

工学系12大学大学院単位互換e-ラーニング科目  
磁気光学入門 第14回  
磁気光学研究の最近の展開

佐藤勝昭

# 磁気光学効果研究の最近の展開

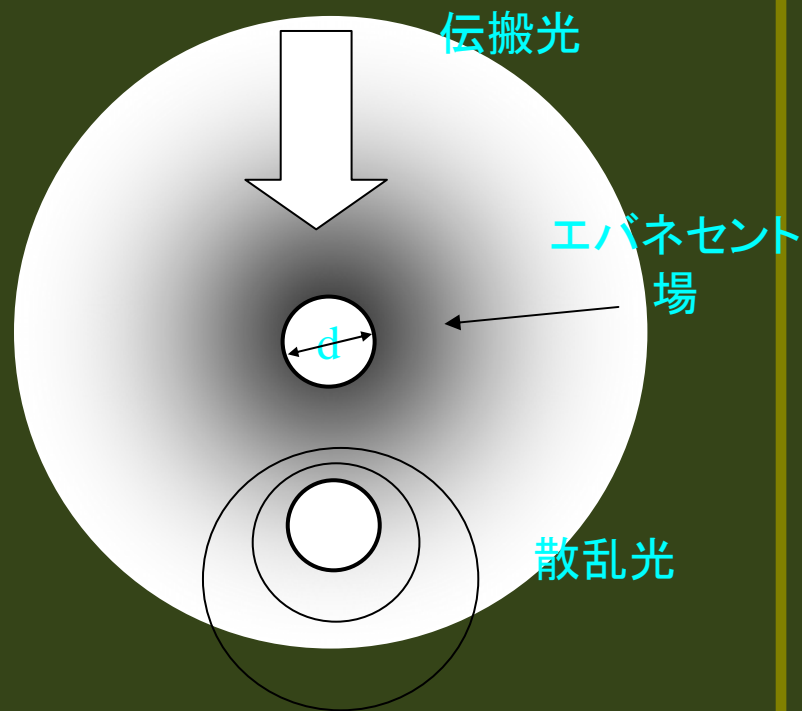
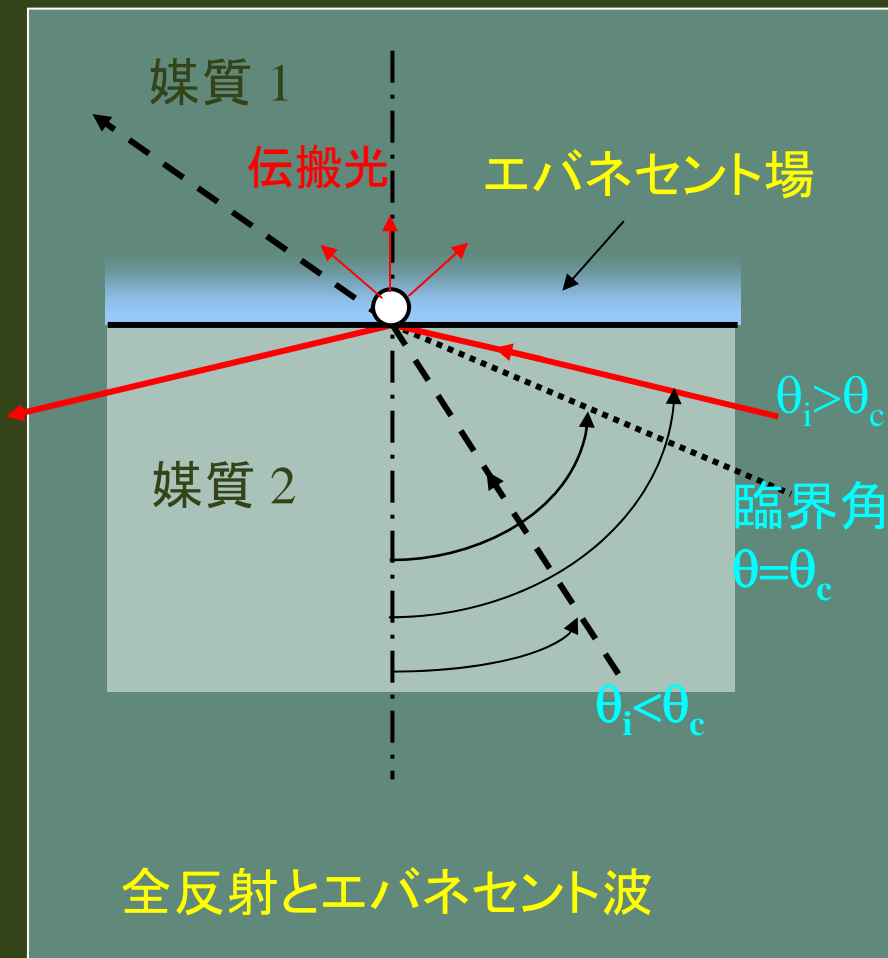
- 近接場磁気光学効果
- 非線形磁気光学効果
- その他の磁気光学効果
  - X線磁気円二色性
  - サニャック干渉計
  - ポンププローブ法による時間分解磁気光学測定
- おわりに

# 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

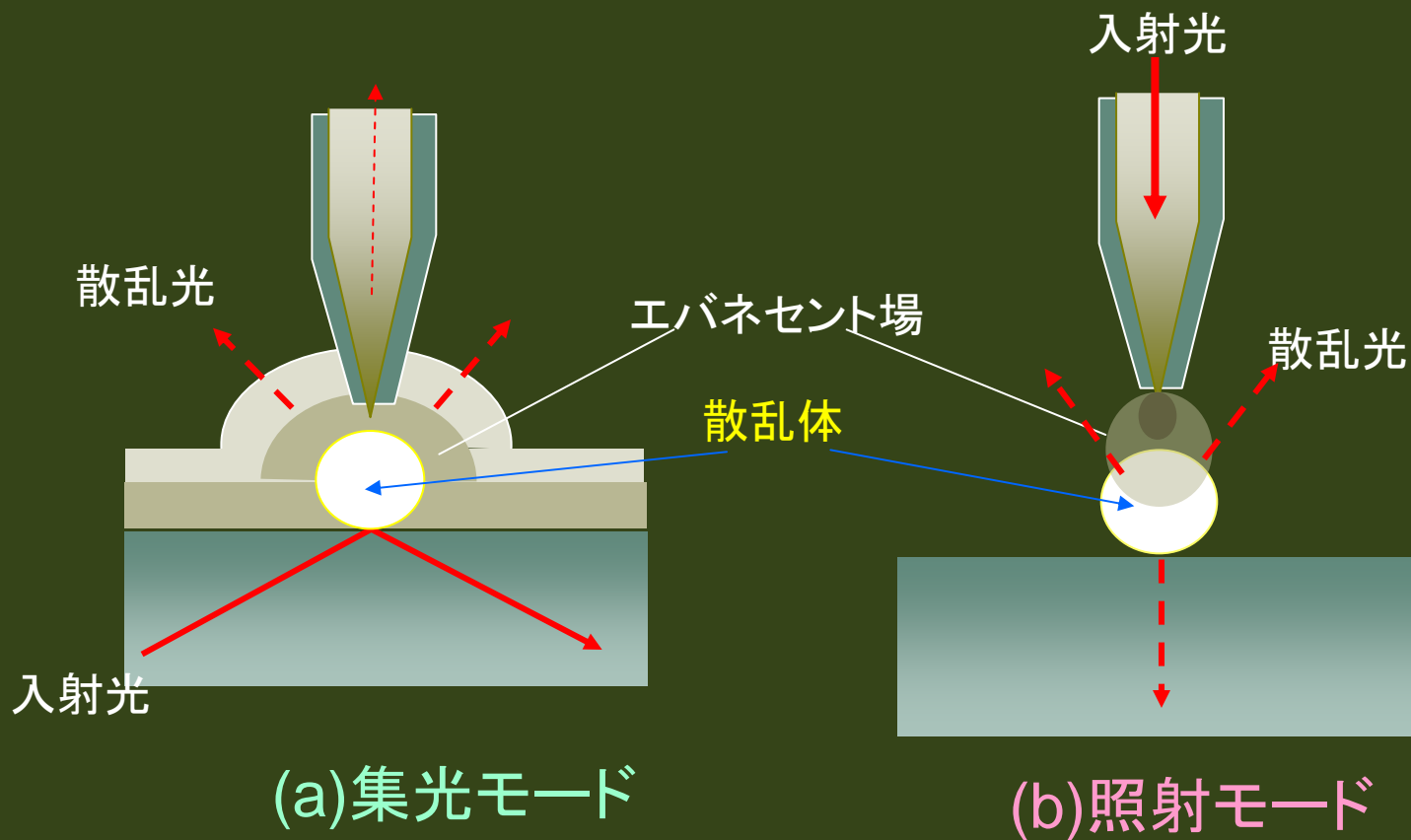


微小物体の周りのエバネセント場に置かれたもう1つの微小物体による散乱光

# SNOMの歴史

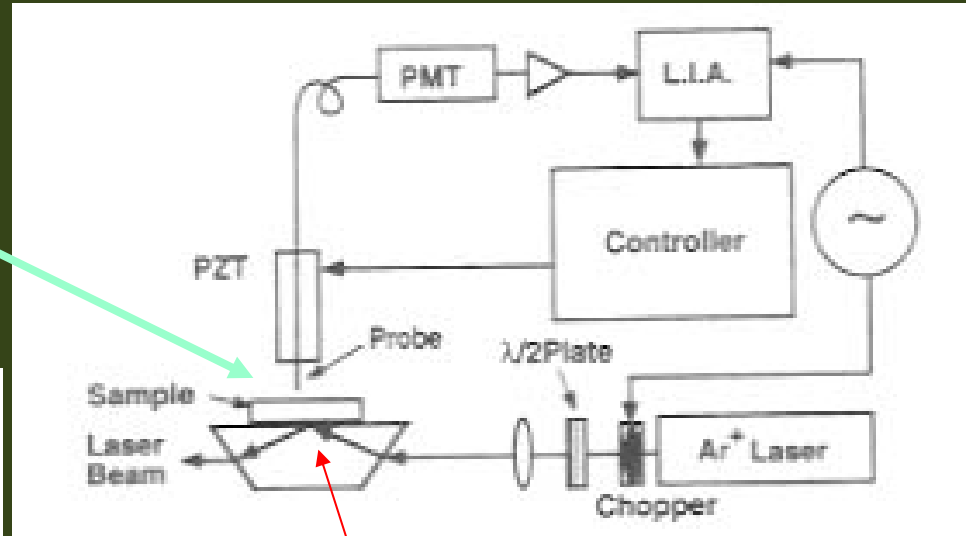
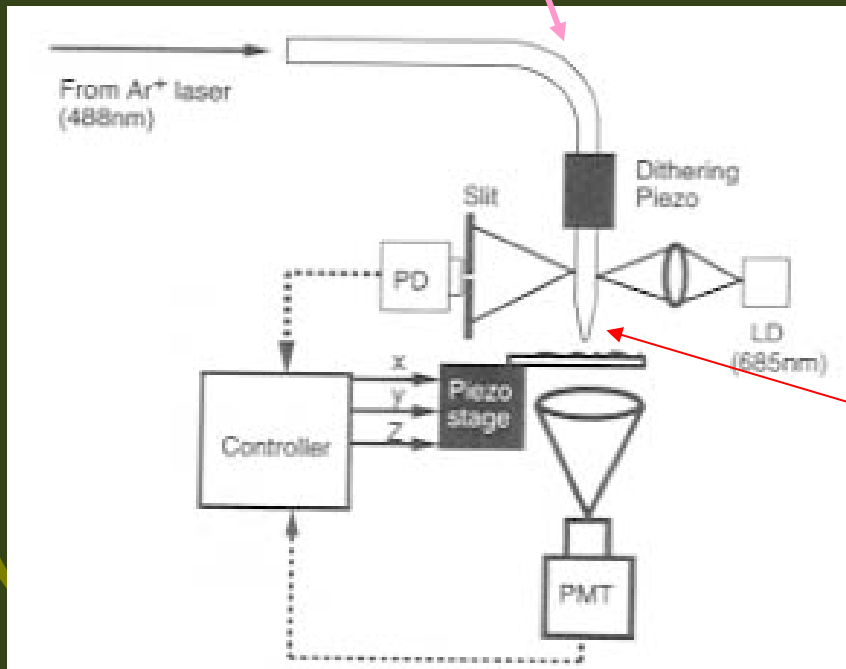
- 近接場の概念：電磁気学において古くから知られる
  - Hertz: Dipoleの近くの電場は $1/r$ ではなく $1/r^2$ :かなり強い
  - Sommerfeld: Dipole antenna近傍の近接場を導出
- 1928 Synge(英):近接場顕微鏡のアイデアを提案
- 1972 Ash:マイクロ波で波長の $1/60$ の解像度達成
- 1982 Pohl: SNOMの原形
- 1985 Pohl: 20nmの分解能達成
- 1991 Betzig:マイクロピペットを使って実用性の高いSNOMを開発;光磁気記録に成功

# 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

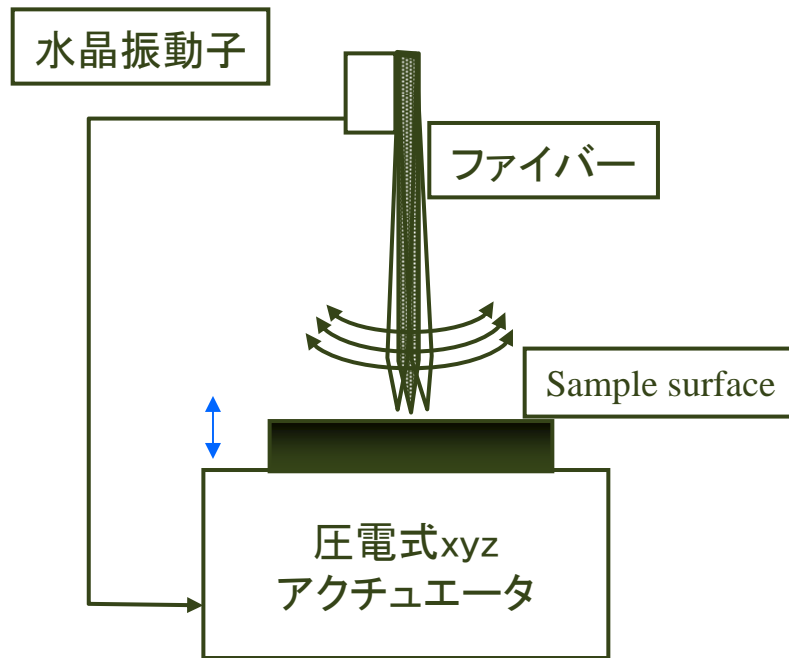
- 集光モード
- 照射モード



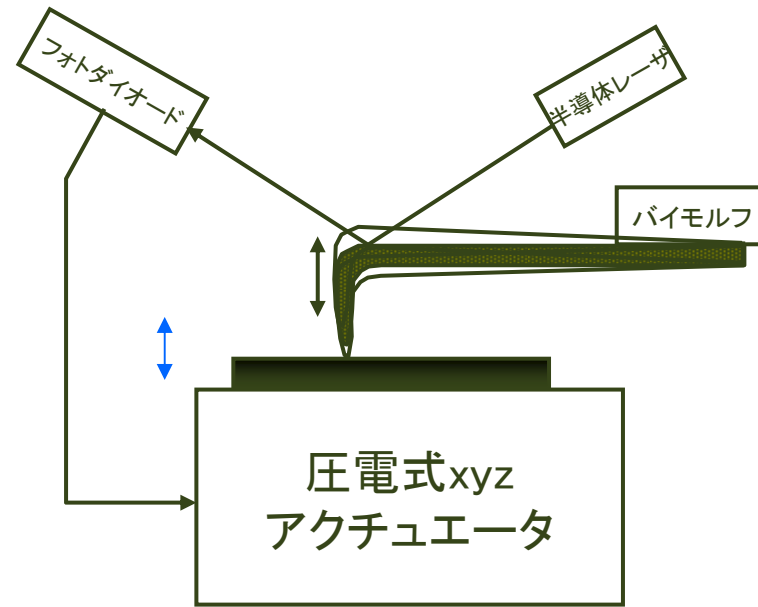
全反射光学系のエバネセント場に試料を置く。

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



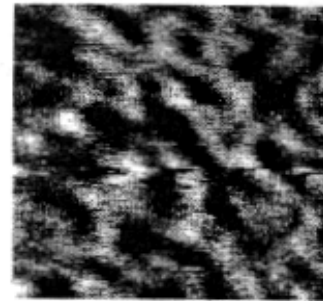
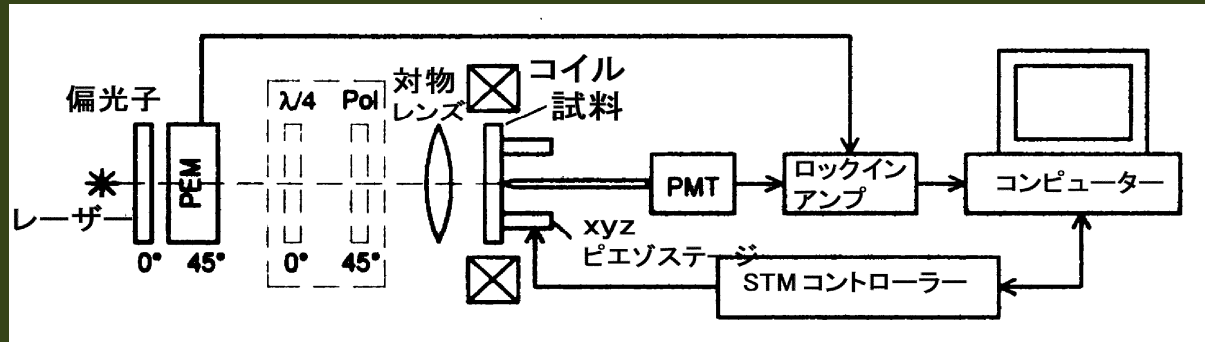
カンチレバー方式



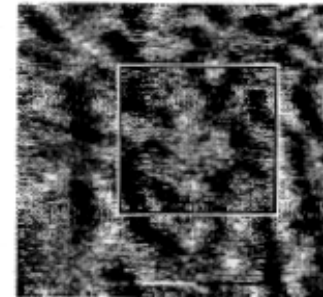
# SNOMによる磁気光学測定

- 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

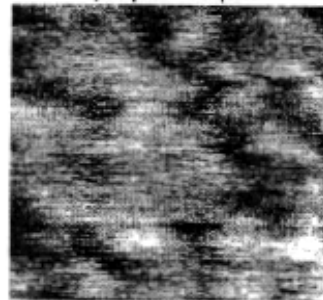
# Kottlerらの試み



a) 9 μm × 9 μm



b) 9 μm × 9 μm



c) 5 μm × 5 μm



d) 5 μm × 5 μm

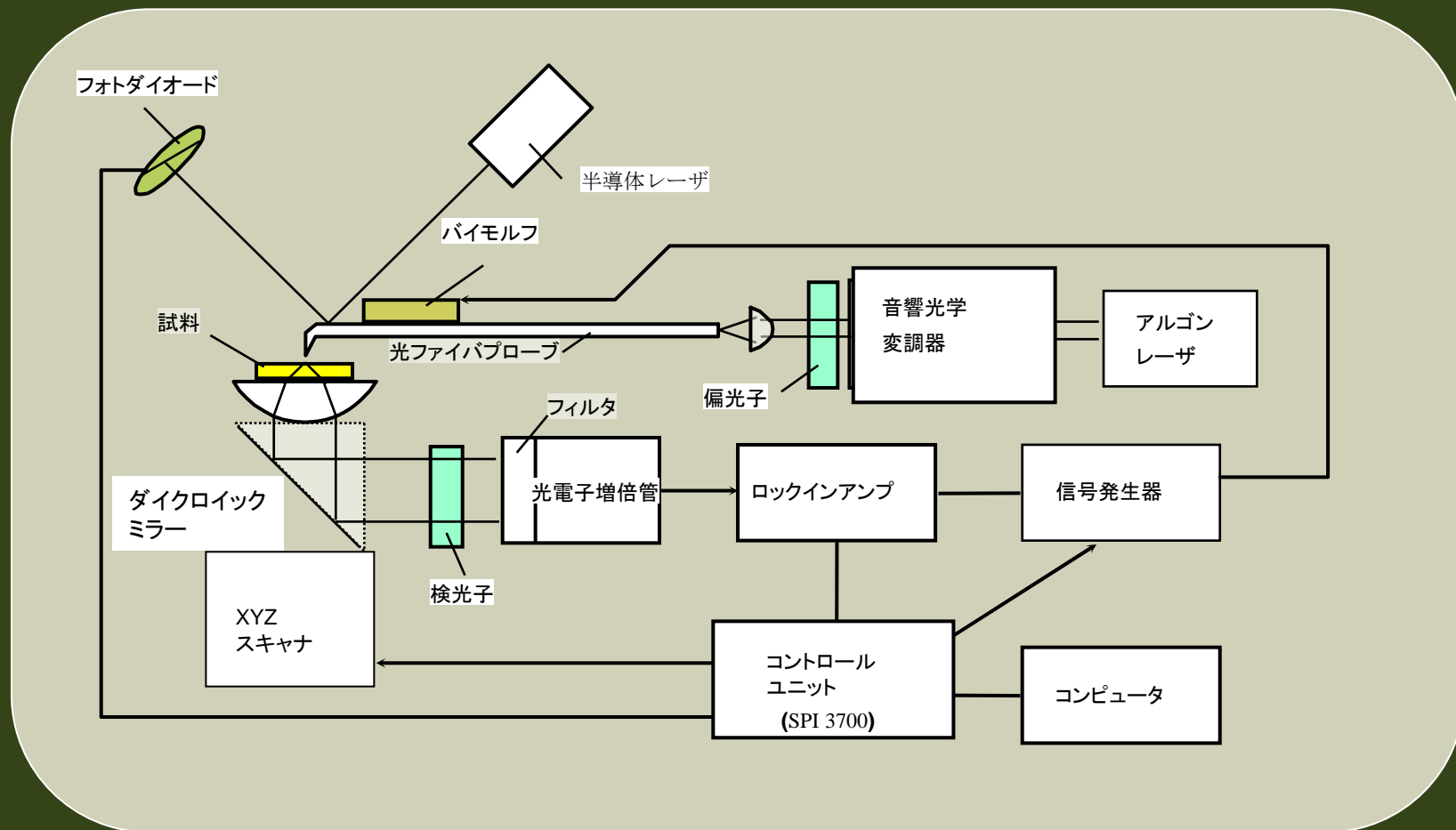
(b)

図6 (a) CD-SNOMシステムと(b)Pt/Coの磁区像 (Kottler<sup>25</sup>)

# 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

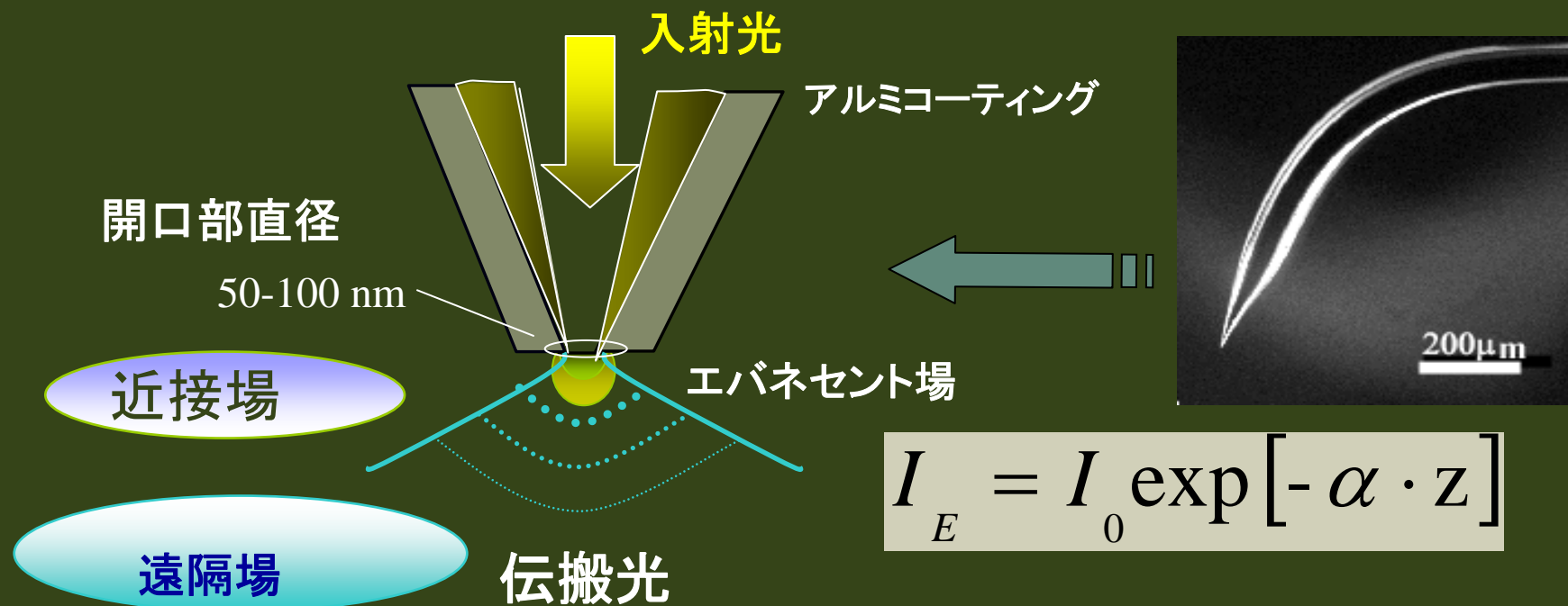
# SNOMのブロック図



# ベントファイバプローブ



# 光ファイバークプ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

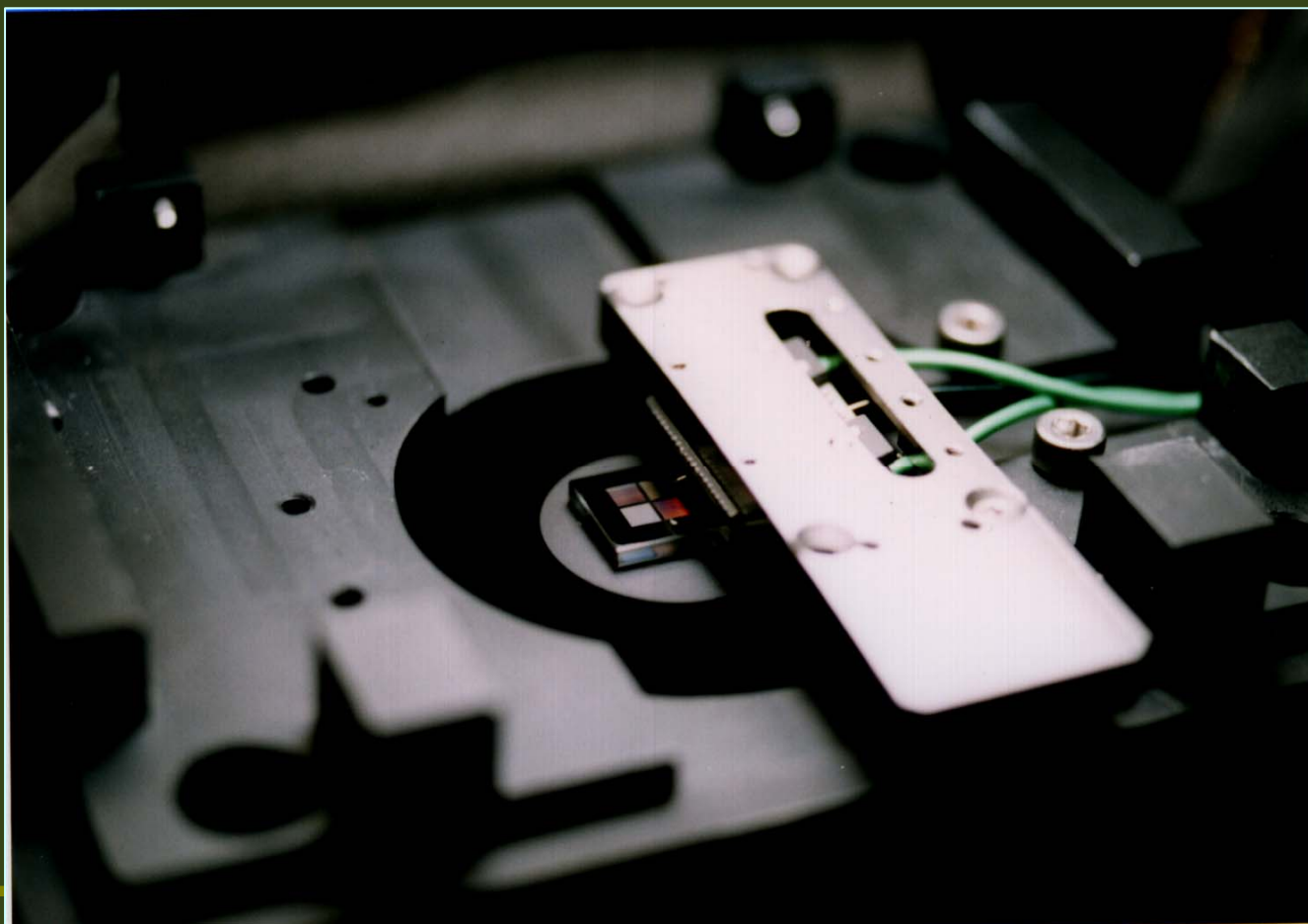
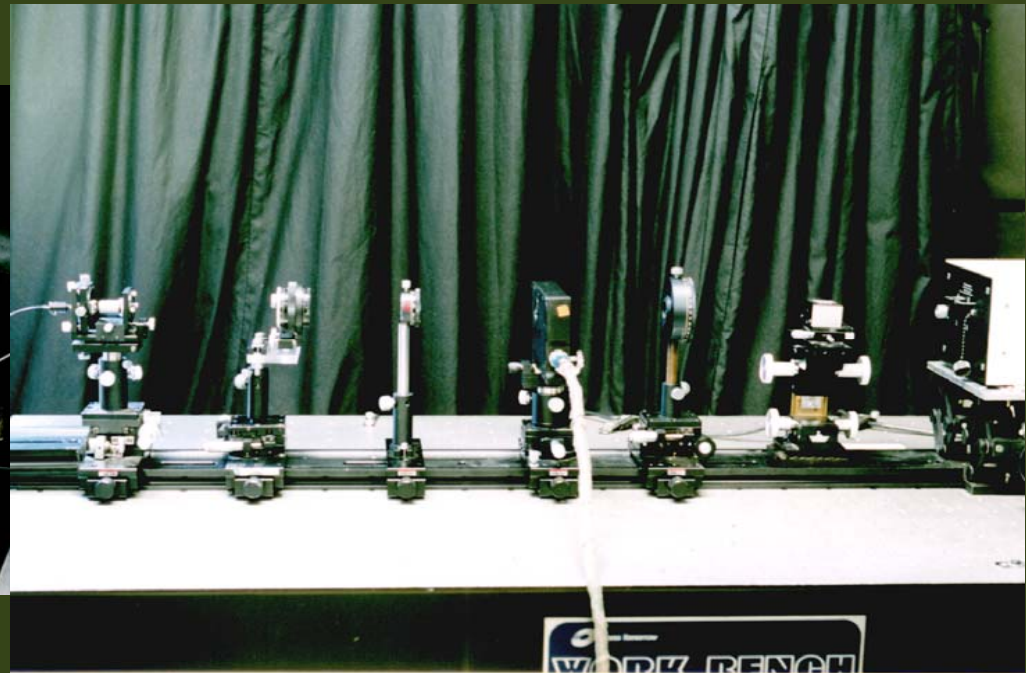
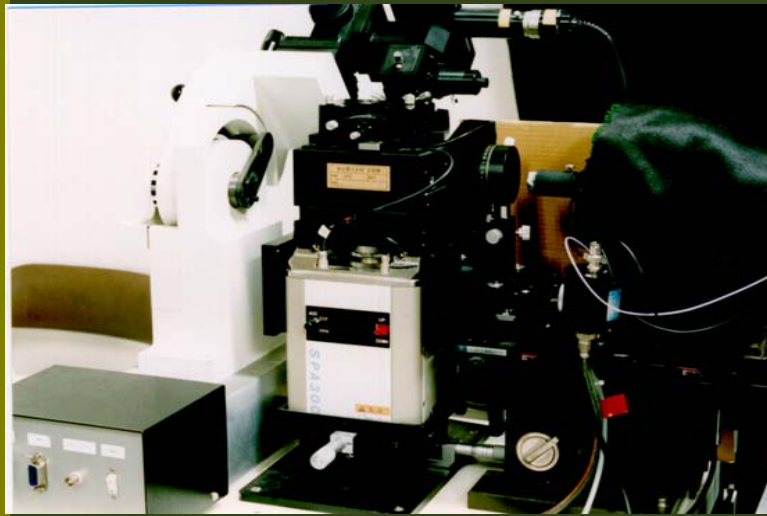


図3

# SNOMシステム

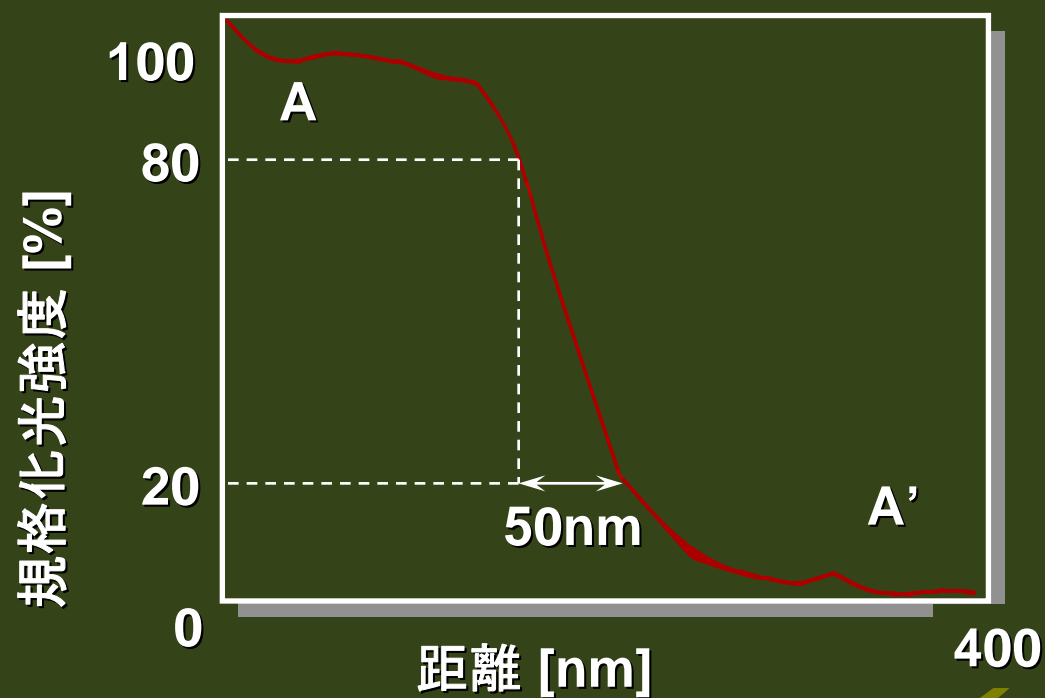
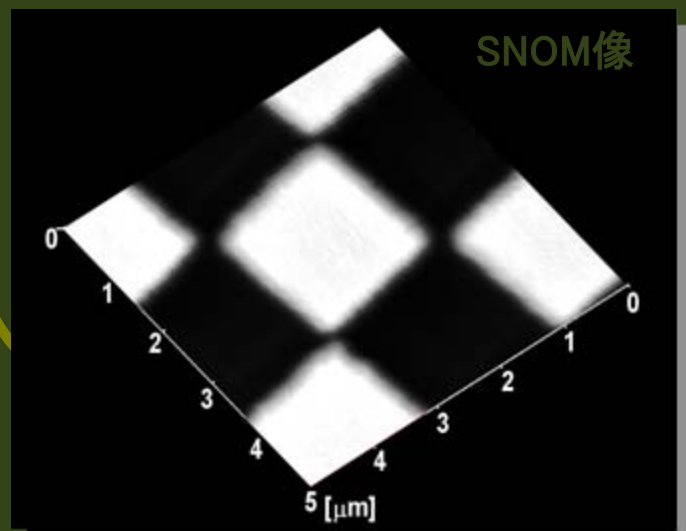
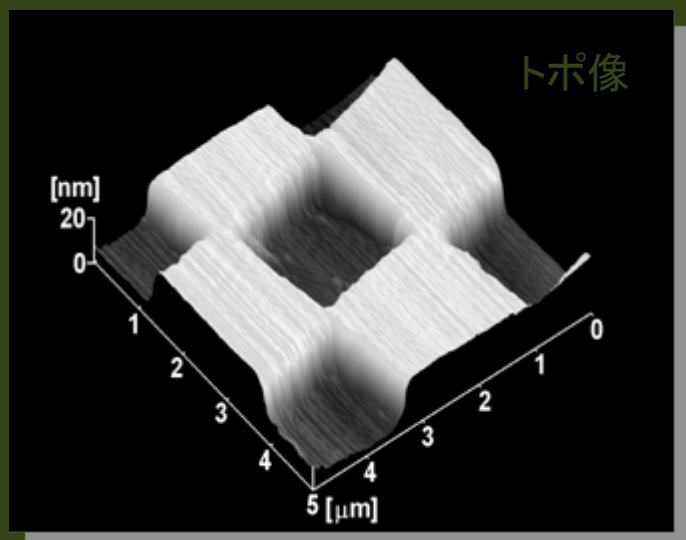




# SNOMアセンブリ

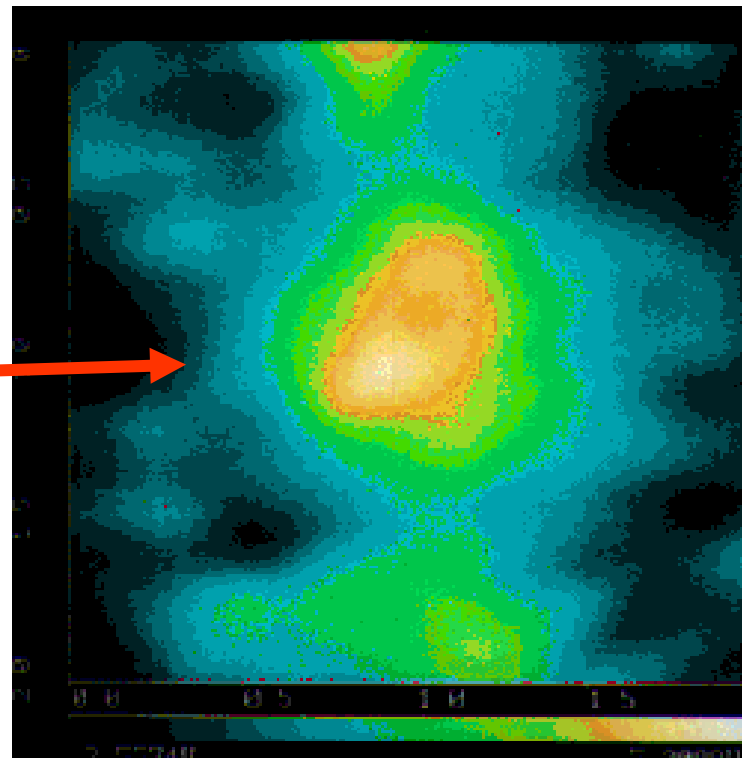
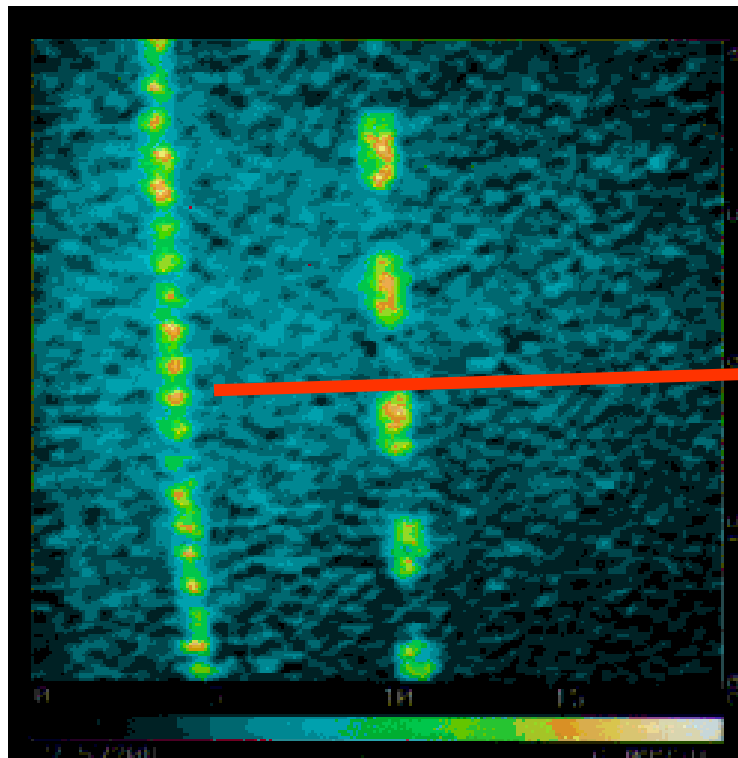


# Cr市松模様の特写像とSNOM像



# 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

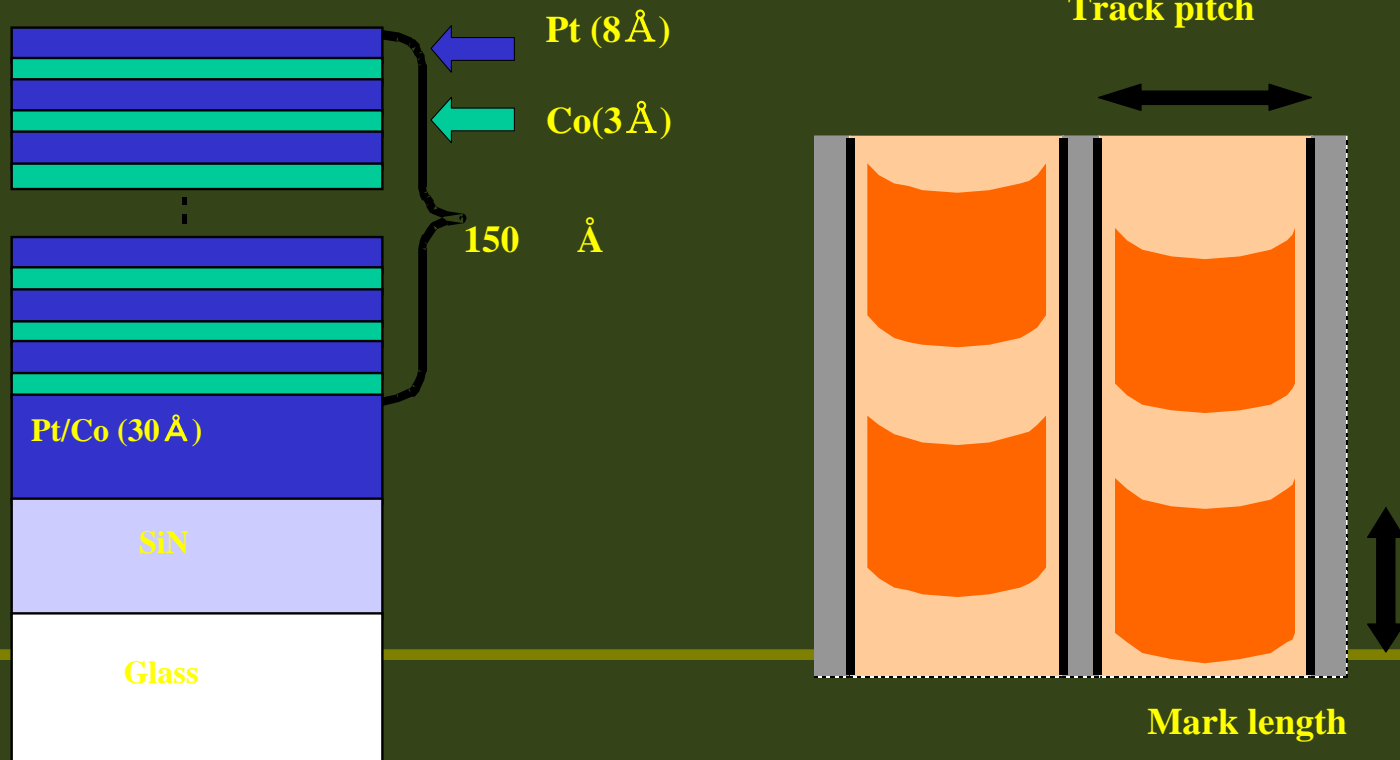


DyIG膜の記録マークの偏光像  
(波長488nm)

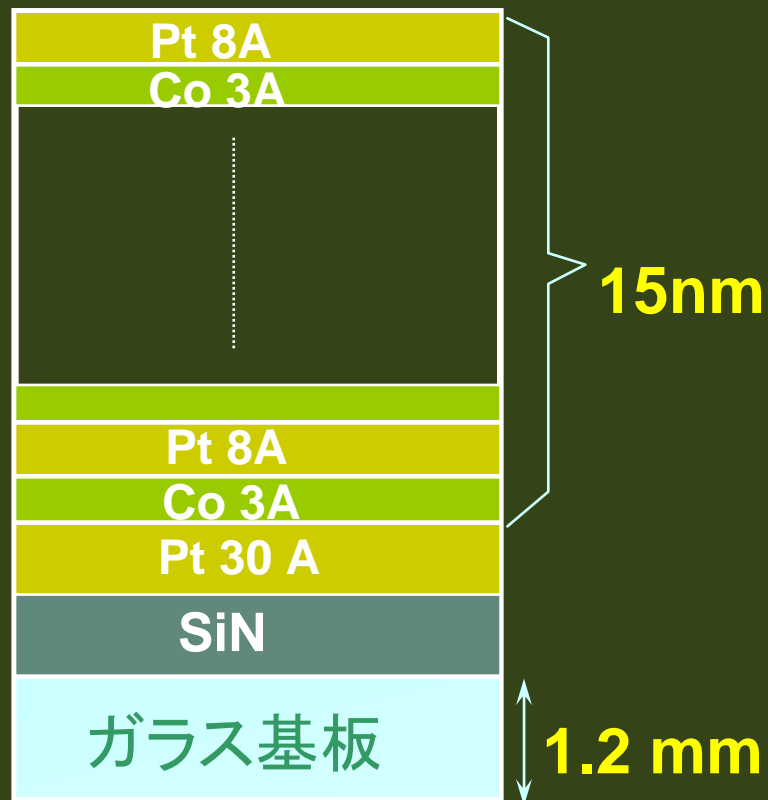
拡大図

# 試料: Pt/Co 多層膜ディスク

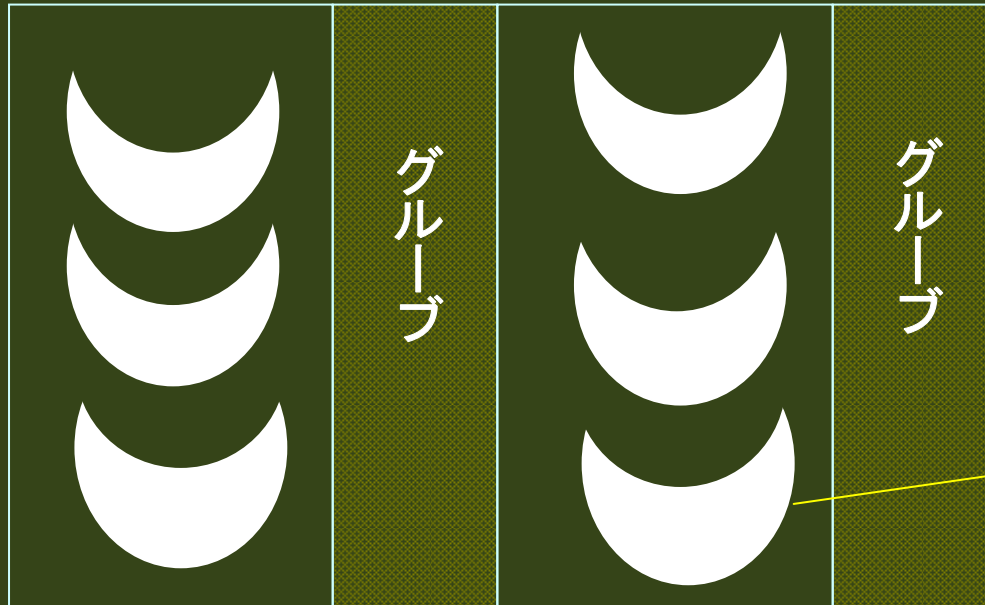
- Structure  $\text{SiN/Pt}(30\text{\AA})/[\text{Pt}(8\text{\AA})/\text{Co}(3\text{\AA})]_{13}$  on glass
- Film thickness  $150\text{\AA}$
- Recording System: Light pulse strobed MFM recording
- Track pitch :  $1.6\mu\text{m}$
- Mark Length:  $0.1 \sim 6\mu\text{m}$
- $\eta_F, \theta_F$ :  $0.47^\circ, 0.74^\circ$



# 測定したPt/Co MOディスクの構造



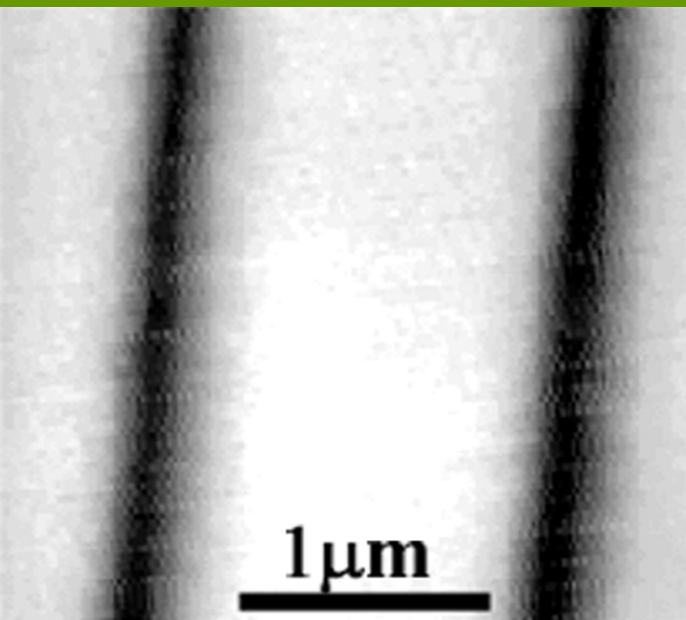
# 磁界変調記録の矢羽型記録マーク



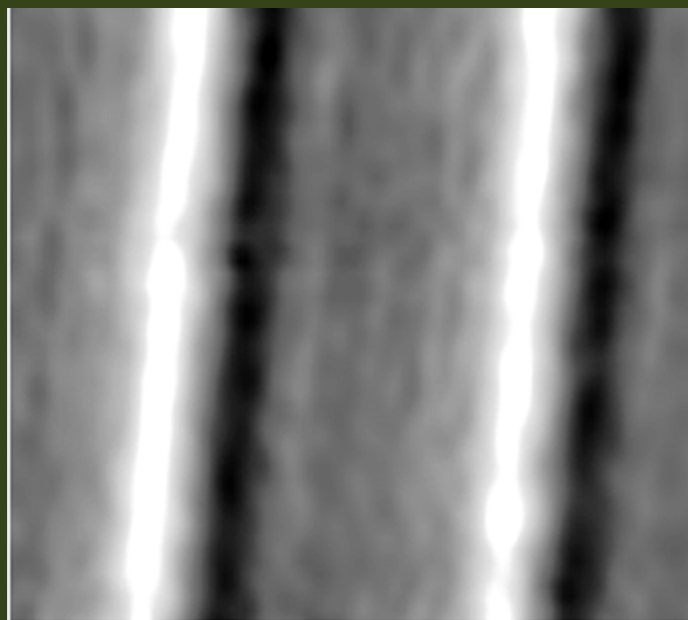
記録マーク

# 観測結果

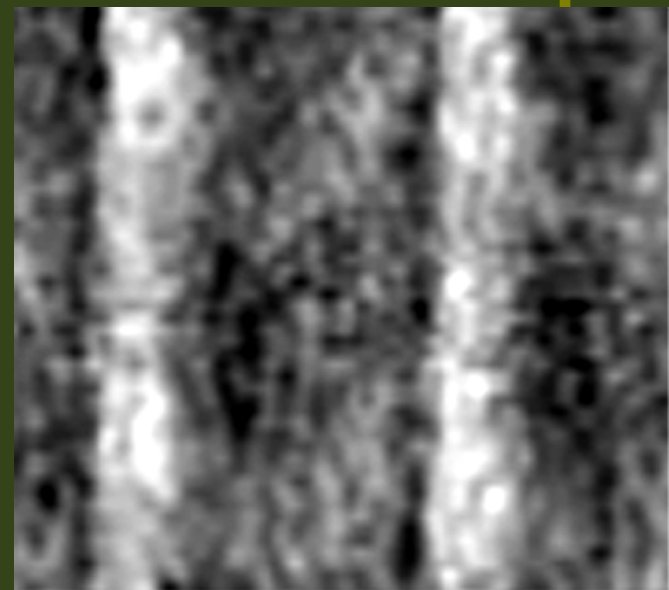
## MO-SNOMによる記録マーク像 (クロスニコル法)



AFMトポ像

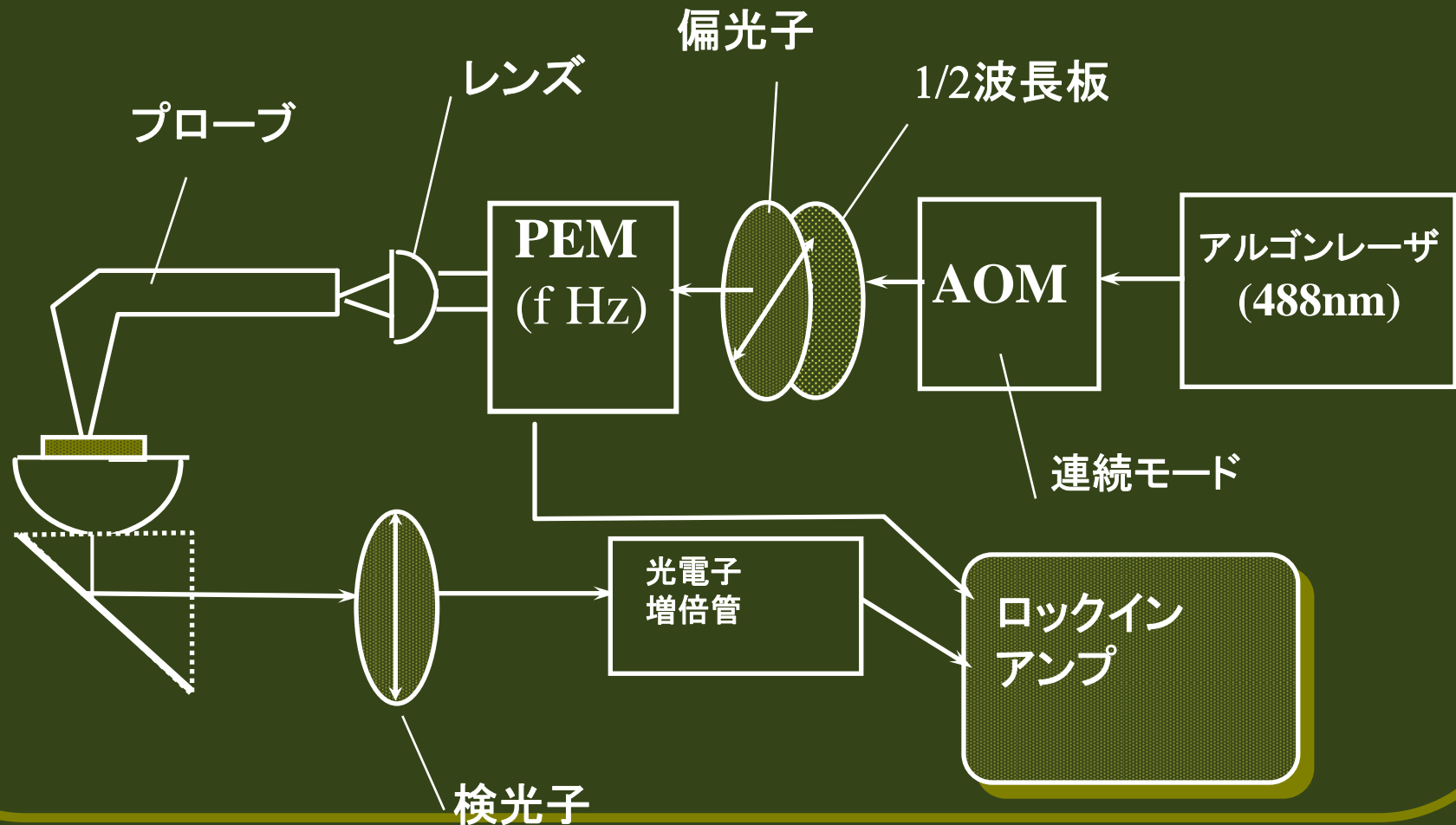


SNOM光学像



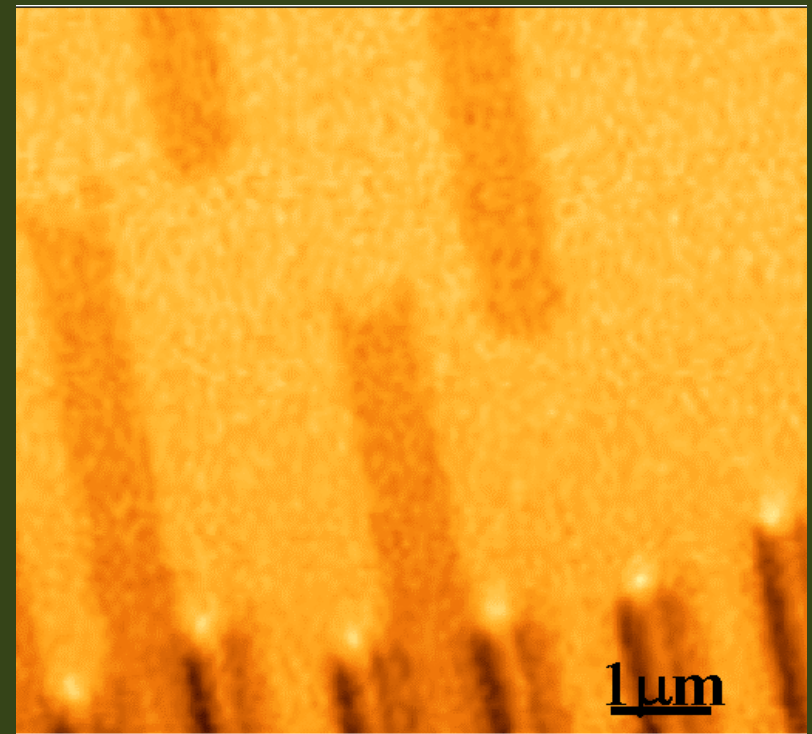
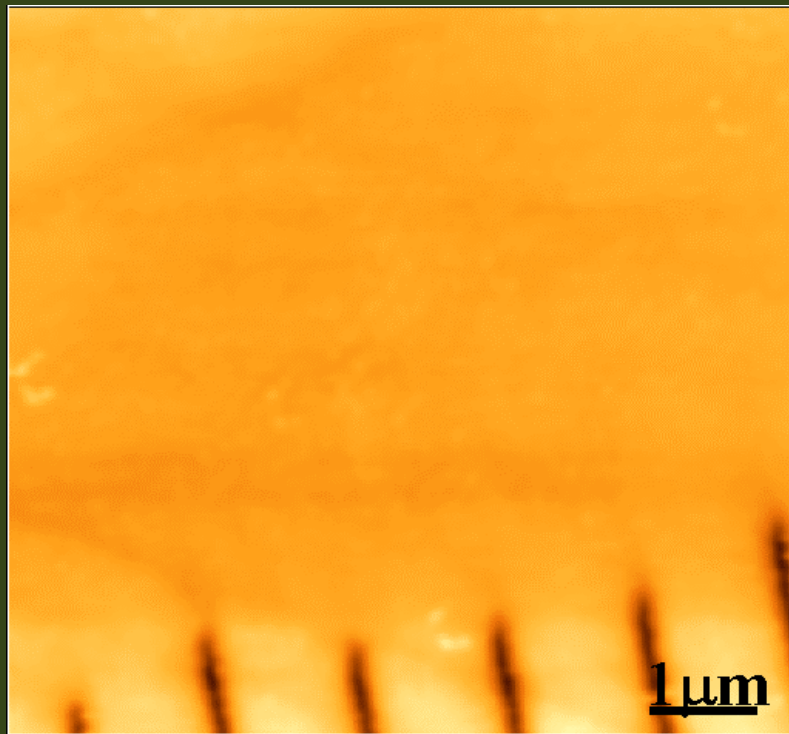
MO-SNOM像

# PEMを使ったSNOMシステム

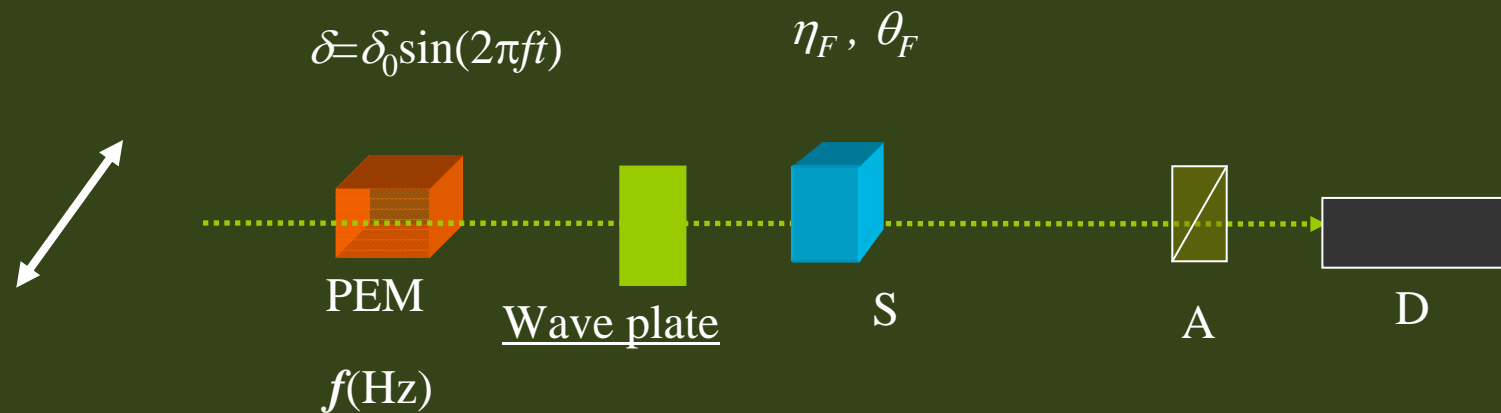




# Pt/Coディスクの記録マークの トポ像と磁気光学像



光ファイバーを光学遅延が  $\Delta$  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  $\Delta = \pi/4$  でないと、  
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

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

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

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

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

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

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

Electric field vector of light

Intensity of light

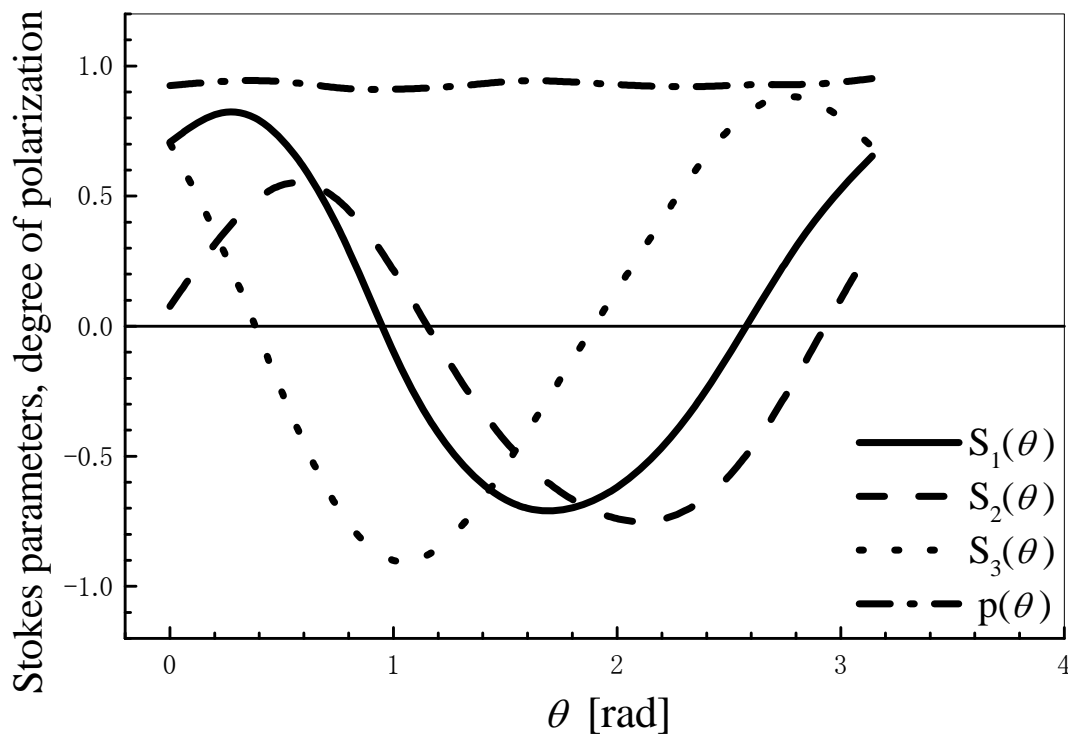
Intensity of linearly polarized  
light along x axis

Intensity of linearly polarized  
light oriented by 45 degrees

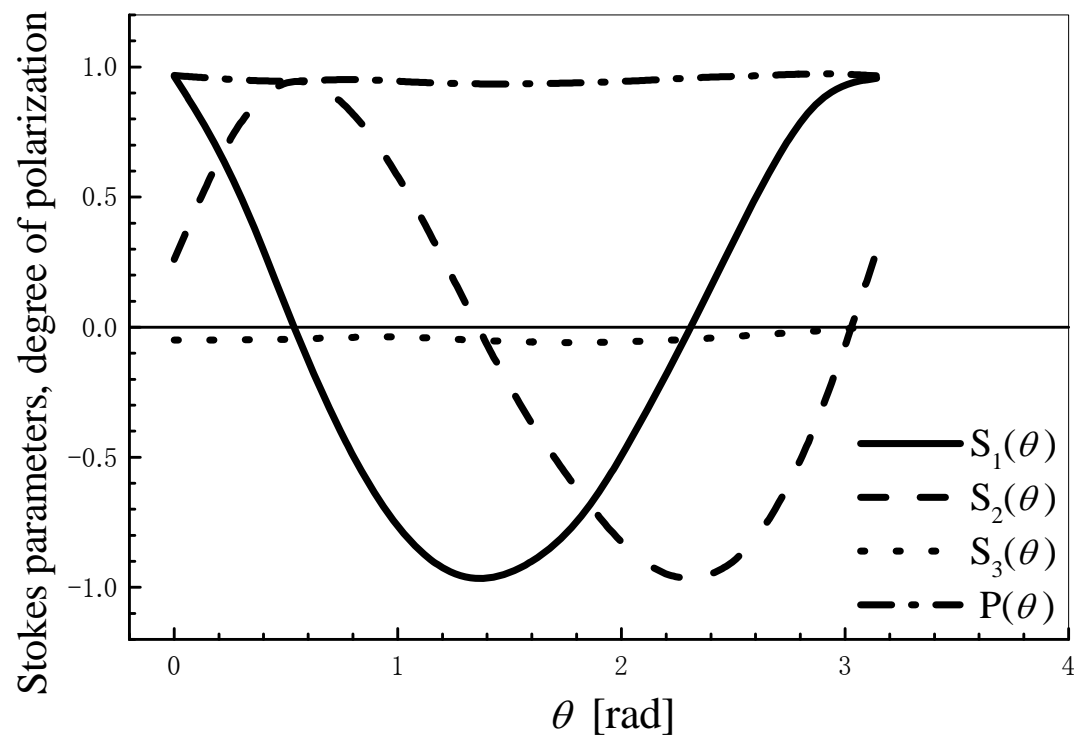
Intensity of circularly  
polarized light

Degree of polarization

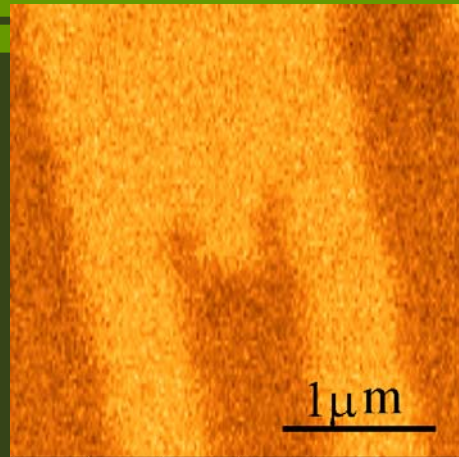
# 補償前のファイバプローブの ストークスパラメータ



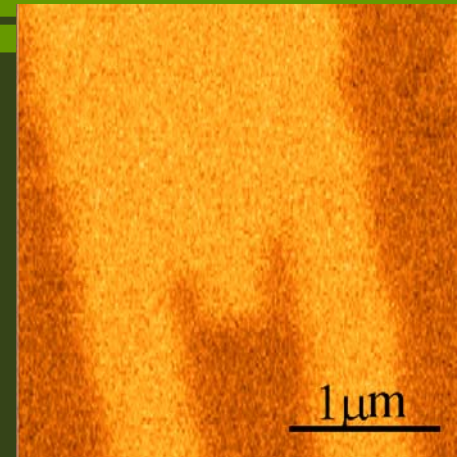
# 補償後のプローブの ストークスパラメータ



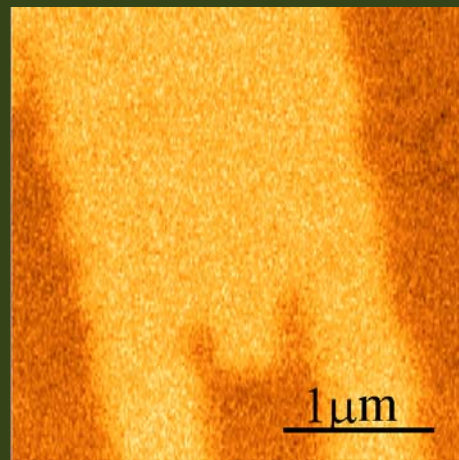
# 補償後の磁気光学像



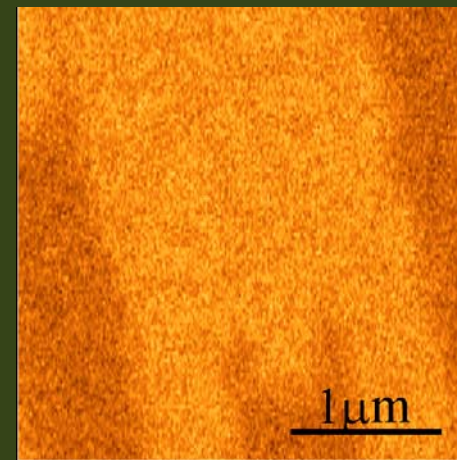
(a) 1f component ( $\Delta=0$ )



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

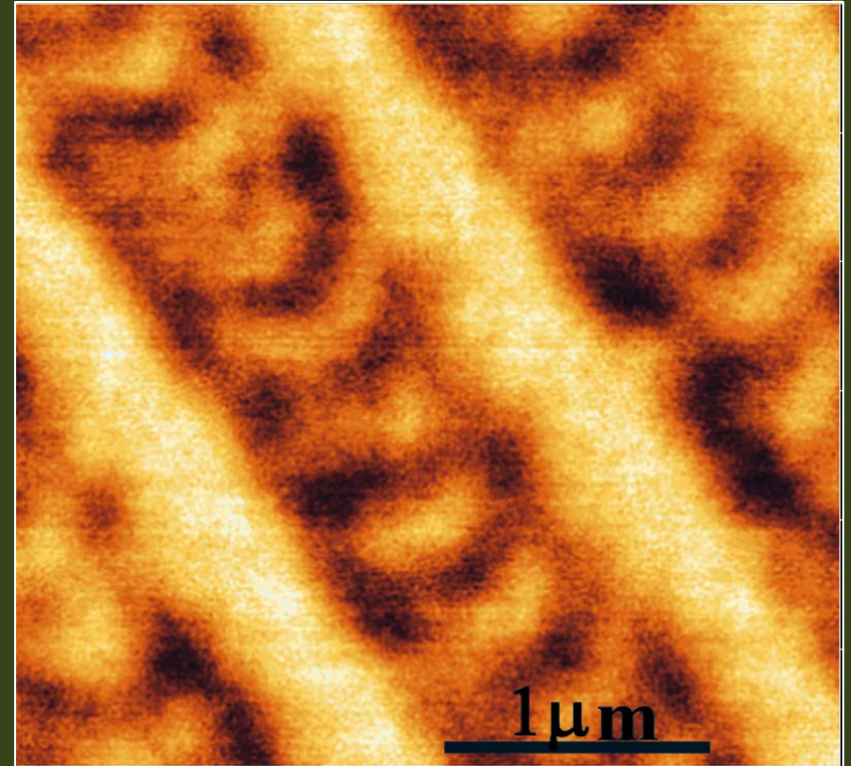
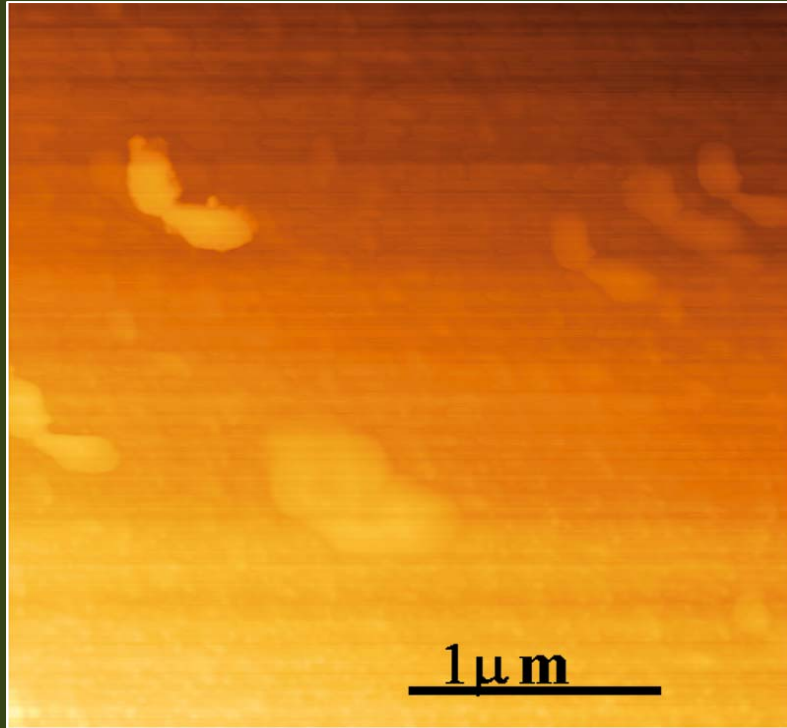


(c) 1f component ( $\Delta=\pi/2$ )

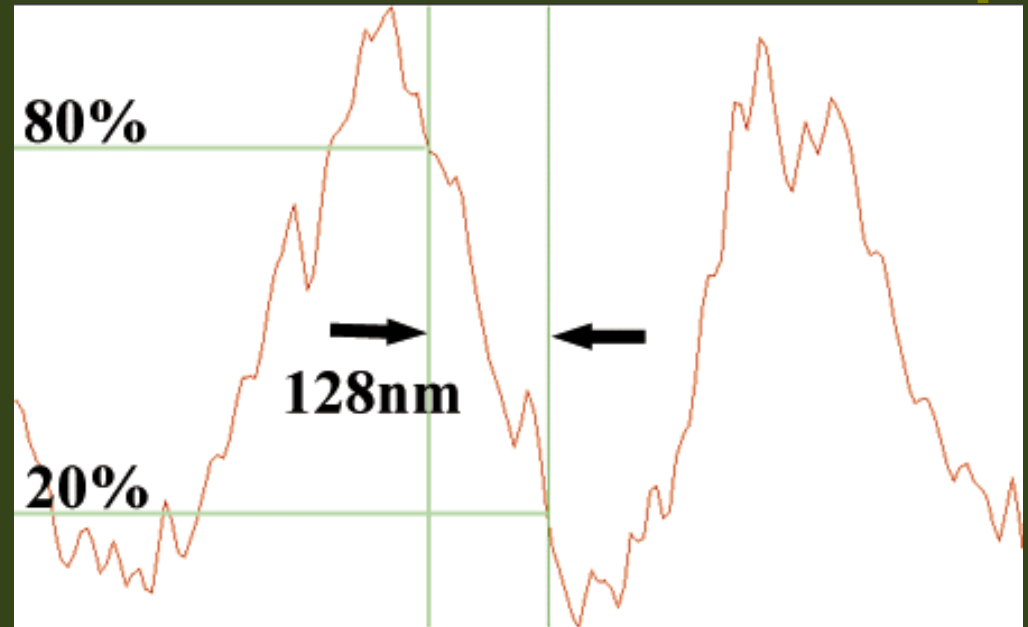
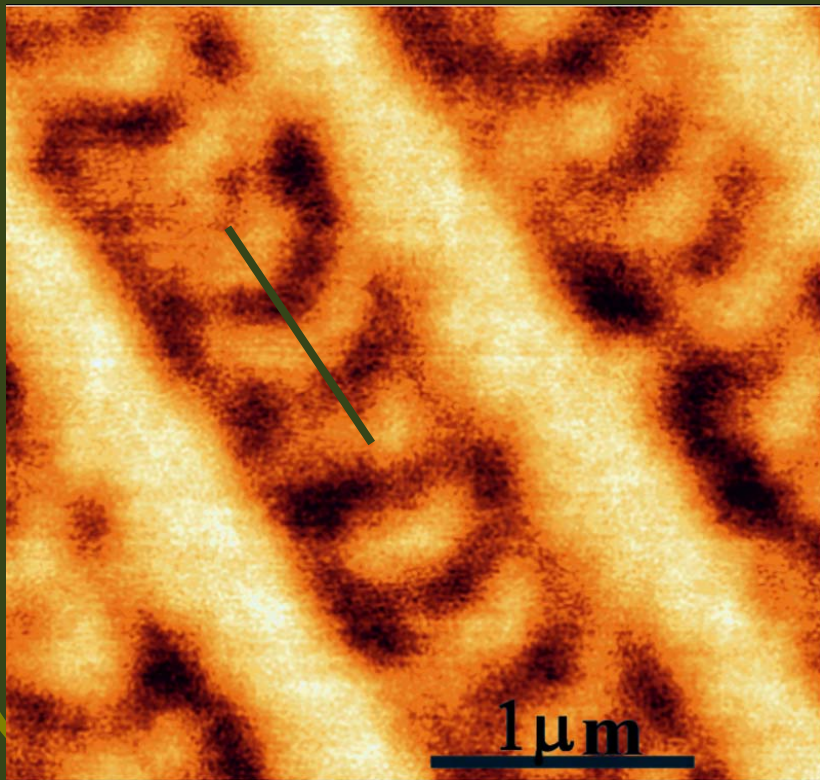


(d) 2f component ( $\Delta=\pi/2$ )

# 0.2 $\mu\text{m}$ の記録マークのトポ像とMO像

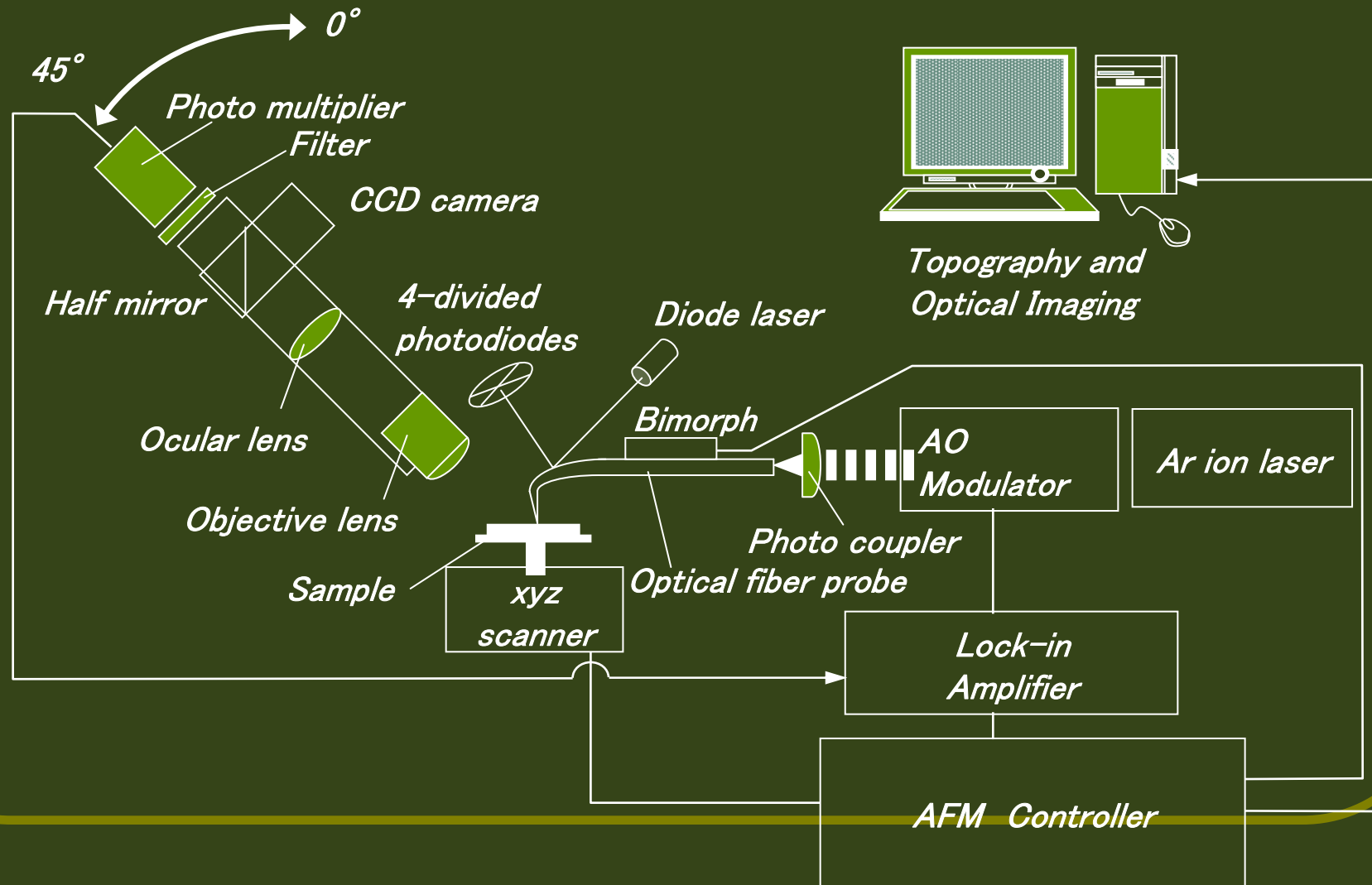


# 0.2 $\mu\text{m}$ の記録マークのSNOM像

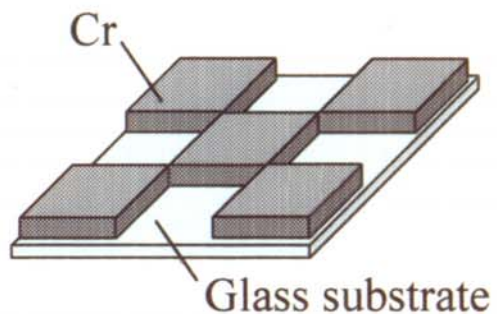




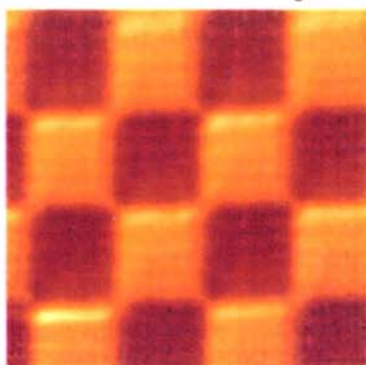
# 反射モードSNOM装置構成図



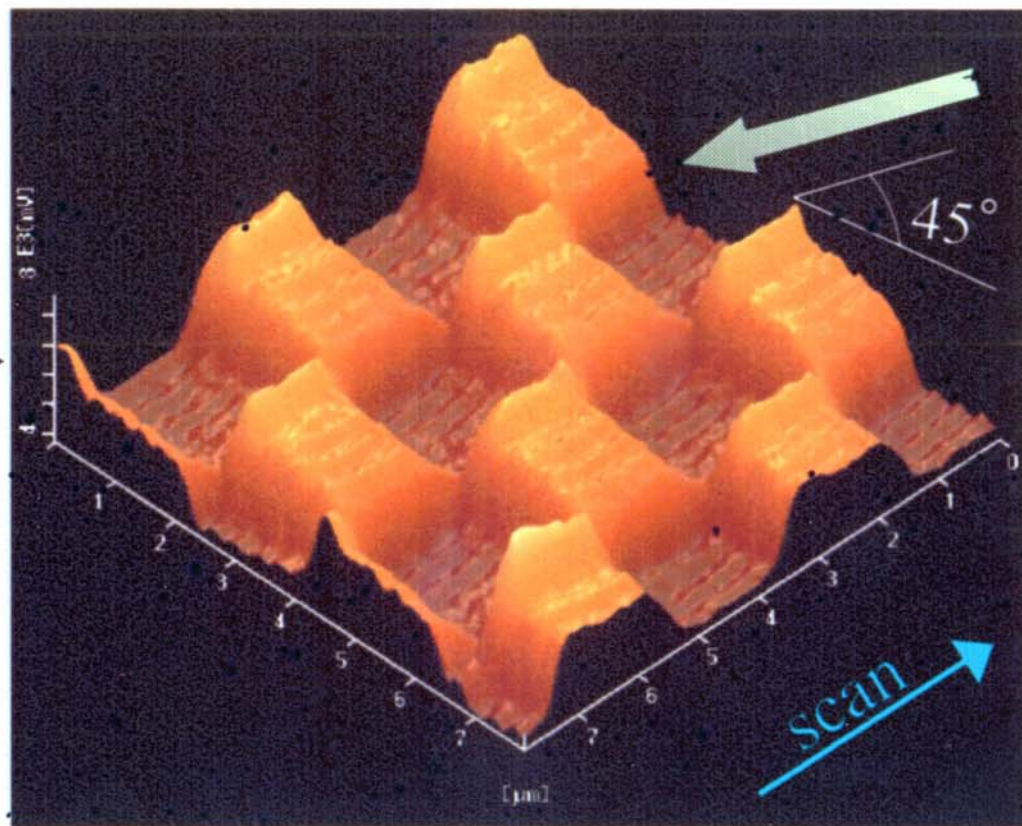
# 反射モードSNOM像



(a) Test sample



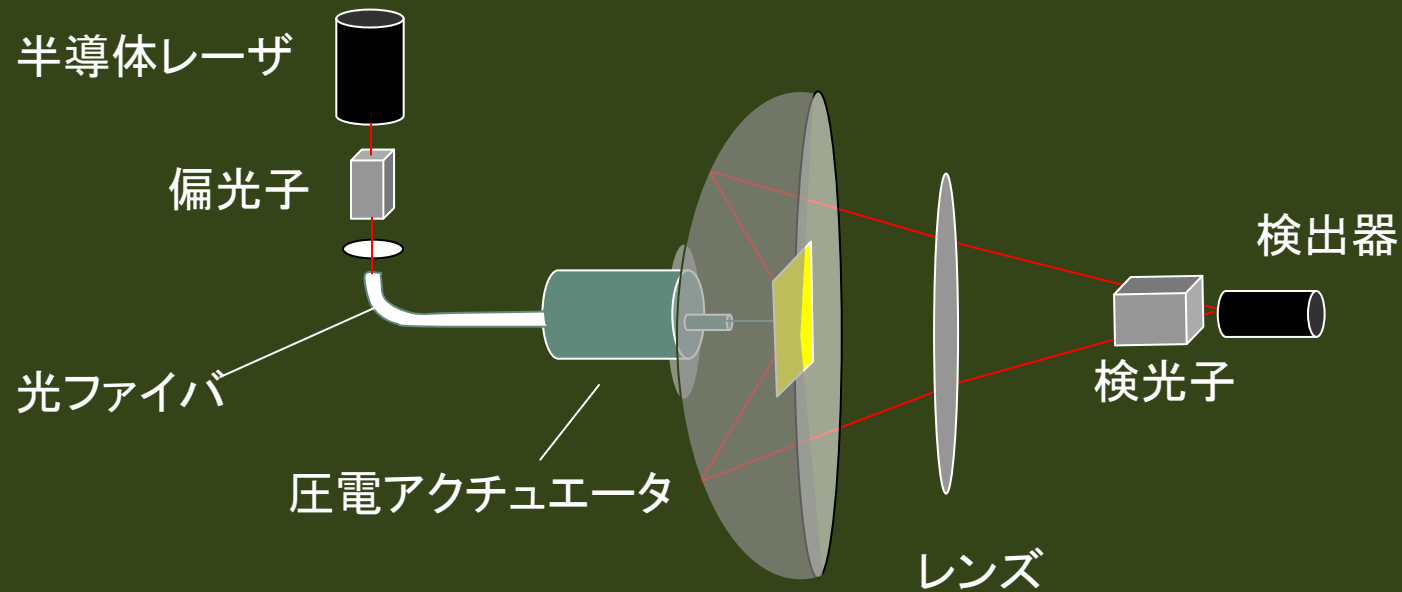
$2\ \mu\text{m}$



(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

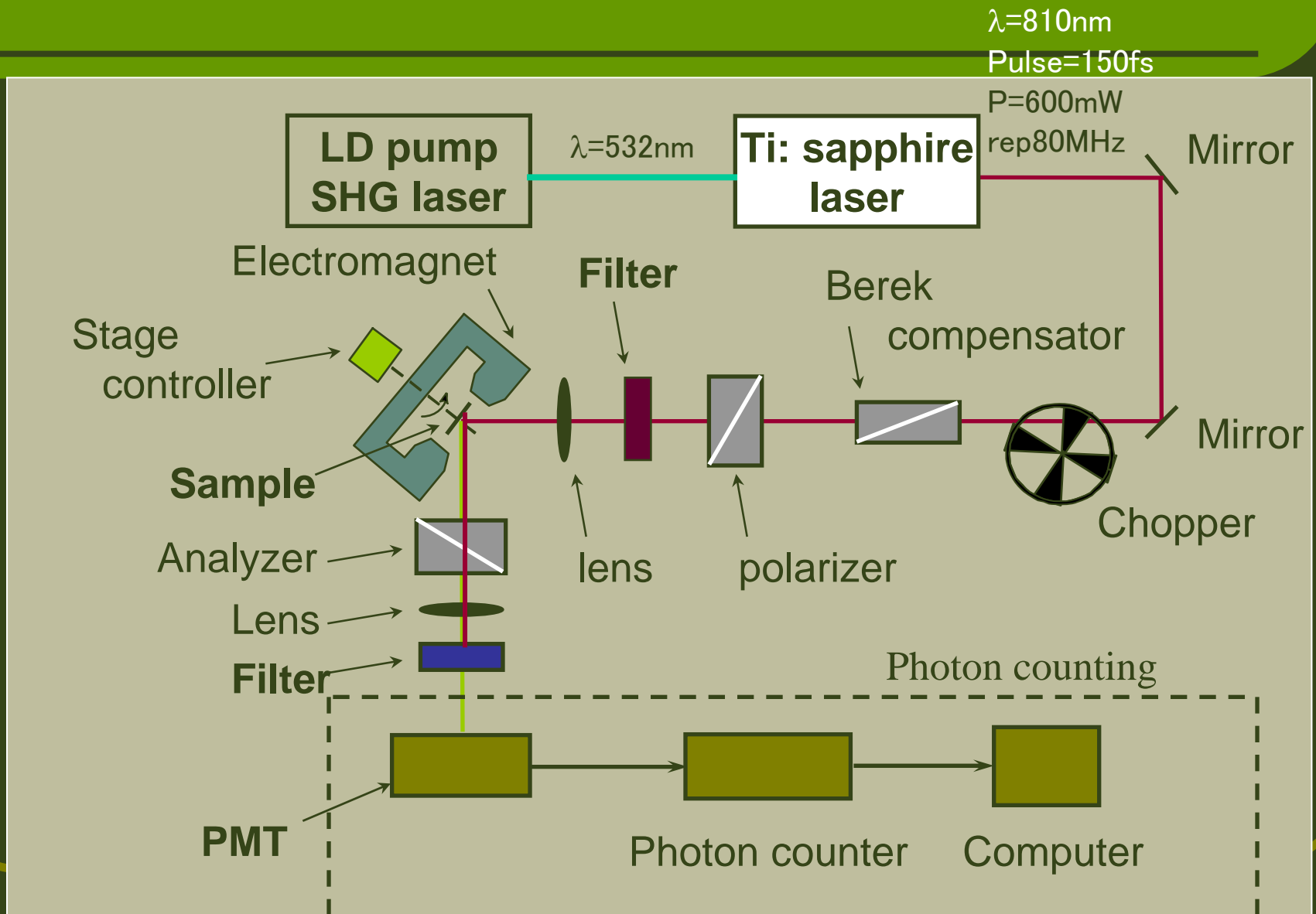


## 2. 非線形磁気光学効果

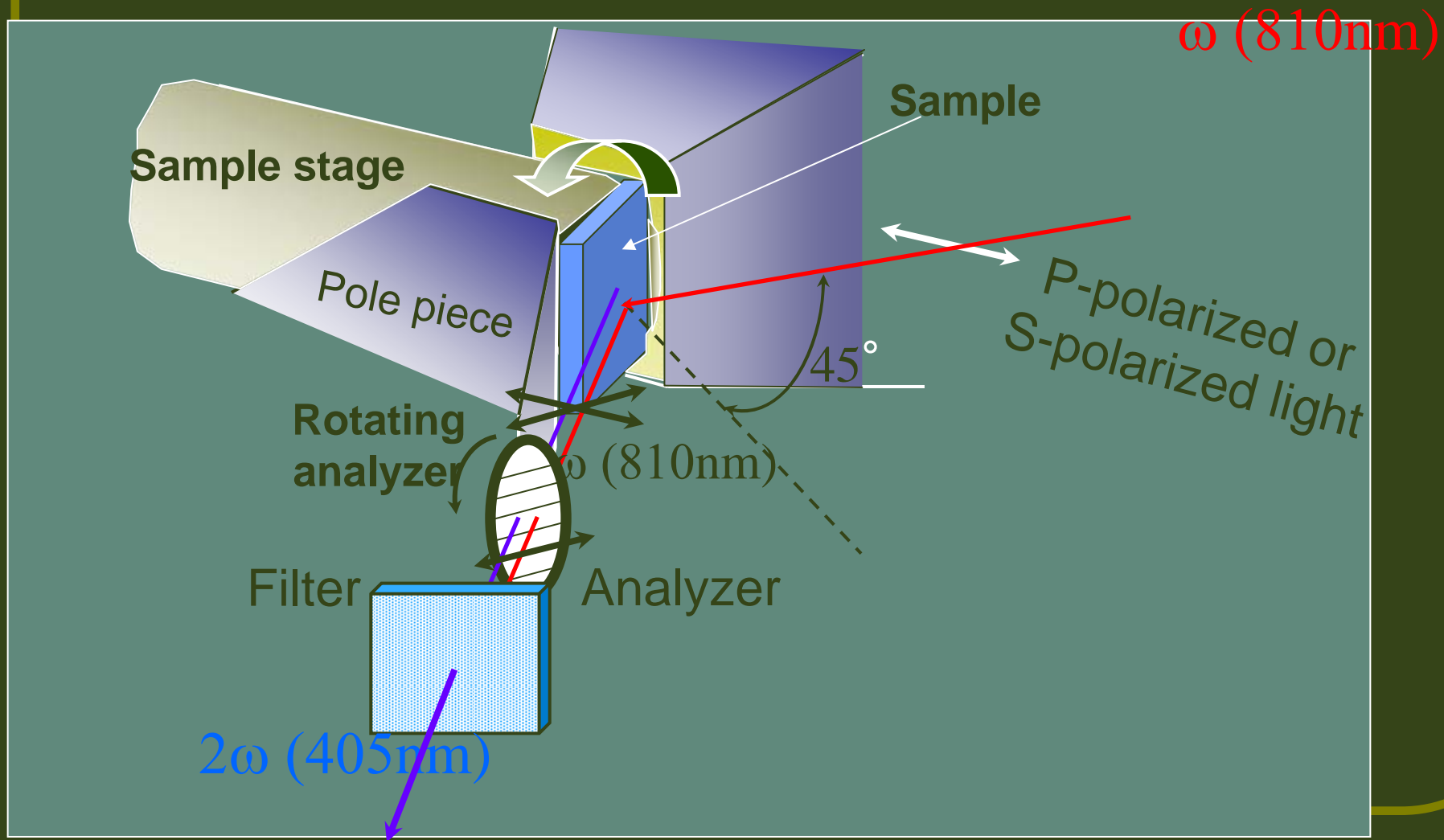
- 非線形光学効果とは「第2高調波光に対する磁気光学効果」のことです。
- 非線形カー回転とは「P偏光が入射したとき、SH光にはP成分とS成分が生じ、SHG光の偏光面が入射偏光面から傾く角度」のことです。
- 中心対称のある物質(Fe, Auなど)では、電気双極子によるSHGは起きません。表面界面では中心対称性が破れるのでSHGが起きます。

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

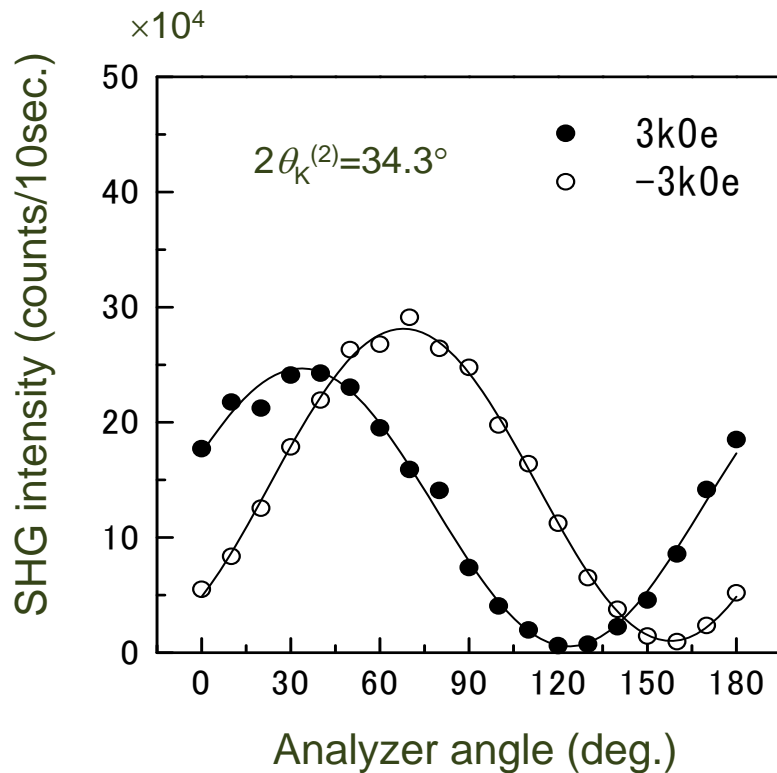
# 非線形磁気光学効果測定系



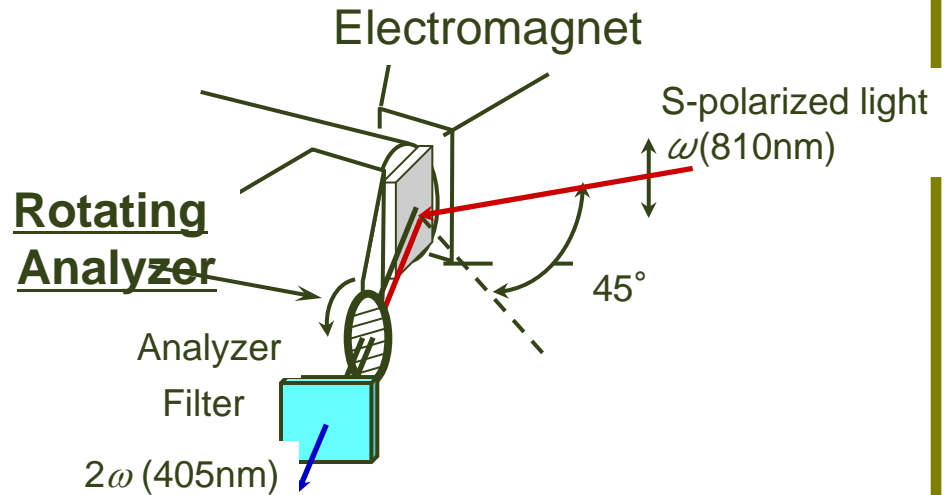
# MSHG測定系配置



# 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

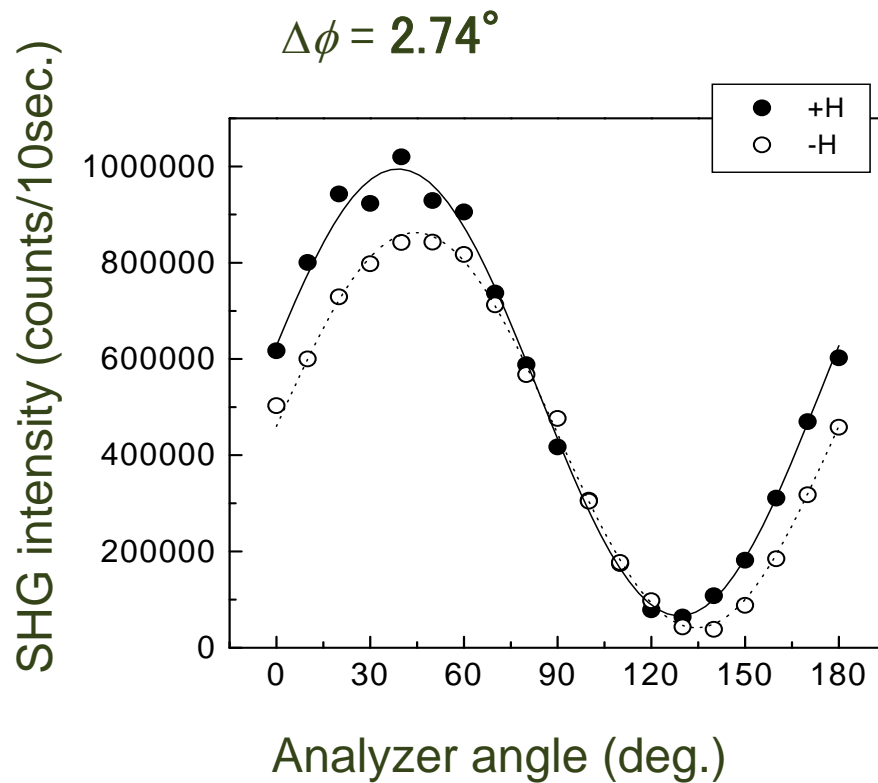
$$\eta_K^{(2)} = \frac{1}{2} \left[ \tan^{-1} \left( \frac{I_{MAX}^{(+)}}{I_{MIN}^{(+)}} \right) - \tan^{-1} \left( \frac{I_{MAX}^{(-)}}{I_{MIN}^{(-)}} \right) \right]$$

Nonlinear Kerr rotation & ellipticity

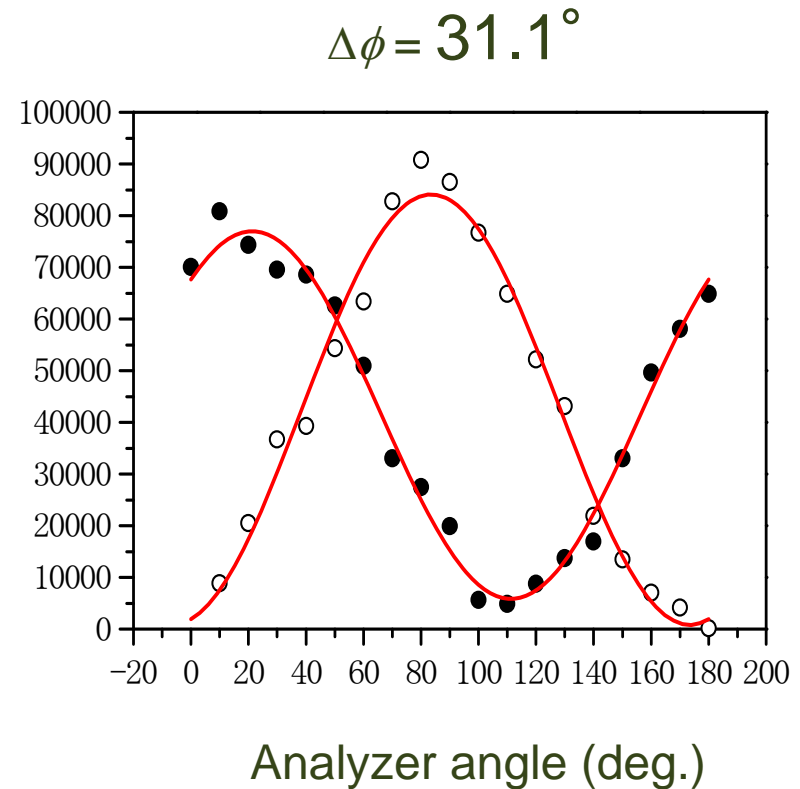
$$\theta_K^{(2)} = 17.2^\circ$$

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

# Fe/Auの非線形力一回転角



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



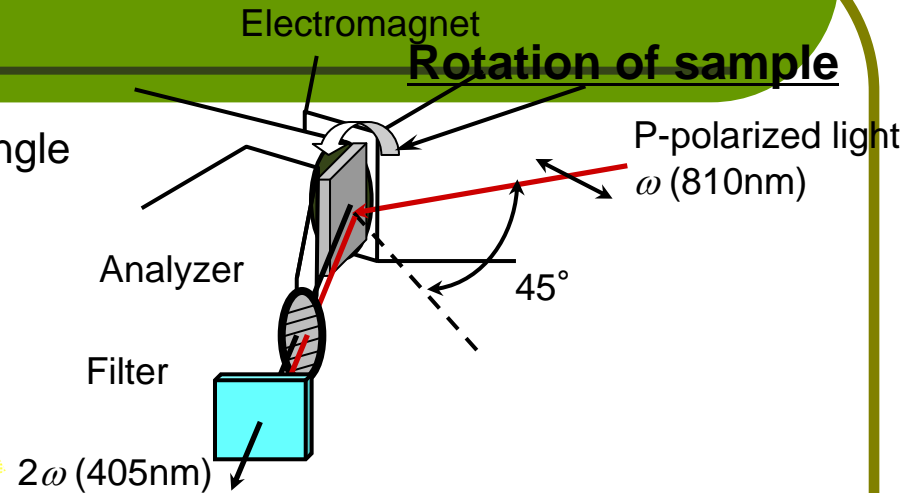
(b) Fe(1.75ML)/Au(1.75ML) Sin

Analyzer angle dependence

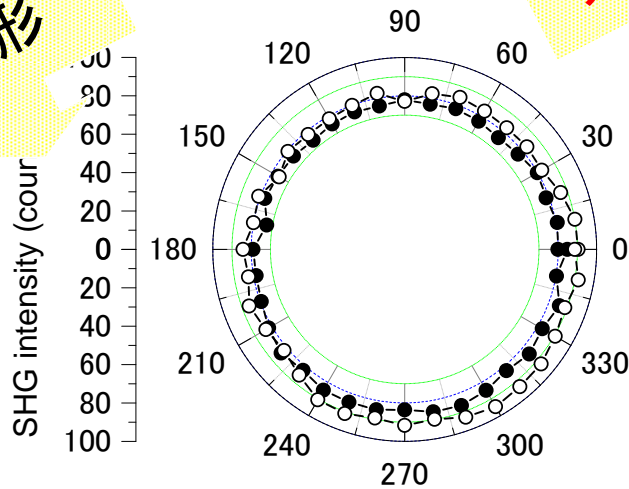


# MSHGの試料方位依存性

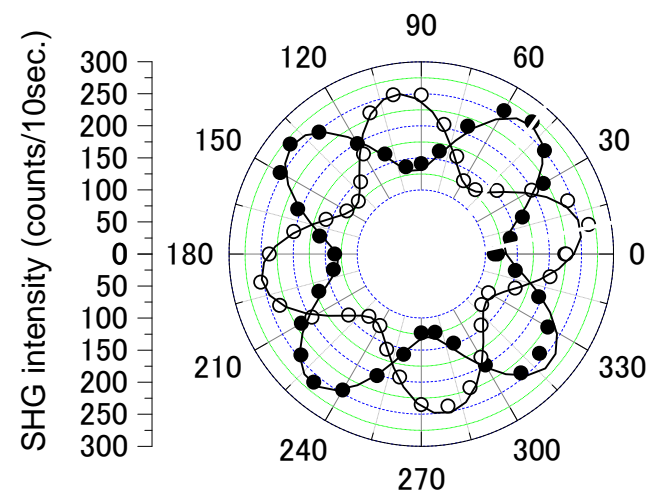
- Linear optical response ( $\lambda=810\text{nm}$ )  
The isotropic response for the azimuthal angle
- Nonlinear optical response ( $\lambda=405\text{nm}$ )  
The 4-fold symmetry pattern  
Azimuthal pattern show  $45^\circ$ -rotation by reversing the magnetic field



線形



非線形



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

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

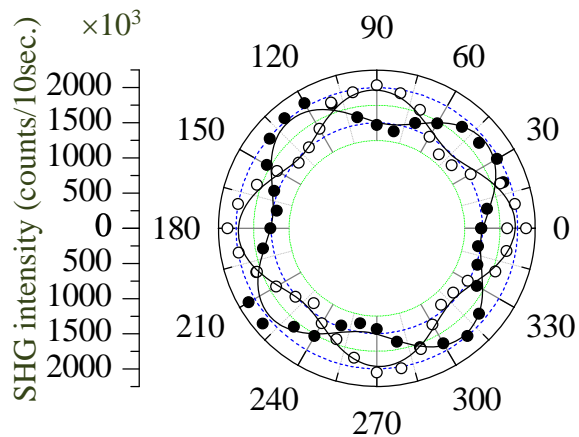
Surface  
nonmagnetic  
(dipole term)

Surface  
Magnetic  
(dipole term)

Bulk  
nonmagnetic  
(quadrupole)

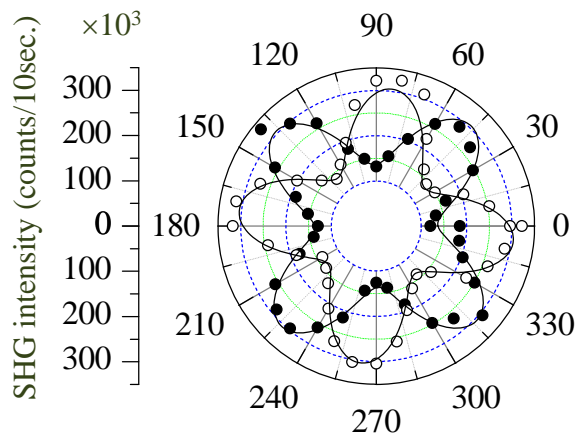
# MSHG方位角依存性のシミュレーション

(a) Pin-Pout



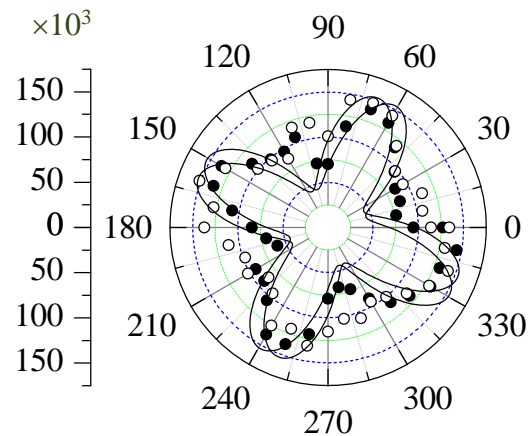
$$A^{PP}=1310, B=26, C=-88$$

(c) Sin-Pout



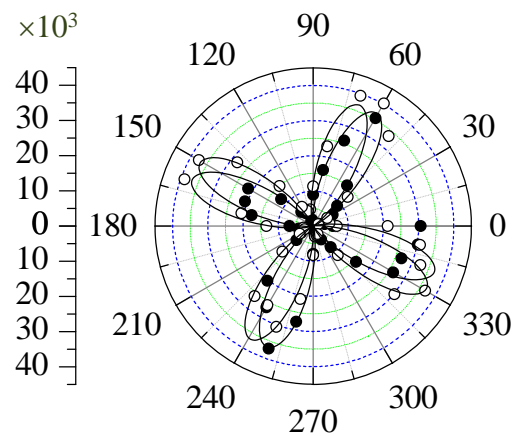
$$A^{SP}=460, B=26, C=-88$$

(b) Pin-Sout



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

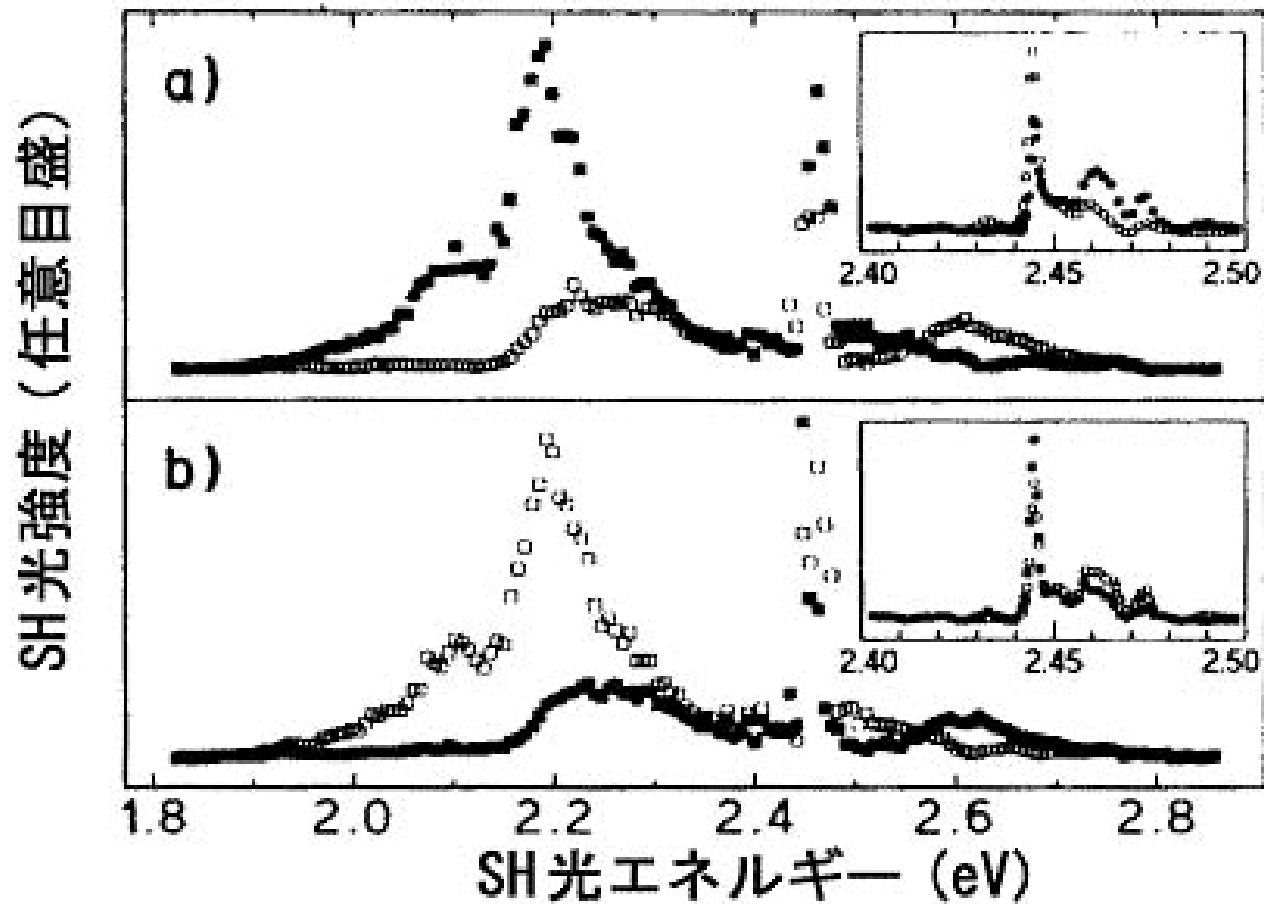
(d) Sin-Sout



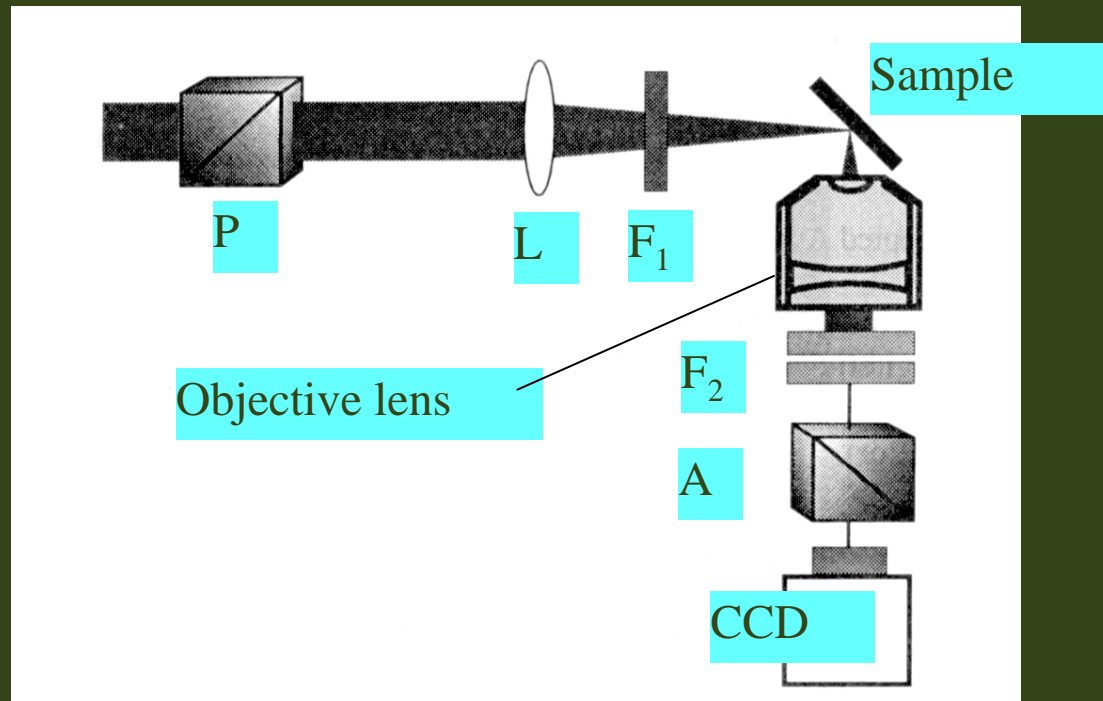
$$A^{SS}=100, B=26, C=-88$$

点: 実験  
実線: 計算

# Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>のMSHG

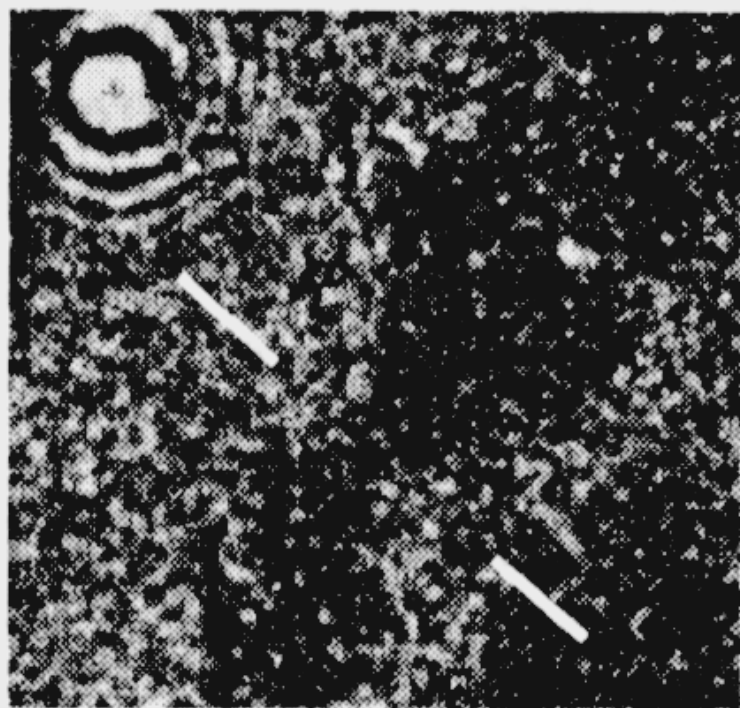


# 非線形磁気光学顕微鏡



非線形磁気光学顕微鏡の模式図

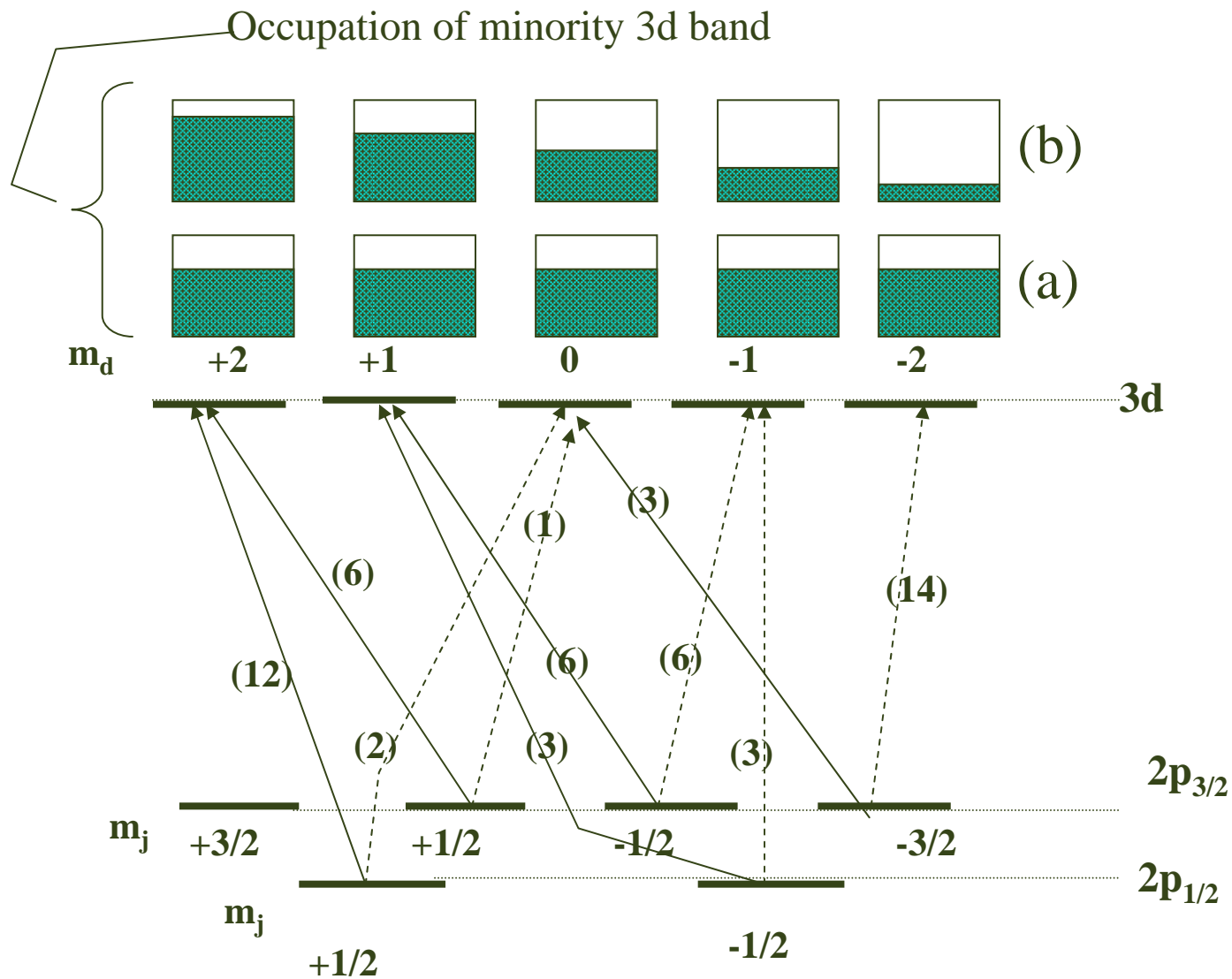
# 非線形磁氣光学顯微鏡像



# その他の磁気光学効果

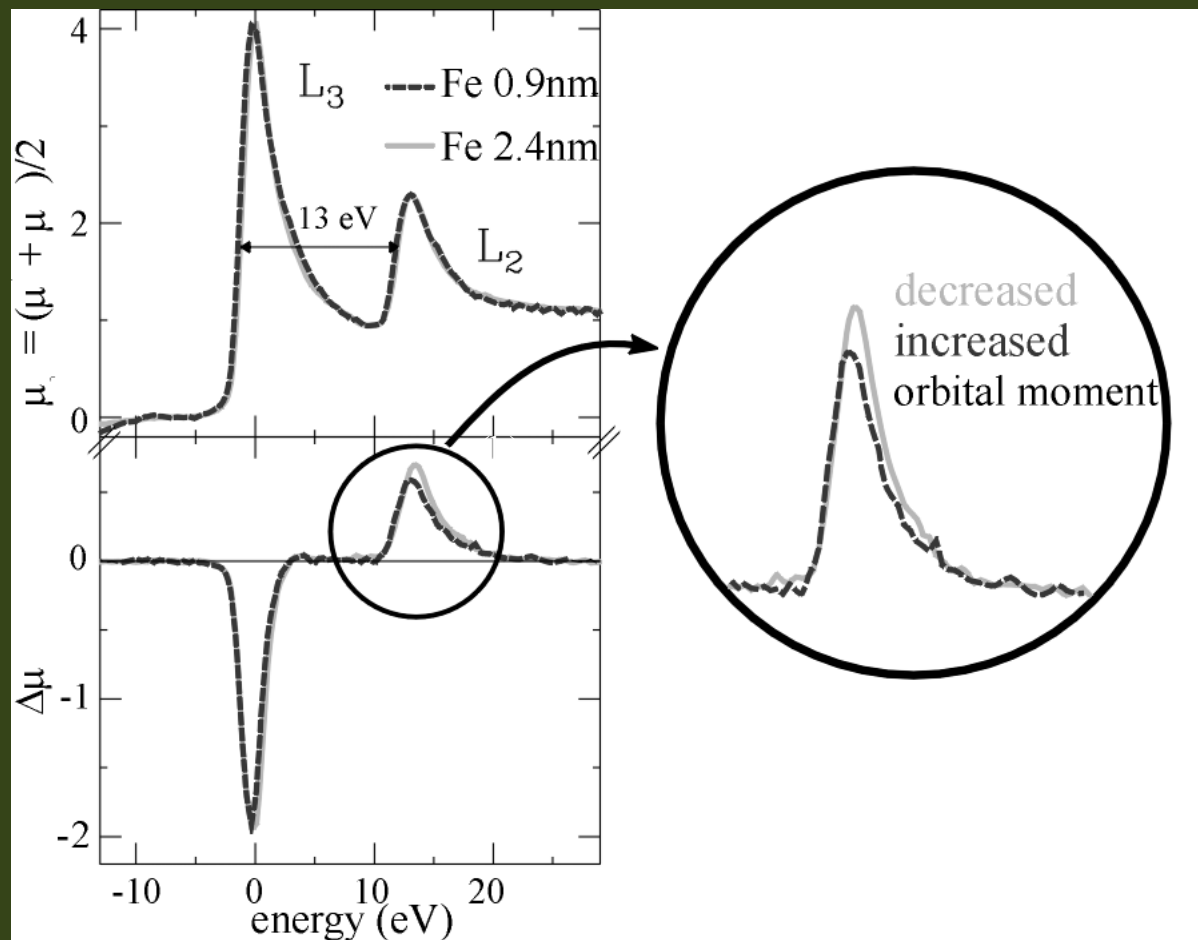
- X線磁気光学顕微鏡
- Sagnac顕微鏡
- ポンププローブ法による動的磁化測定

# X線磁気光学効果

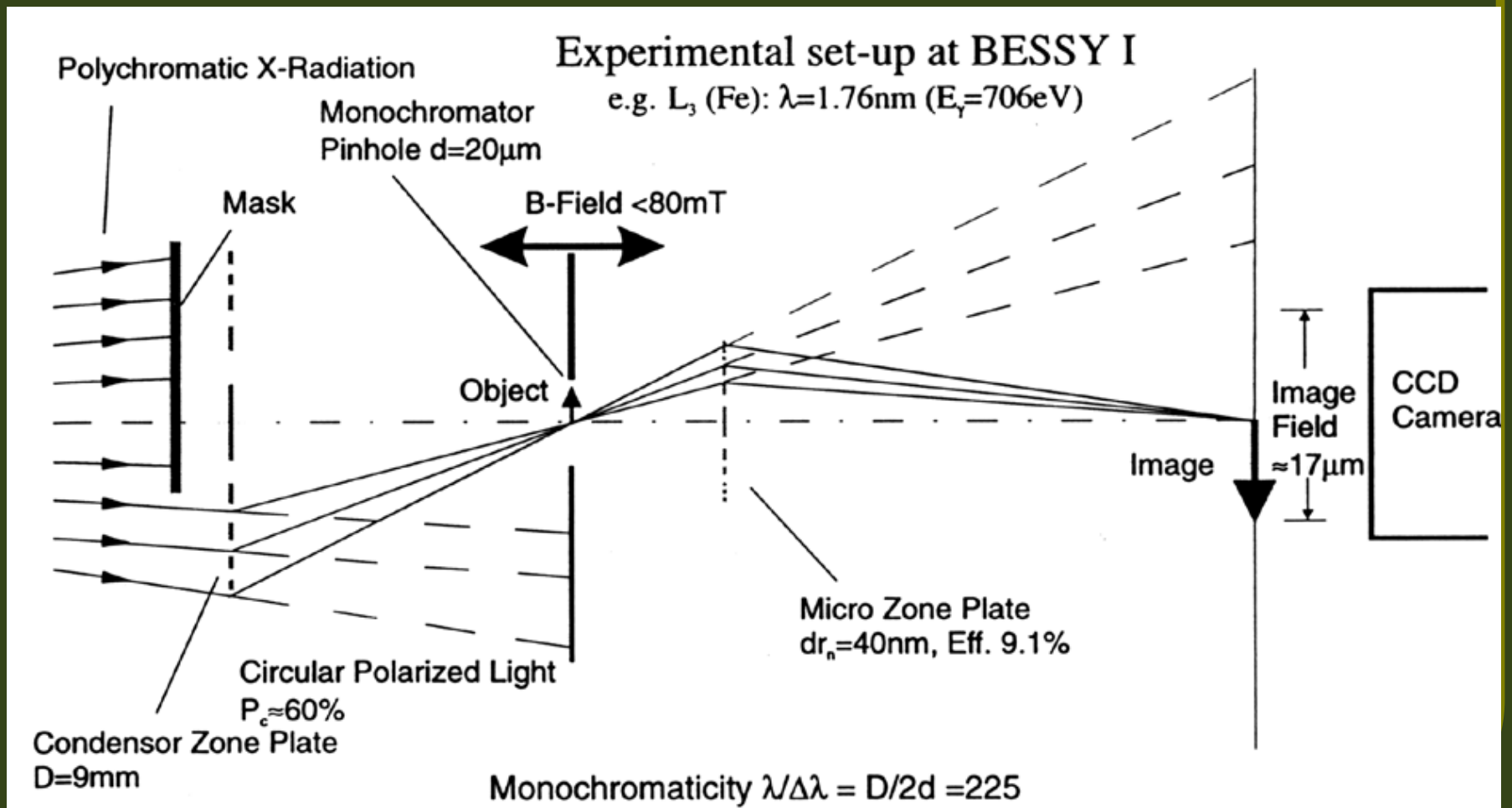




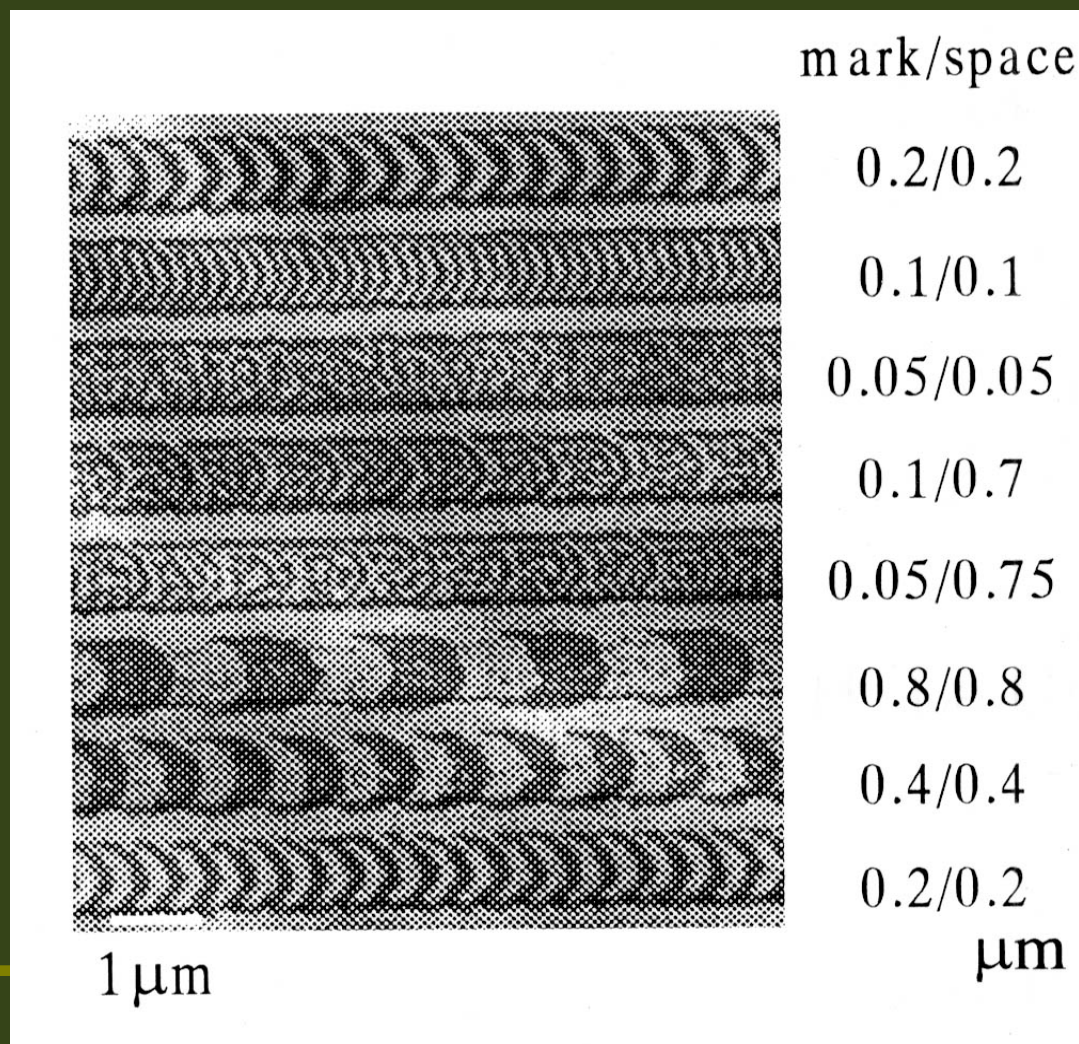
# L吸収端の磁気円二色性



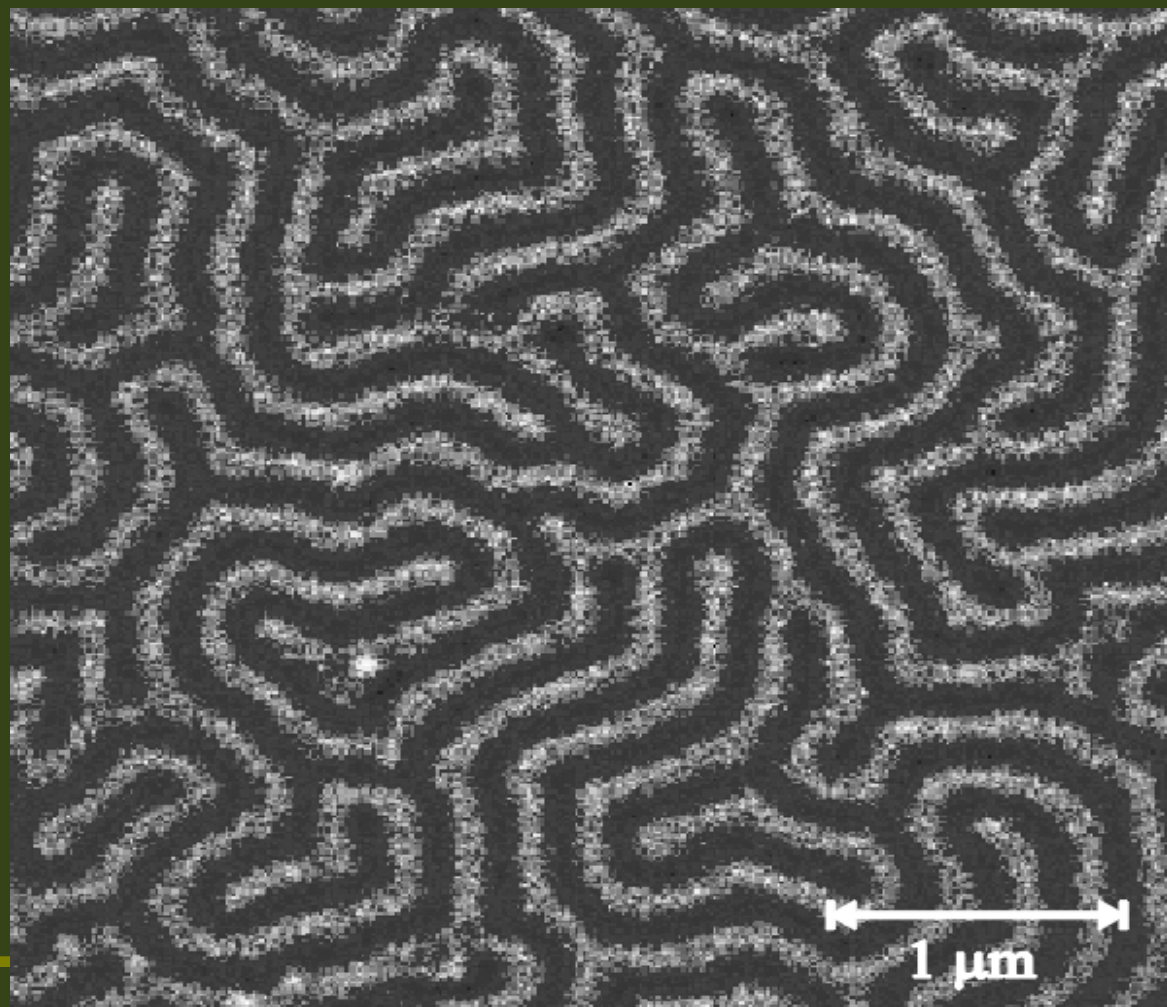
# XMCD顯微鏡



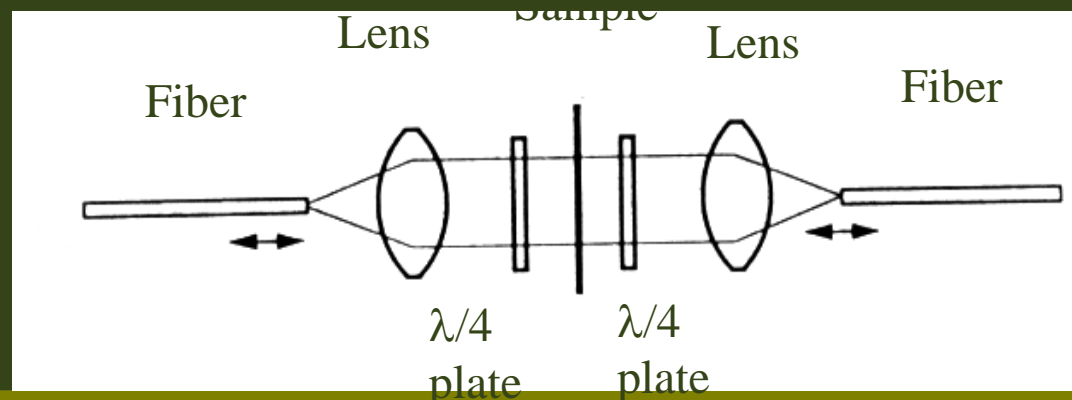
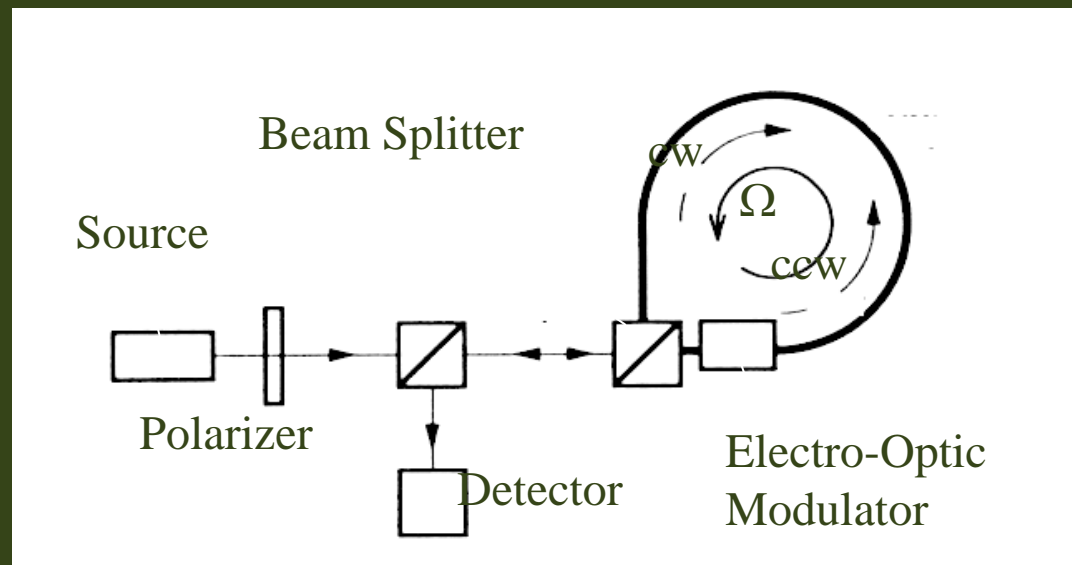
# X線顕微鏡によるMO膜観測



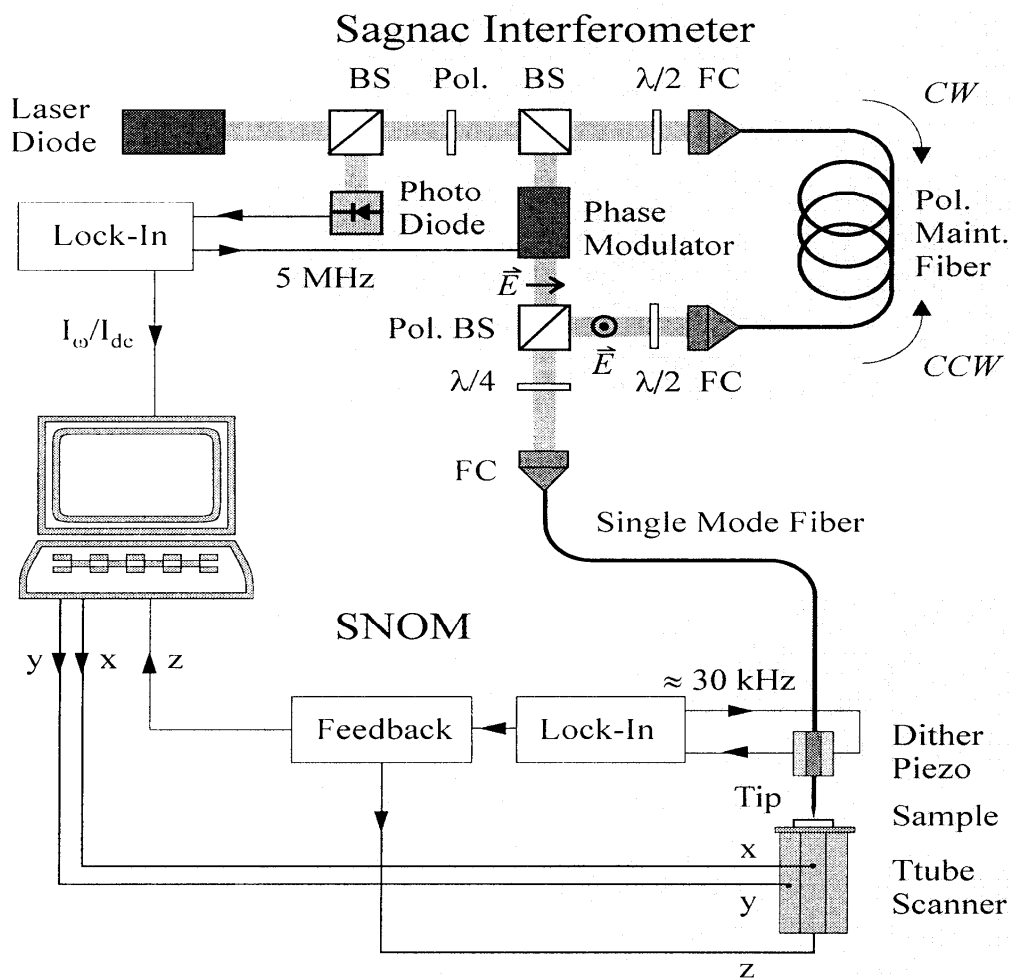
# X線顕微鏡で観察したGdFeの磁区



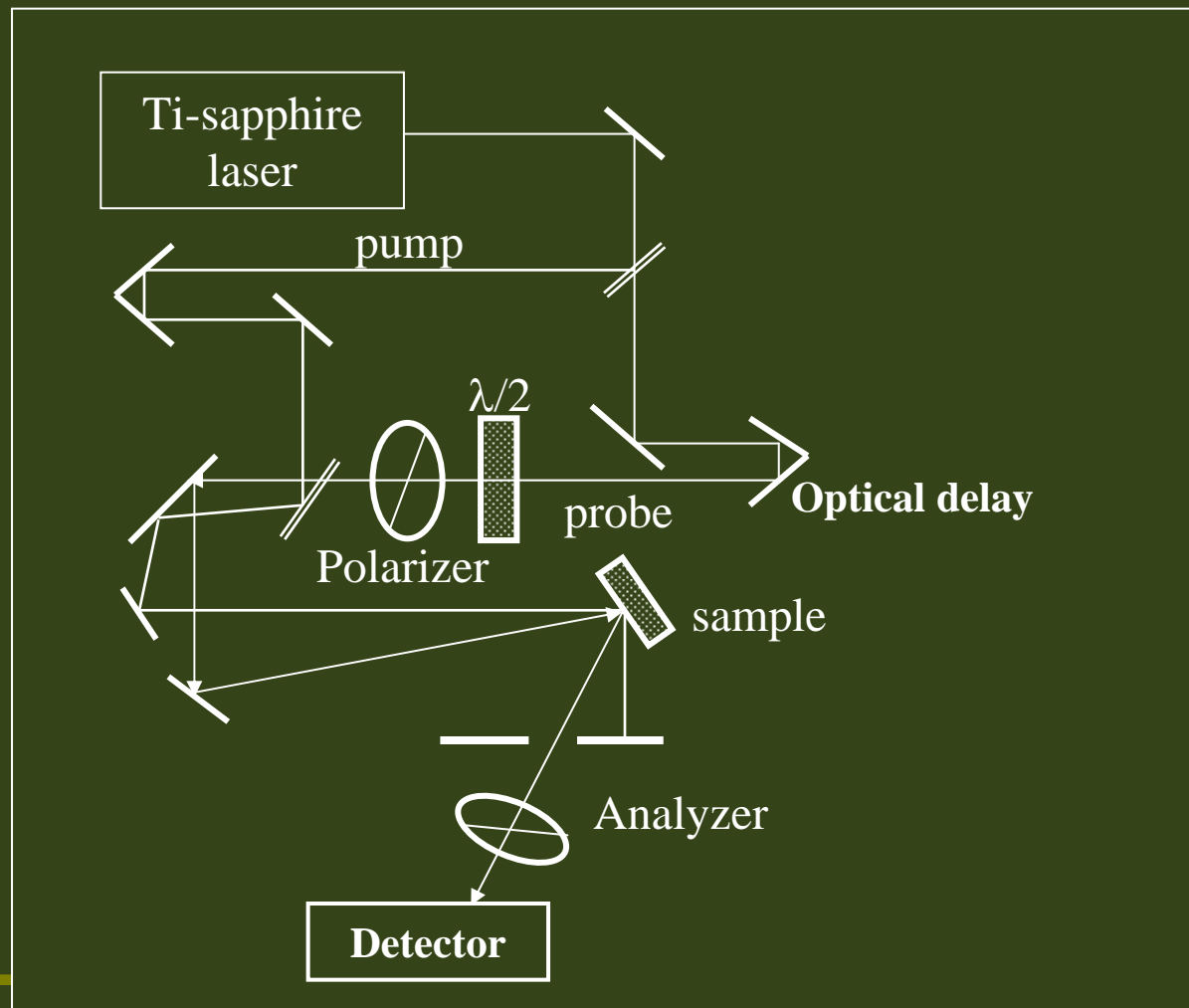
# サニャック干渉計



# サニャック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)

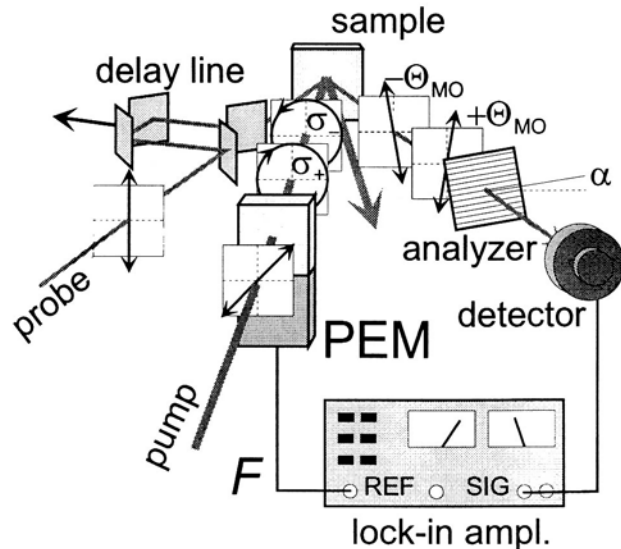


FIG. 1. Schematic diagram explaining a TIMMS experiment. A photoelastic modulator (PEM) modulates the pump between left and right-handed circular polarization ( $\sigma_+ \leftrightarrow \sigma_-$ ). This results in a modulation of the magneto-optical rotation ( $-\Theta_{MO} \leftrightarrow +\Theta_{MO}$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

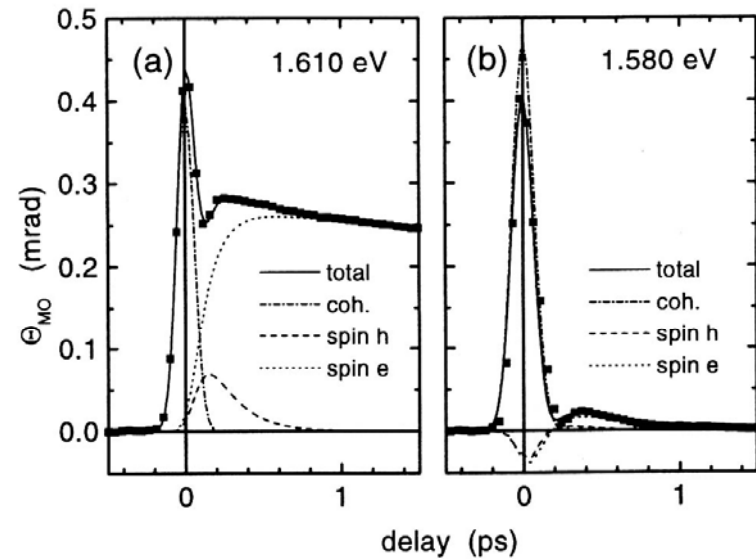
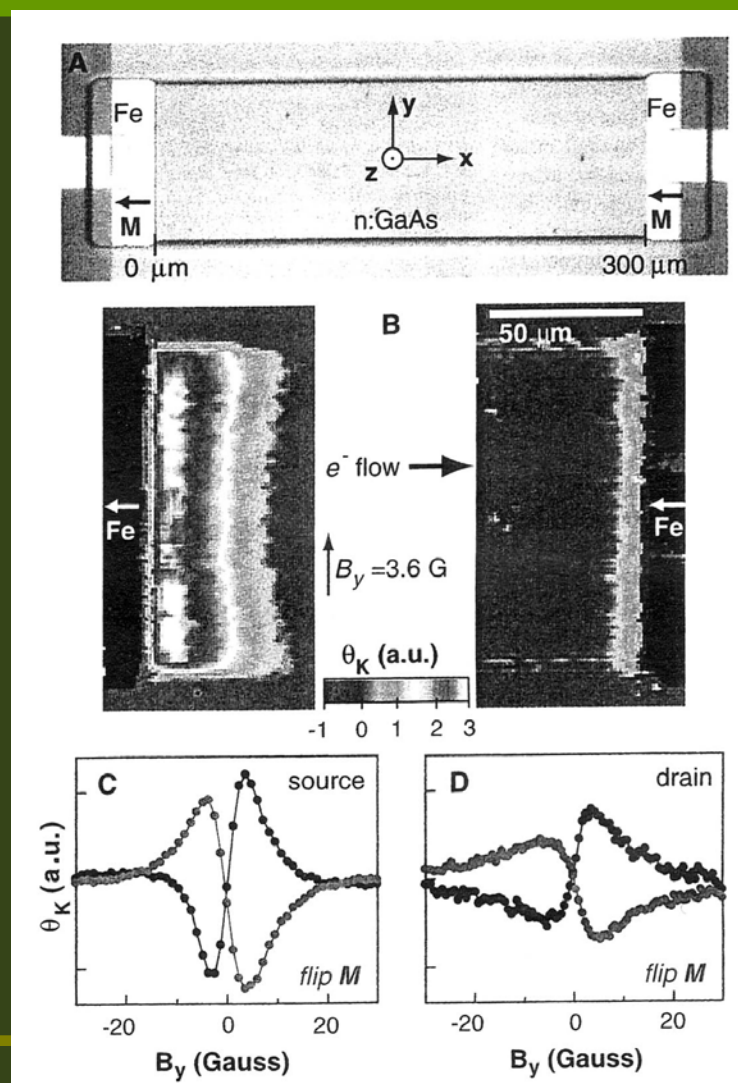


FIG. 4. TIMMS time-scans like in Fig. 3, but for frequencies above the bandgap:  $\hbar\omega = 1.610$  eV (a), and  $\hbar\omega = 1.580$  eV (b). In (b), a three stage fit is applied (see text).



# 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。

# 「磁気光学入門」のおわりに

- 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。