

シリコン埋め込みナノ磁性ドット 配列の磁氣的・光学的評価

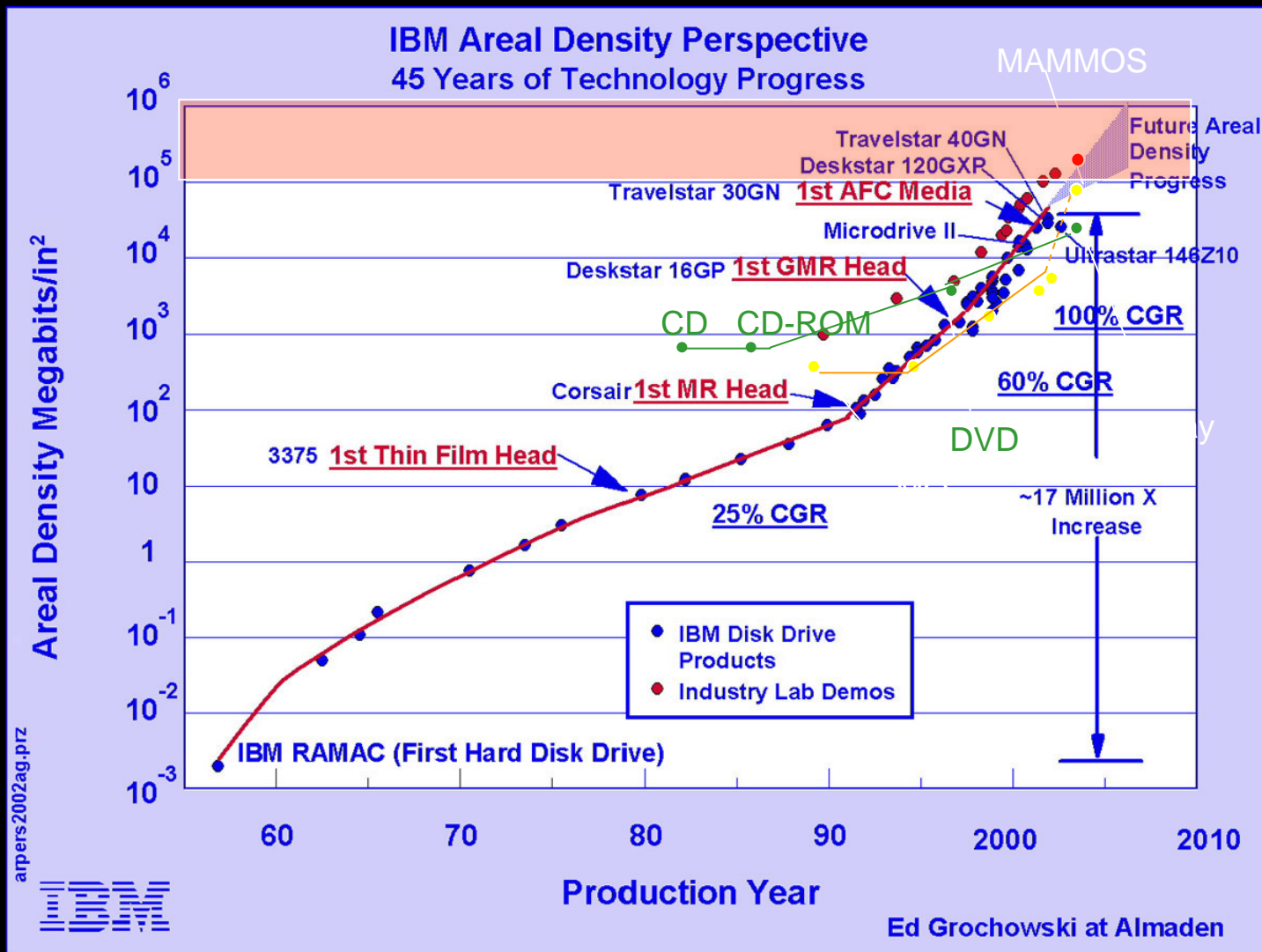
佐藤勝昭¹, 石橋隆幸¹, 森下義隆¹, 町田賢司^{1,2},
手塚智之¹, 水澤愛子¹, 山本尚弘¹
農工大¹、NHK放送技研²

講演内容

- この研究の目的
- ダマシン法による埋込ドット配列の作製
- MFM観測
- マイクロ磁気シミュレーション
- 非線形光学効果

この研究の背景

磁気ストレージの急速な高速化



微小磁性体研究の必要性

- 高密度磁気記録への強いニーズ
- 研究室レベルでの最新の記録密度200 Gbit/in².
- 数年のうちに 1Tbit/in² の高密度を実現することが期待されている。この密度は 1 bit のサイズが 25 nm ×25 nmであることを意味する。

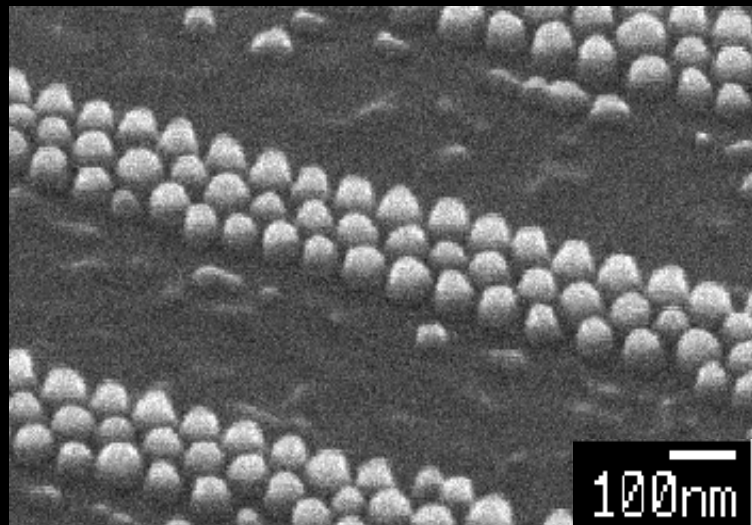
MRAM, パターンディスク

Co₇₄Cr₆Pt₂₀ ドット配列 (80 nm pitch, 40 nmφ)

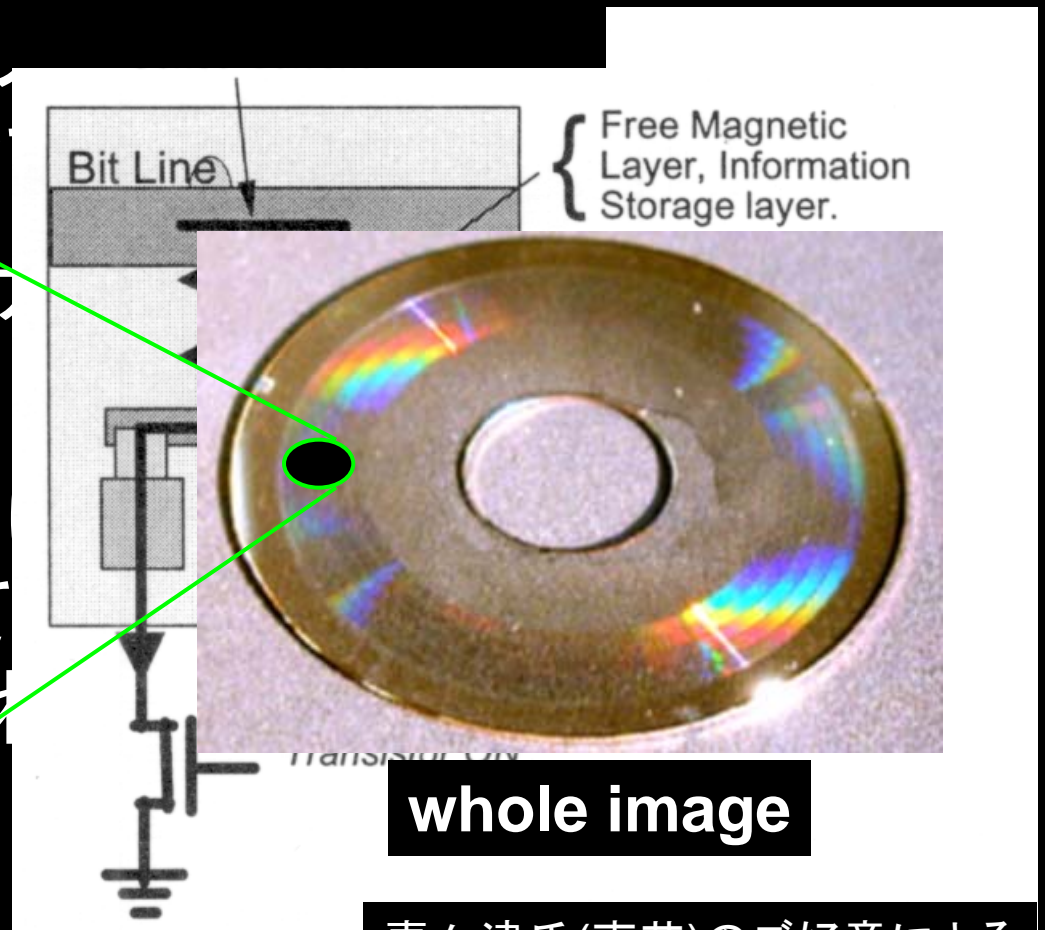
2.5-インチディスク基板

パターンディスク

パターンディスク



SEM image



whole image

喜々津氏(東芝)のご好意による

サブミクロン磁性体加工技術

- サブミクロン領域の磁性体の微細加工技術については、集束イオンビーム(FIB)を用いた加工、電子ビーム(EB)を援用したリフトオフ技術、電子ビームを援用したダマシシ法などが知られている。集束イオンビームによる直接エッチングは数 μm の範囲の比較的小規模な加工に適している。VSMによる磁気評価や光学的評価などのためには、数mmにおよぶ広い範囲にわたって多数の磁性体微細構造を作ることが要請されるが、この目的にFIBは適していない

EBリソグラフィ

- mmサイズの広範囲の加工技術としては、EB描画で作成したマスクを用いて磁性体を直接エッチング加工するリフトオフ法と、EB描画によるマスクを用いて微細加工した基板に磁性体を埋め込むダマシン法が知られている。
- 本研究ではこのダマシン法を用いたパーマロイの微細加工を行う。この方法では化学機械研磨(CMP)によって埋め込み構造を作製するため表面が平坦化されているため、磁気力顕微鏡(MFM)による観察において、リフトオフ法のようなトポグラフ信号による虚画像の形成を抑制することができる

パーマロイ

- パーマロイは軟質磁性を示し磁気記録材料としては適さないが、飽和磁束密度 B_s が大きく、磁気異方性が小さいという特徴があるので、微細化による形状磁気異方性効果を検証するための格好の材料である。
- この報告では、さまざまな形状の磁性体埋め込み構造のダマシン法による作製を試み、VSM, MFMによる評価を行い、さらに表面状態に敏感といわれる非線形光学効果による評価を行った結果を報告する。

静磁的相互作用の評価

- パターメディアやMRAM等の高集積化においては隣接磁性ドットからの静磁的相互作用の評価が必要。
- 隣接ボルテックス間の静磁的相互作用のクリアリティへの影響の評価。

ドットサイズとスピン構造

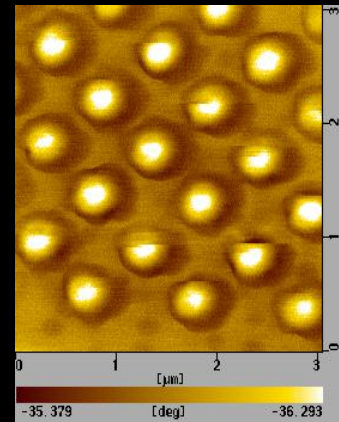
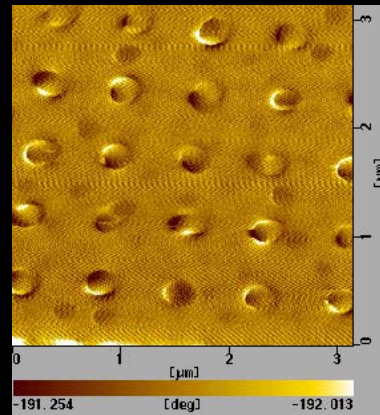
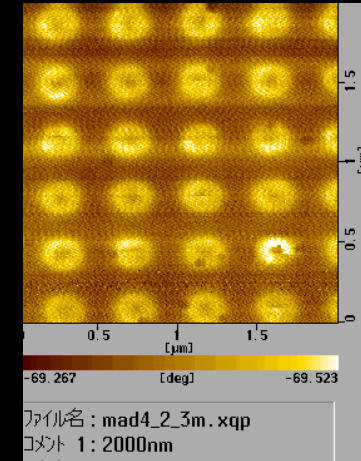
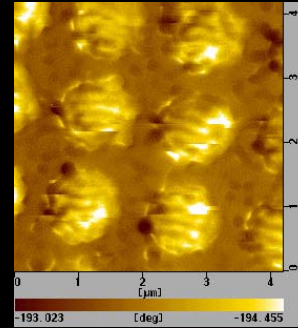
- サイズの減少とともに
多磁区構造



ボルテックス構造



単磁区構造



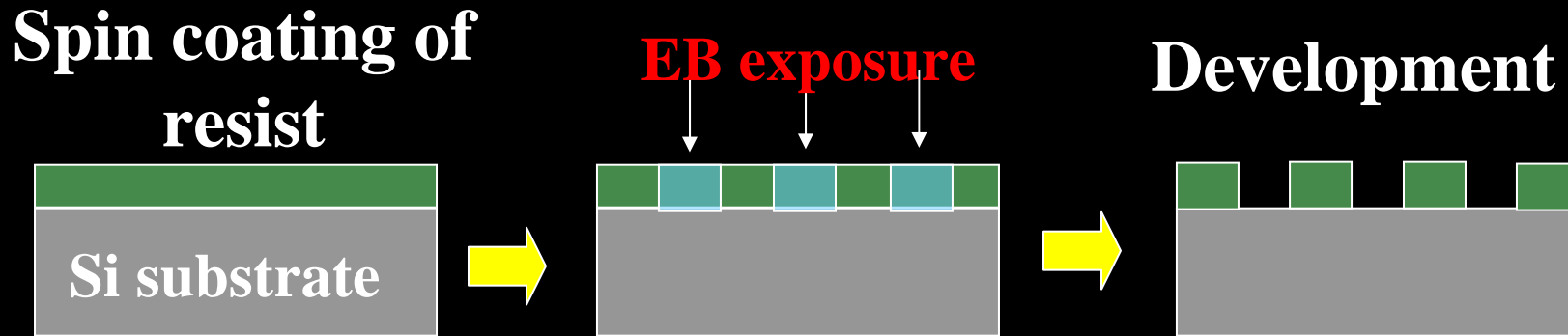
この研究の目的

- サブミクロンサイズで十分な厚みをもった稠密に配列した磁性ドット配列
- VSM and MFM観察
- マイクロ磁気シミュレーションとの比較。

パーマロイドット配列の作製

- ① 高いドライエッチ耐性をもつレジストZEPをSiに、塗布。
- ② 電子ビーム描画
- ③ 現像
- ④ エッチング：ドライエッチでSiにピット配列形成
- ⑤ 磁性薄膜の堆積(蒸着)
- ⑥ 化学機械研磨

1. EB-patterning process



[1] Dot size

100nm × 300nm rectangular dot with 300nm-spacing

100nm square dot with 300nm-spacing

[2] Patterned area: 3mm × 3mm

[3] EB-resist thickness: 300 nm

...by spin-coating with 5000 rpm rotation

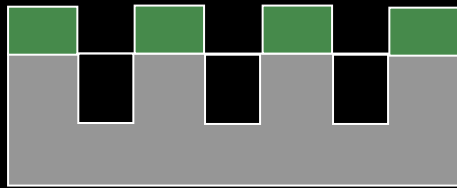
[4] Baking: 160°C, 60min

Clean Room Laboratory



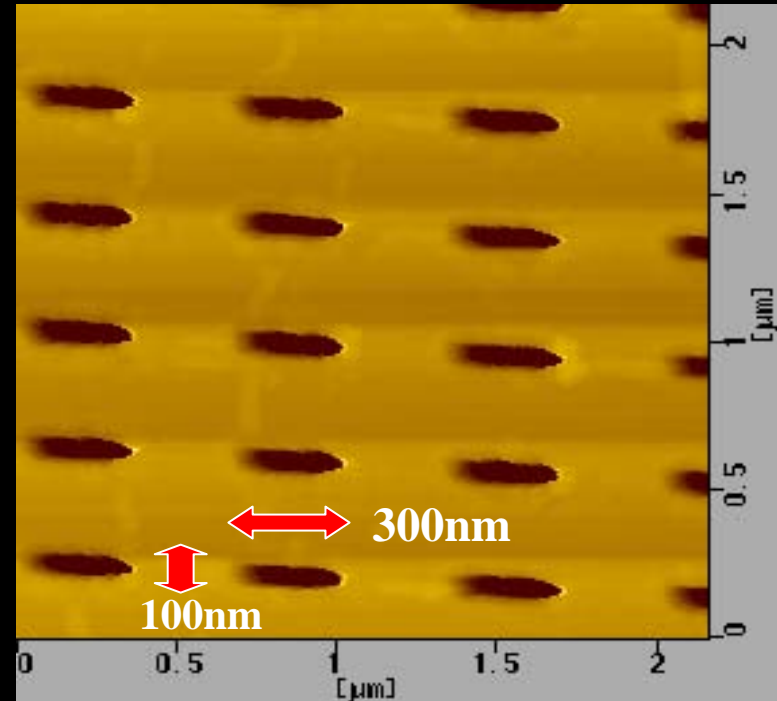
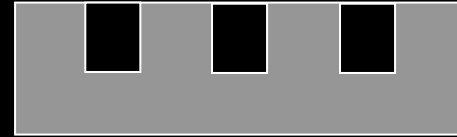
- Electron beam lithography

2. Dry etching process of Si substrate



Etching

- [1] Etching gas: CF_4
- [2] Vacuum $3.0 \times 10^{-3} \text{Pa}$
- [3] Gas pressure 9.2Pa
- [4] RF power: 400W
- [5] Etching rate: $0.1 \mu \text{m}/\text{min}$



Silicon surface after etching

Dry-etching



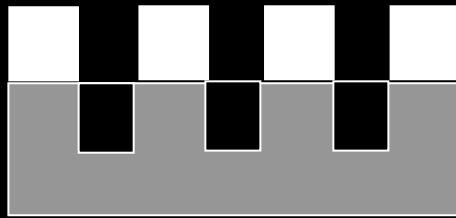
3. パーマロイの埋め込み

[1] Material: permalloy (Ni80Fe20)

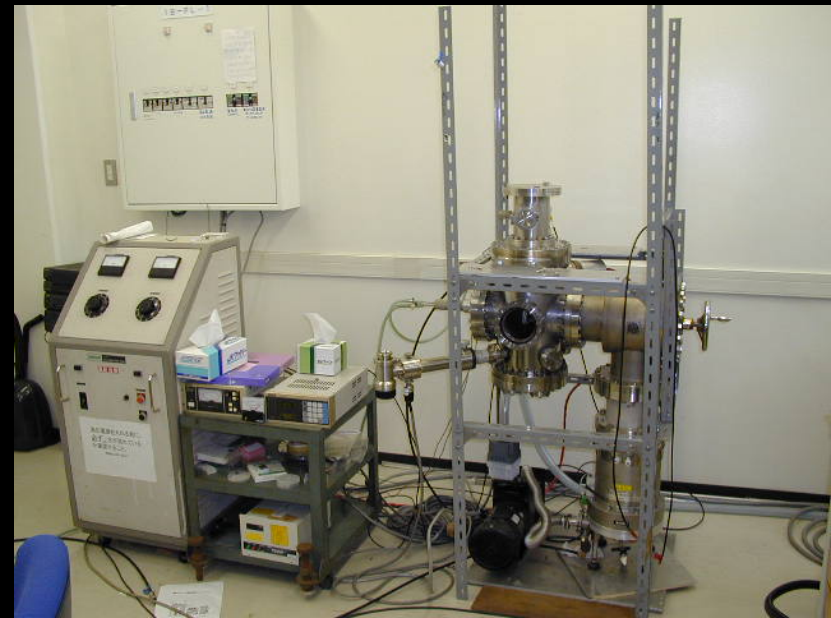
[2] Vacuum 3.0×10^{-6} Torr

[3] Accelerating voltage 4kV

[4] Deposition rate $1.0 \text{ \AA}/\text{sec}$



Embedding of permalloy film by electron beam deposition



4. Chemical mechanical polishing

[1] Polishing chemicals: Si wafer
grain-size $\sim 20\text{nm}$

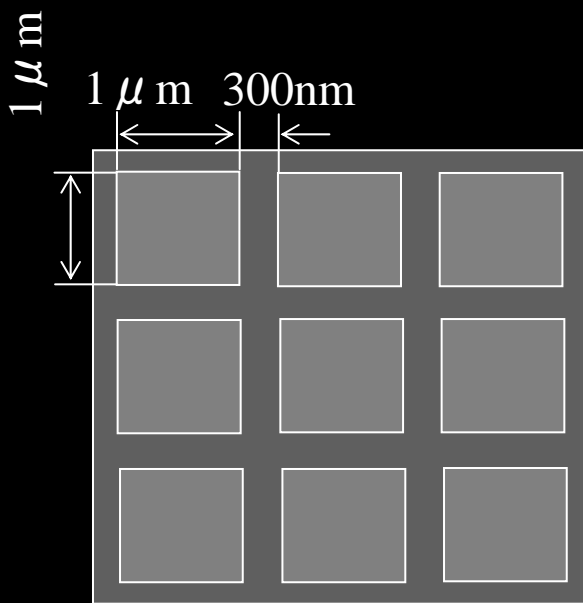
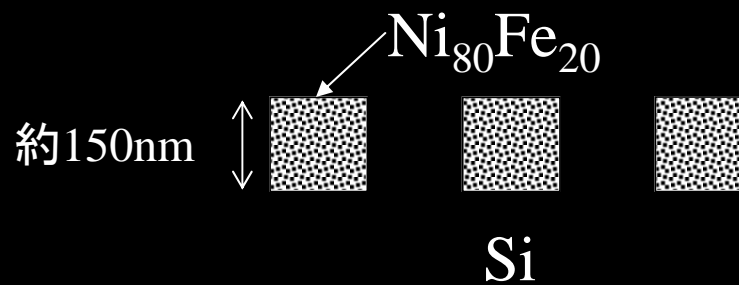
[2] pH 11

[3] polishing rate: $60\text{nm}/\text{min}$

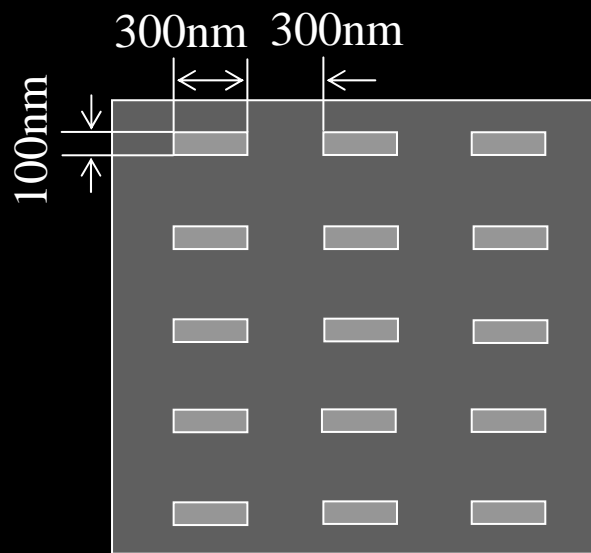


flattening

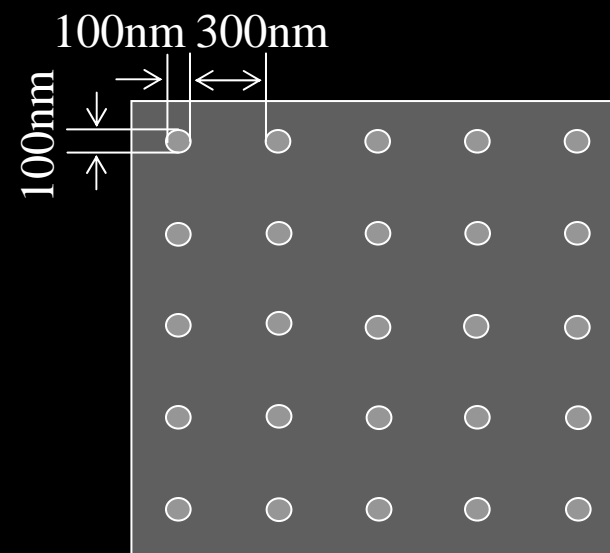
作製されたドット配列 (1)



正方形

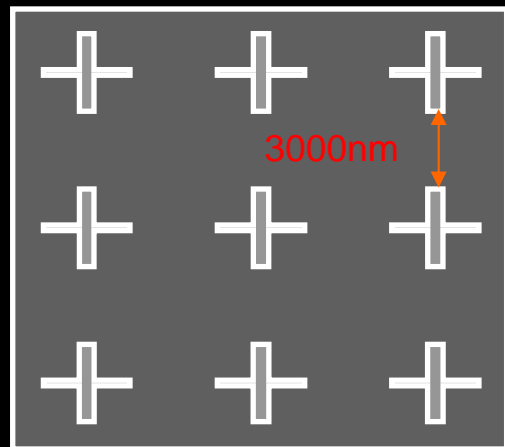


矩形

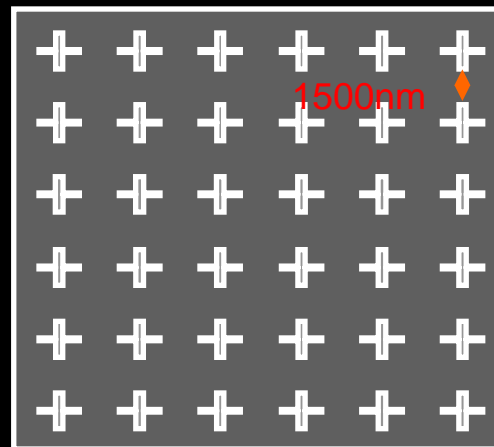
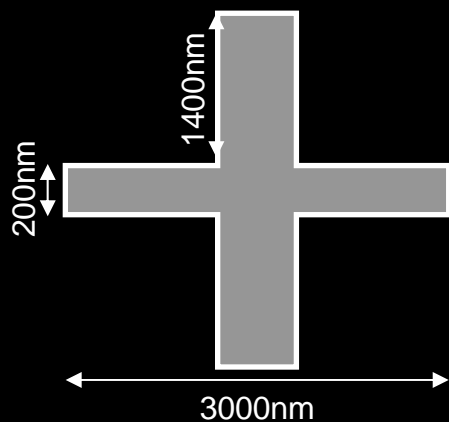


円形

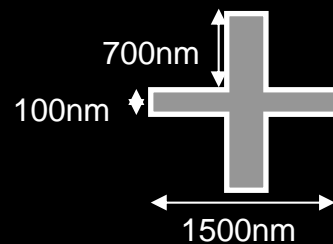
作製されたドット配列 (2)



十字
パターン1

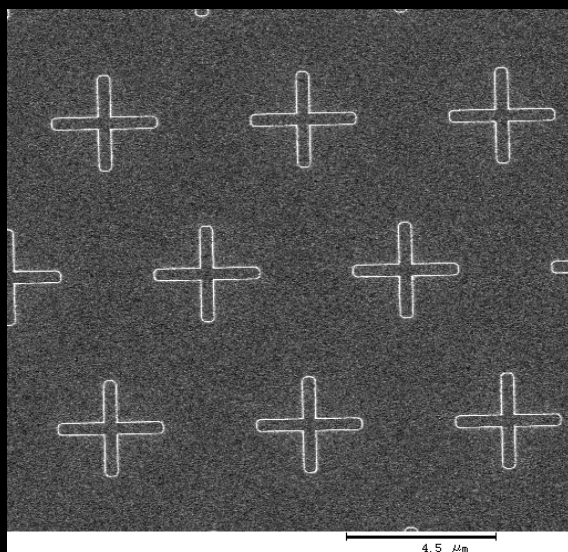


十字
パターン2

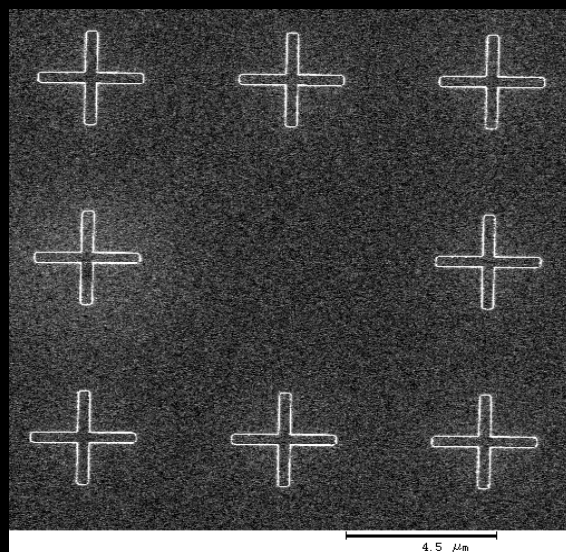


ドット深さ : ~150nm

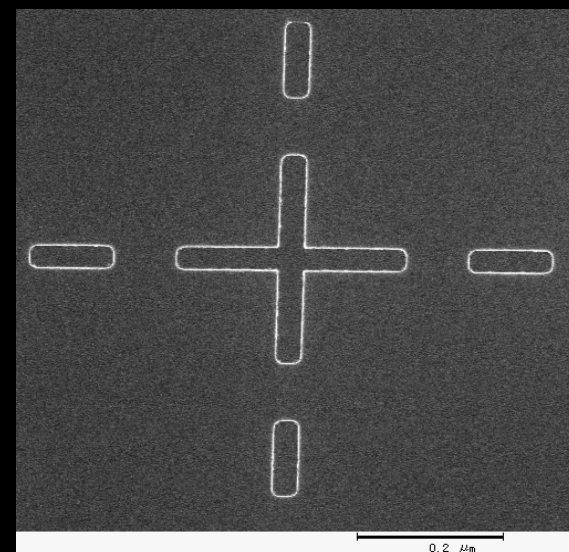
CROSS9



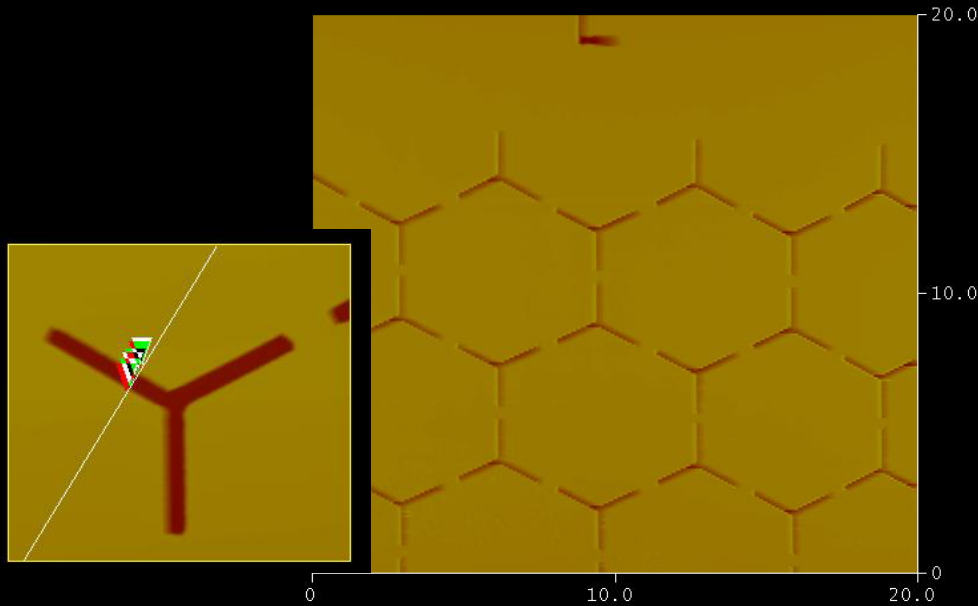
CROSS11



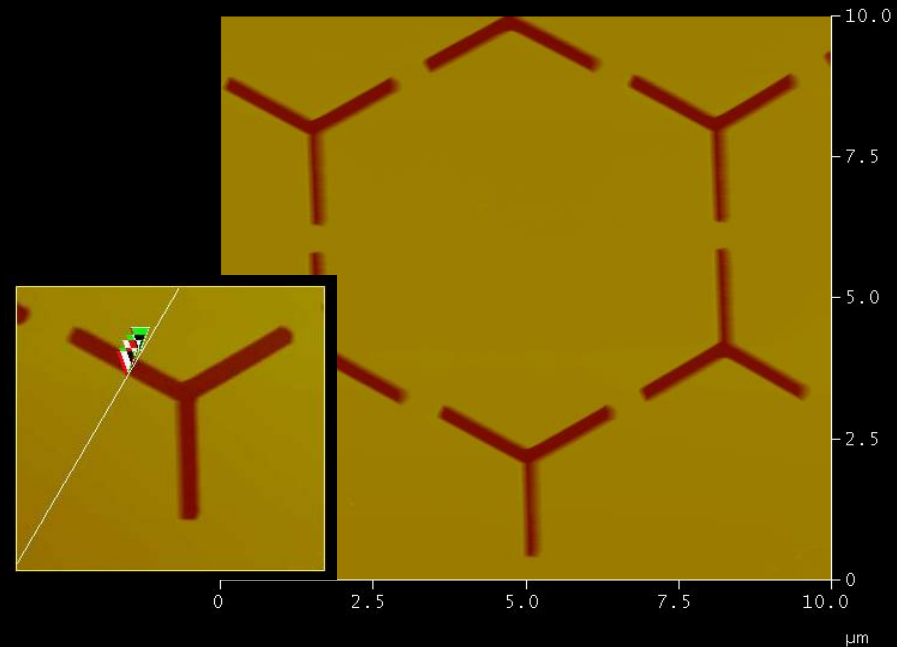
CROSS13



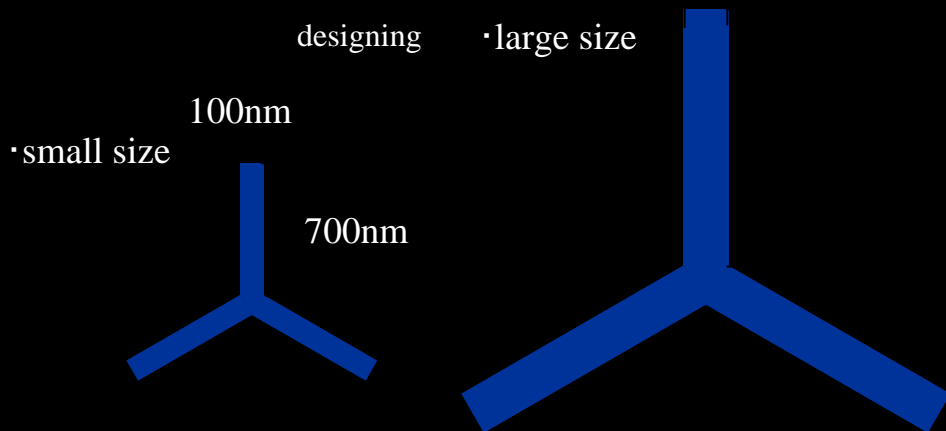
AFM image of 3-handles pattern. After CF4 Dry-Etching.



Width: surface 320nm , bottom 140nm
Depth :109nm

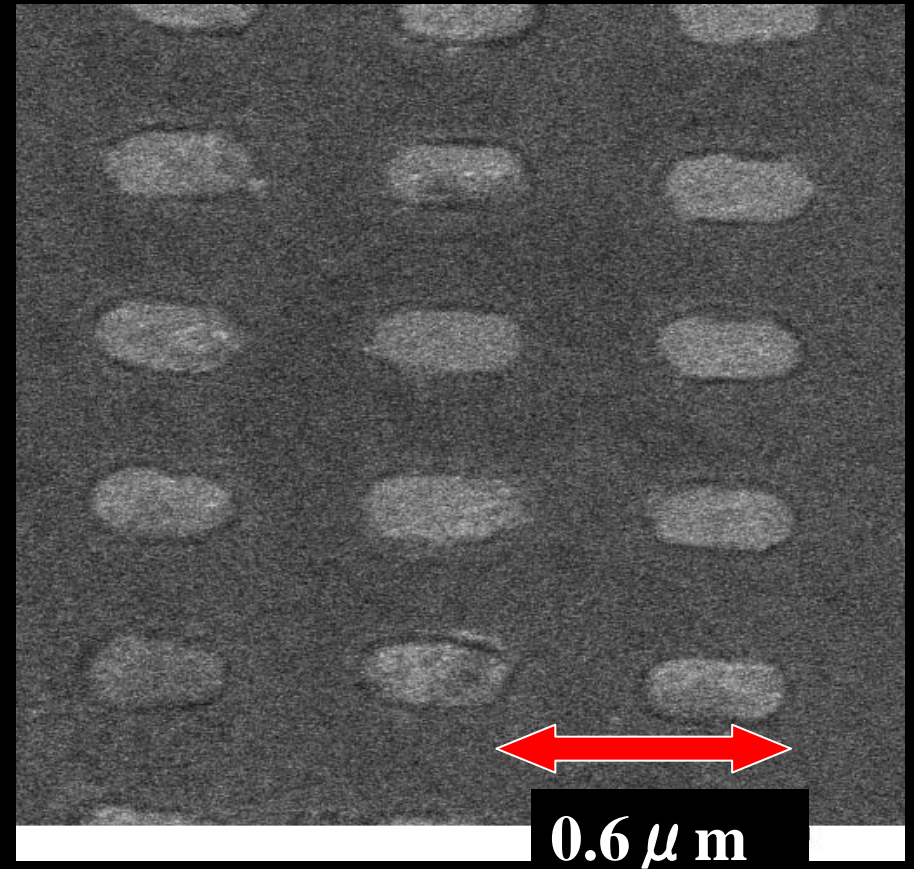
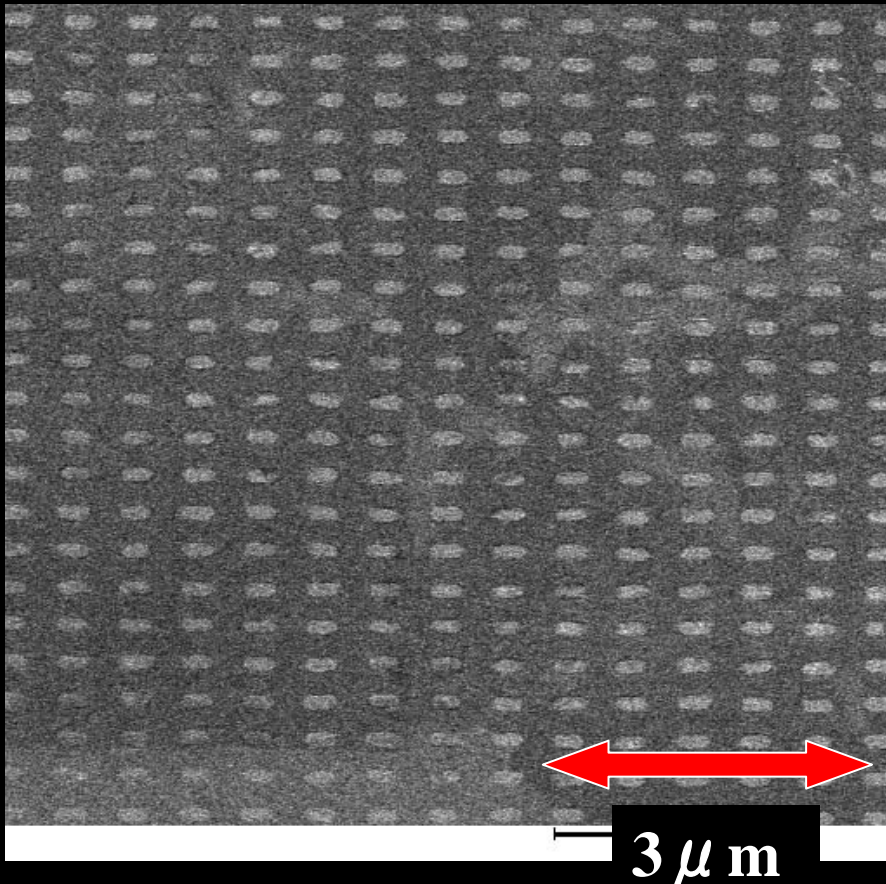


Width : surface 368nm, bottom 203nm
Depth : 109nm

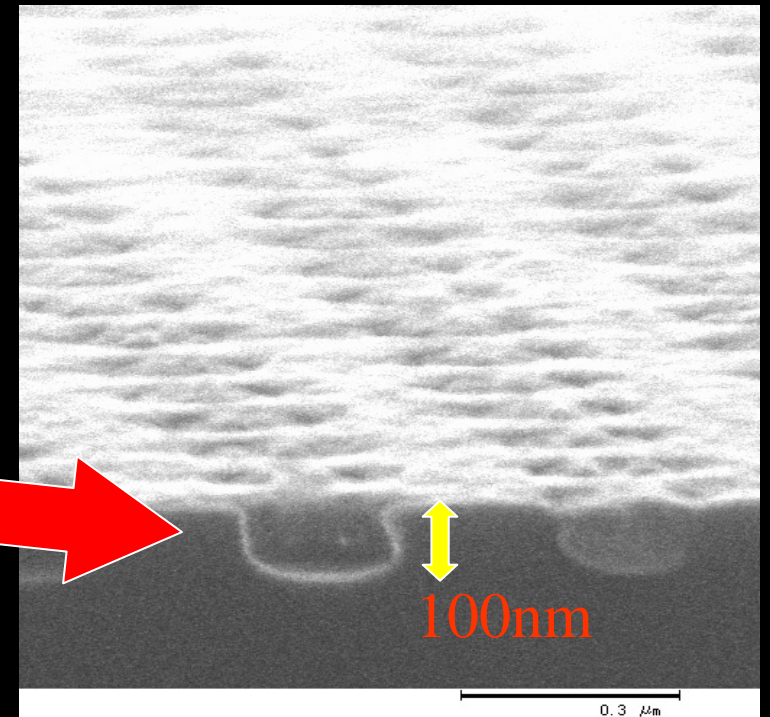
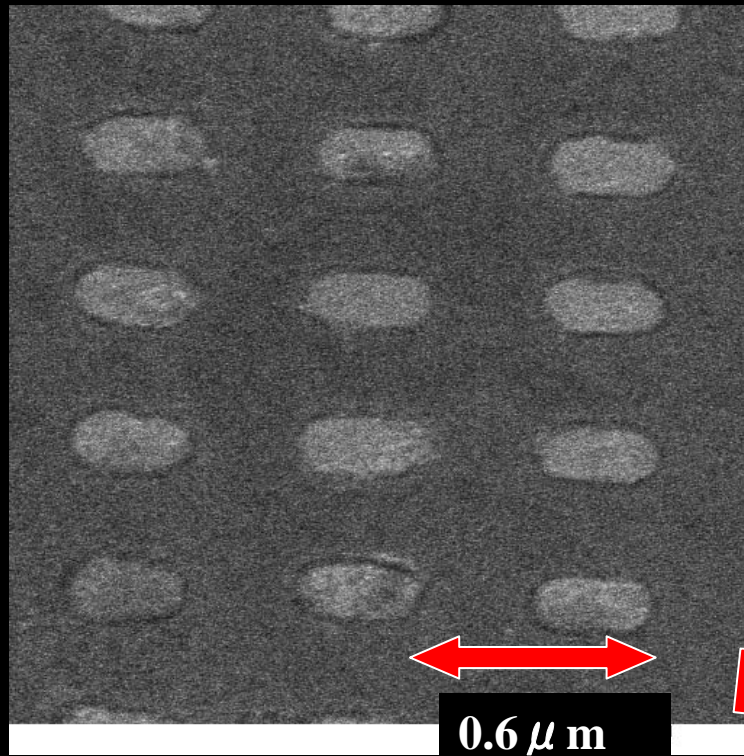


SEM 観察

300nm × 100nmsquare dot, 300 nm space



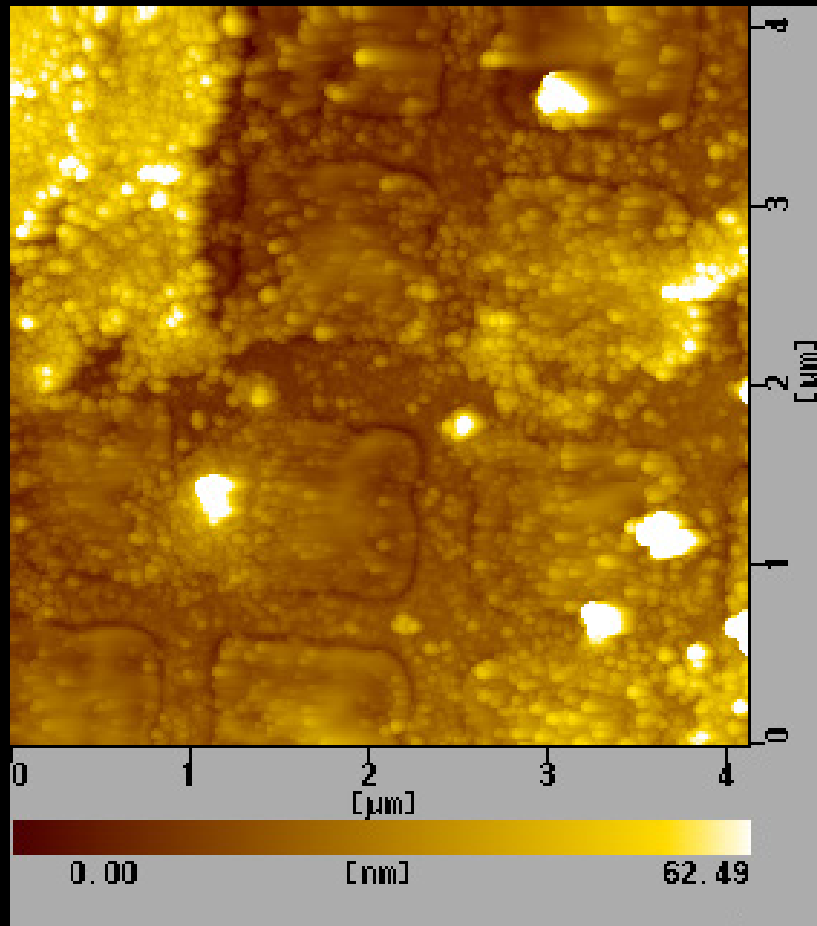
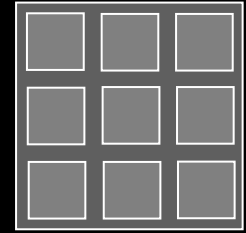
断面 SEM



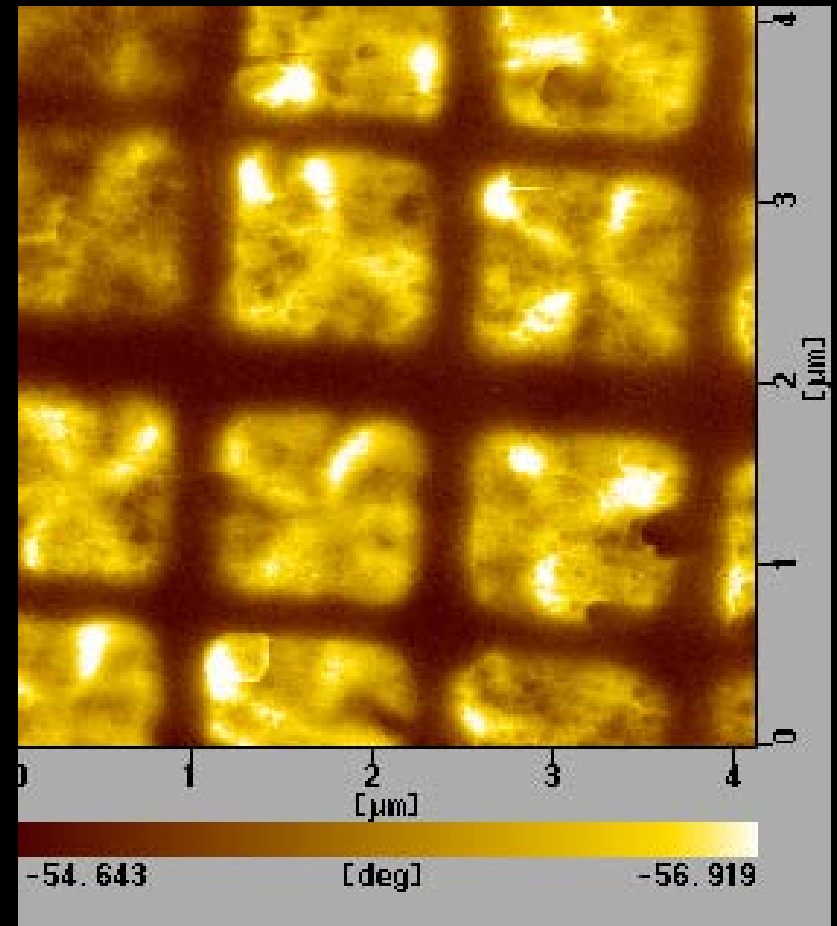
高モーメントチップによるMFM 観察

- SPI-3800N 磁気力顕微鏡 (MFM) 高モーメントチップ (40 nm厚 CoCrPt被覆)

1 μm 正方形ドット

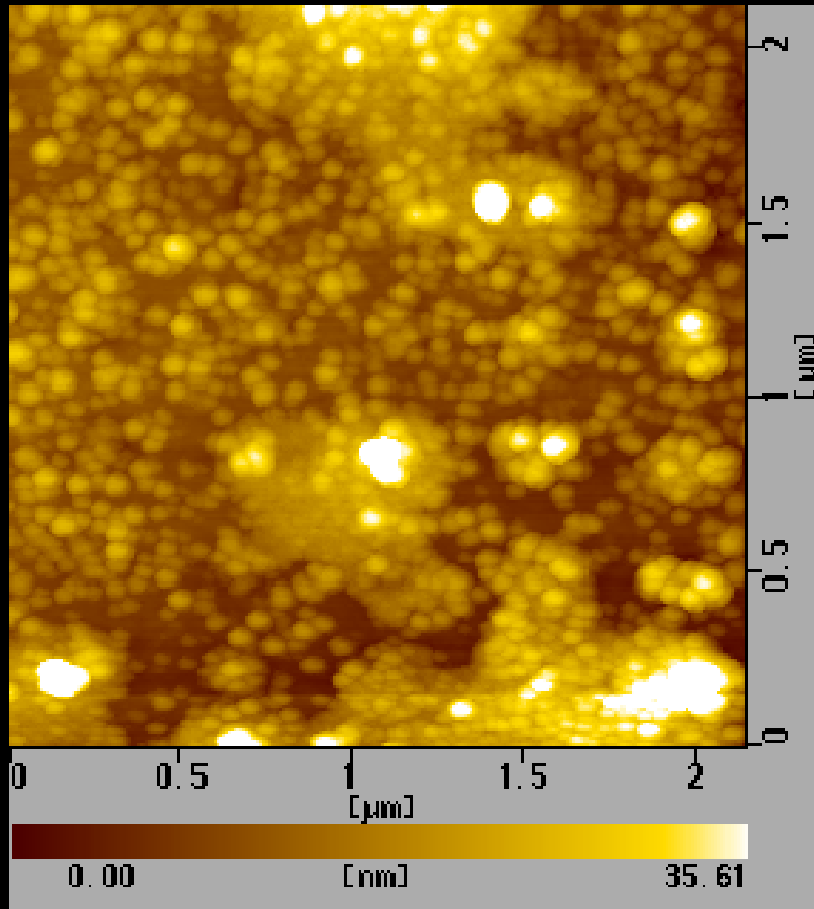
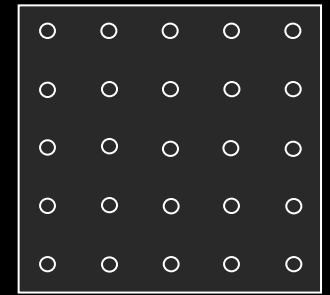


AFM

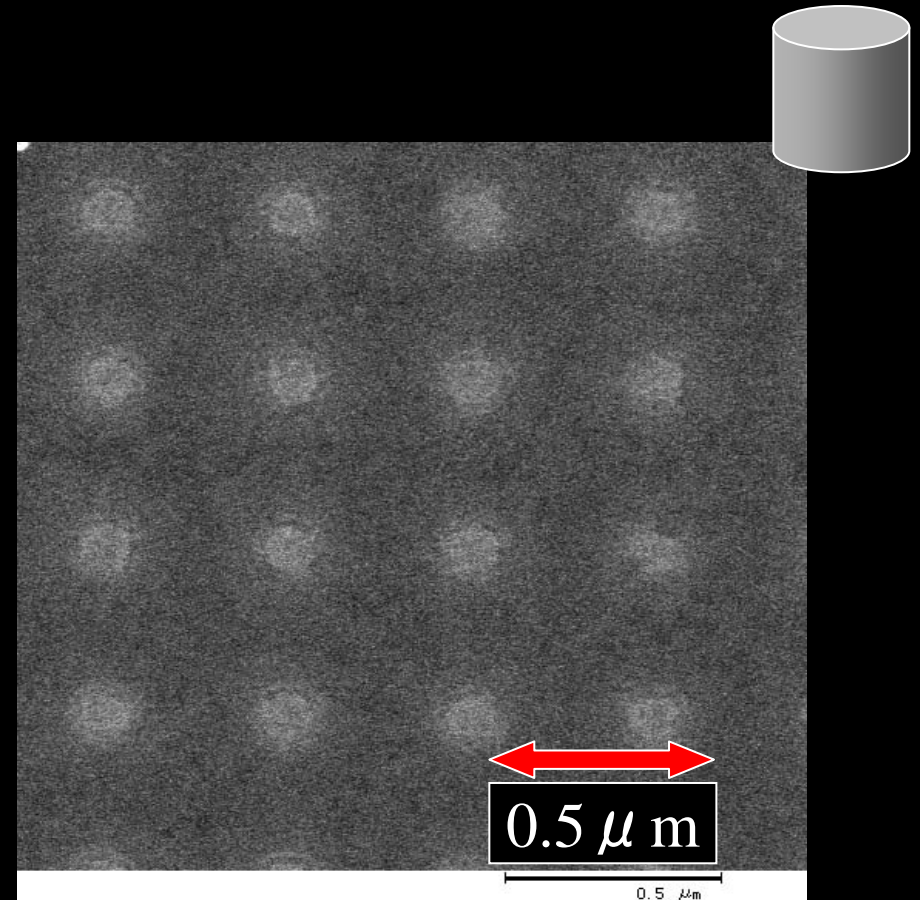


MFM

100nm 正方形ドット パターン間隔 300 nm

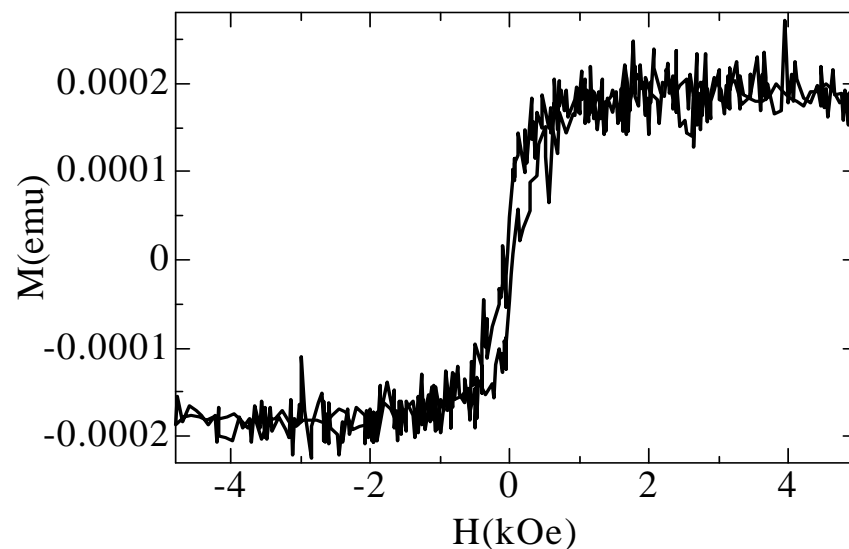
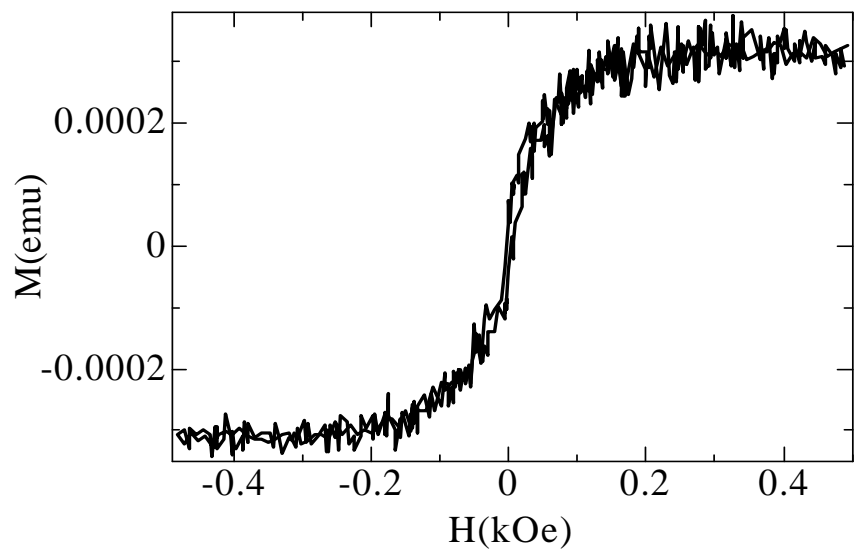
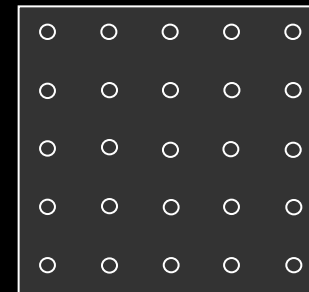


AFM



SEM

100nm 円形ドットのMH曲線



Parallel

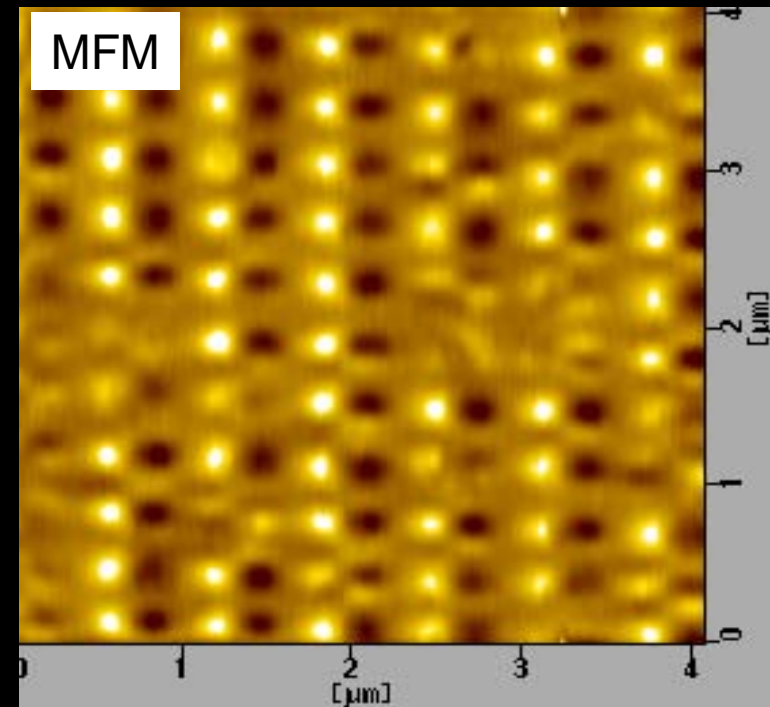
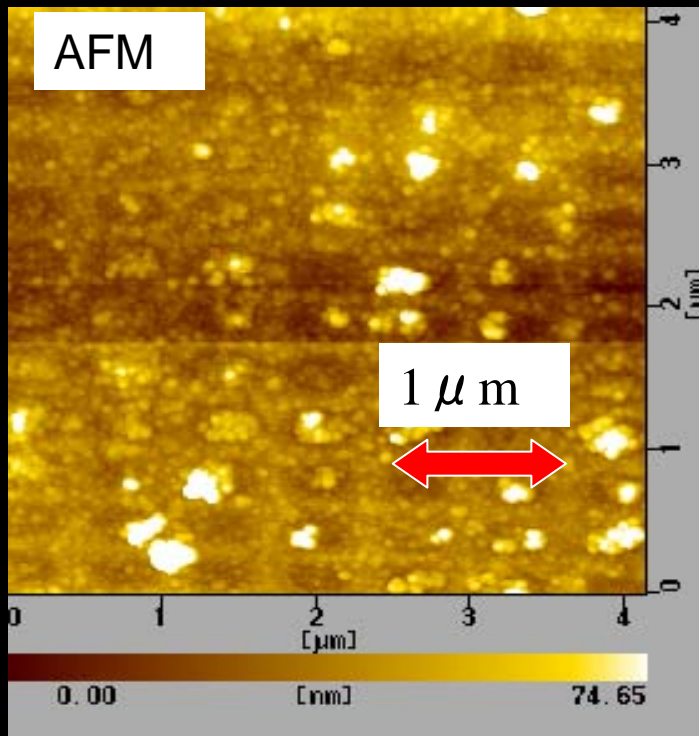
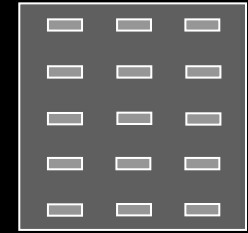
100 nm ϕ



150 nm height

Perpendicular

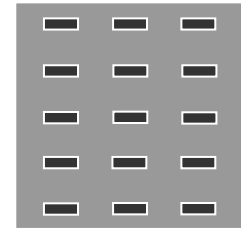
100nm×300nm 矩形ドット



AFM Line scan . . . Surface roughness~10nm

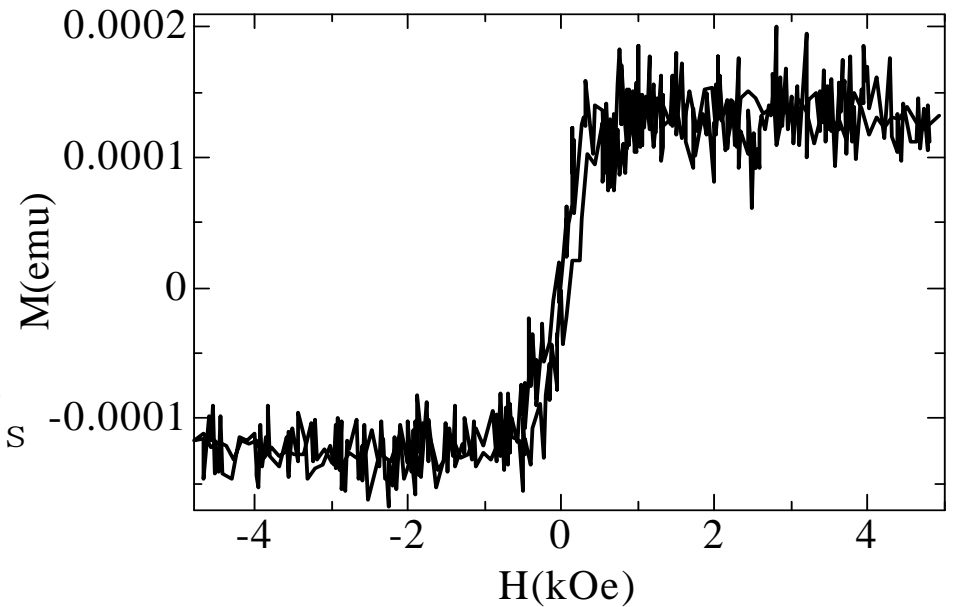
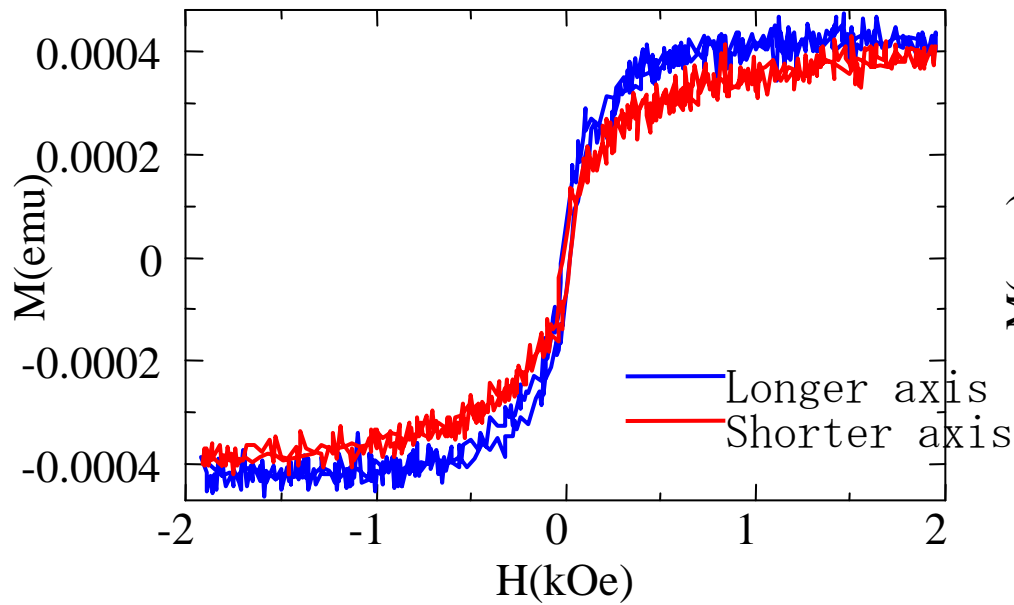
MFM image . . . magnetization axis along the longer side direction

VSM 測定

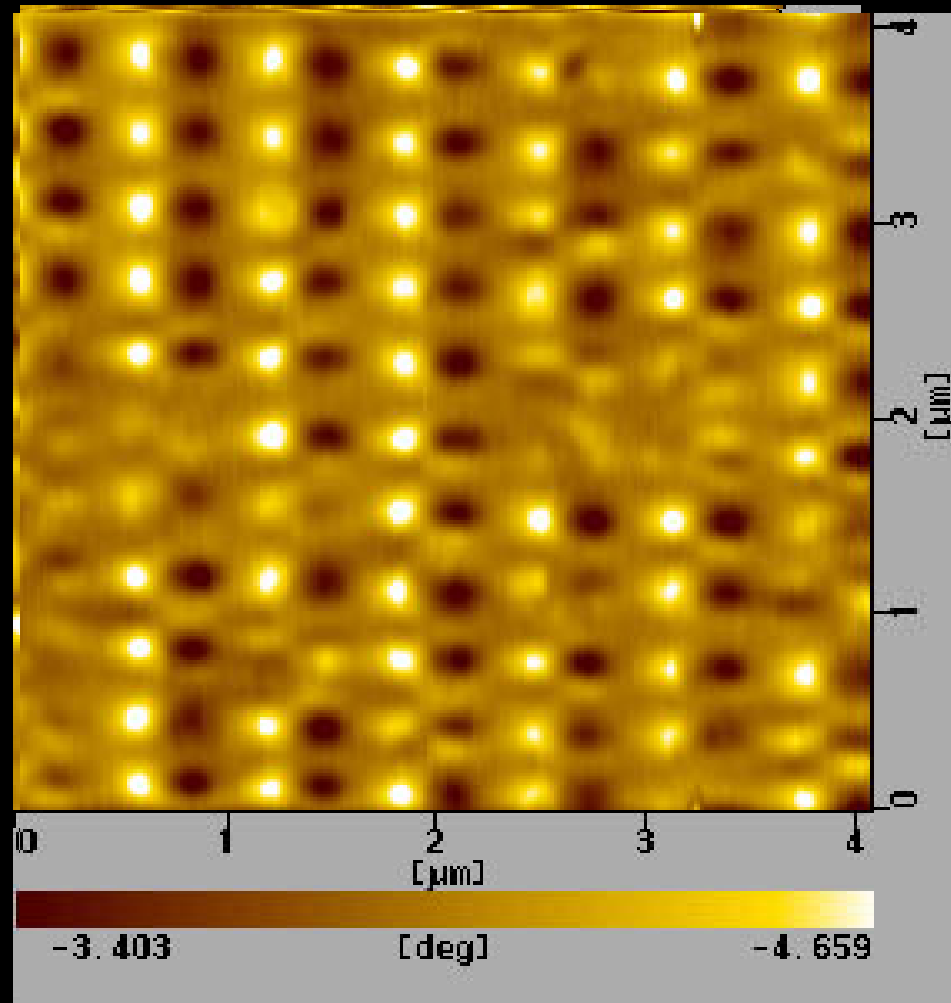


面内

面直

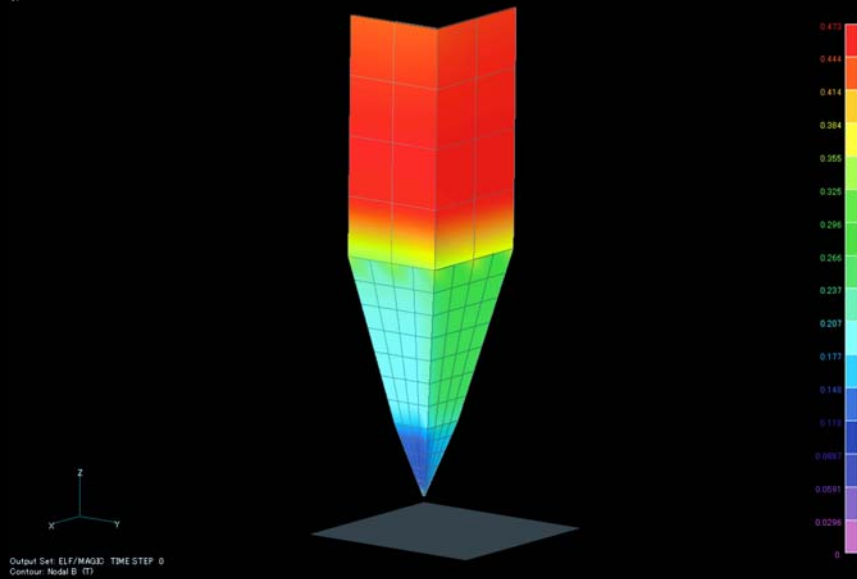


Scan-direction dependence

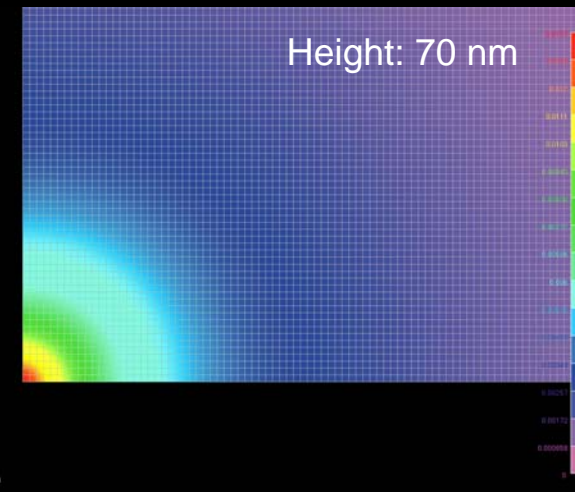
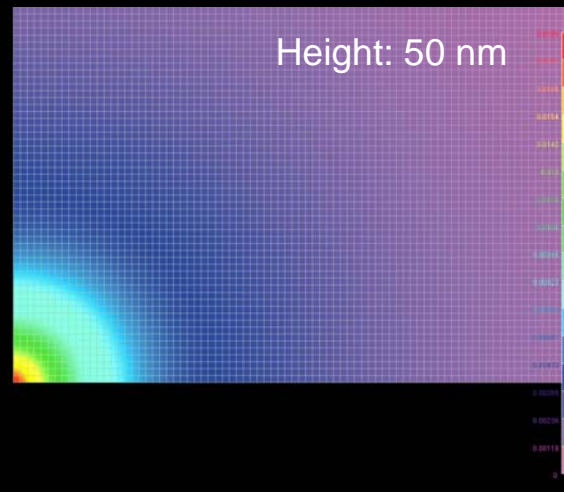
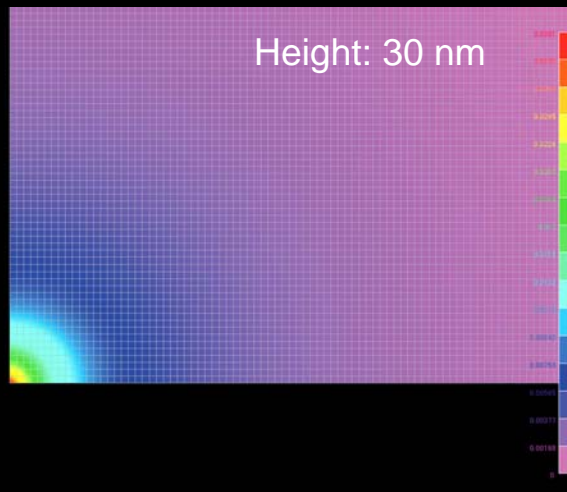


MFM チップからの洩れ磁界

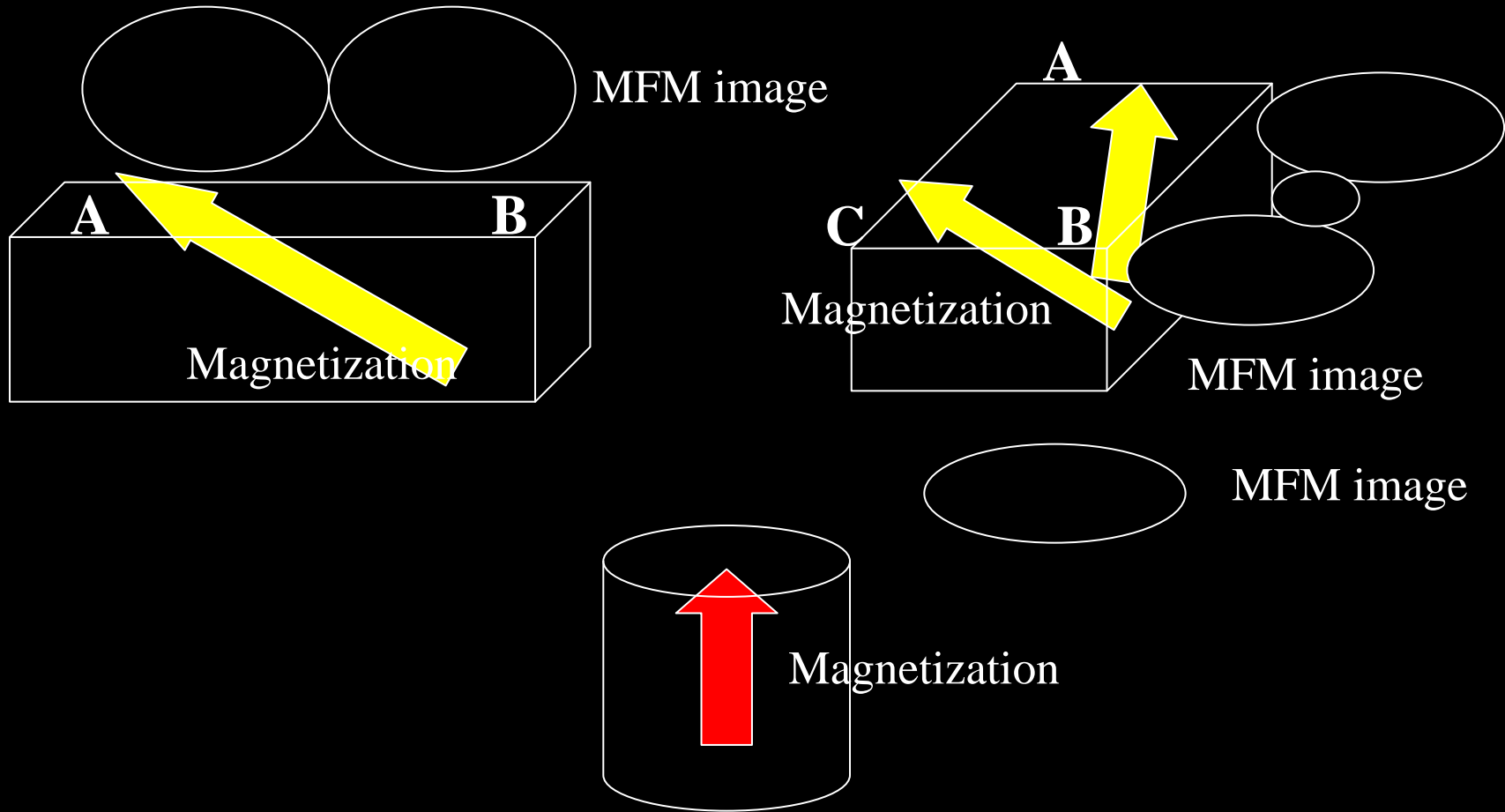
v1



- マイクロ磁気シミュレーション



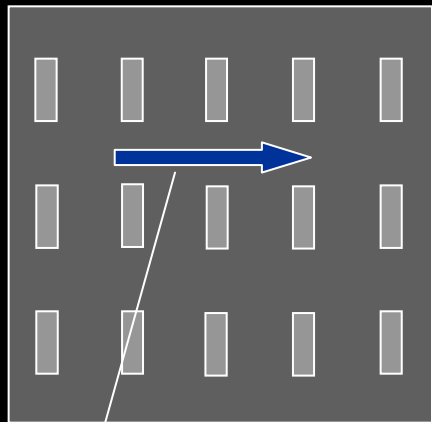
MFM画像の説明



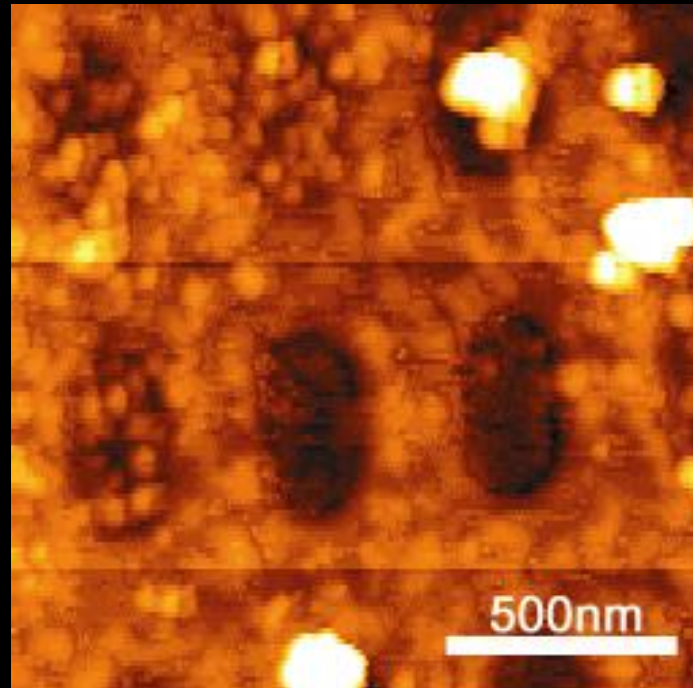
低モーメントチップによるMFM観察

- SPI-4000/SPA300HV MFM
- 低モーメントチップ (25 nm-厚 CoCrPt被覆)
- Q-制御と高真空環境

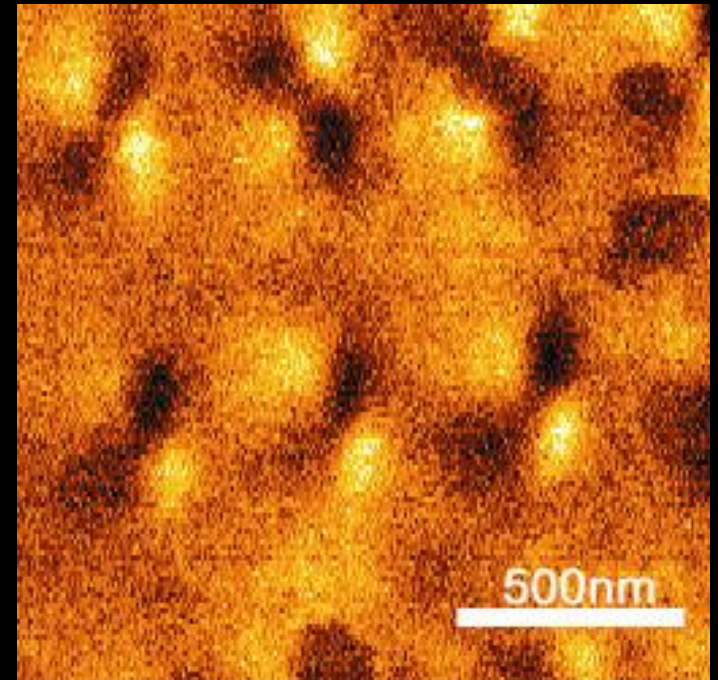
300nm x 100nm 矩形ドットのMFM像 低モーメントプローブ使用



Scan direction

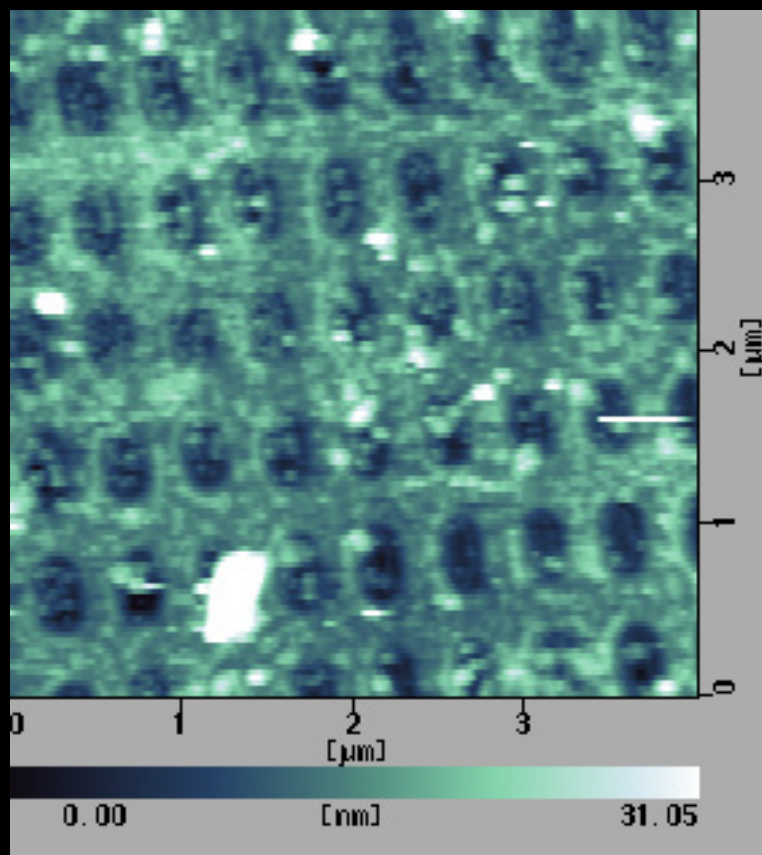


AFM

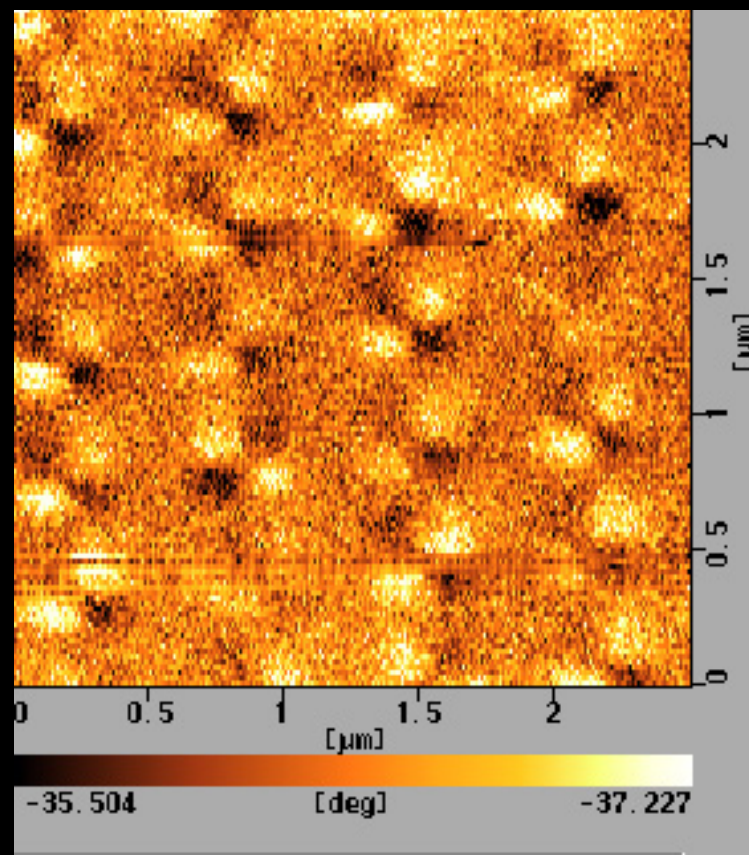


MFM

300nm x 100nm 矩形ドットのMFM像 低モーメントプローブ使用(ワイドスキャン)

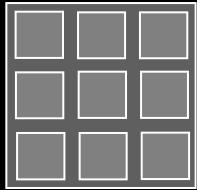


AFM

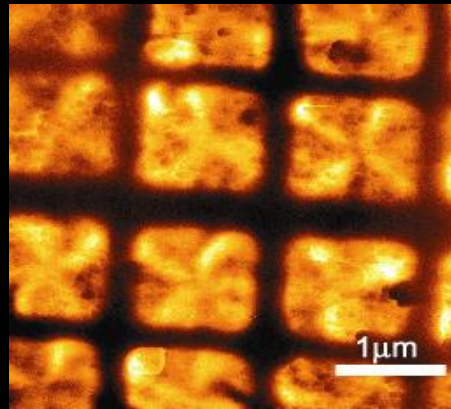


MFM

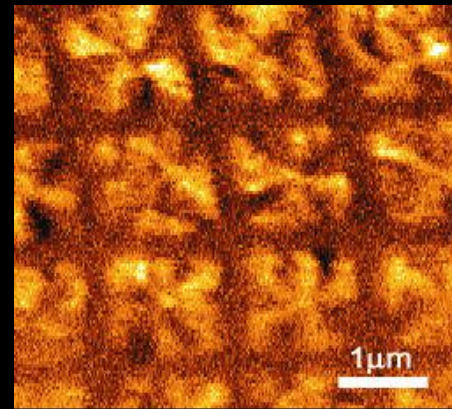
高モーメント探針と低モーメント探針の比較



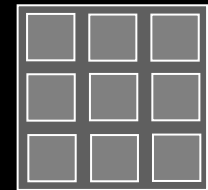
Square dots



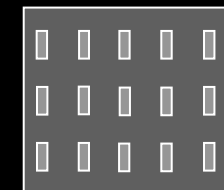
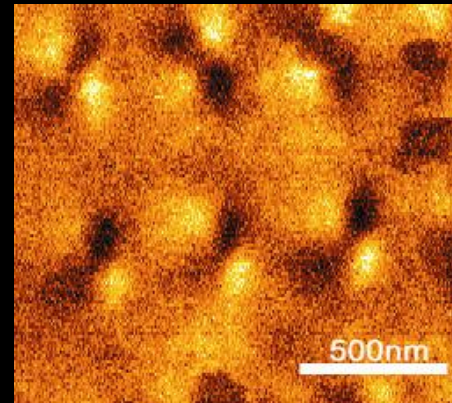
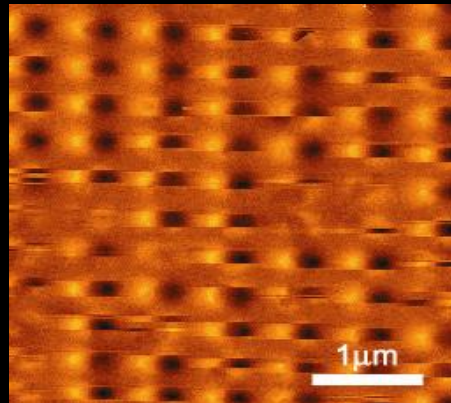
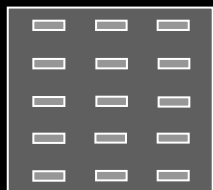
High-moment tip
(CoPtCr/50nm in Air)



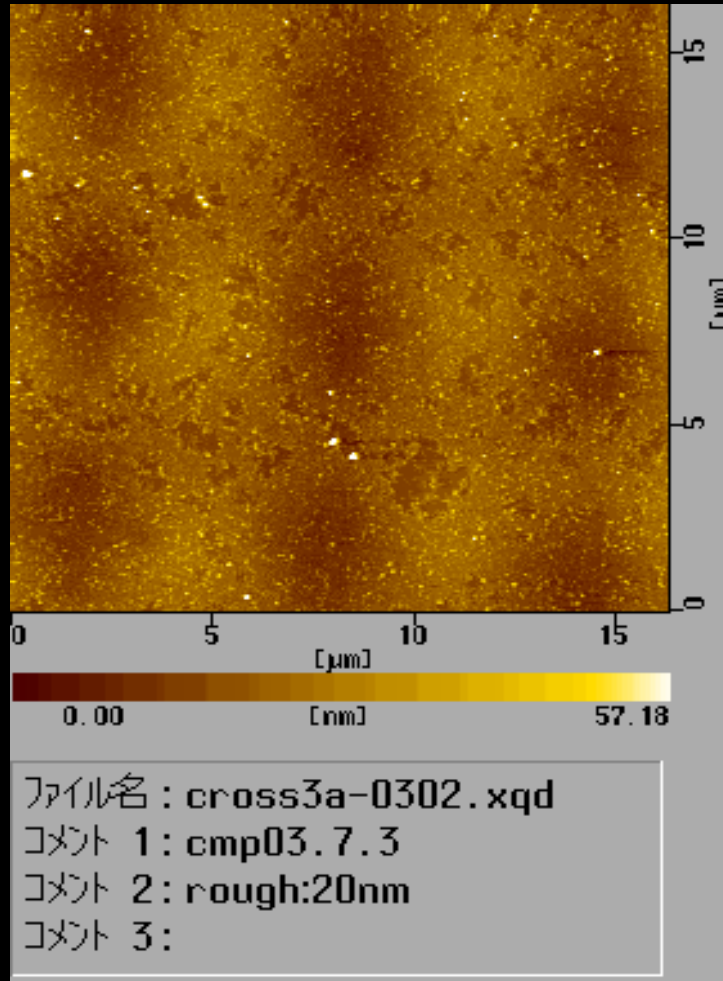
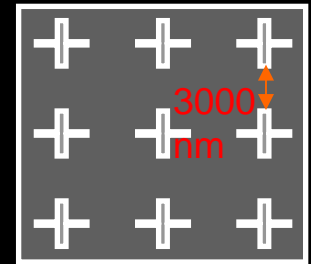
Low-moment tip
(CoPtCr/24nm in HV)



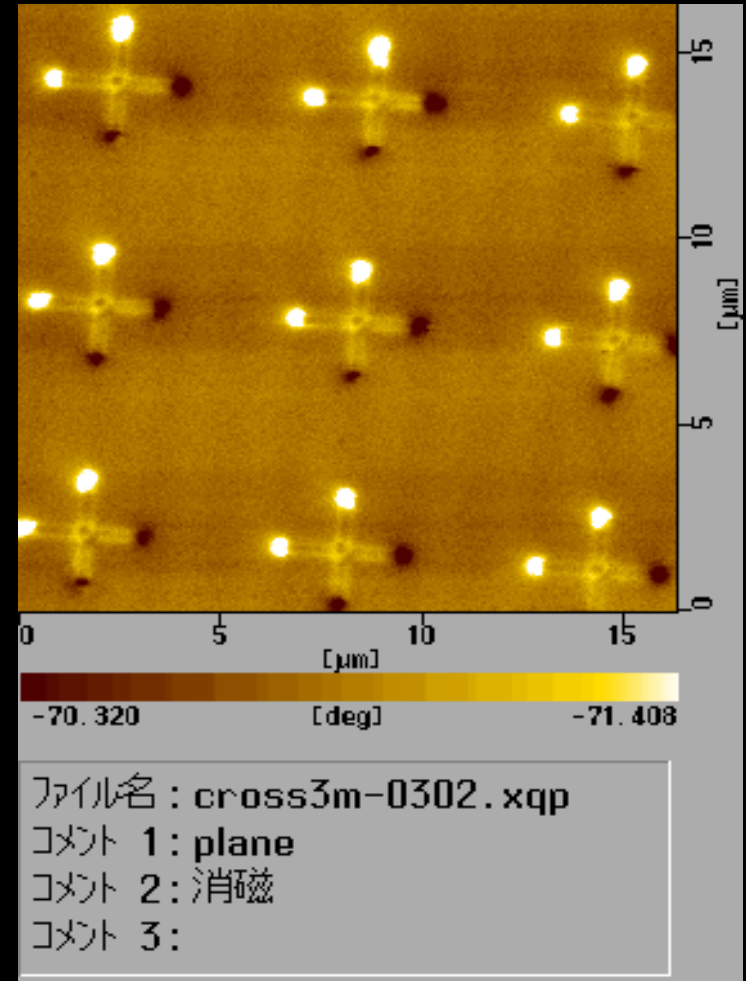
Rectangular dots



十字架パターンのAFM/MFM観察(1)

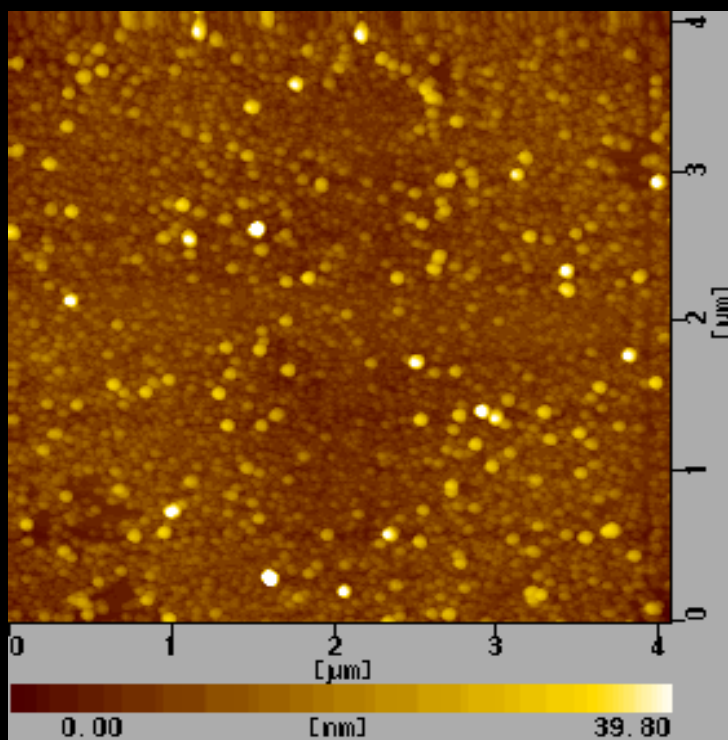
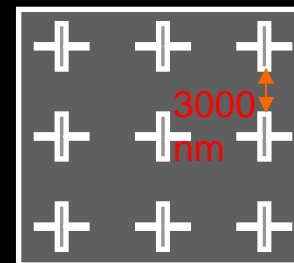


AFM



MFM

十字架パターンのAFM/MFM観察(2)



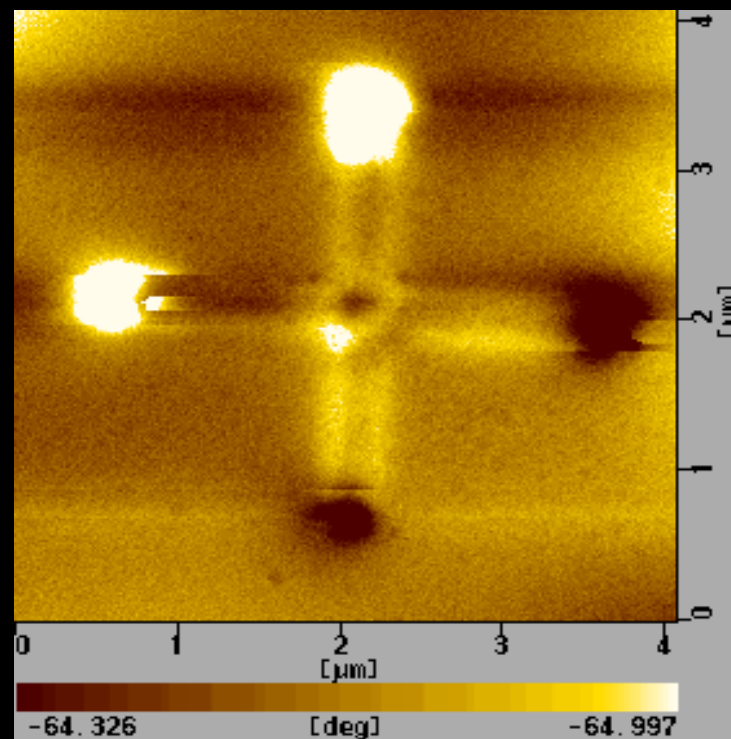
ファイル名 : cross3a-0303.xqd

コメント 1 : cmp03.7.3

コメント 2 : rough:20nm

コメント 3 :

AFM



ファイル名 : cross3m-0303.xqp

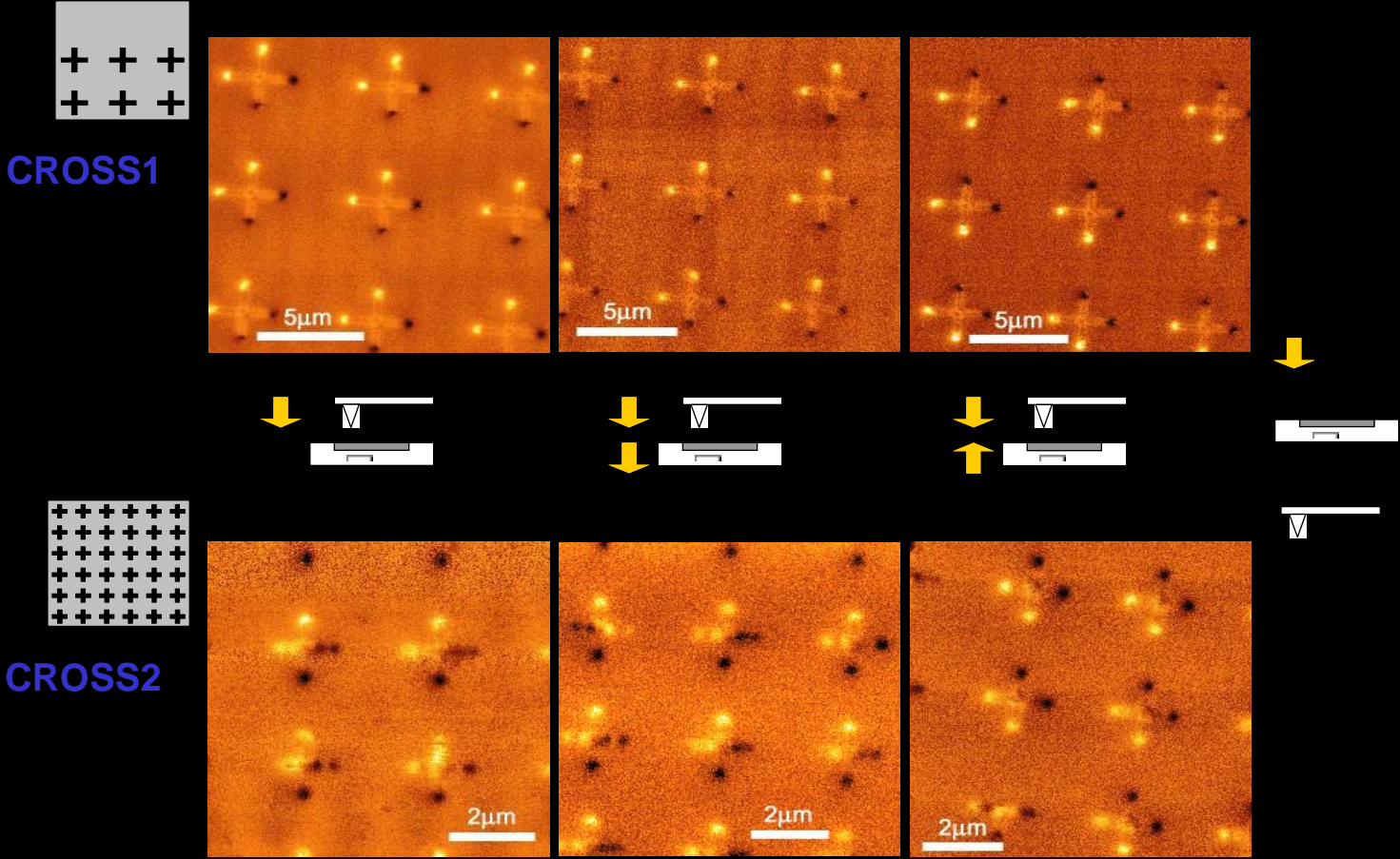
コメント 1 : plane

コメント 2 : 消磁

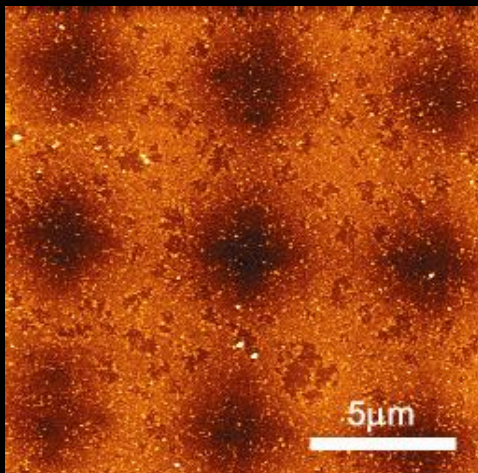
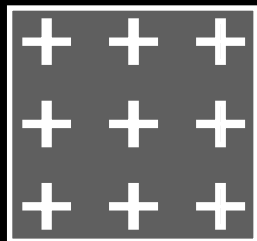
コメント 3 :

MFM

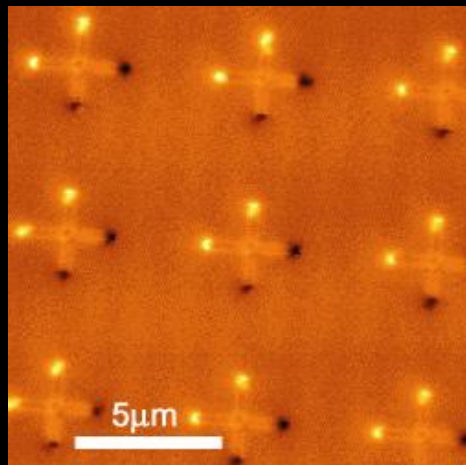
高モーメントチップによる十字架パターンのMFM像



十字架配列のAFM/MFM画像 (低モーメントチップ)

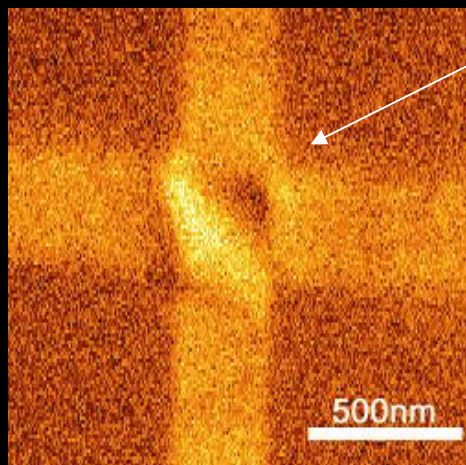
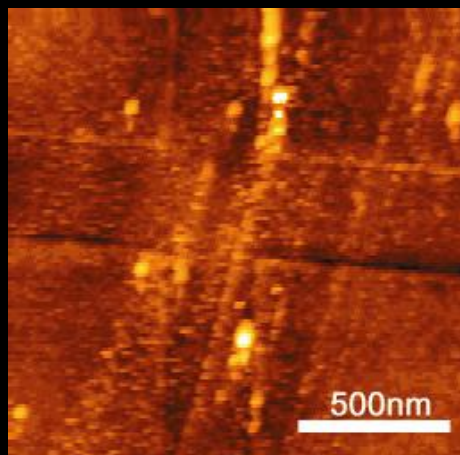


AFM image



MFM image

200nm × 3000nm
cross dots
(3000nm space)



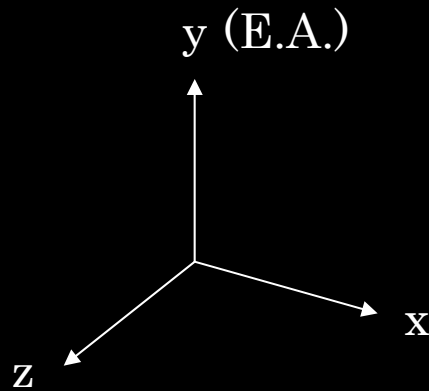
Complicated
Spin structure

Zoom up at center
of
a cross dot

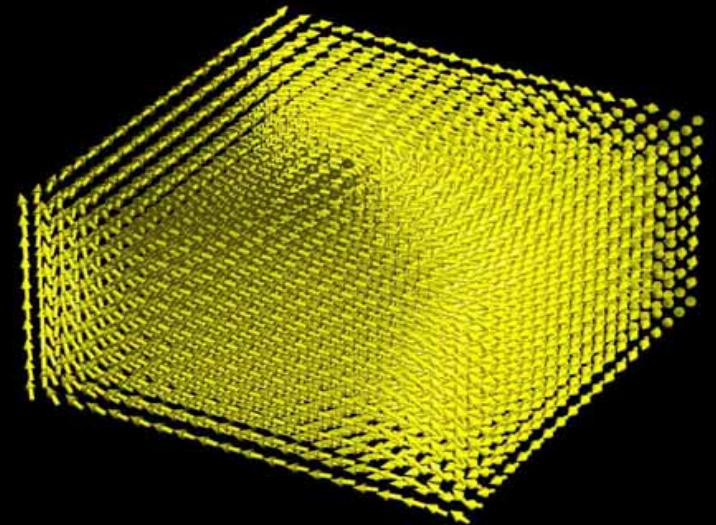
スピン分布のシミュレーション

正方形ドット

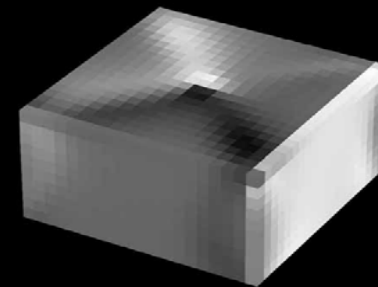
Micromagnetic simulation using LLG



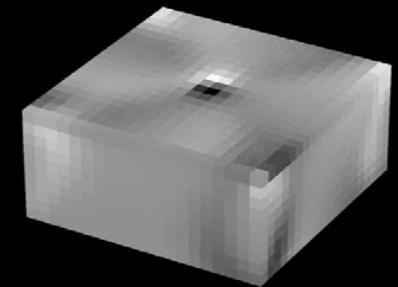
$$H_y = 10 \text{ kOe} \rightarrow 0 \text{ Oe}$$



Saturation magnetization (Ms)	800 emu/cm ³
Exchange field (A)	1 × 10 ⁻⁶ erg/cm ³
Anisotropic constant (Ku)	1000 erg/cm ³
Gyro magnetic constant (γ)	-1.76 × 10 ⁷ rad/(s · Oe)
Damping constant (α)	0.2
Easy axis	Y direction
Dot Size	200 nm × 200 nm × 100 nm
Number of dot	1
Mesh size	10 nm × 10 nm × 10 nm

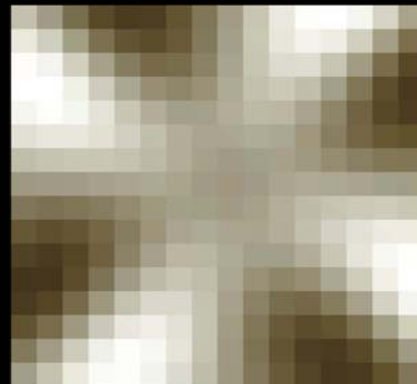
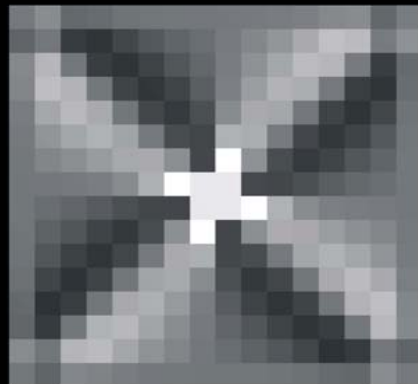
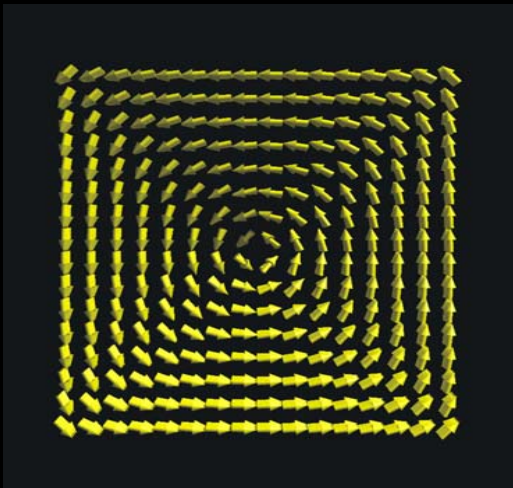


div M

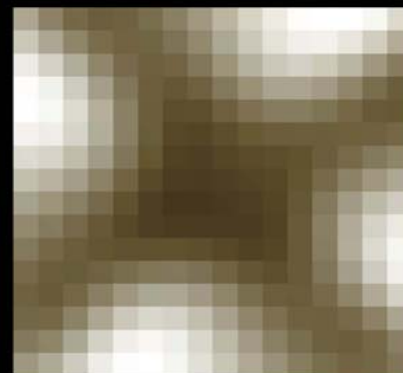
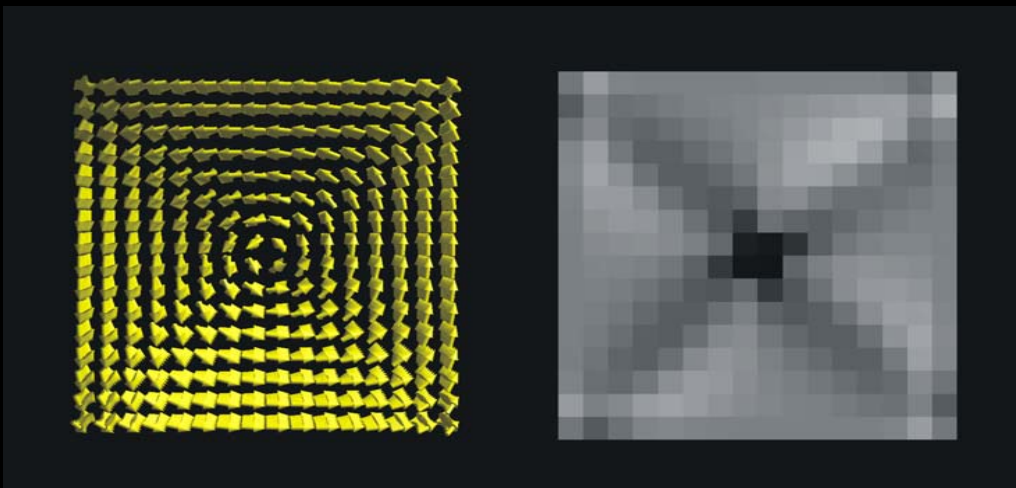


div M_y

200 x 200
x t50 nm



200 x 200
x t100 nm

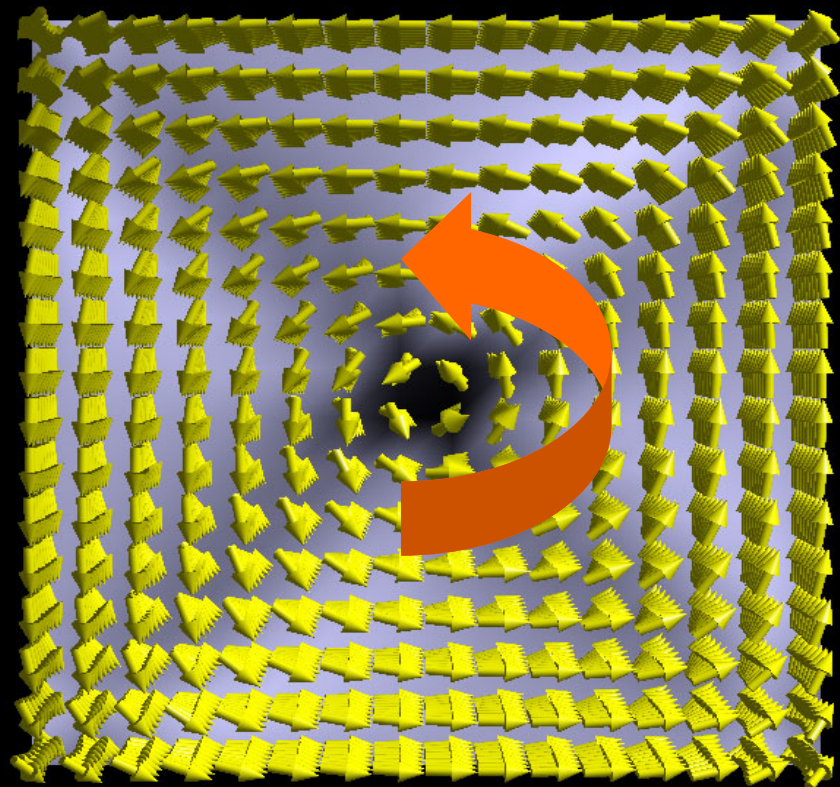


磁化

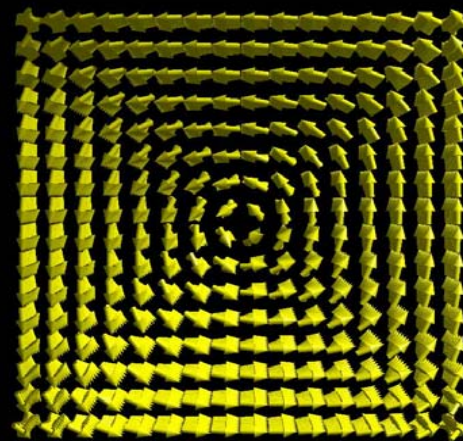
- dv M

平均勾配

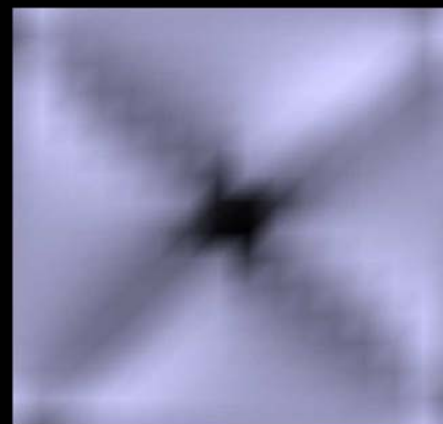
単一ドットの計算



Calculation of a single dot



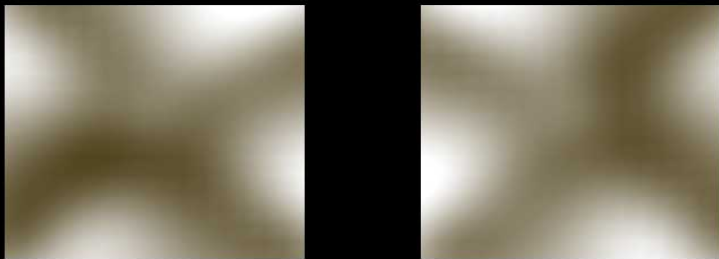
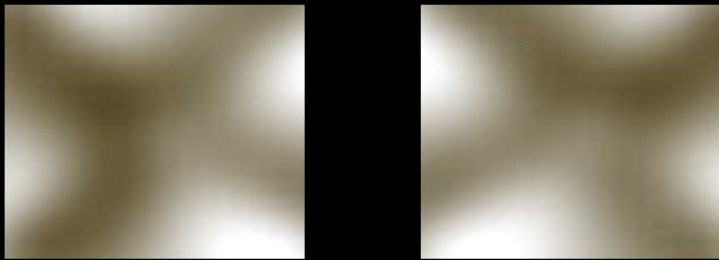
スピン構造



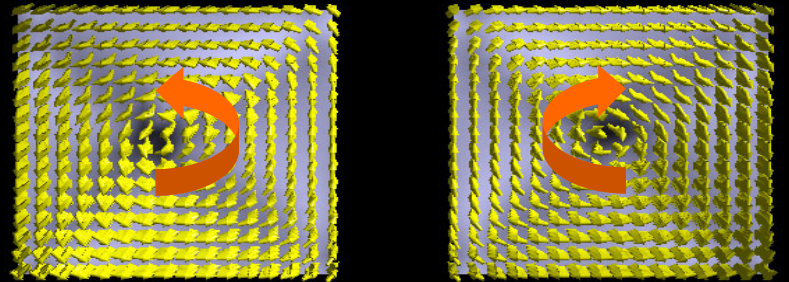
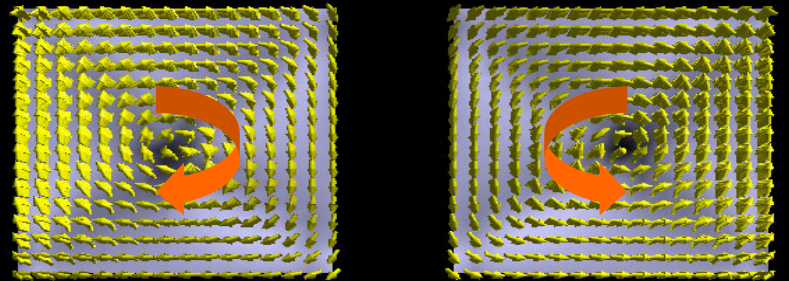
$-\text{divM}$

隣接4ドットの計算

環流磁区の中心の移動

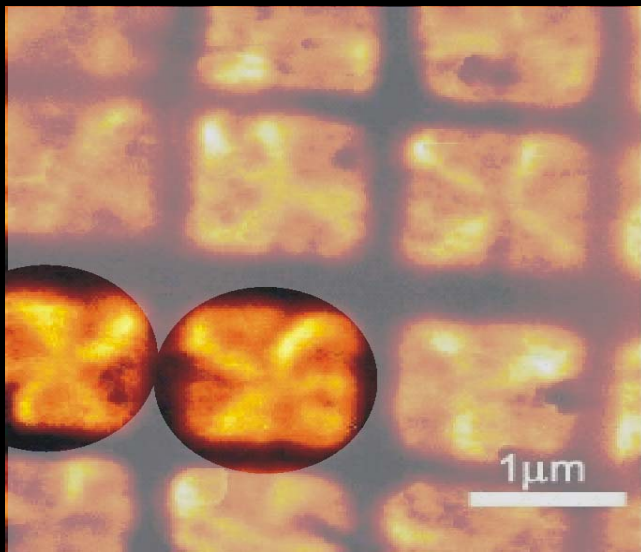


Force gradient image

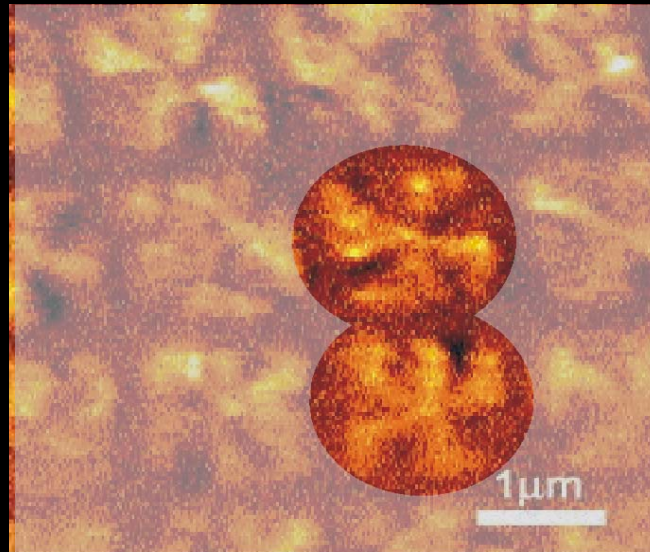


Spin distribution image

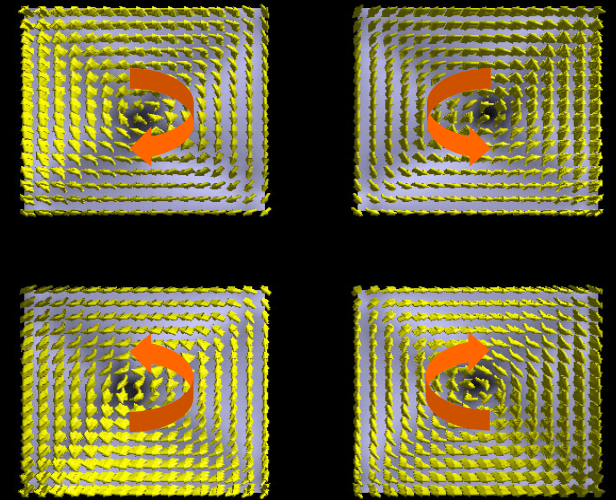
MFM像とスピン分布像の比較



High-moment tip
(CoPtCr/500 Å in Air)



Low-moment tip
(CoPtCr/240 Å in HV)



Spin distribution image

キラリティの反転

結論1

- 隣接ドット間に働く静磁的相互作用により、環流磁区の90度磁壁にプロペラ型の歪み
⇒ マイクロ磁気解析により正方形ドットにおけるキラリティ制御を説明

スピン分布の理論解析

十字架ドットの計算

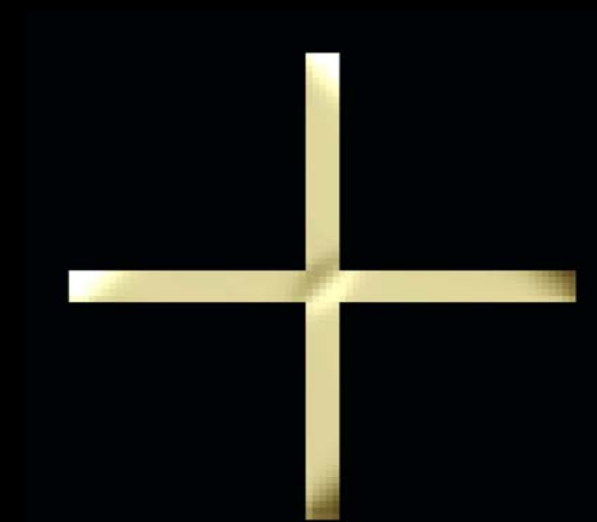
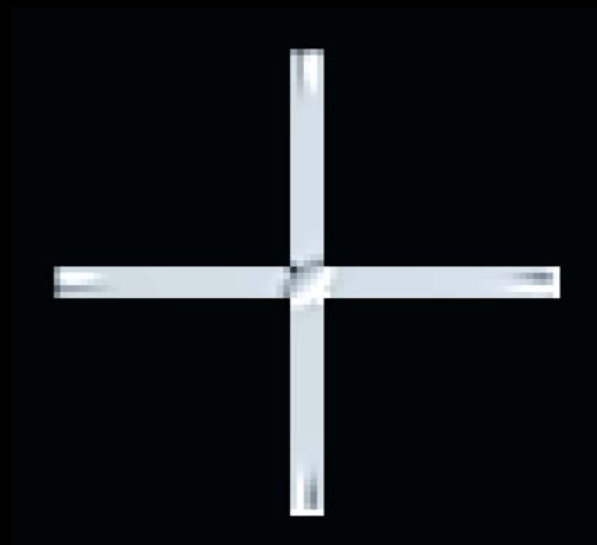
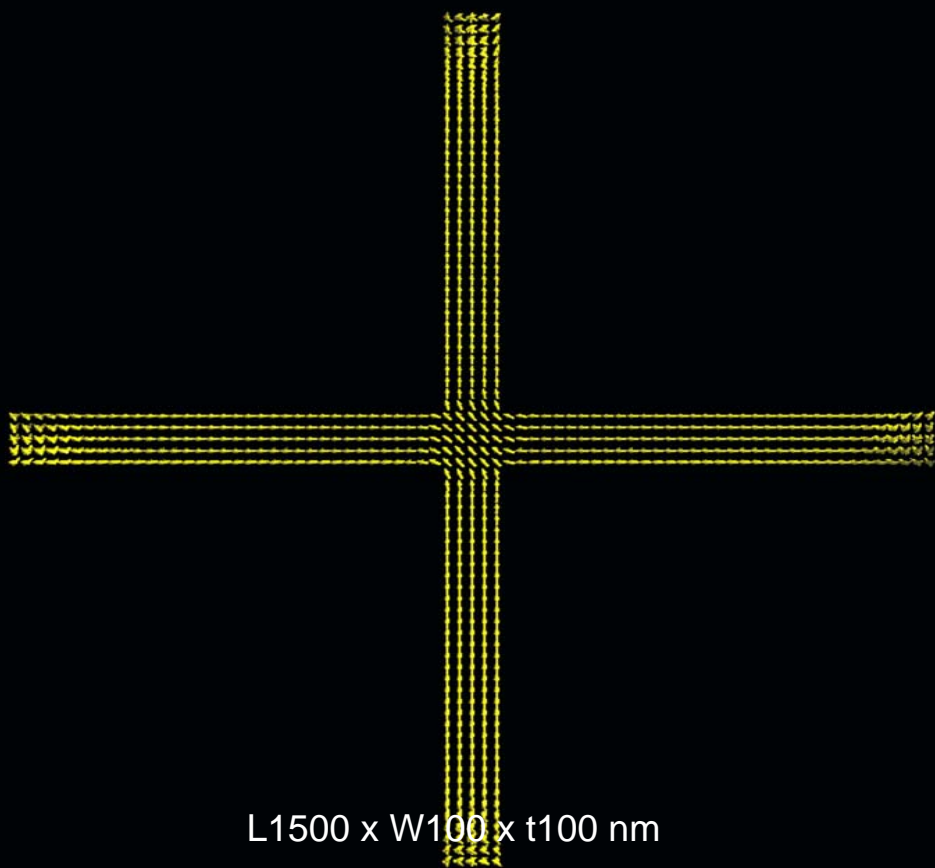
LLGシミュレーション

$$\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = |\gamma| (\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{eff}) + \frac{\sigma}{M_s} \mathbf{M} \times \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t}$$

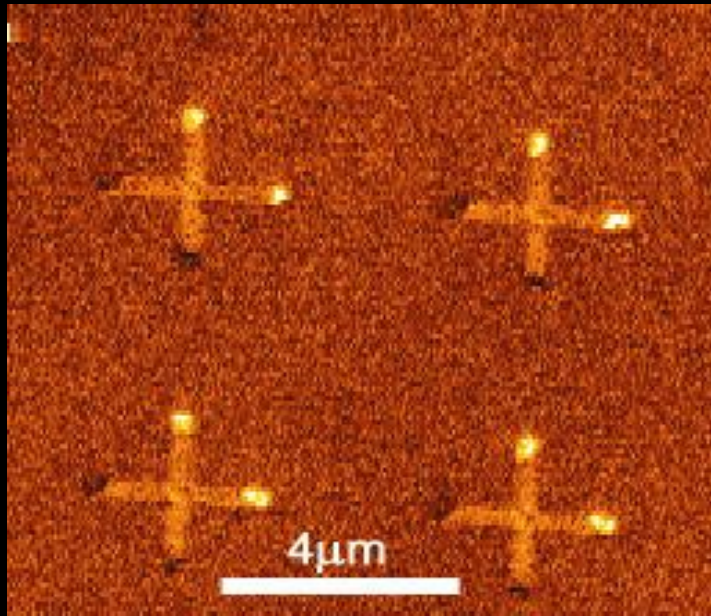
- σ : Damping constant
- H_{eff} : Effective field
- M_s : Saturation magnetization

- $M_s = |\mathbf{M}|$, $\mathbf{M} \cdot \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = 0$

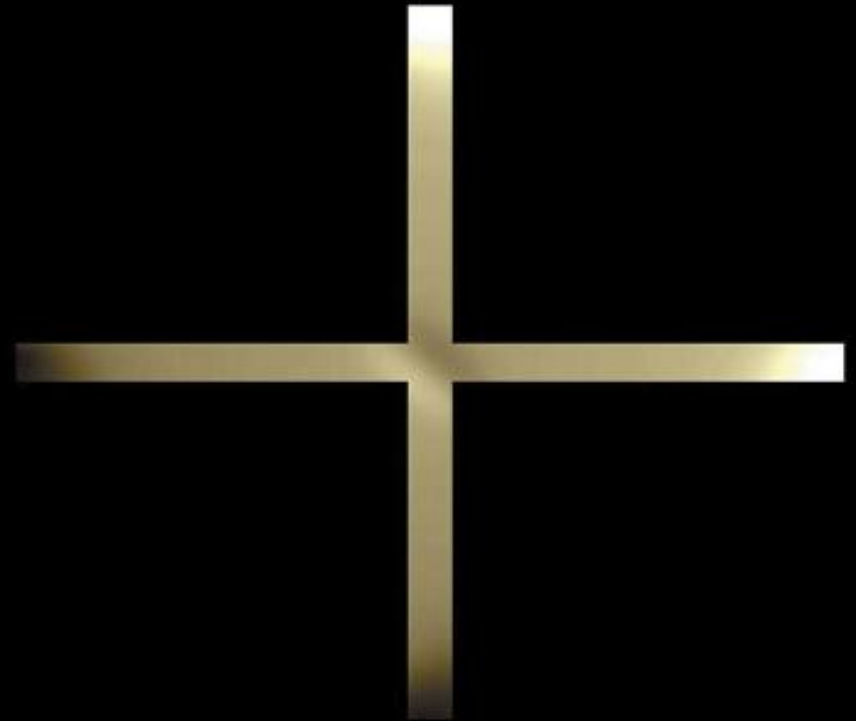
結果



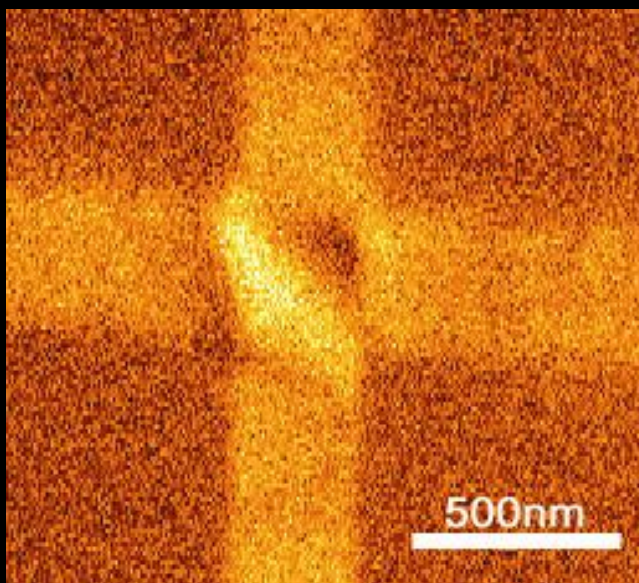
MFM像と力勾配像の比較



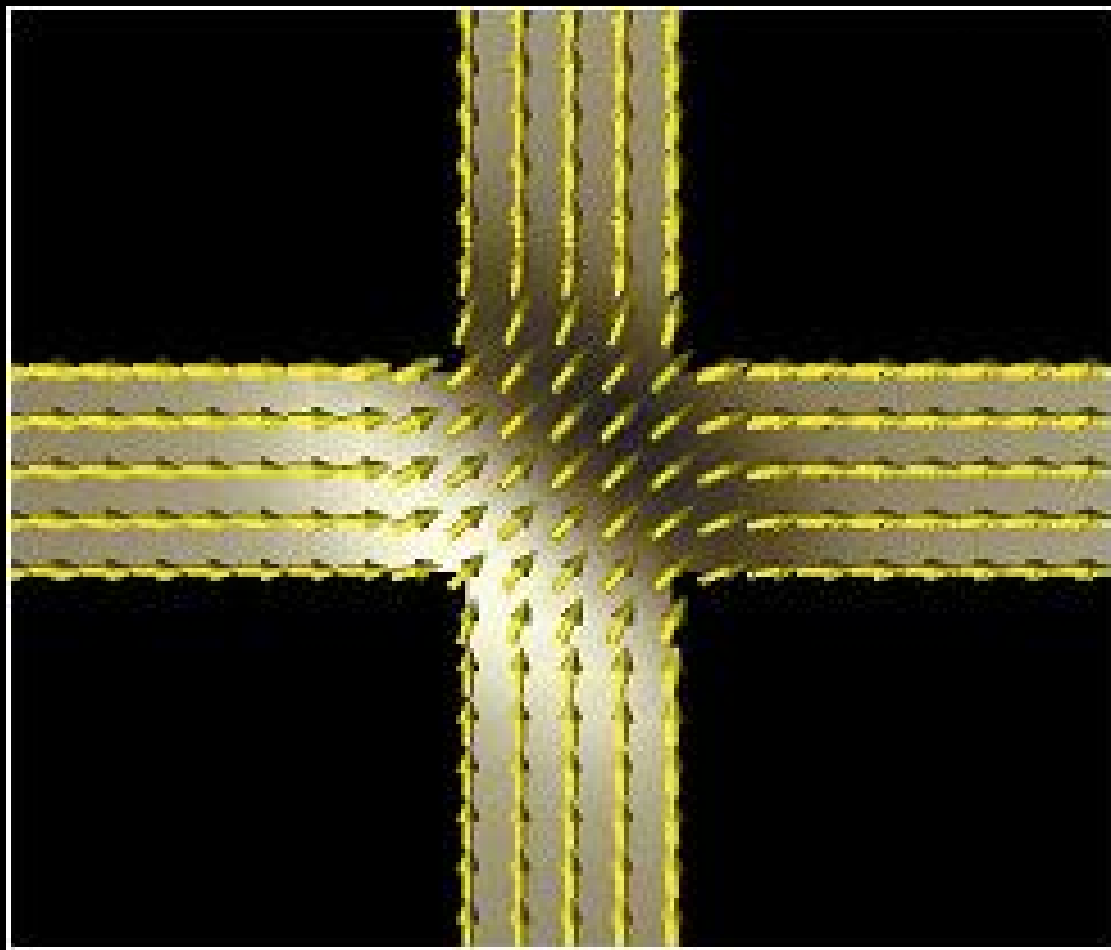
Low-moment tip
(CoPtCr/240 Å in HV)



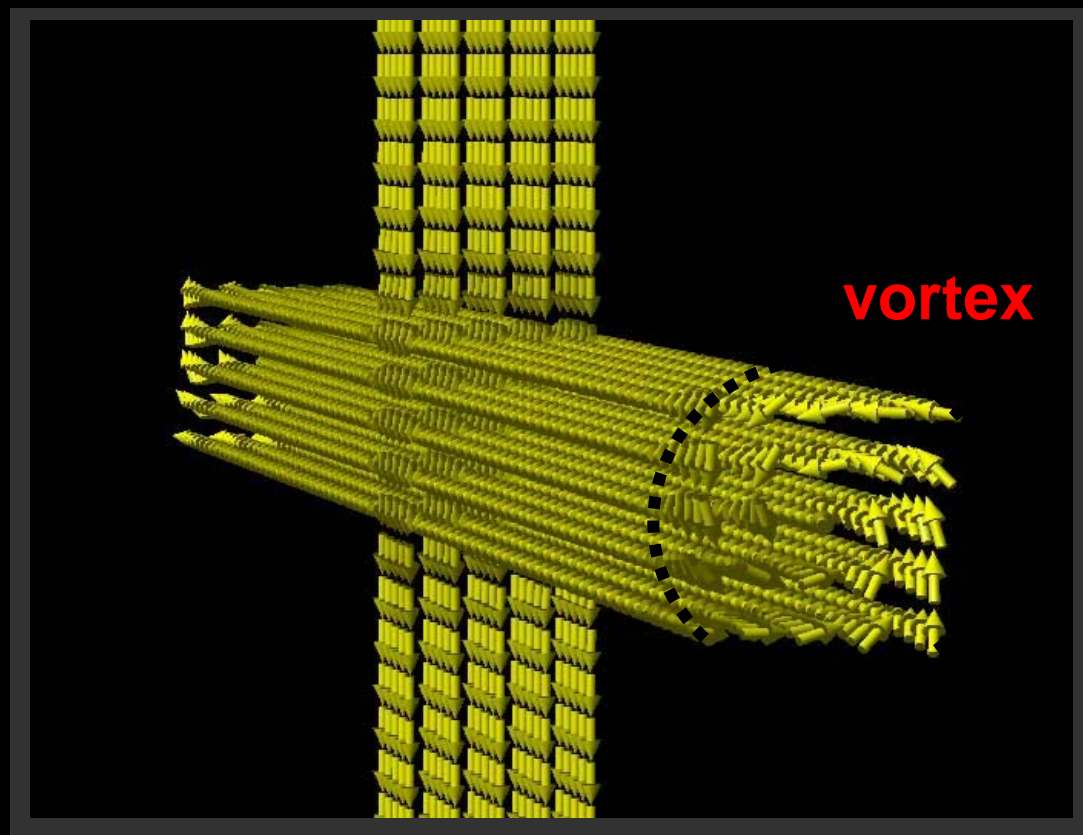
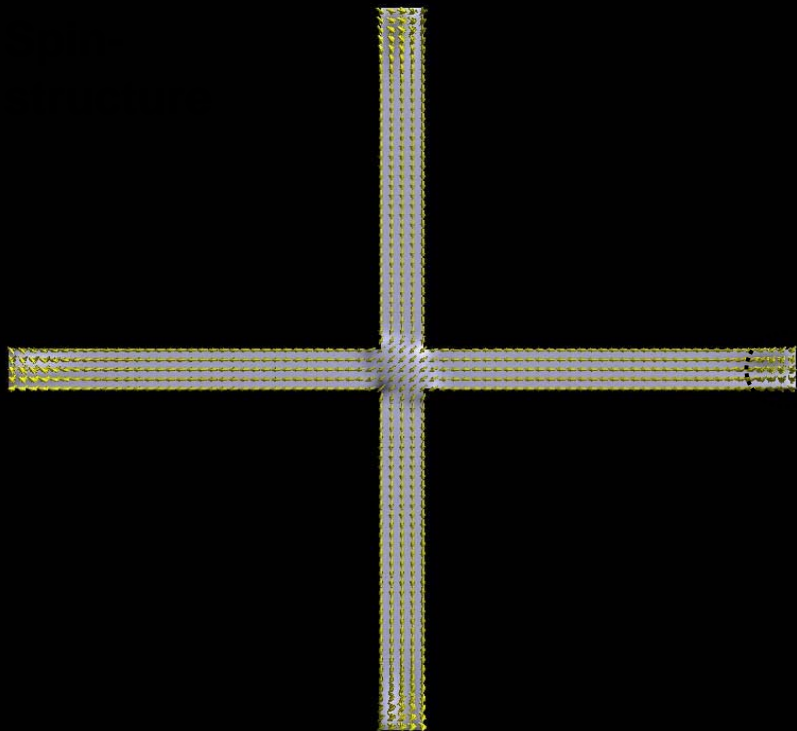
交差領域における力の勾配像とスピン分布図



Low-moment tip
(CoPtCr/240 Å in HV)



十字架パターンのマイクロ磁気解析

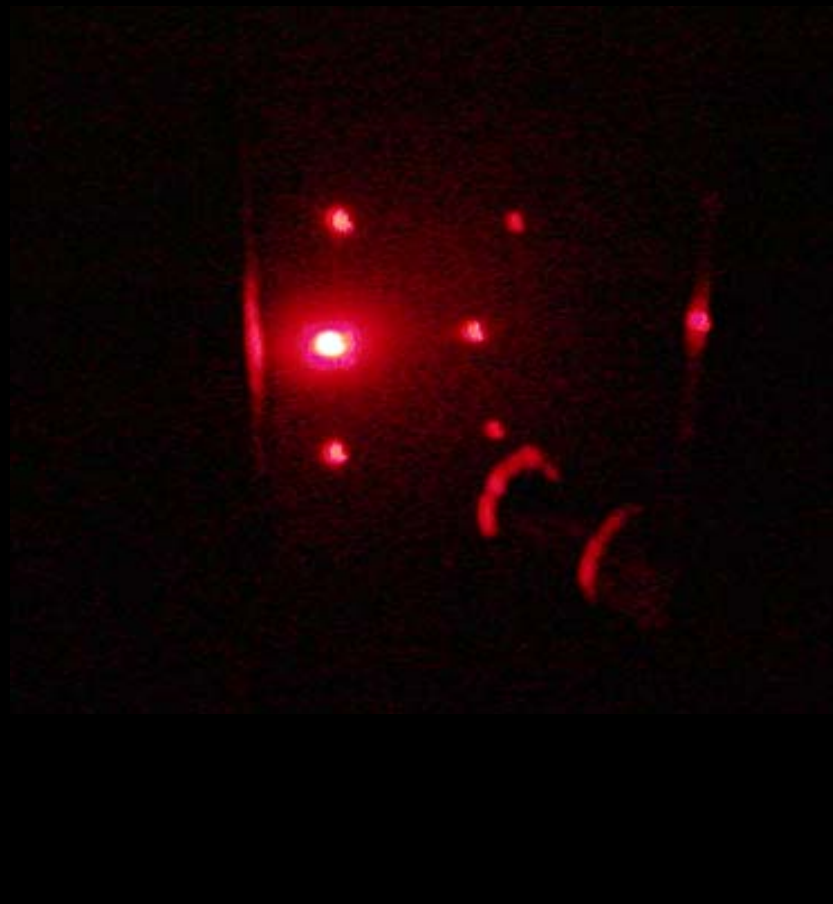
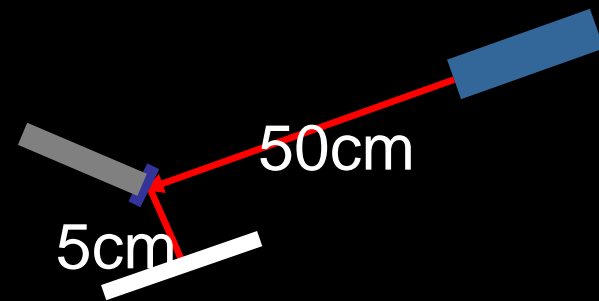


結論 2

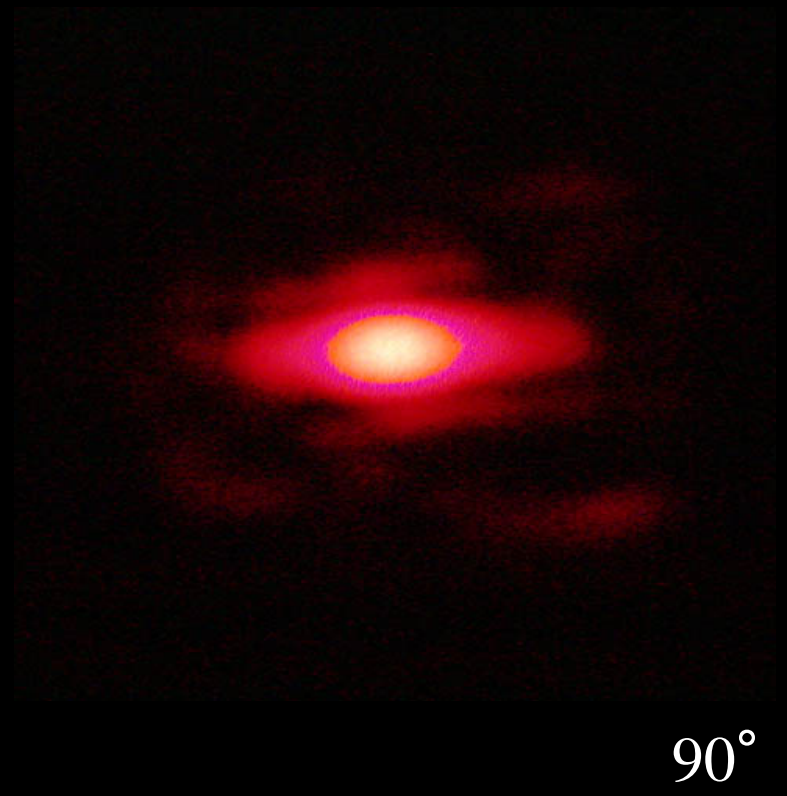
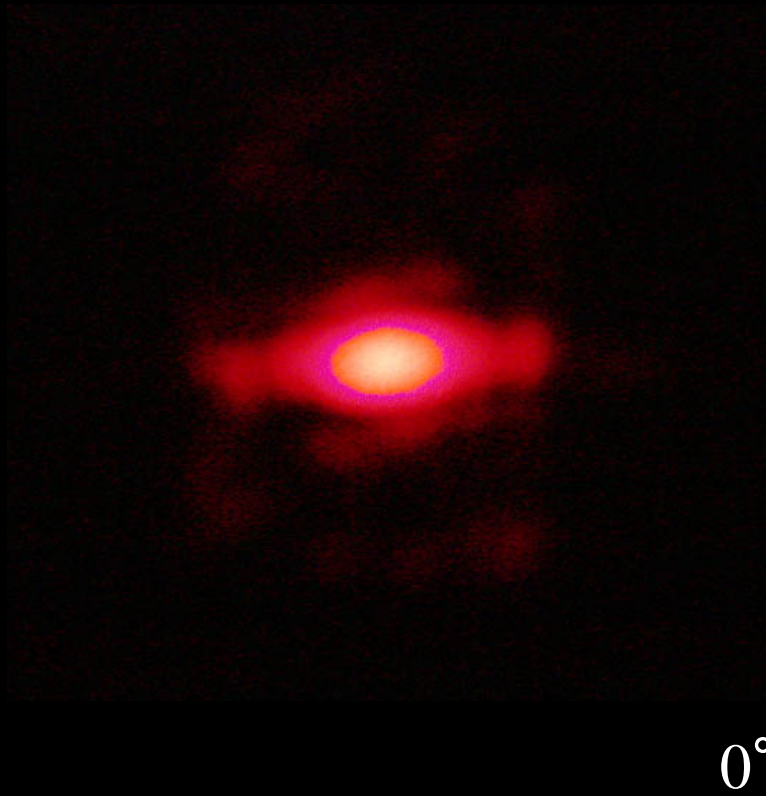
- MFM 画像はバーの両端に同じ方向にそろったイメージを示す
 - ⇒ 静磁的相互作用を考慮する必要あり。
 - ⇒ バーの両端にはボルテックスが現れる。
- 交差領域では
 - ⇒ 斜めに分割された明暗が観測される

光学的評価

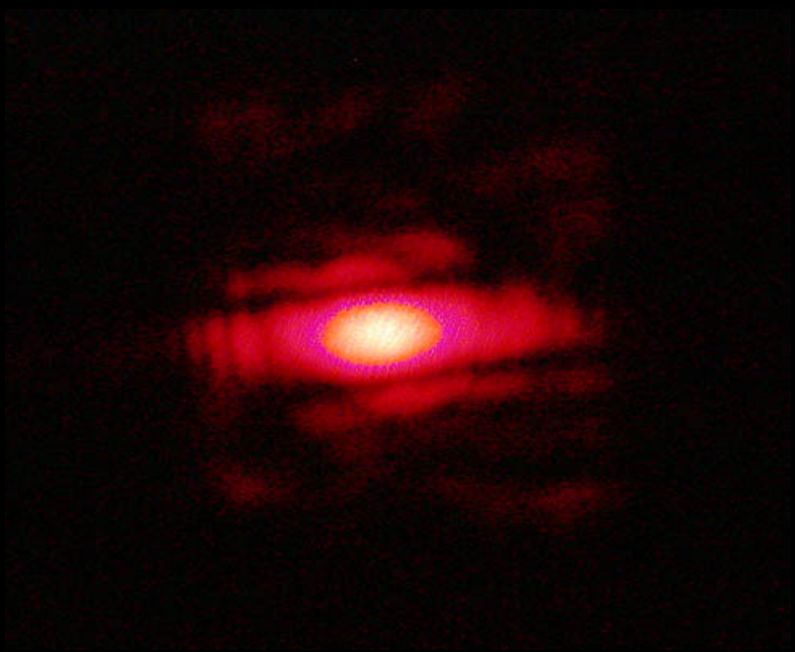
Square dot array



Circular dot array



Rectangular dot array

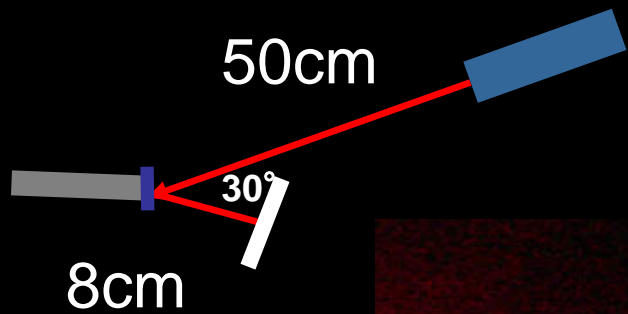


0°

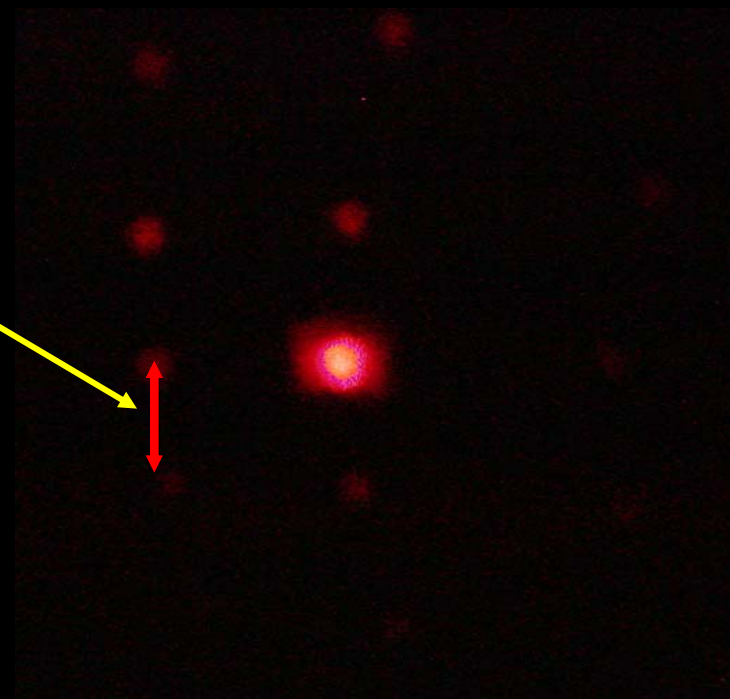


90°

Cross1 (empty dots)



1.5cm



camera



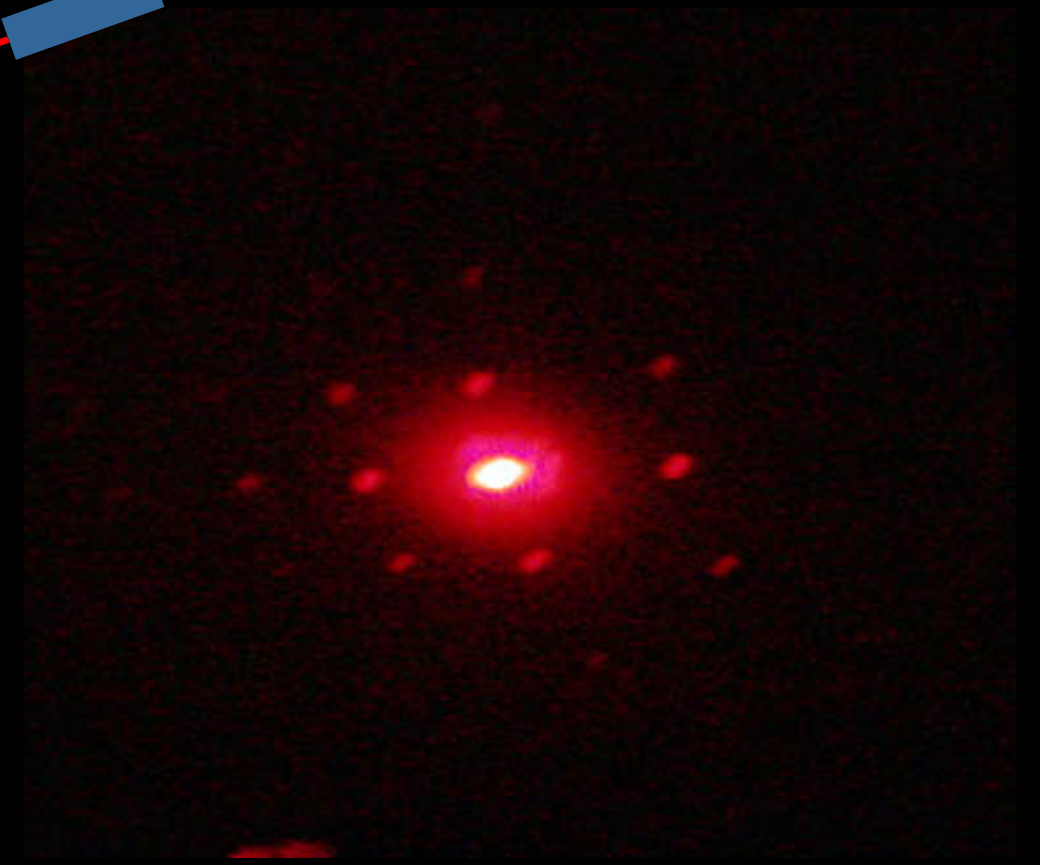
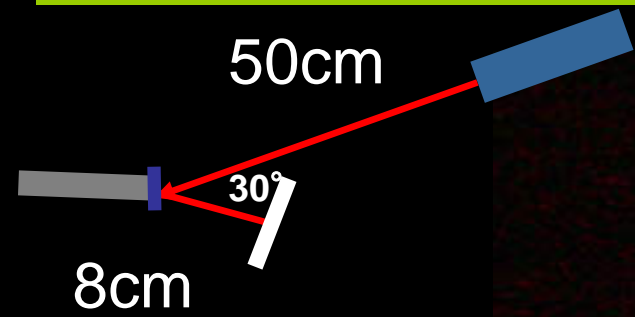
screen

camera

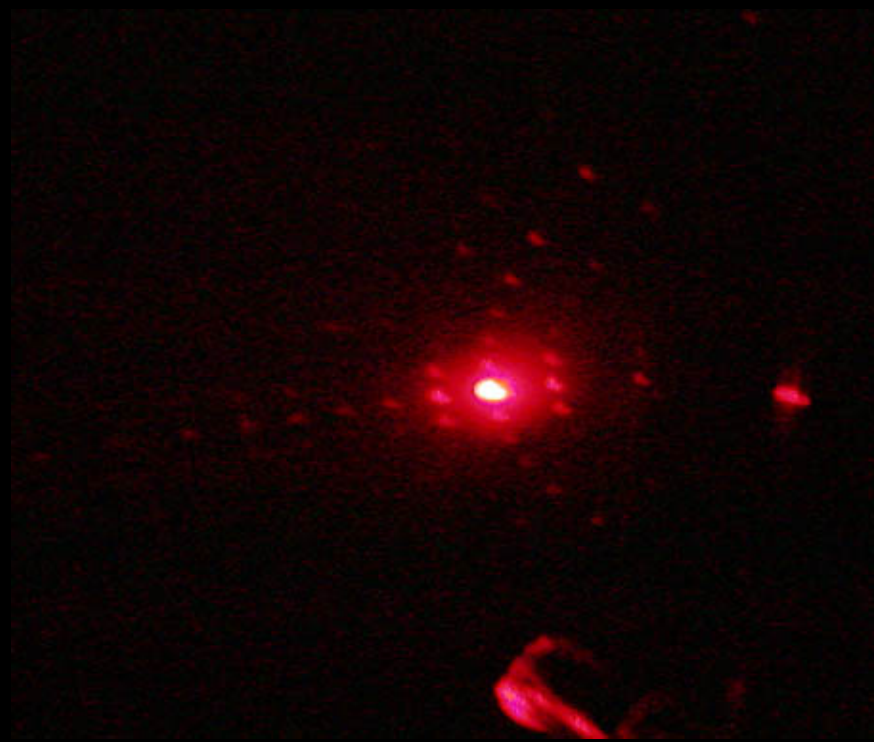
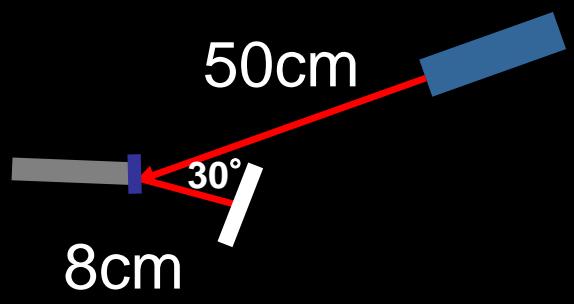
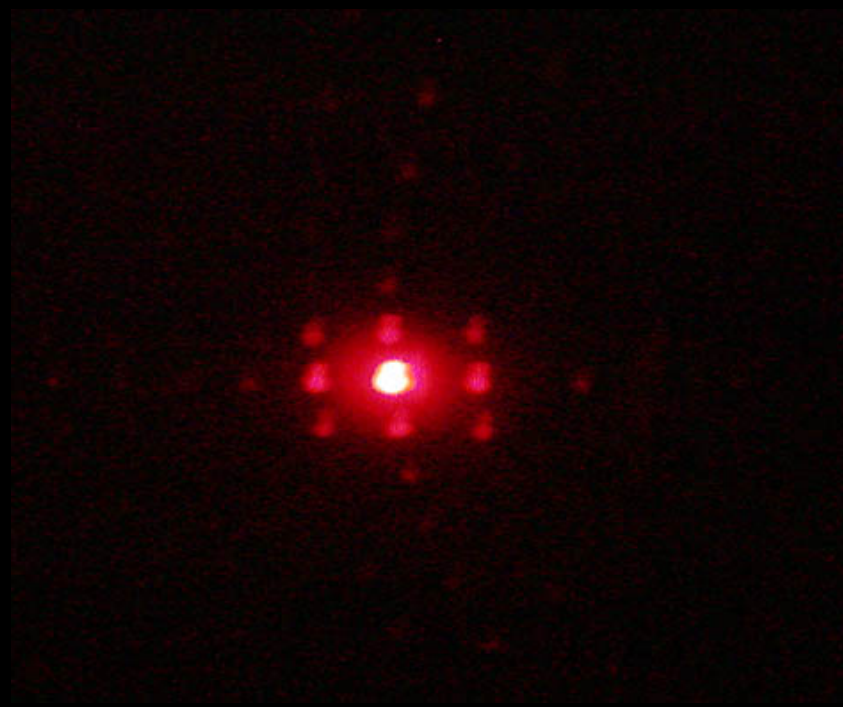
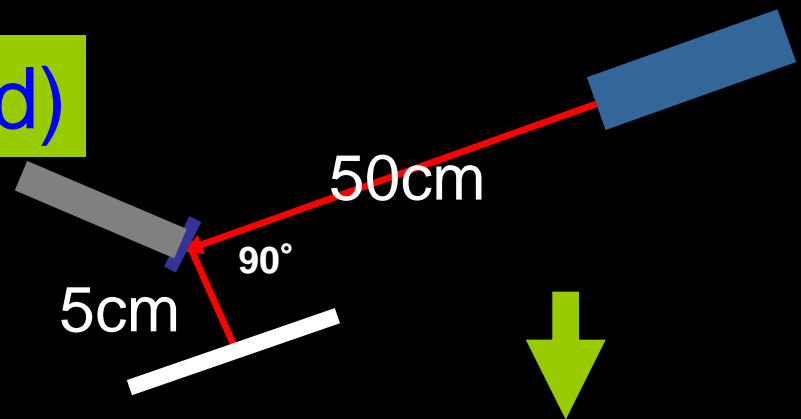


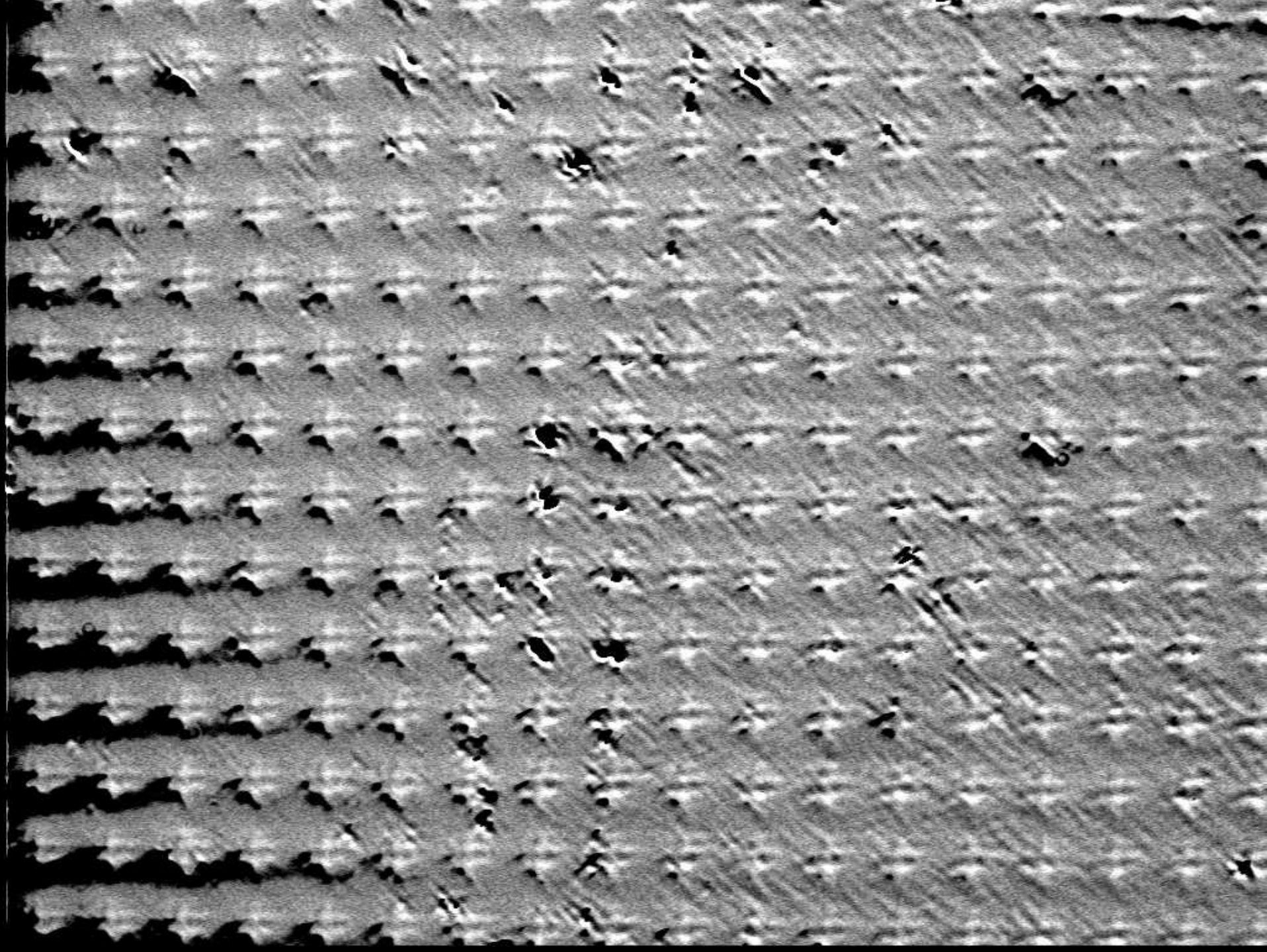
screen

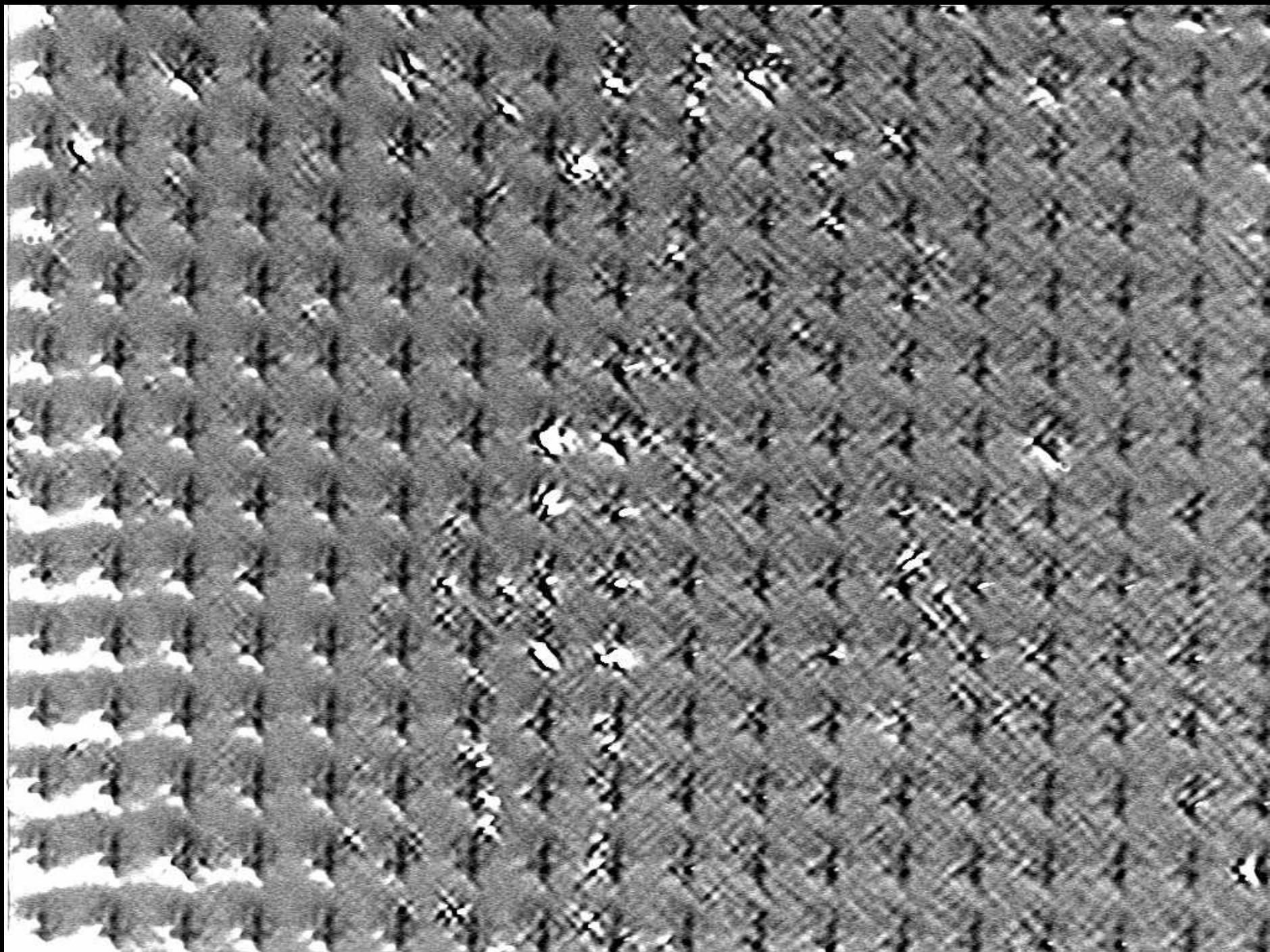
Cross1 (permalloy embedded)



Cross3 (permalloy embedded)



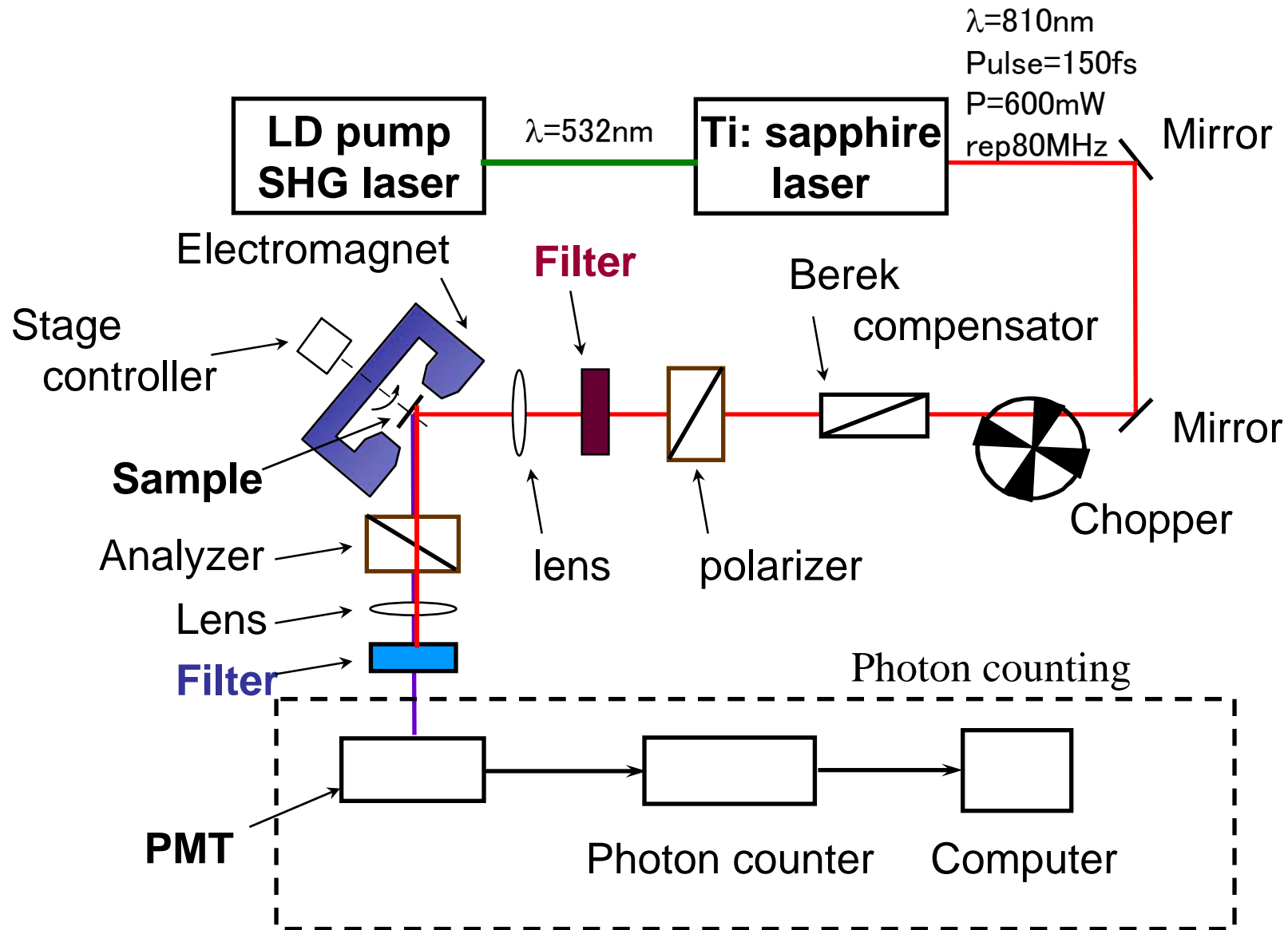


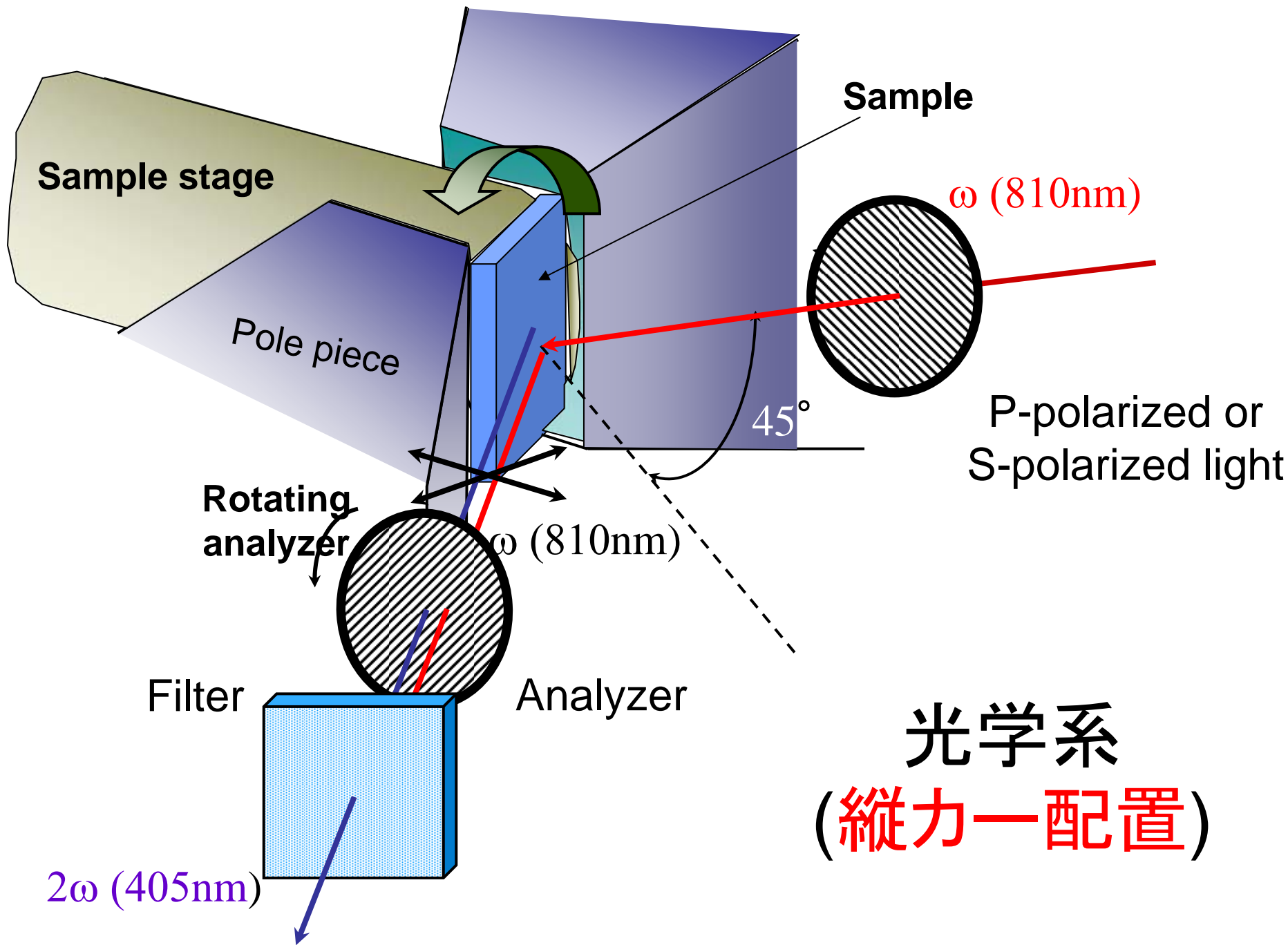


非線形光学

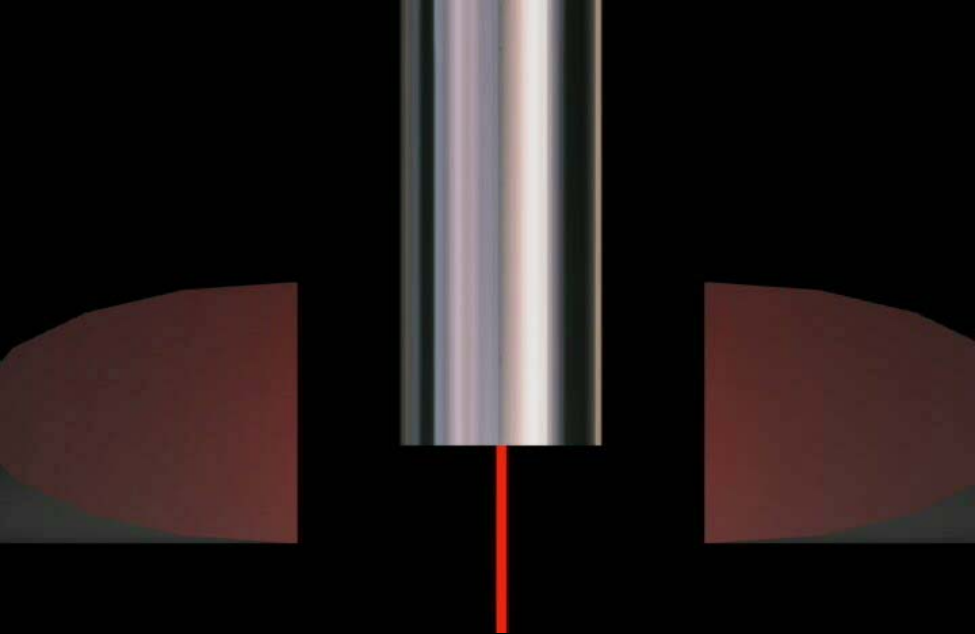
- Azimuthal SHG pattern with symmetry of dot array structure
- Magnetization-induced SHG?
- Nonlinear Kerr effect

MSHG Measuring System



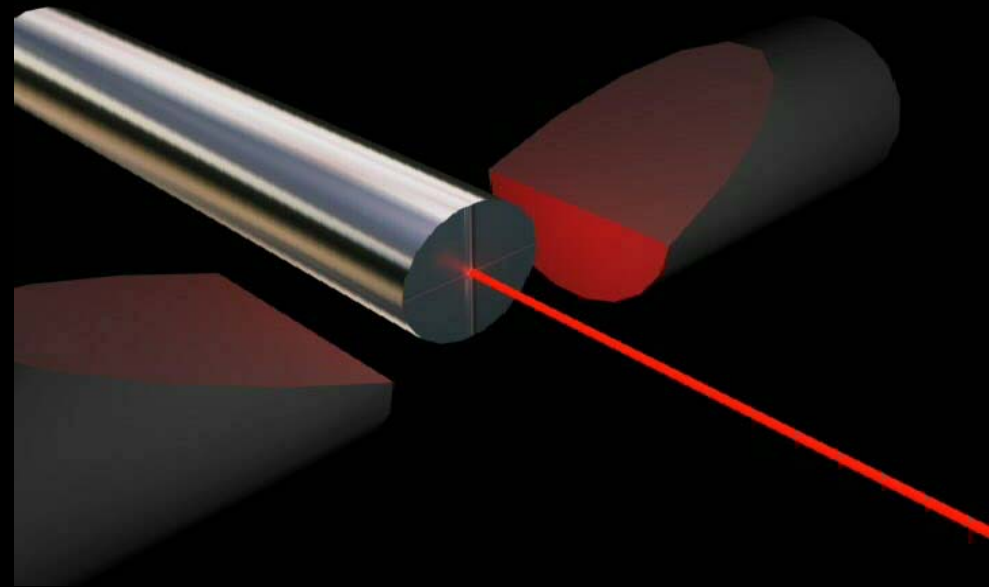


光学系
(縦力一配置)



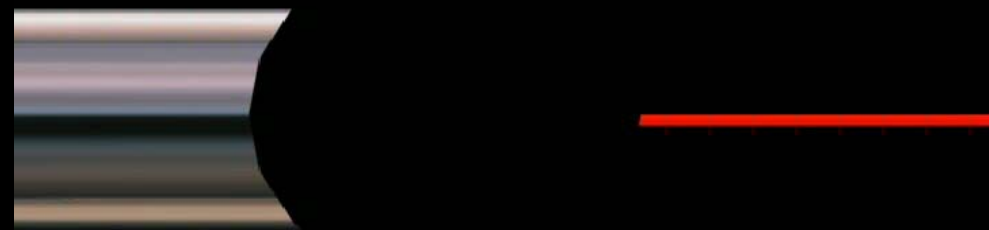
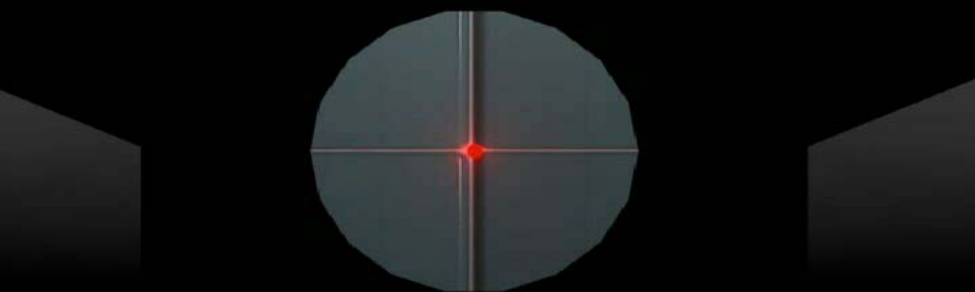
Top

Front



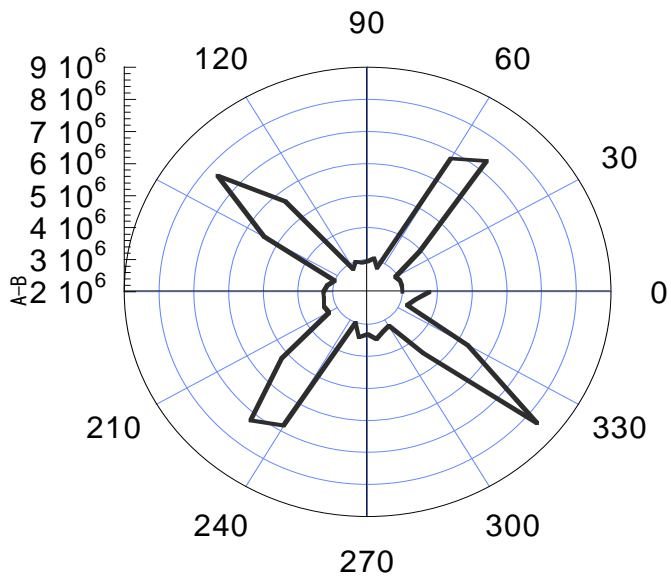
Perspective

Left

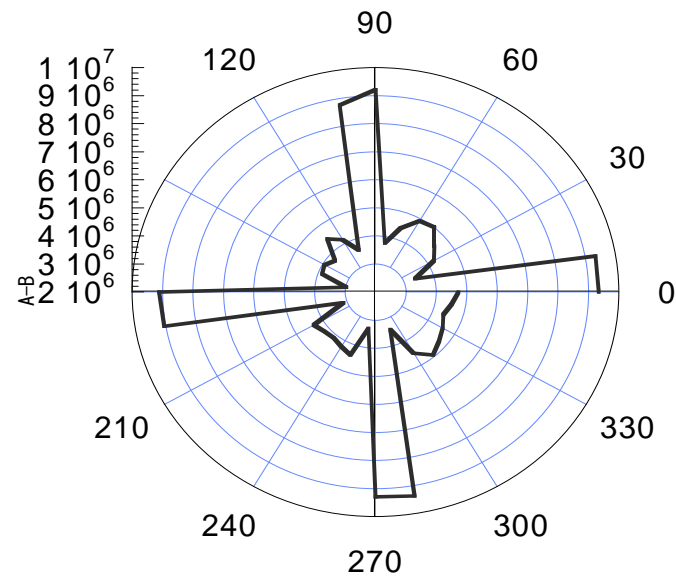


正方配列した円形ドット(パーマロイ埋め込み前)

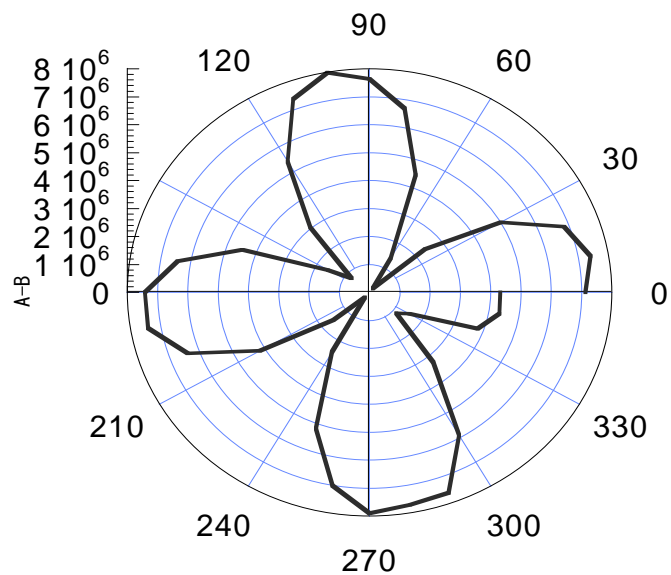
Pin Pout



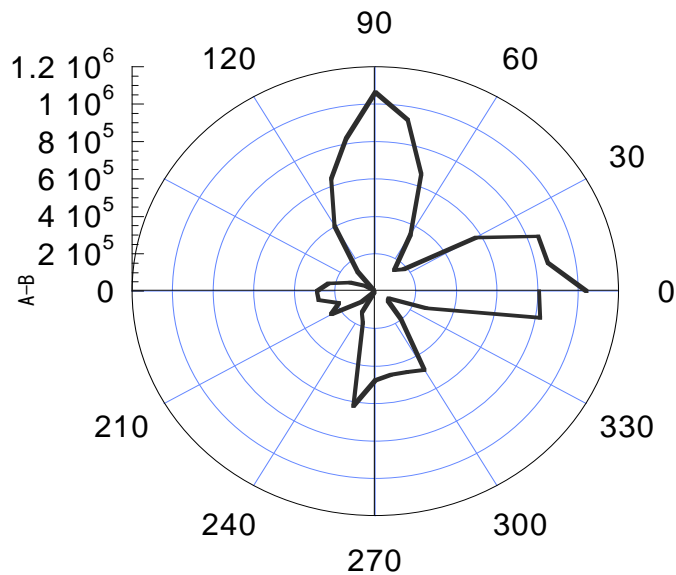
Pin Sout



Sin Pout

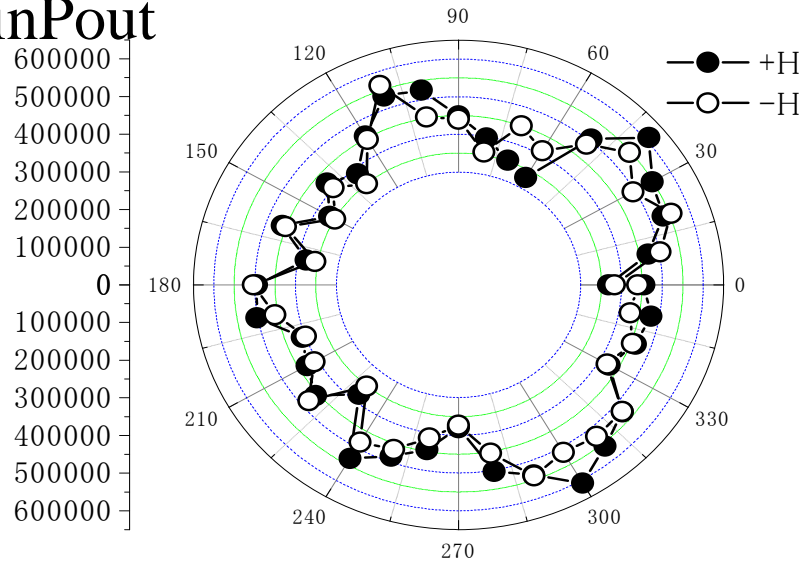


Sin Sout

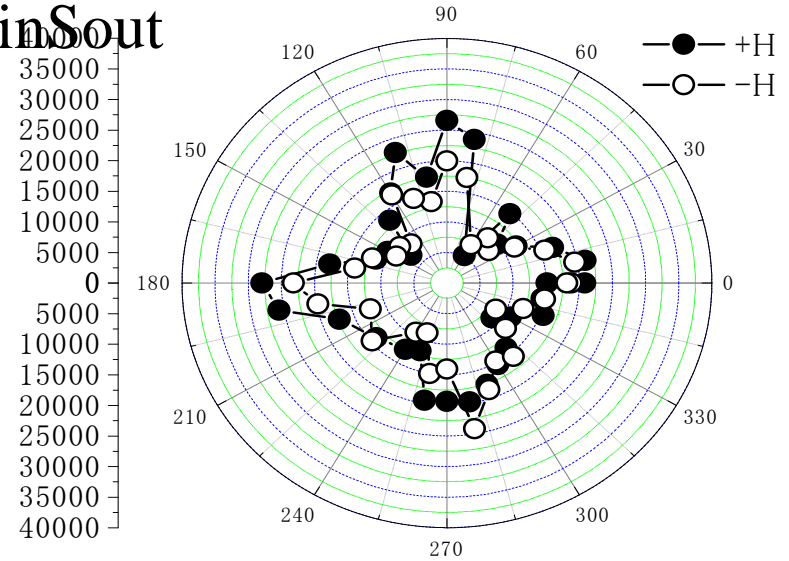


円形ドット 100nm × 100nm パーマロイ埋め込み

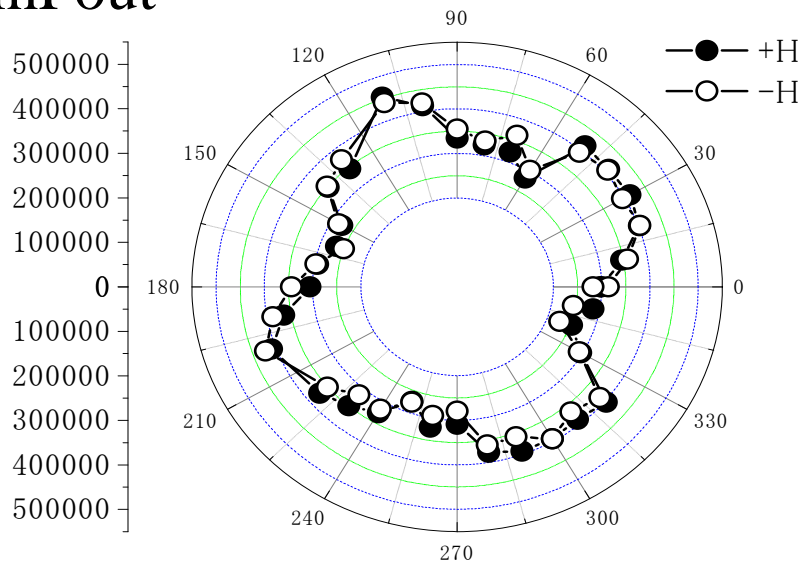
PinPout



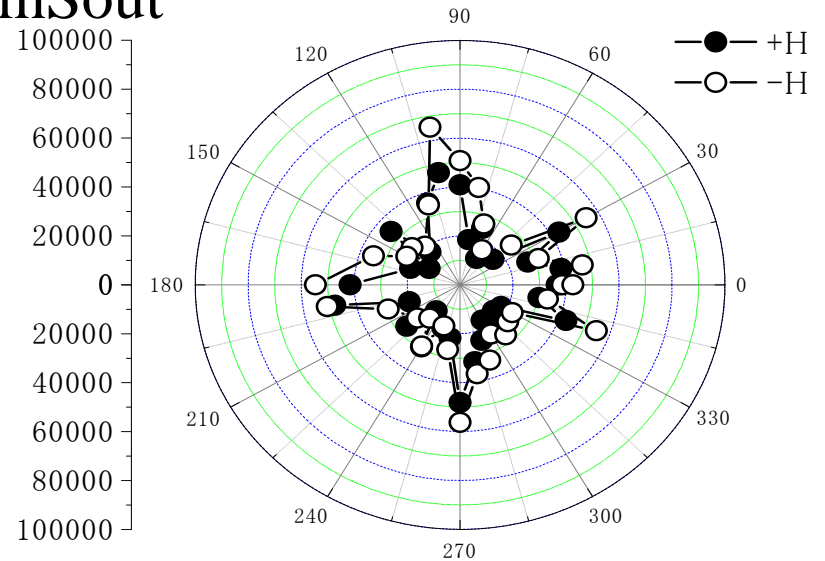
PinSout



SinPout

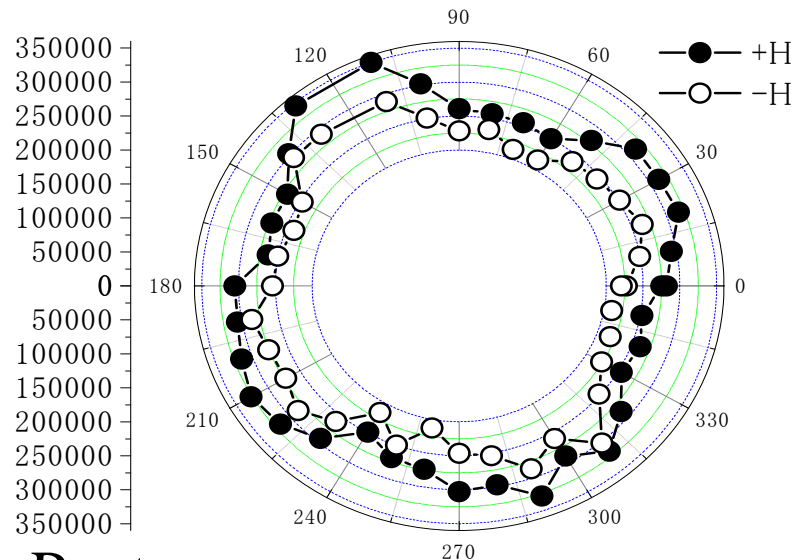


SinSout

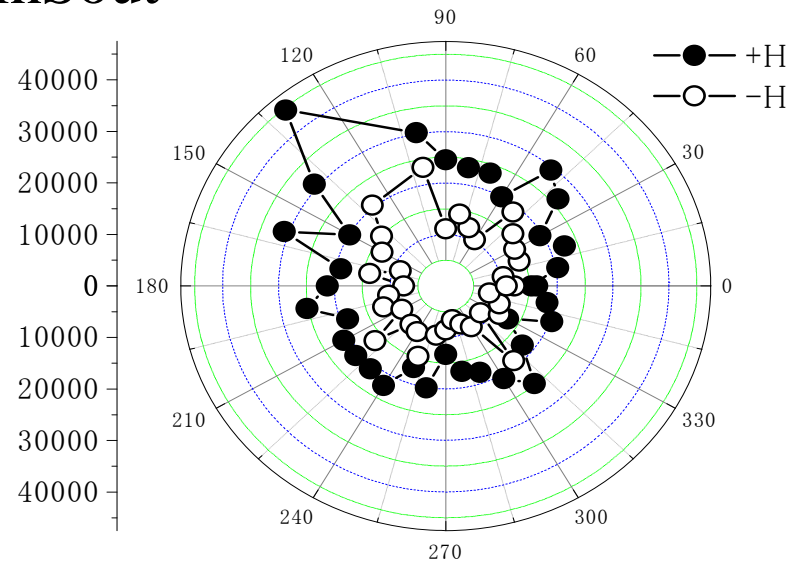


正方形ドット 1 μm \times 1 μm

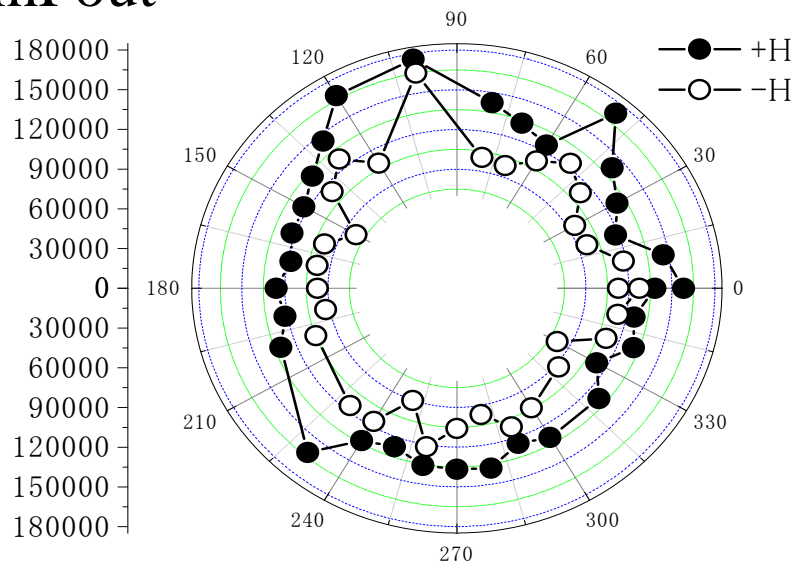
PinPout



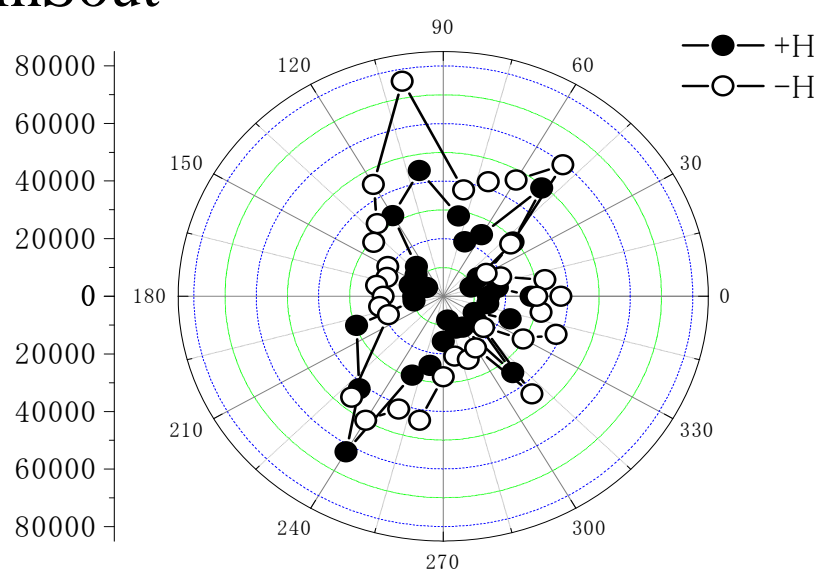
PinSout



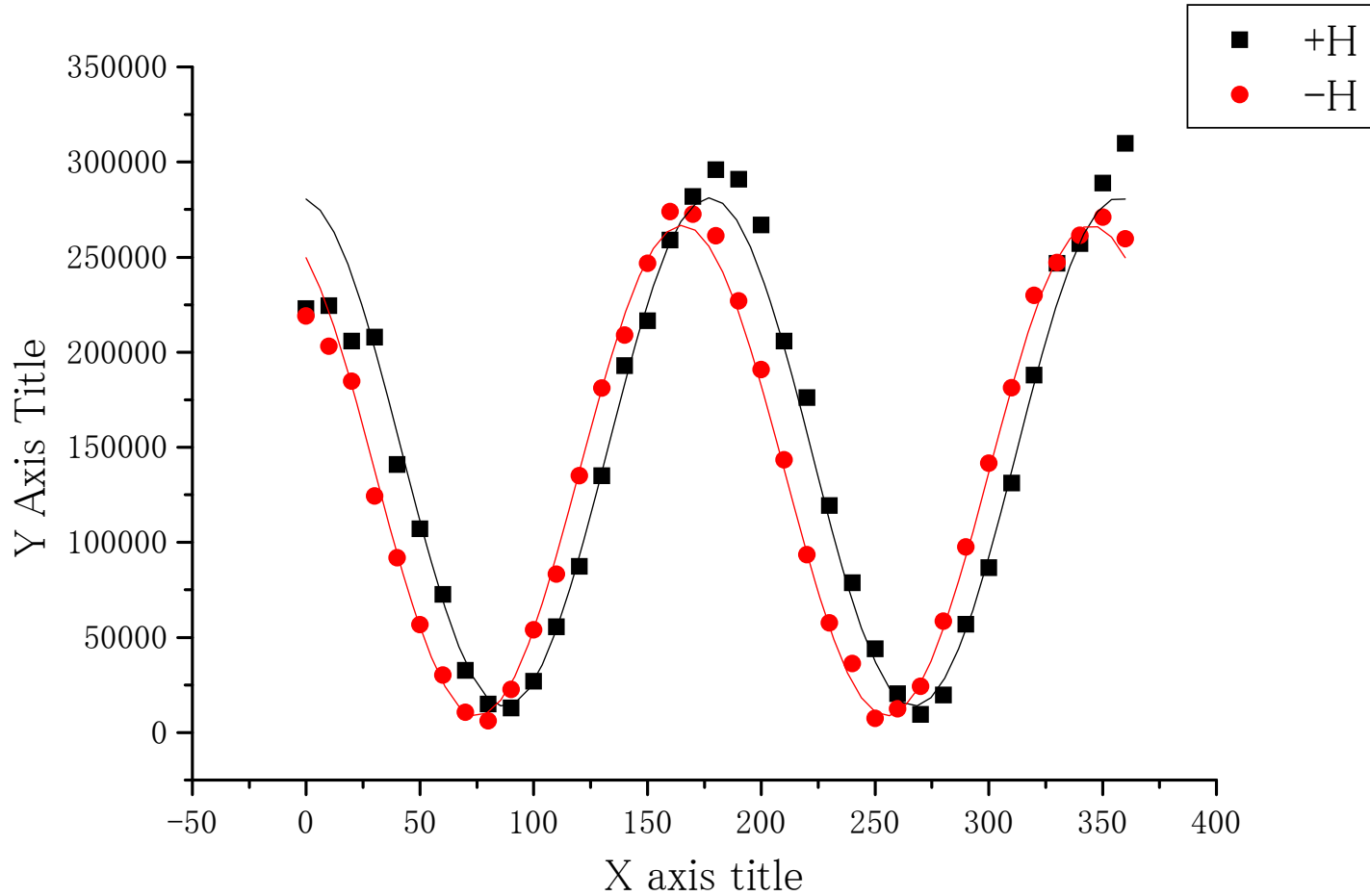
SinPout



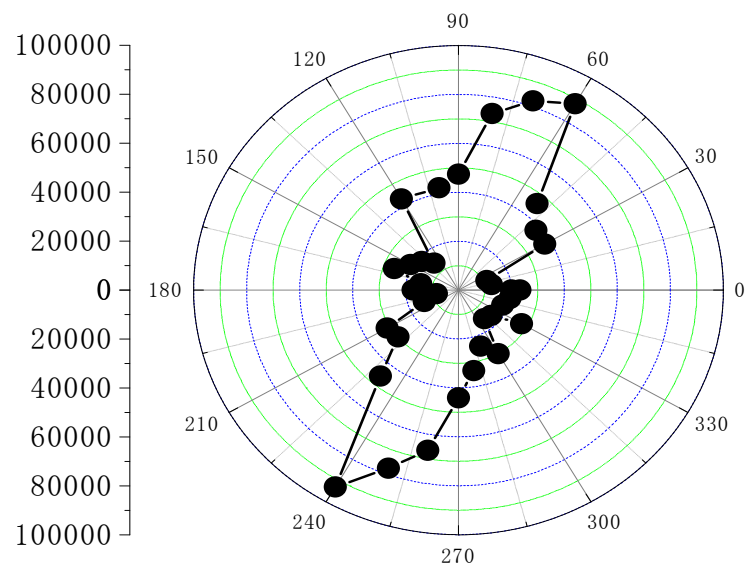
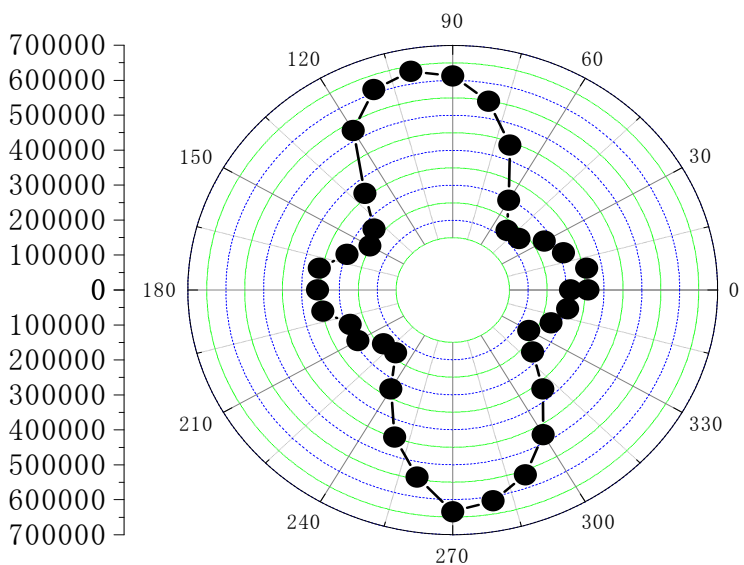
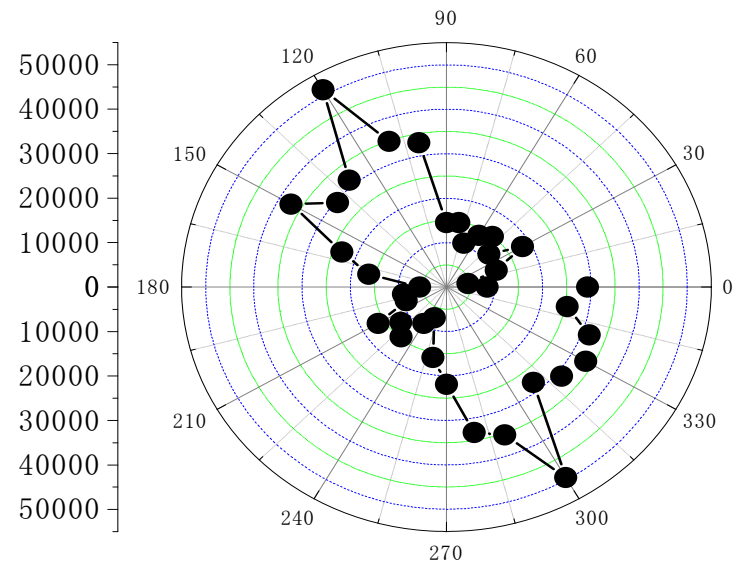
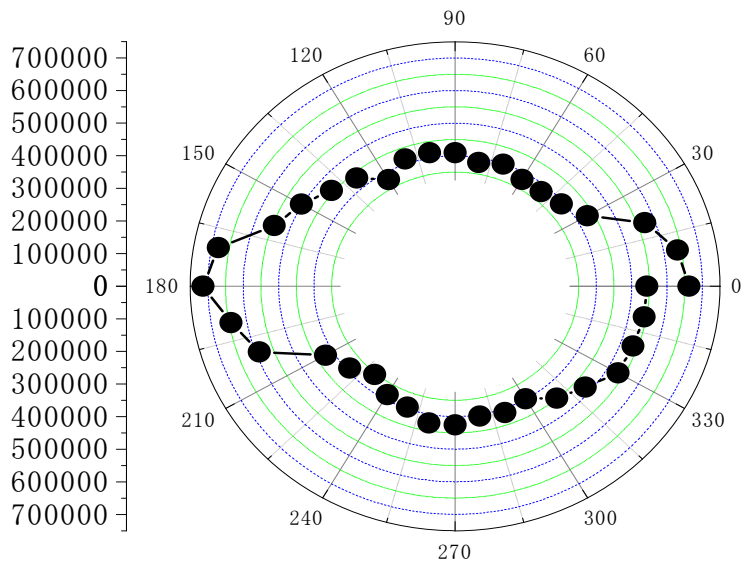
SinSout



非線形力一効果



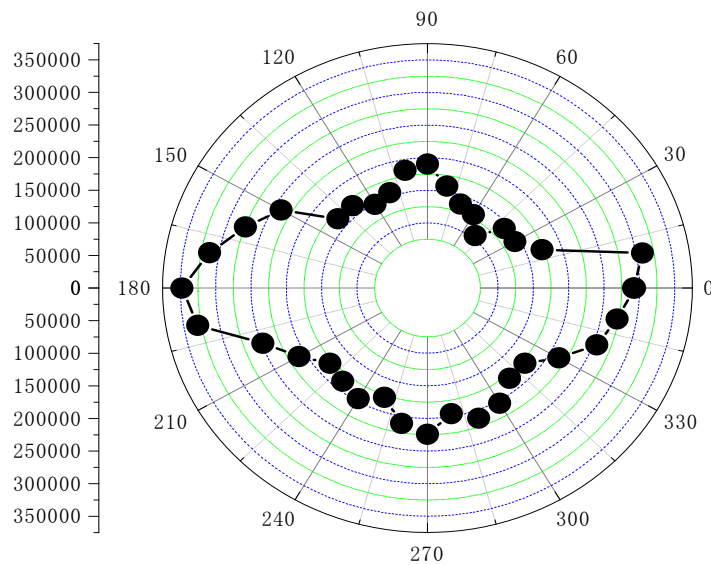
矩形パターン, $H=0$



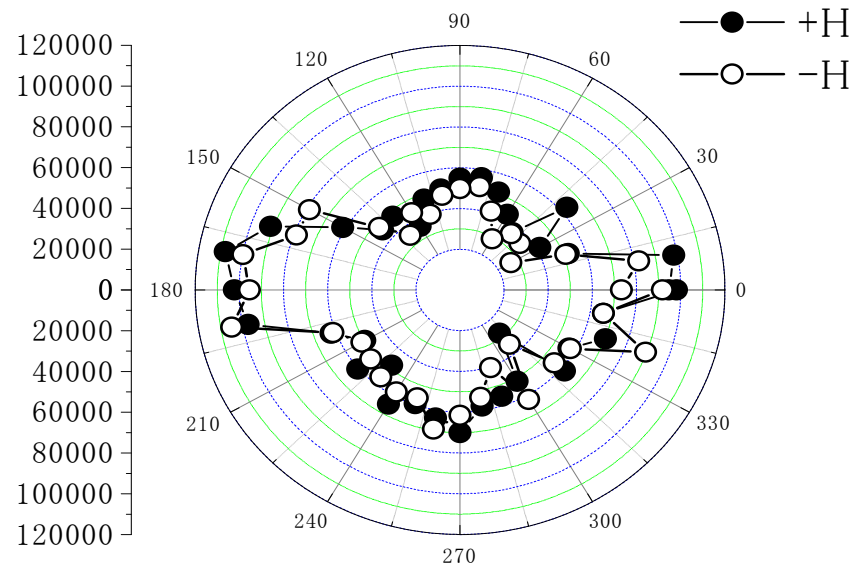
矩形パターン $H=0, \pm 1.2\text{kG}$

PinPout

$H=0$

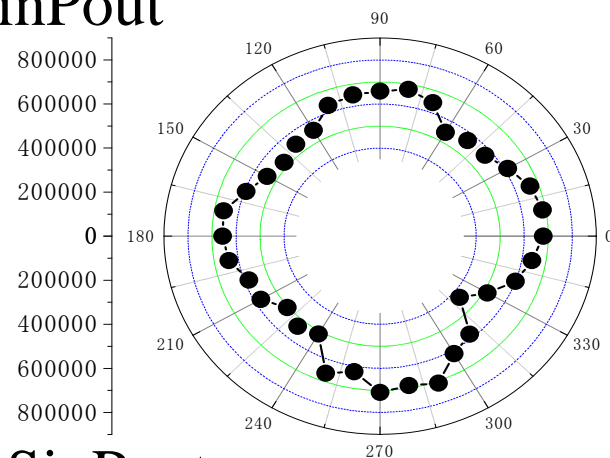


$H=1.2\text{kOe}$

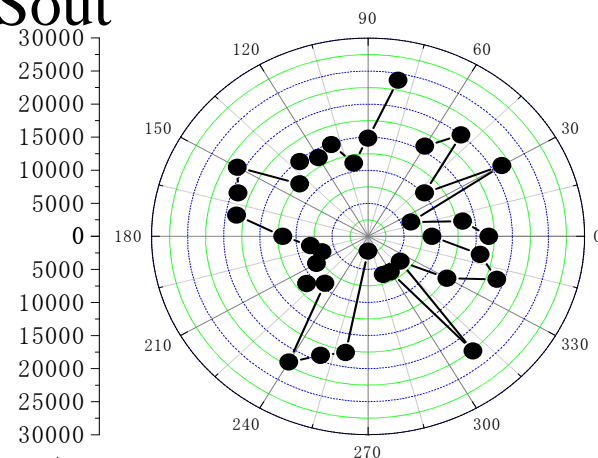


十字パターン(埋め込みなし), H=0

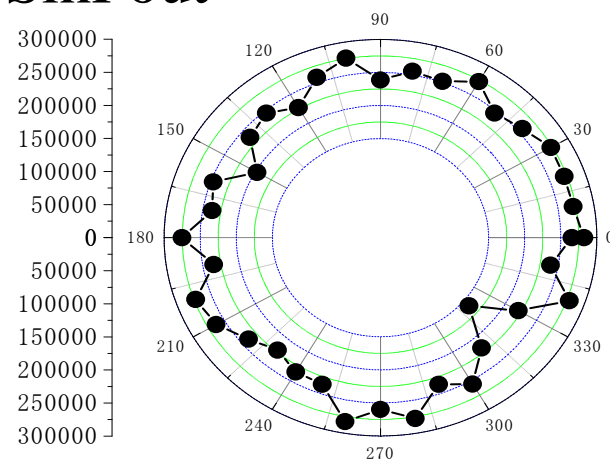
PinPout



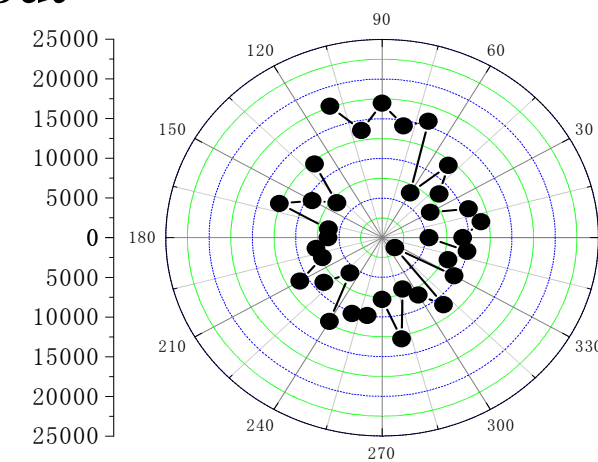
PinSout



SinPout



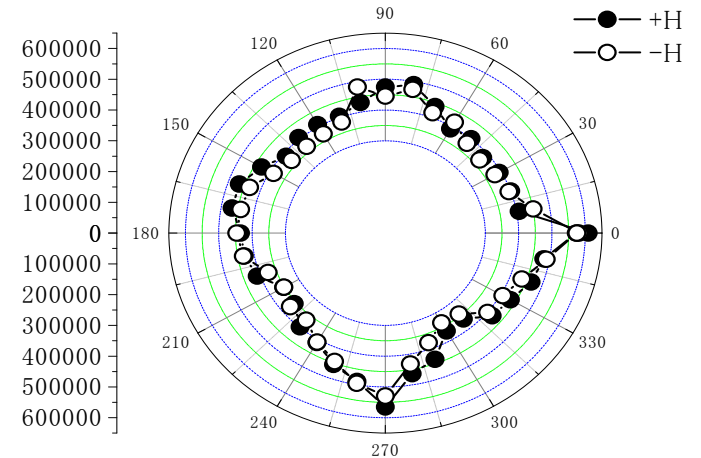
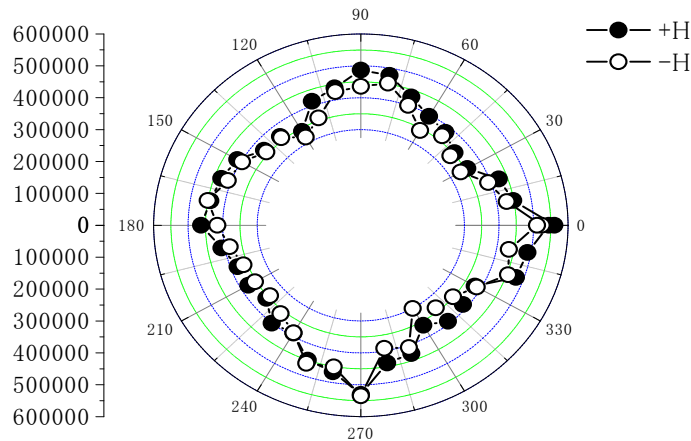
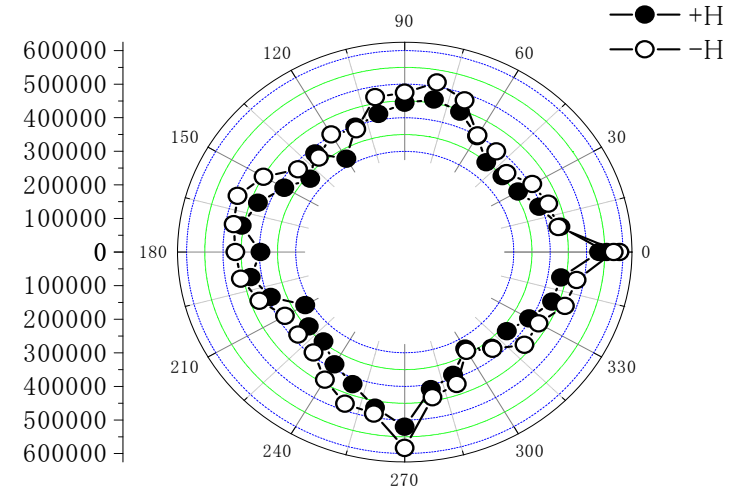
SinSout



十字パターン(磁性体埋め込み), H=2kOe印加

PinPout

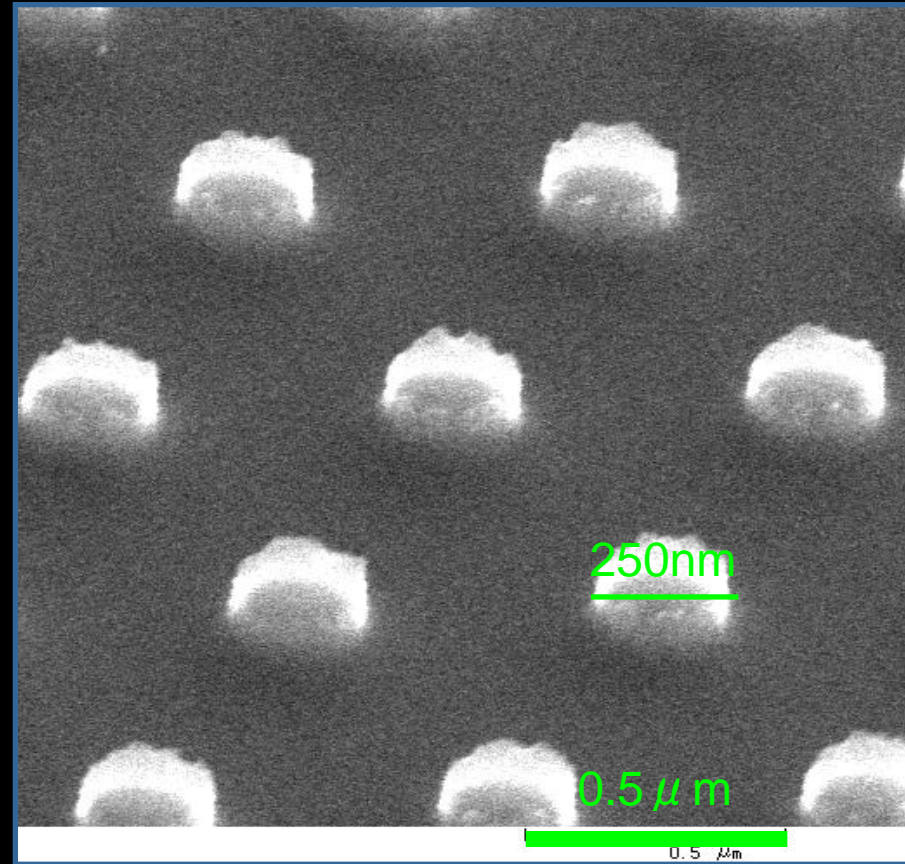
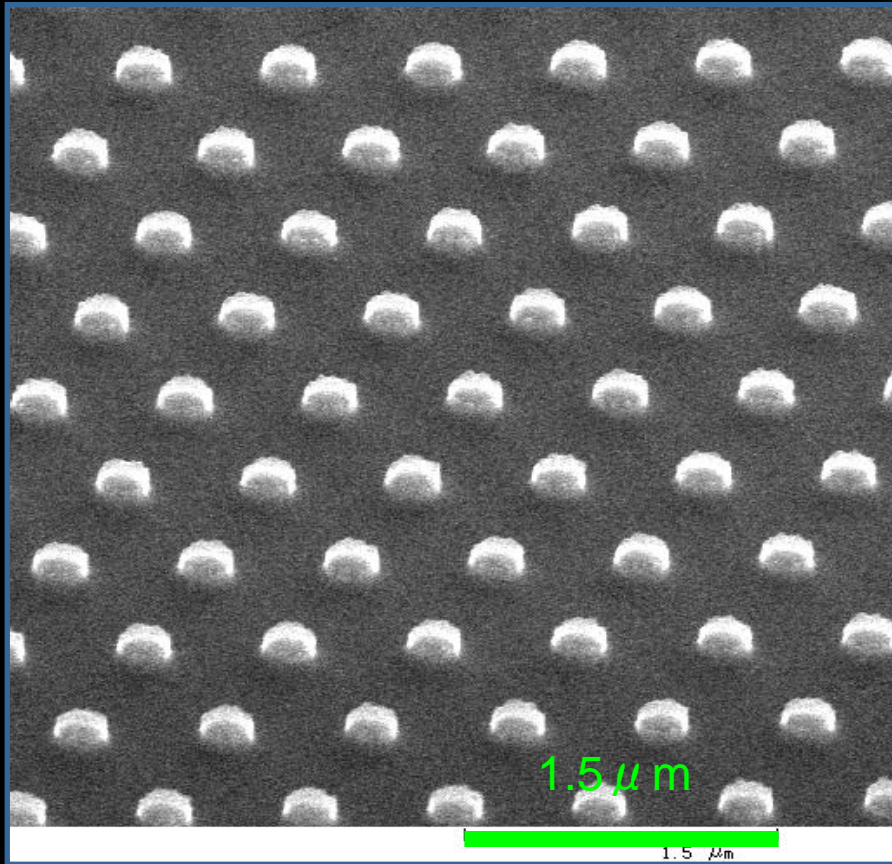
Repeated measurement



三角配列した円形ドット

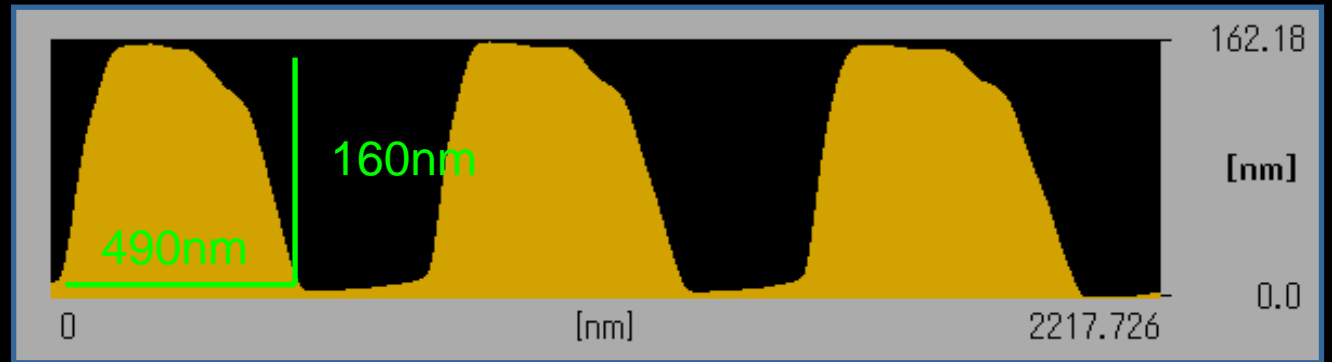
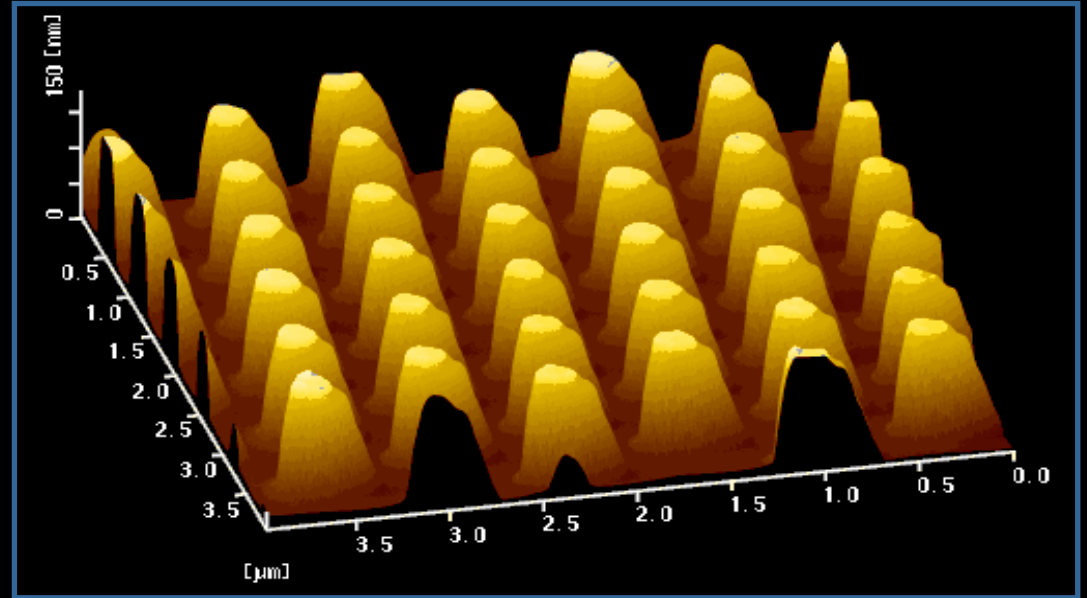
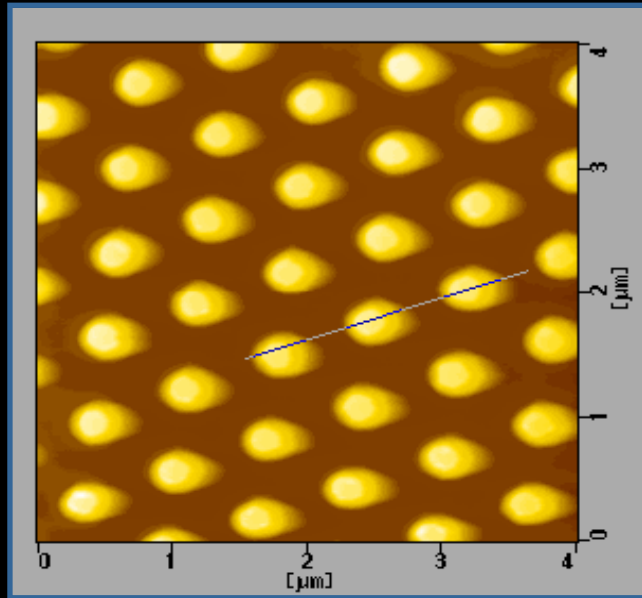
SEM

sample name:MDOT3



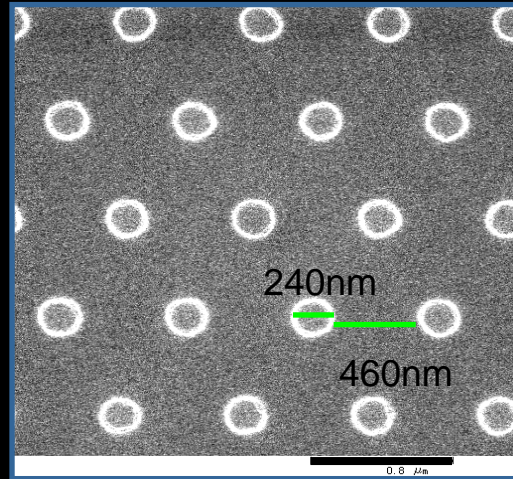
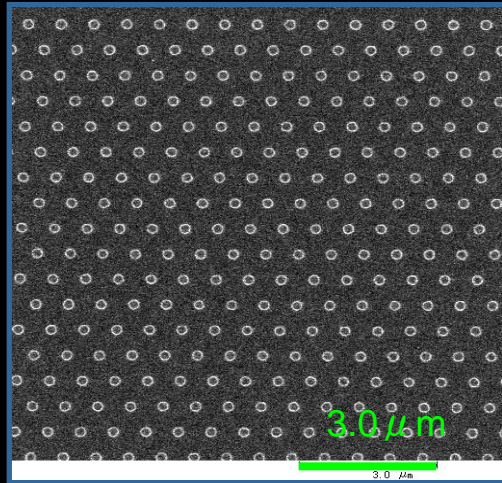
AFM

sample name:MDOT3

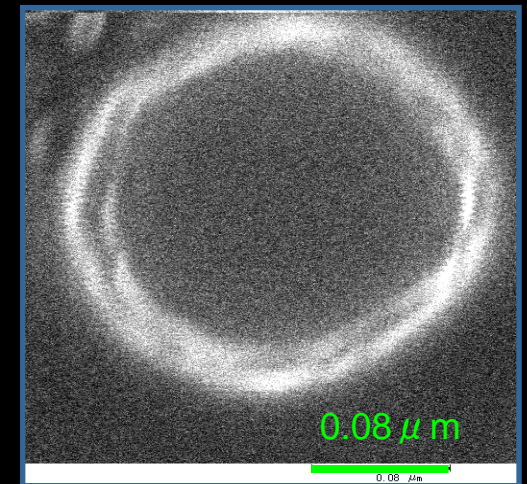
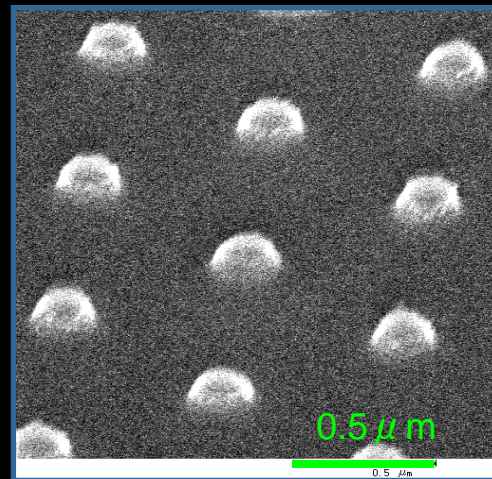


アンチドット SEM

sample name:MDOT3



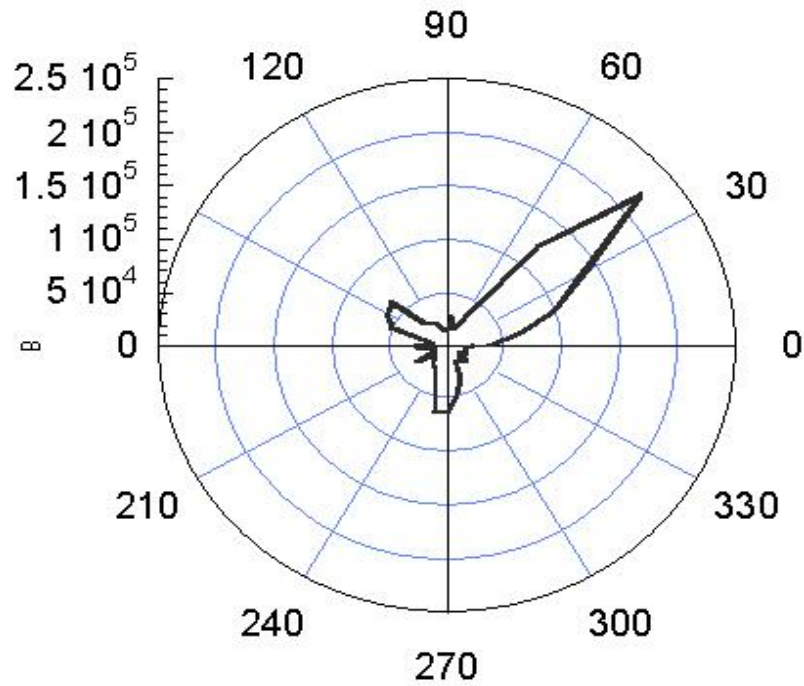
aslant



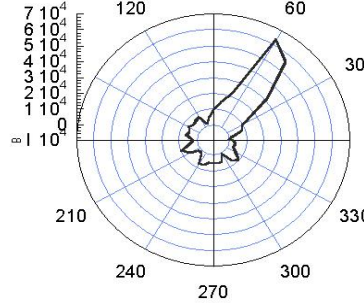
SHG

sample name:MDOT3

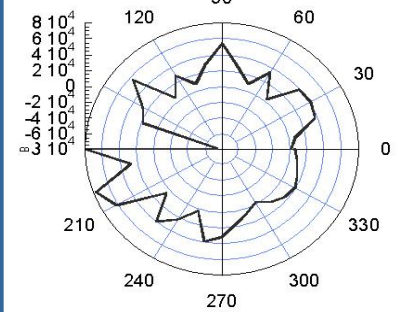
Pin Pout



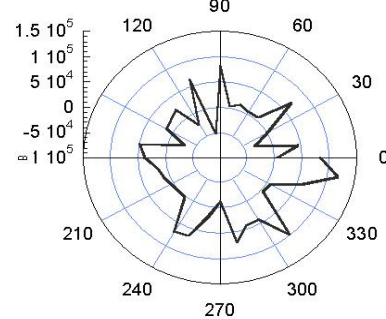
Pin Sout



Sin Pout



Sin Sout



結論

- 最小サイズ100nm深さ150nmの微細磁性ドットをダメージマシン法で再現性よく作製できるようになった
- 形状磁気異方性によりパーマロイでも垂直磁化を得ることができた。
- MFM像の解析には探針からの漏れ磁束を考慮しなければならない。
- 高密度に配置されたドット配列においてはドット間の静磁的相互作用により隣接するボルテックスのキラリティを反転させることが、実験的にも理論的にも判明。
- LLG方程式による3次元のマイクロ磁気解析はMFM像を定性的に説明できる。
- 非線形光学効果はドット配列の対称性を反映する。

謝辞

- 低モーメントチップの測定にご協力頂いた山岡様 (エスアイアイナノテクノロジー) に感謝します。
- この研究は東京農工大学21世紀COEプログラム「ナノ未来材料」の一環として行っている。