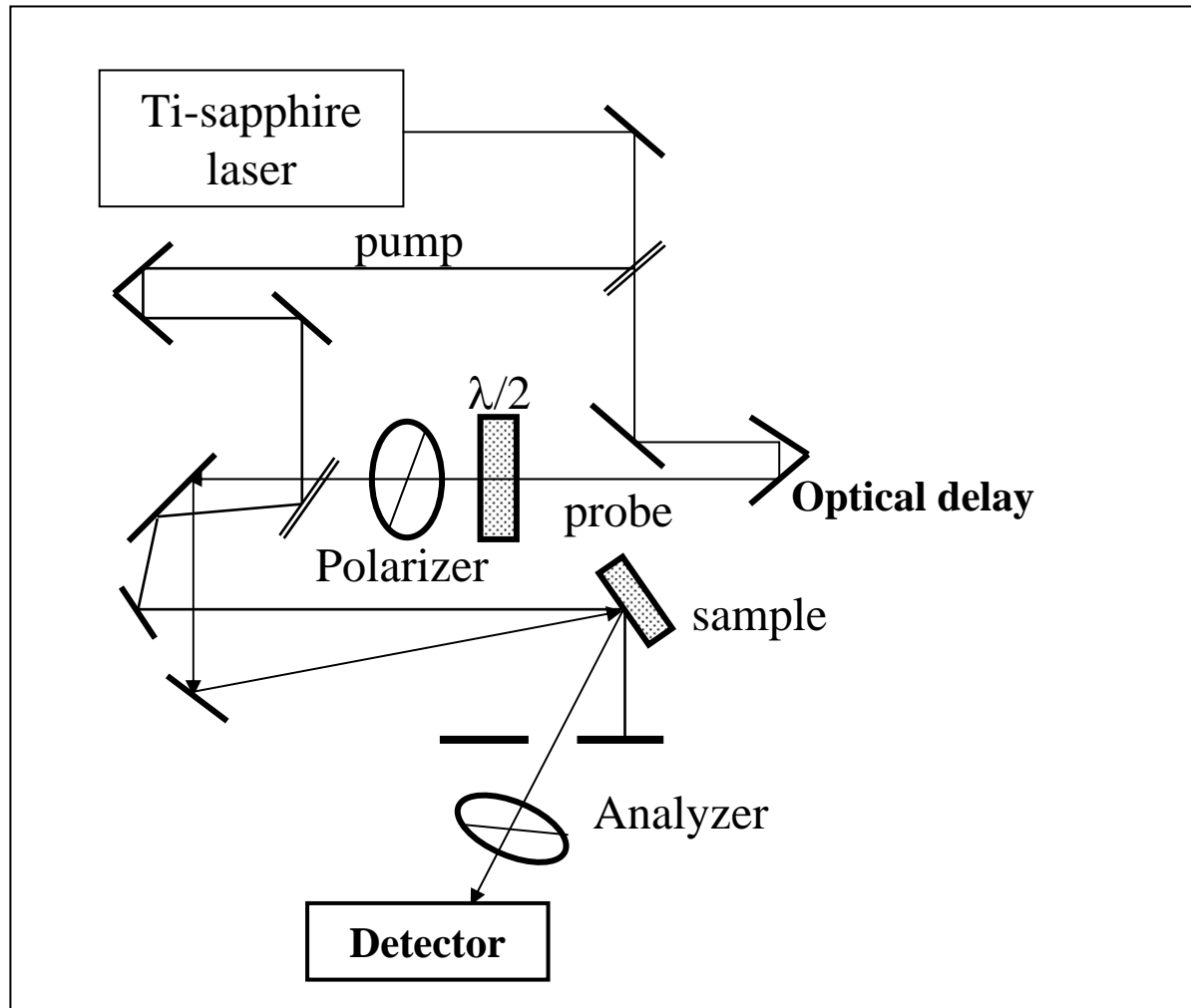
サニャック干渉計



サニヤックSNOM



ポンププローブ磁気光学測定



時間分解磁化變調分光(TIMMS)

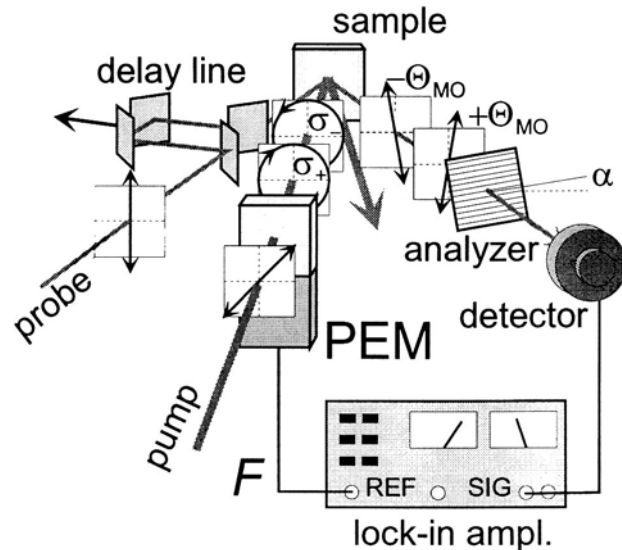


FIG. 1. Schematic diagram explaining a TIMMS experiment. A photoelastic modulator (PEM) modulates the pump between left and right-handed circular polarization ($\sigma_+ \leftrightarrow \sigma_-$). This results in a modulation of the magneto-optical rotation ($-\Theta_{MO} \leftrightarrow +\Theta_{MO}$), which is picked up by a lock-in amplifier.

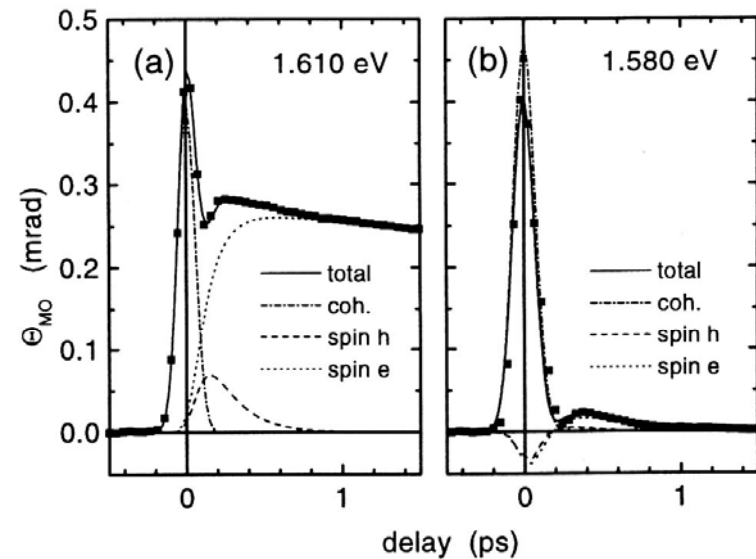
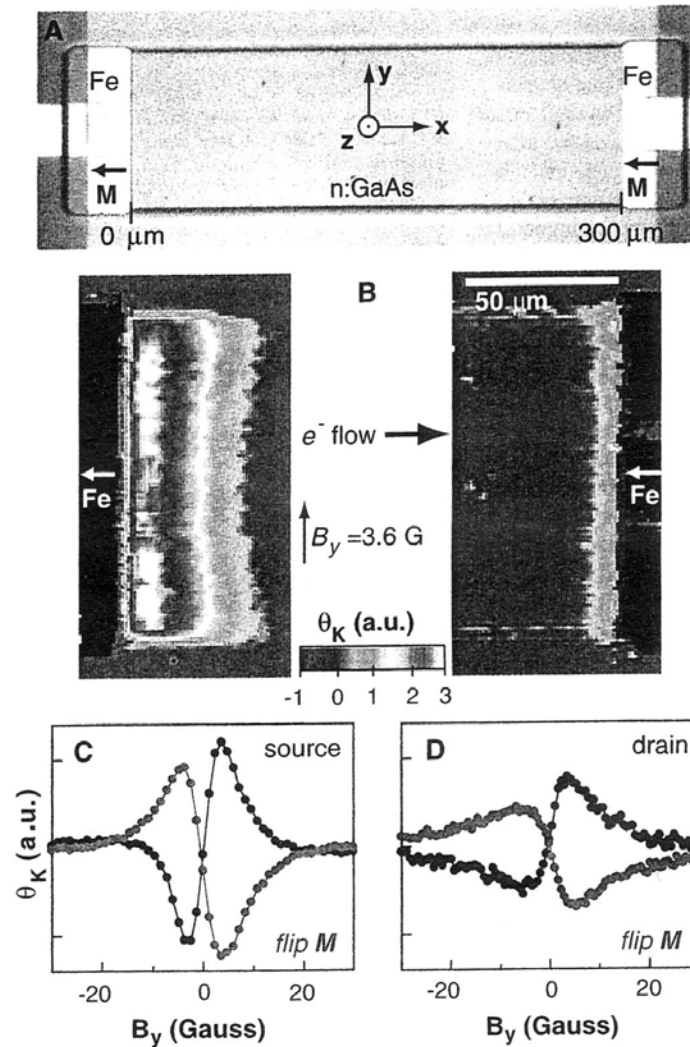


FIG. 4. TIMMS time-scans like in Fig. 3, but for frequencies above the bandgap: $\hbar\omega = 1.610$ eV (a), and $\hbar\omega = 1.580$ eV (b). In (b), a three stage fit is applied (see text).

B.Koopmans, W.J.M.de Jonge: [Appl. Phys. B Volume 68, Number 3](#)
 March 1999, Pages: 525 - 530

スピン注入の磁気光学的評価

- Crookerらは、Fe/GaAs/Fe ラテラル構造において、Fe→GaAsのスピン注入が起きていることを磁気光学的に検証しました。



今回のまとめ

- 磁気光学効果の研究の発展形として、近接場光に対する磁気光学効果や、非線形光学効果に対する磁化の作用、内殻励起におけるX線MCDを用いた顕微鏡などあたらしい分野が開拓されてきました。
- さらに、時間軸がずっと短くなって、ピコ秒、フェムト秒の領域での磁化の変化まで観測できるようになりました。

おわりに

- 磁気光学効果は、光学的には左右円偏光に対する応答の差として説明されます。
- 磁気光学効果は現象論的には誘電率テンソルの非対角成分から生じます。
- 磁気光学効果は量子論的には磁化とスピン軌道相互作用により生じます。
- 光磁気記録、光通信デバイスなどの応用が発展しました。
- 非線形磁気光学効果、近接場磁気光学効果など新しい研究が進展しています。