磁性ヘテロ構造におけるスピン機能の創出とその展開

東京工業大学応用セラミックス研究所
谷山智康

第26回無機材料に関する最近の研究成果発表会 、平成21年1月26日（月）

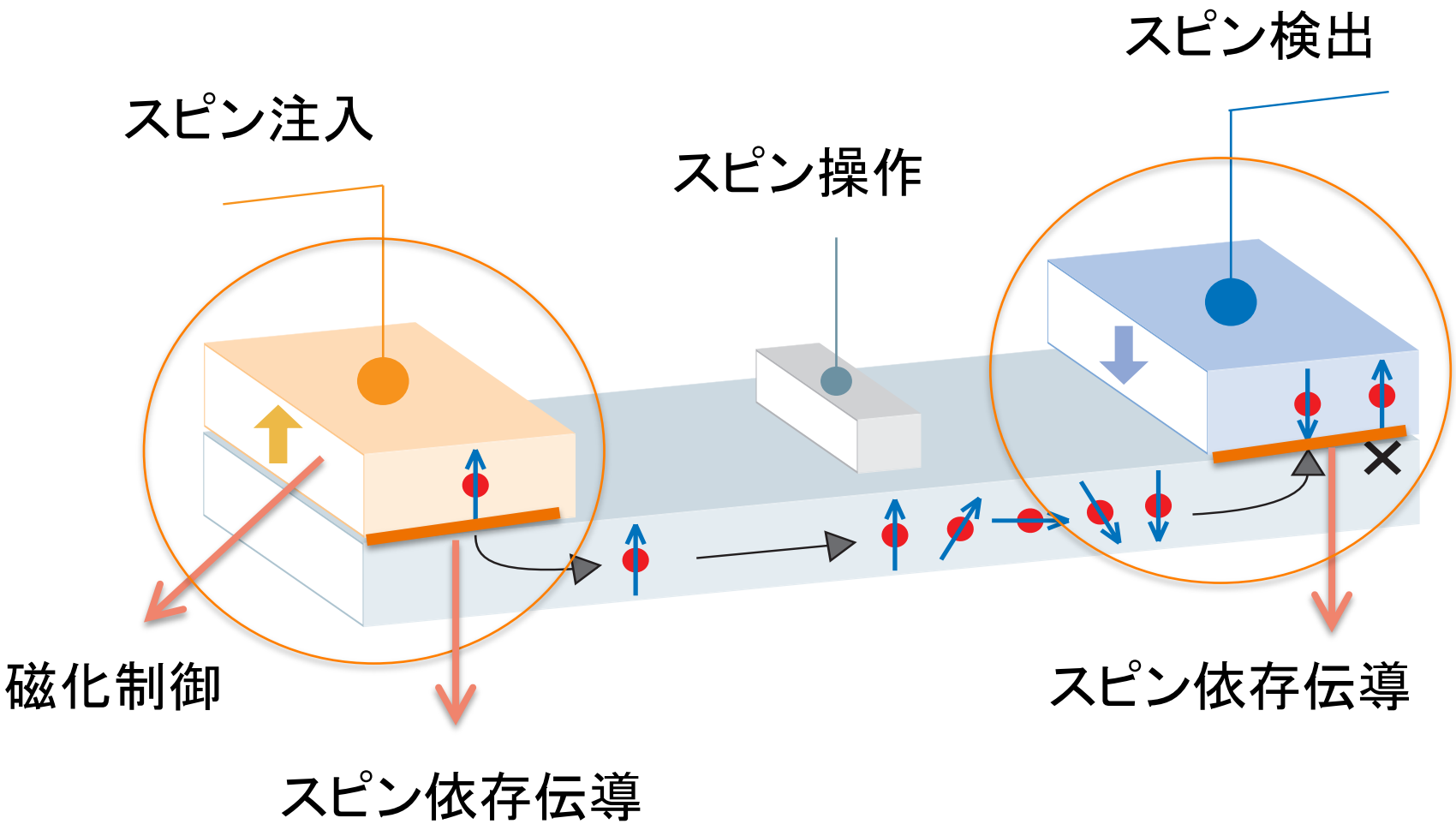
スピントロニクスとは

- 物質中の電子のスピンを利用することで、新しいエレクトロニクス機能を創成する分野

電子
- 電荷（+、−）
- スピン（↑、↓）

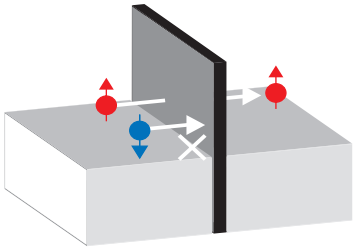
- スピンの優位性
  - ・省電力によるデバイス動作
  - ・スピントランジスタ、スピンLED
  - ・量子コンピューティング等既存技術では不可能なエレクトロニクスのブレークスルー

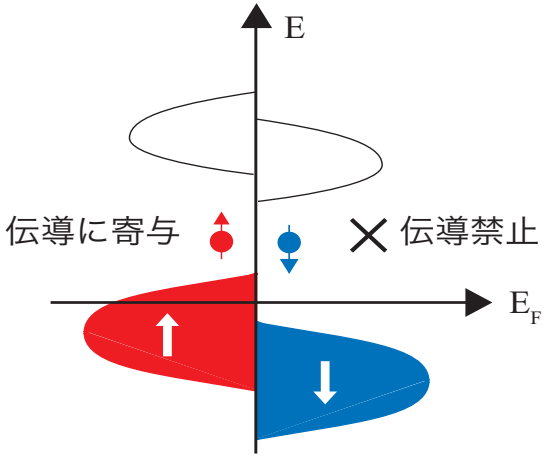
スピントロニクスの基本要素技術
ー　スピンの注入、操作、そして検出へ

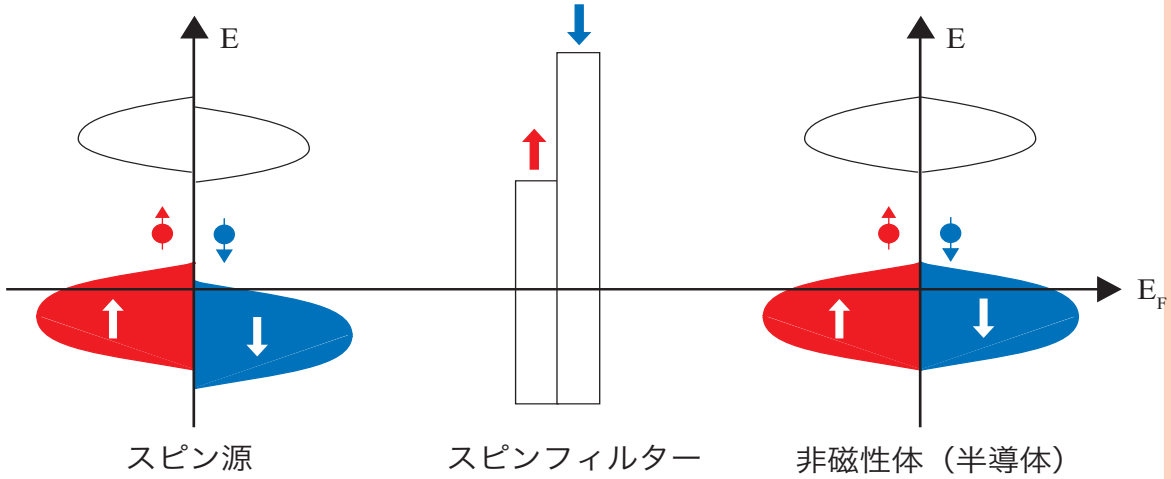


スピン注入の現状

- スピンフィルターを用いる方法



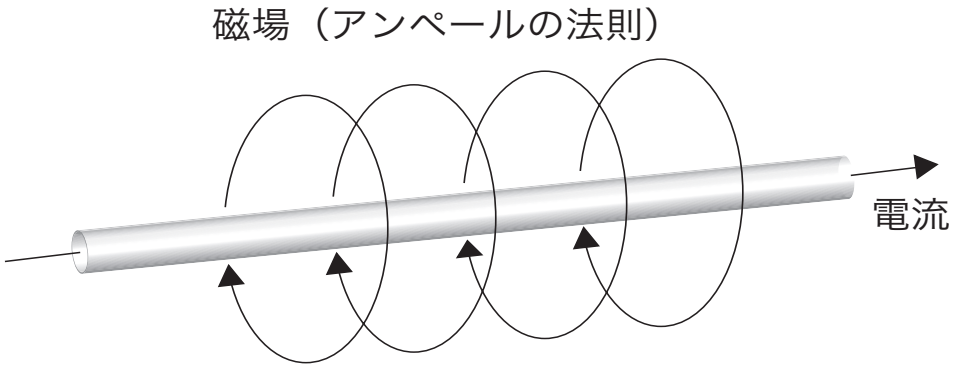




高スピン偏極材料（ハーフメタル）を用いる方法

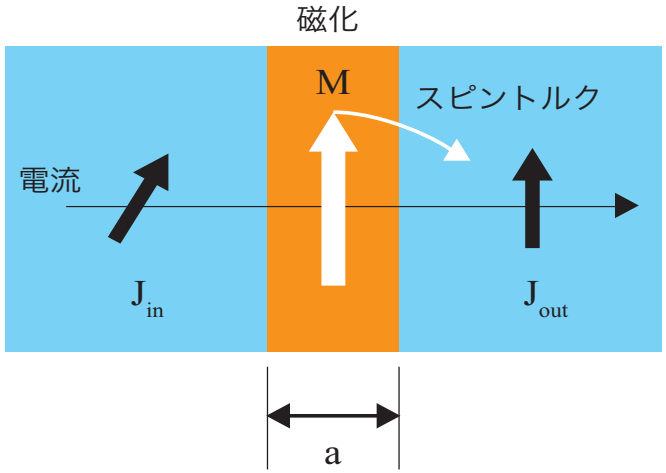
磁性制御の現状

- 局所磁場を用いる方法



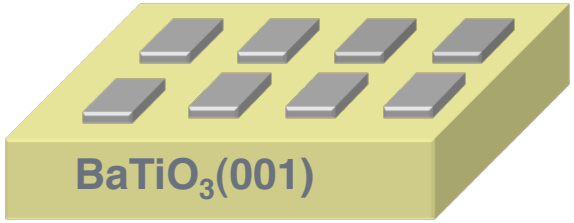
- スピン偏極電流を用いる方法（スピントルク）

→ これらは大電流を要する



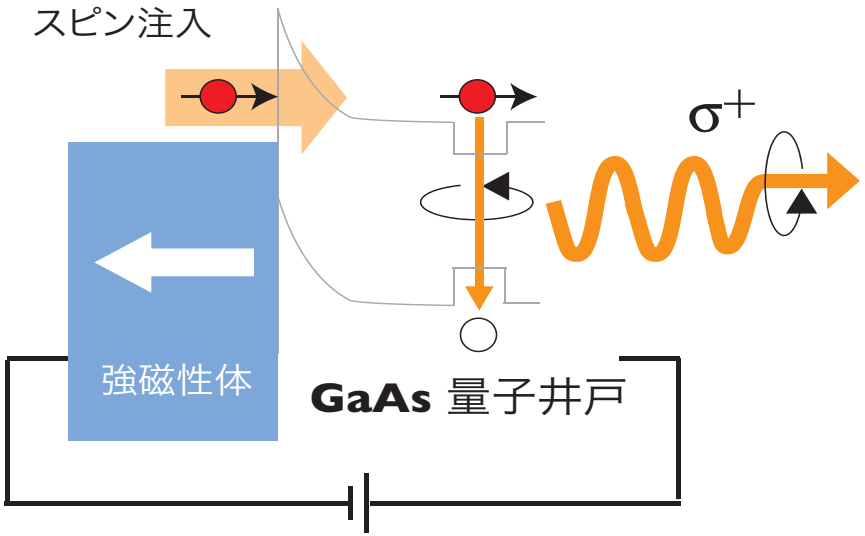
- 磁気歪み効果を用いる方法

（強磁性体／強誘電体ヘテロ構造）

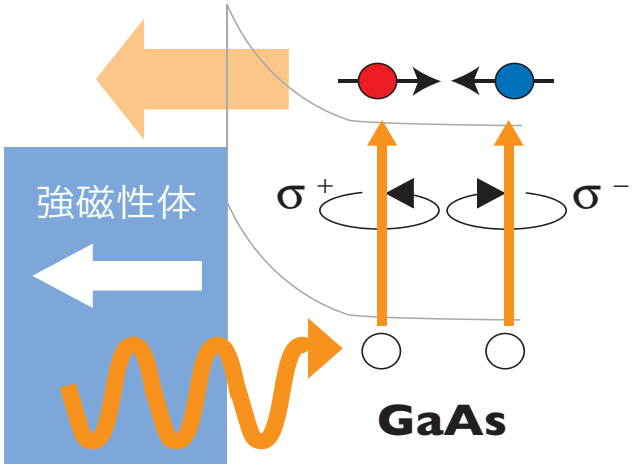


スピン検出の現状

- 円偏光発光解析を用いる方法（光学的手法）



- スピンフィルター効果を用いる方法（電気的手法）



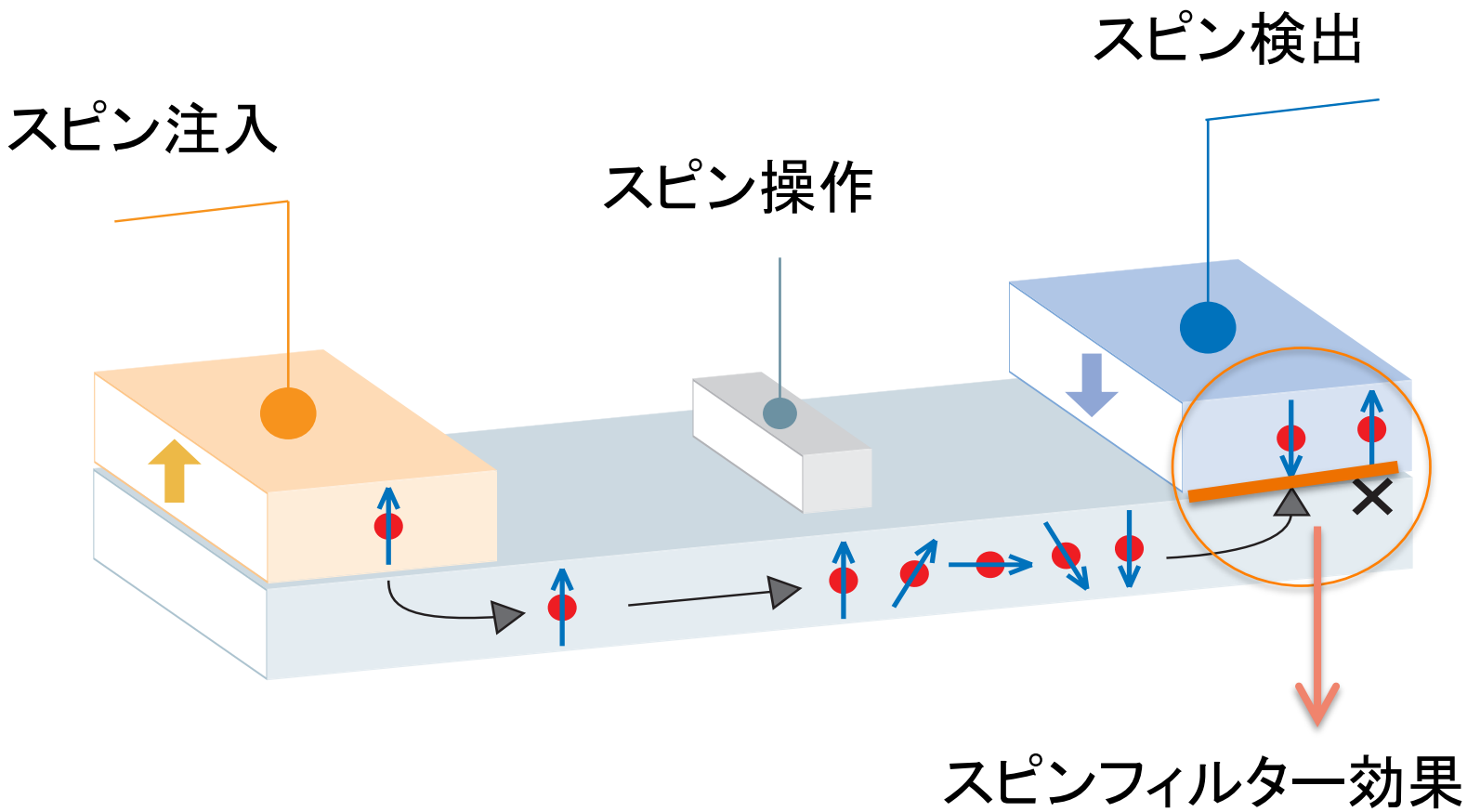
成果報告の概要

- マグネタイト（Fe_3O_4）／GaAs界面におけるスピンフィルター効果

- Fe_3O_4／半導体量子井戸ヘテロ構造における
  スピン注入

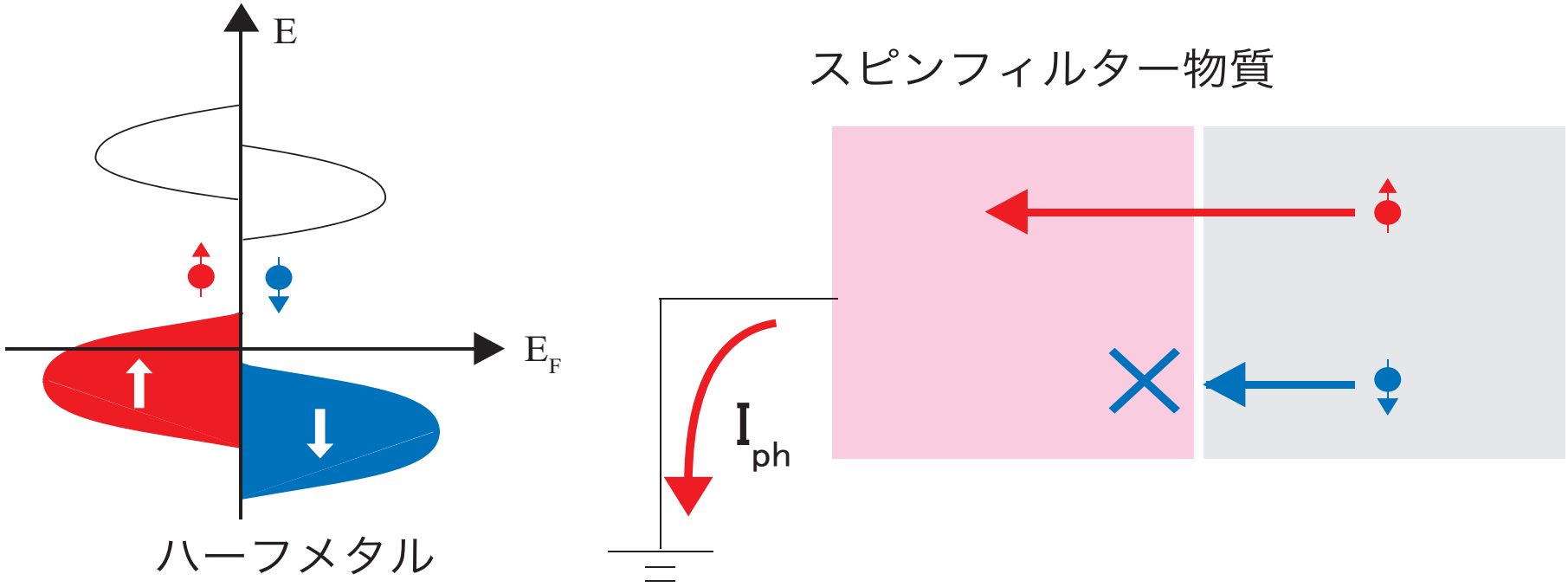
- Fe／$BaTiO_3$ヘテロ構造における磁気異方性制御

スピントロニクスの基本要素技術としての
スピン検出　ー　スピンフィルター効果



如何にしてスピン偏極電子を検出するか

スピンフィルター効果とは



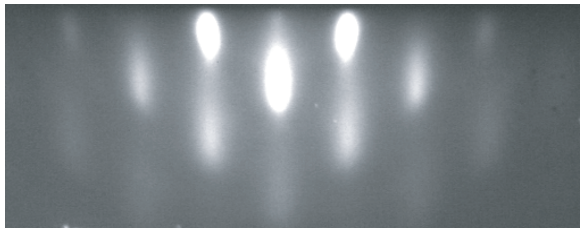
- 光電流を検出することでスピンを間接的に推定することができる

GaAs上へのFe_3O_4のエピタキシャル成長

- 2段階ステップ成長

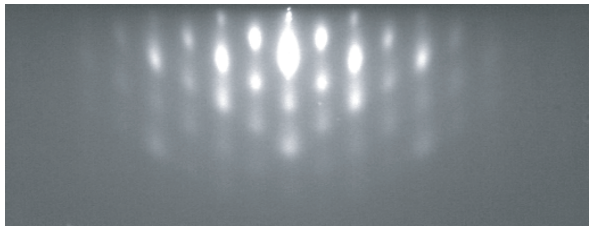
5-nm-thick Fe
GaAs(001)

MBE growth of Fe thin layer
base pressure ~10^{-10} Torr



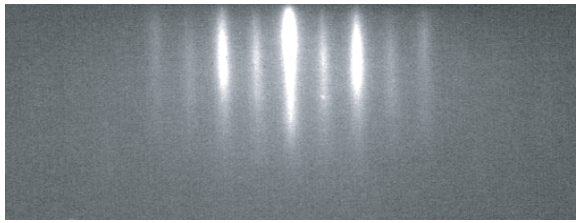
10-nm-thick Fe_3O_4
GaAs(001)

Oxidation in O_2 atmosphere
at 260°C

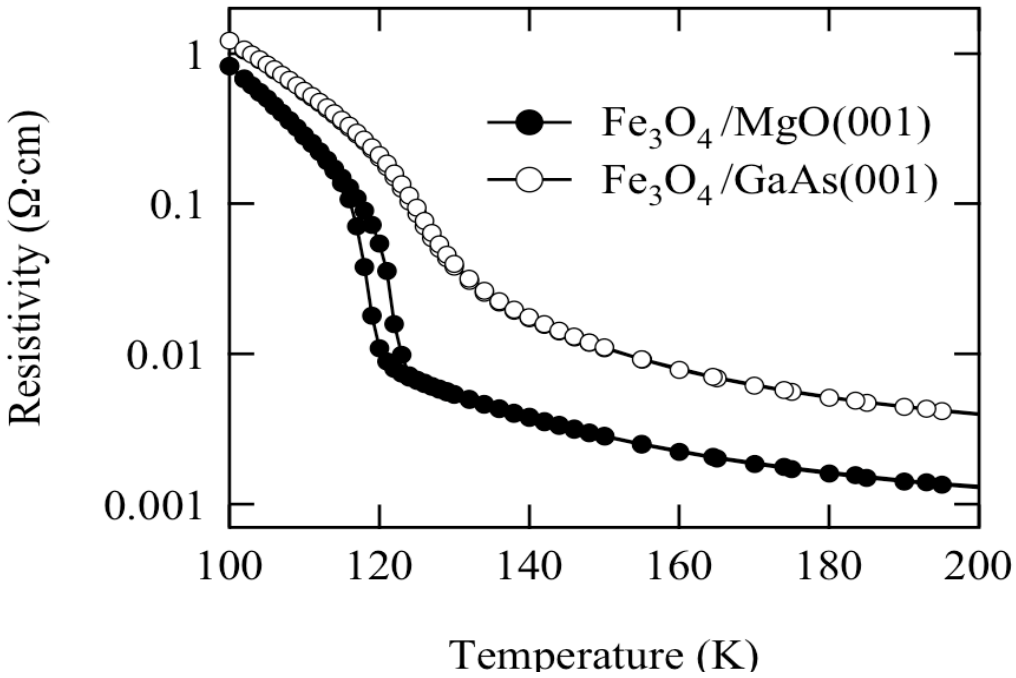


100-nm-thick Fe_3O_4
GaAs(001)

Reactive MBE growth of Fe_3O_4
in O_2 atmosphere at 300°C

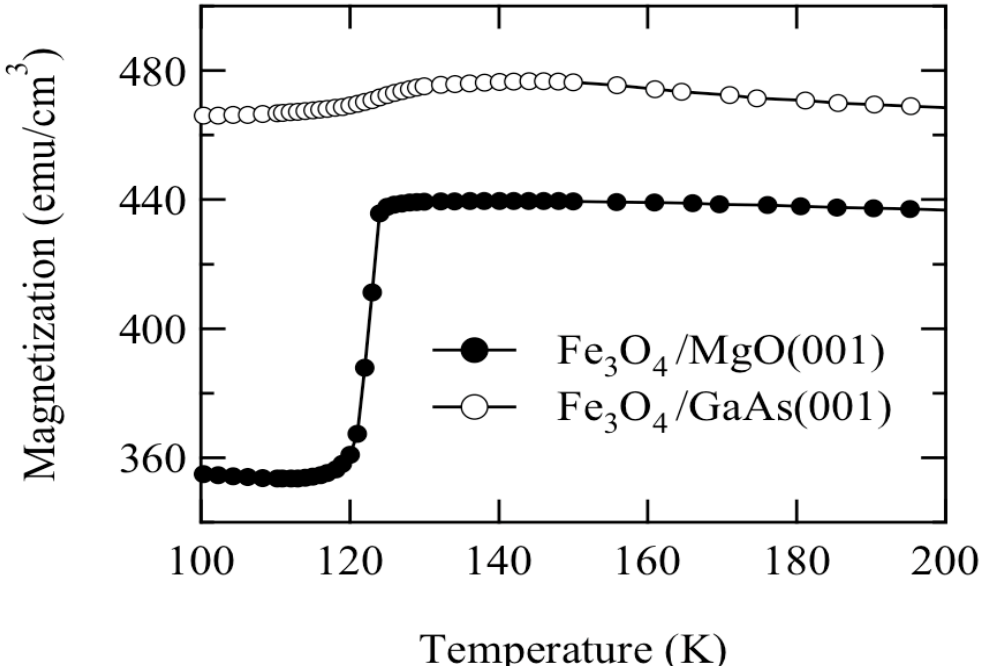


エピタキシャルFe_3O_4/GaAsの伝導特性



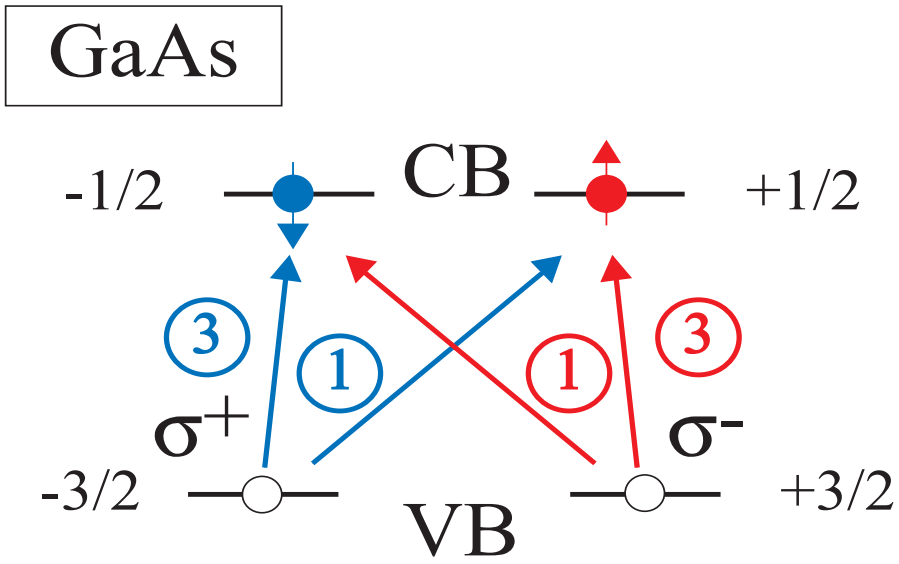
- Verwey転移をT_V=125Kで観測
  （バルクではT_V=119K）

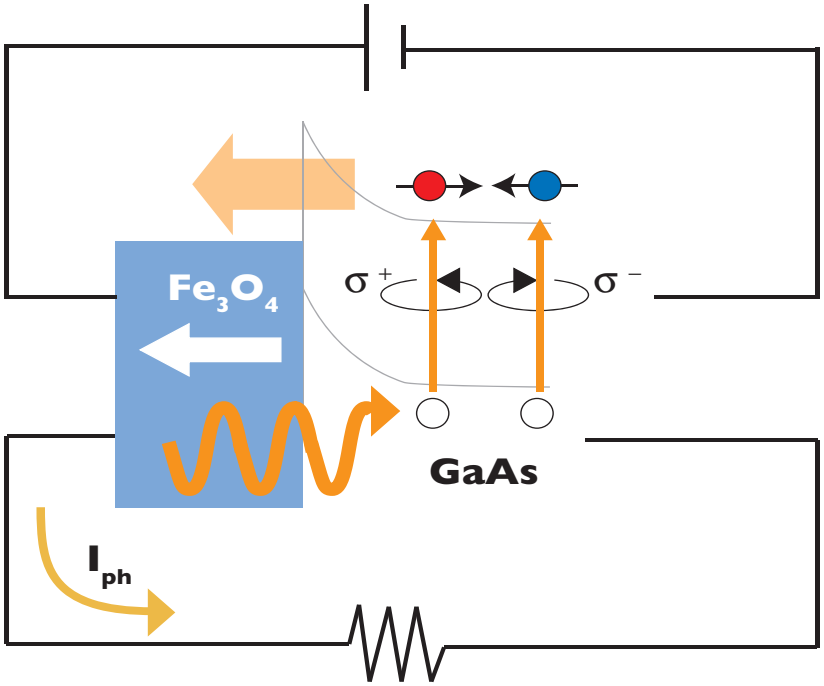
エピタキシャルFe_3O_4/GaAsの磁気特性



- Fe_3O_4／MgO(001)と比較してVerwey転移が散漫

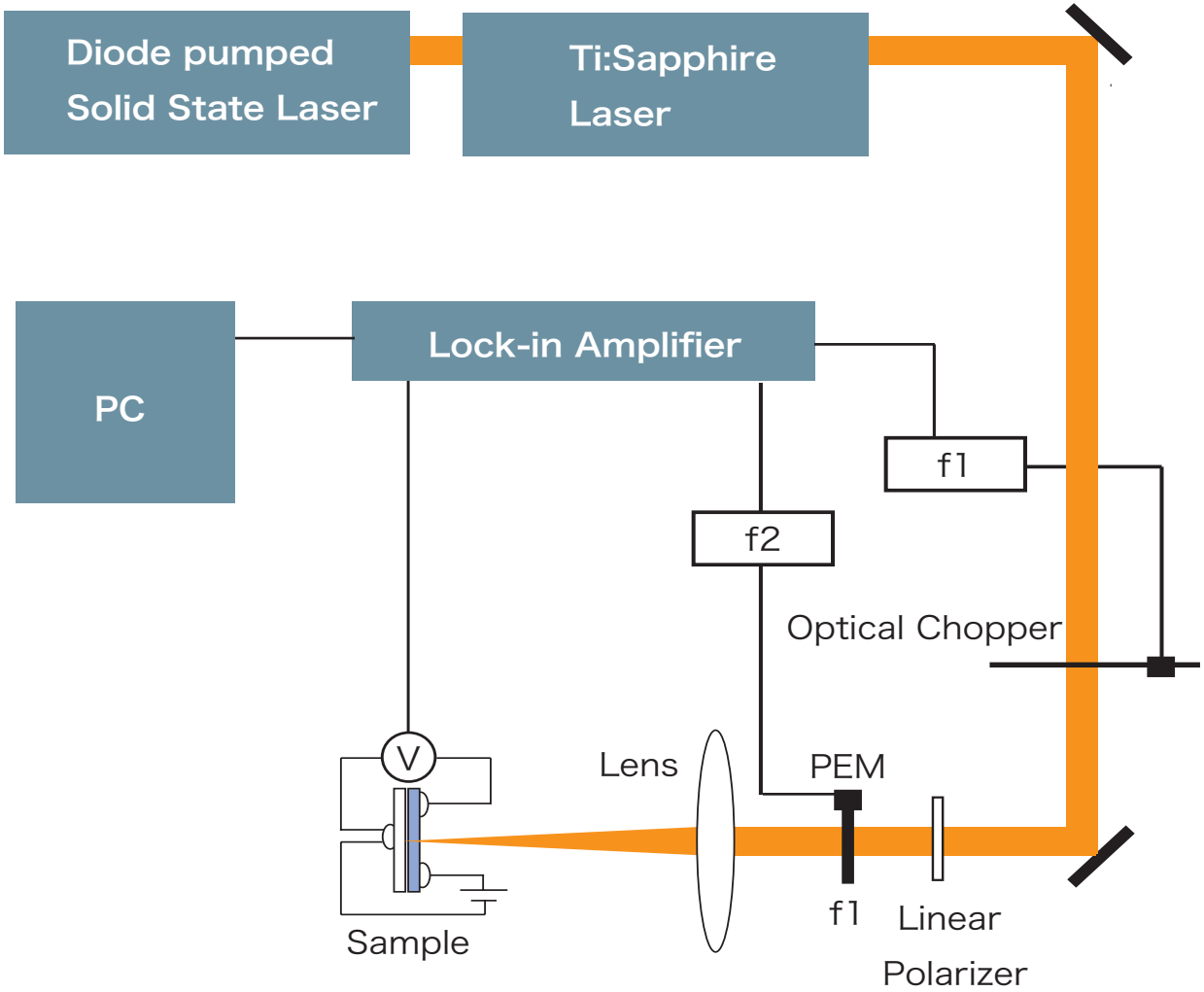
円偏光スピン励起法



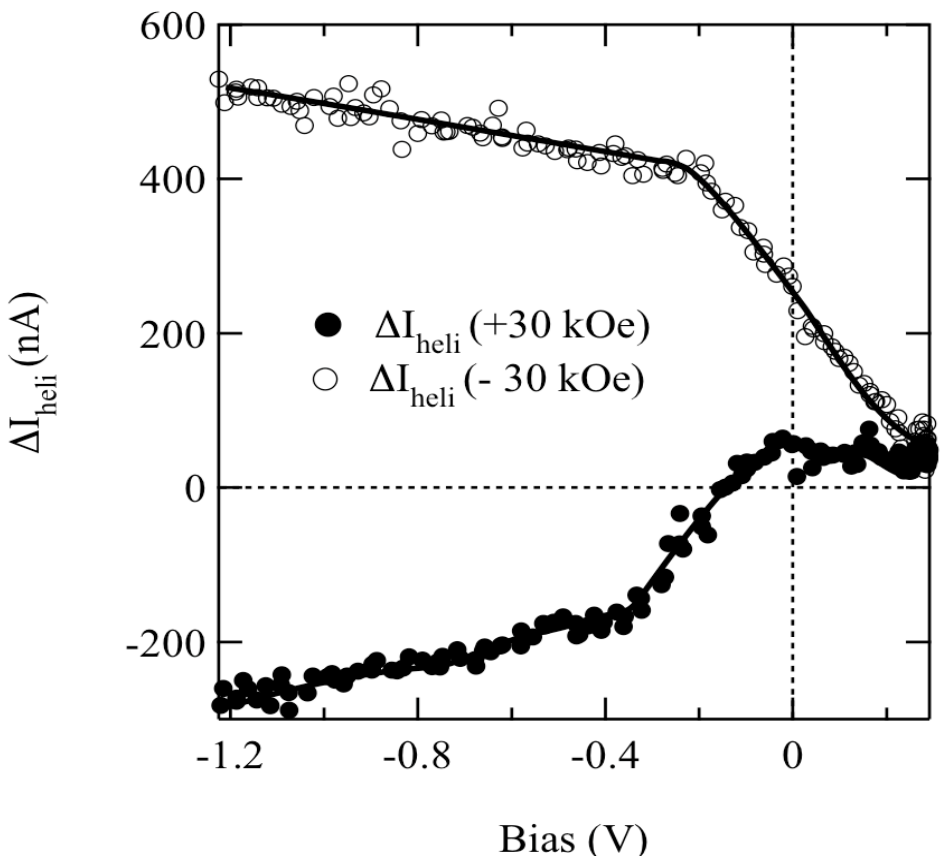


- 円偏光照射によりスピン偏極電子を励起することができる

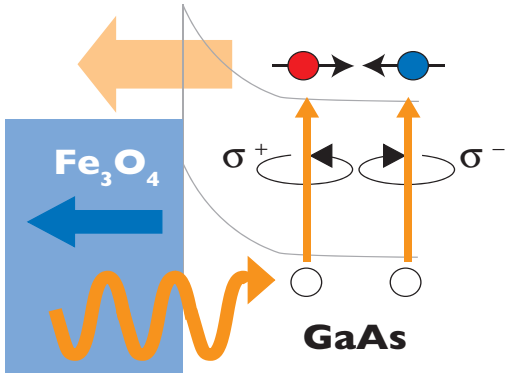
測定系の概略


Diode pumped
Solid State Laser
Ti:Sapphire
Laser
PC
Lock-in Amplifier
f1
f2
Optical Chopper
V
Lens
PEM
f1
Linear
Polarizer
Sample

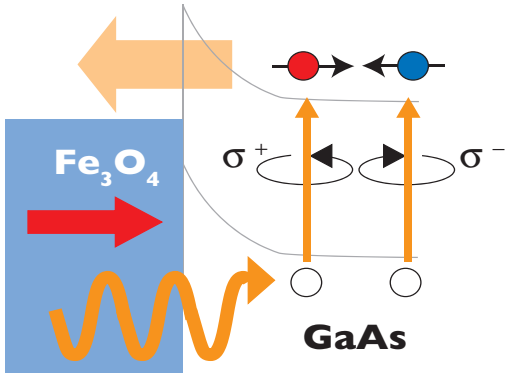
ヘリシティ依存光電流



+30 kOe

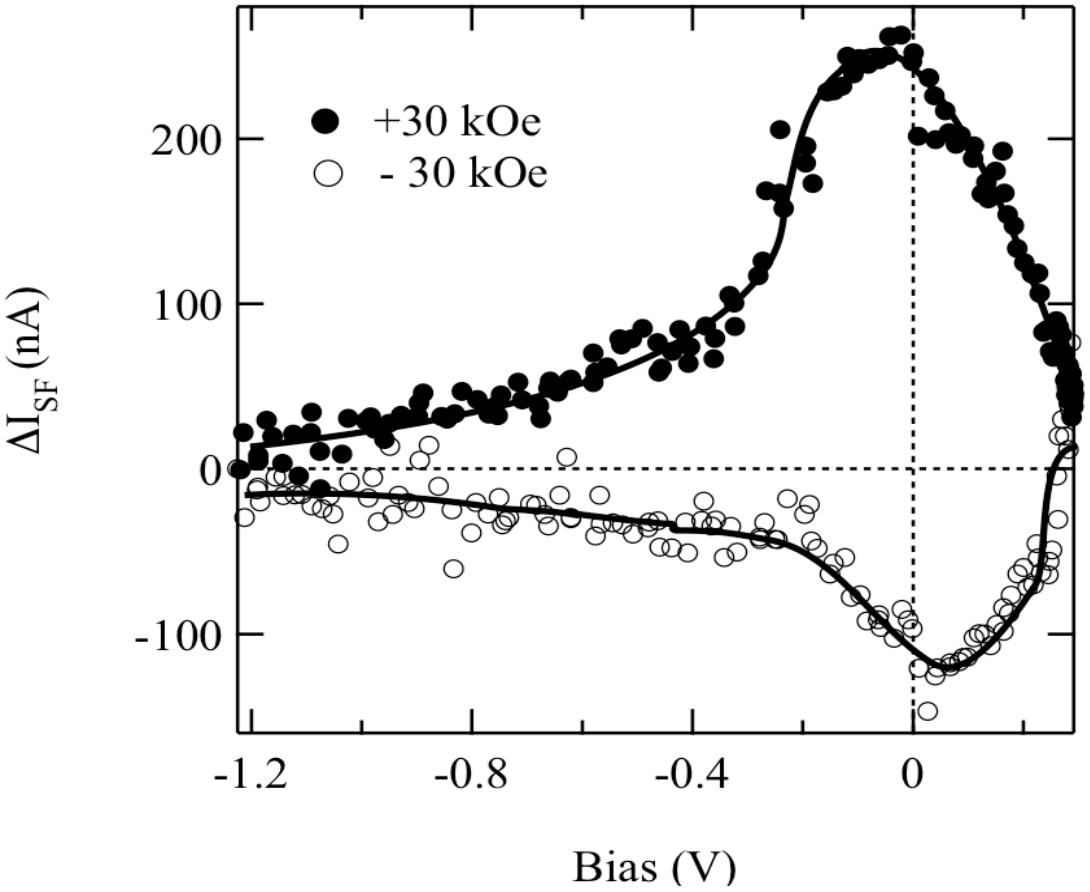


−30 kOe



- 磁気モーメントの方向に依存した明確な光電流の変化

スピンフィルター電流



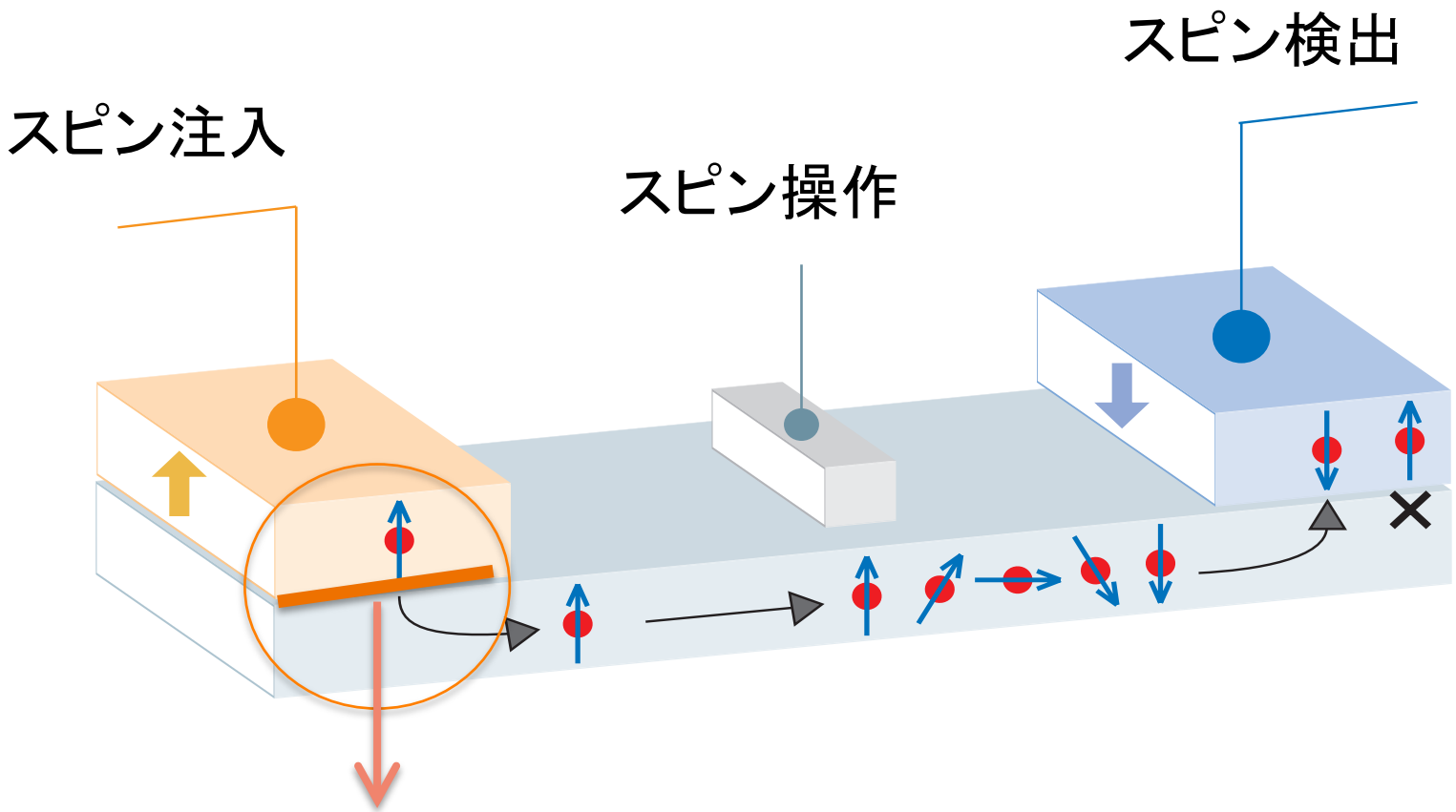
$$\Delta I_{SF} = \Delta I_{heli} - \alpha I_{ph}$$

- 逆方向バイアスではスピンフィルター効果がないことを考慮

まとめ（1）

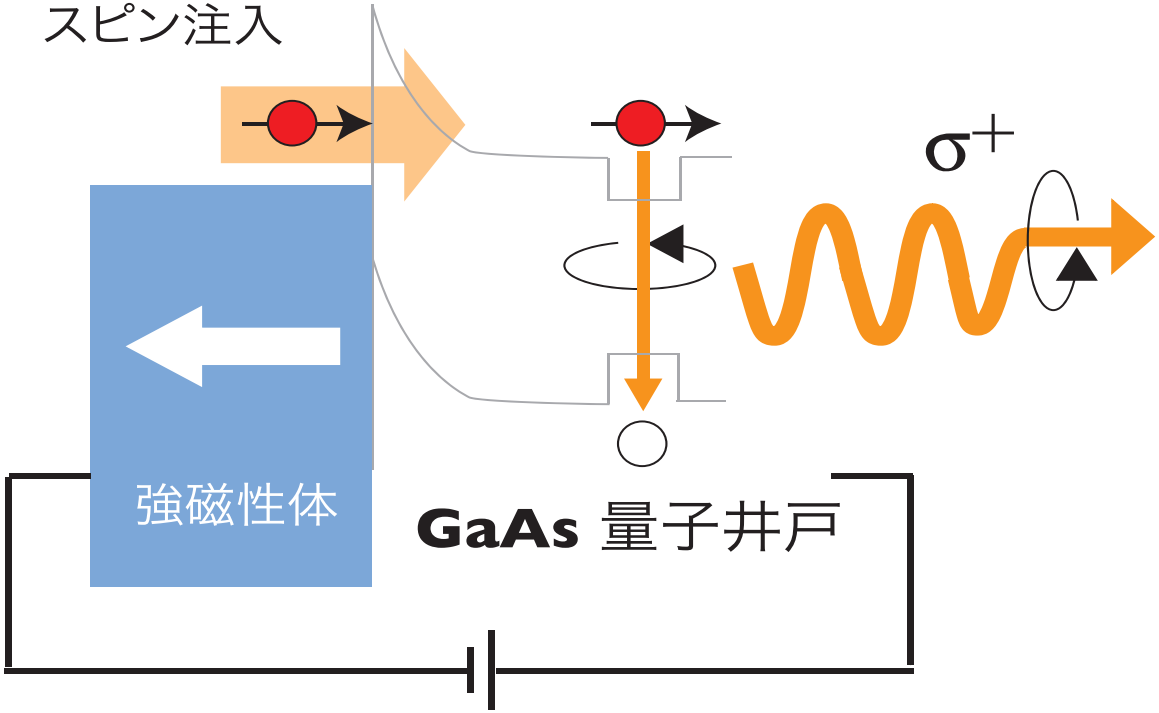
- Fe_3O_4エピタキシャル薄膜をGaAs上に成長することに成功した。
- Fe_3O_4エピタキシャル薄膜によるスピンフィルター効果を円偏光スピン励起法により検出した。
- 室温におけるスピンフィルター効果はハーフメタル特性より期待されるものと比較して小さい。
- 磁気、伝導特性から、小さいスピンフィルター効果は界面においてハーフメタル特性が劣化した結果によると推定される。

スピントロニクスの基本要素技術としての
スピン注入



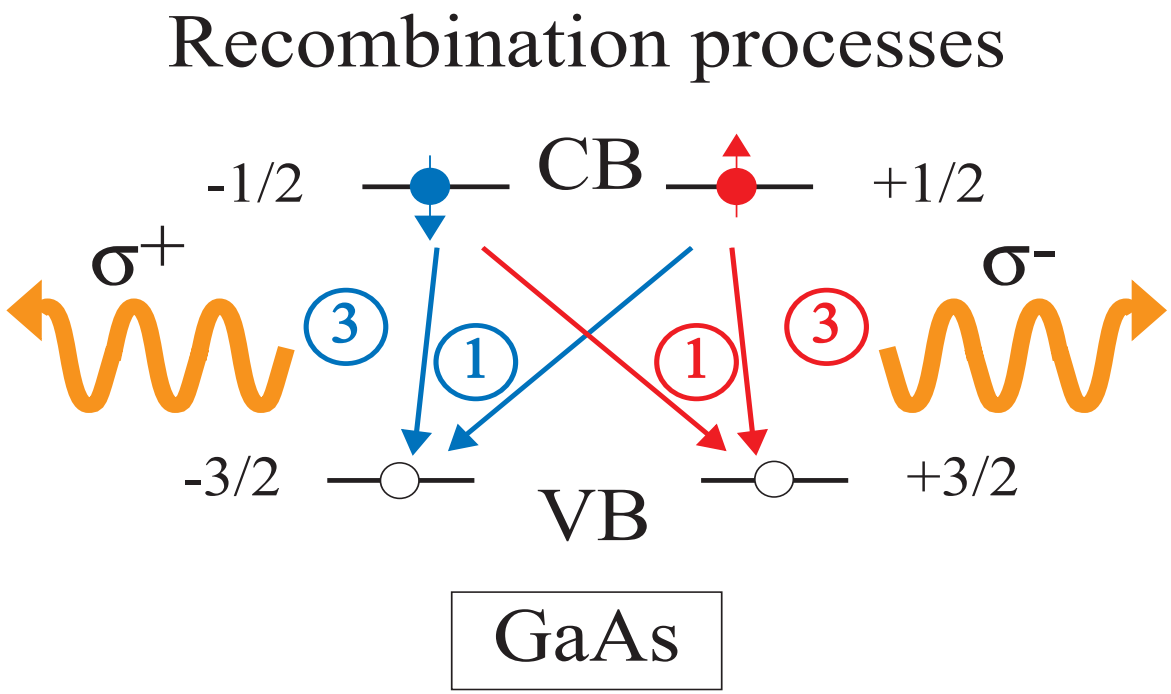
如何にしてスピン偏極電子を効率的に注入するか

半導体量子井戸へのスピン注入



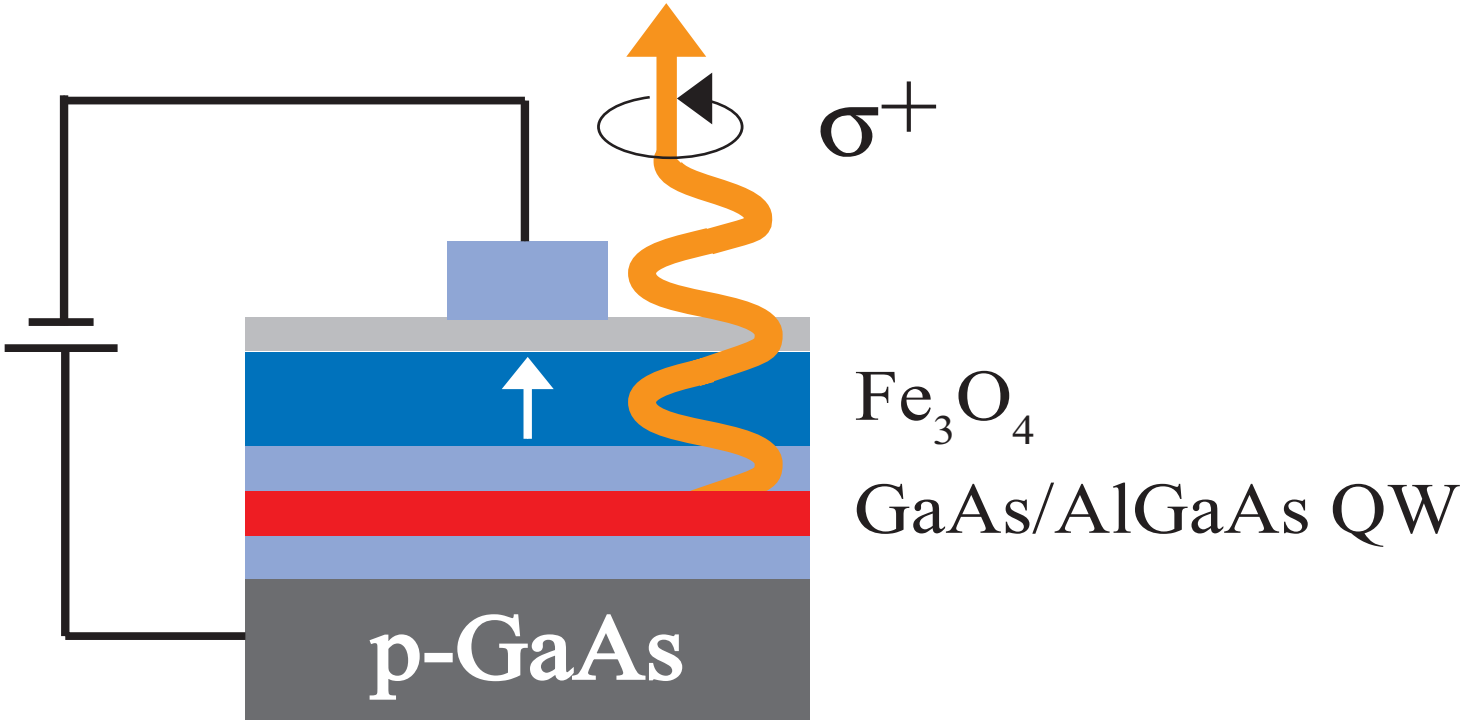
- 強磁性体から半導体へ界面障壁を介したスピン注入電子の注入を行い、光学的手法によりそのスピンを検出する

スピン偏極電子とホールの過程



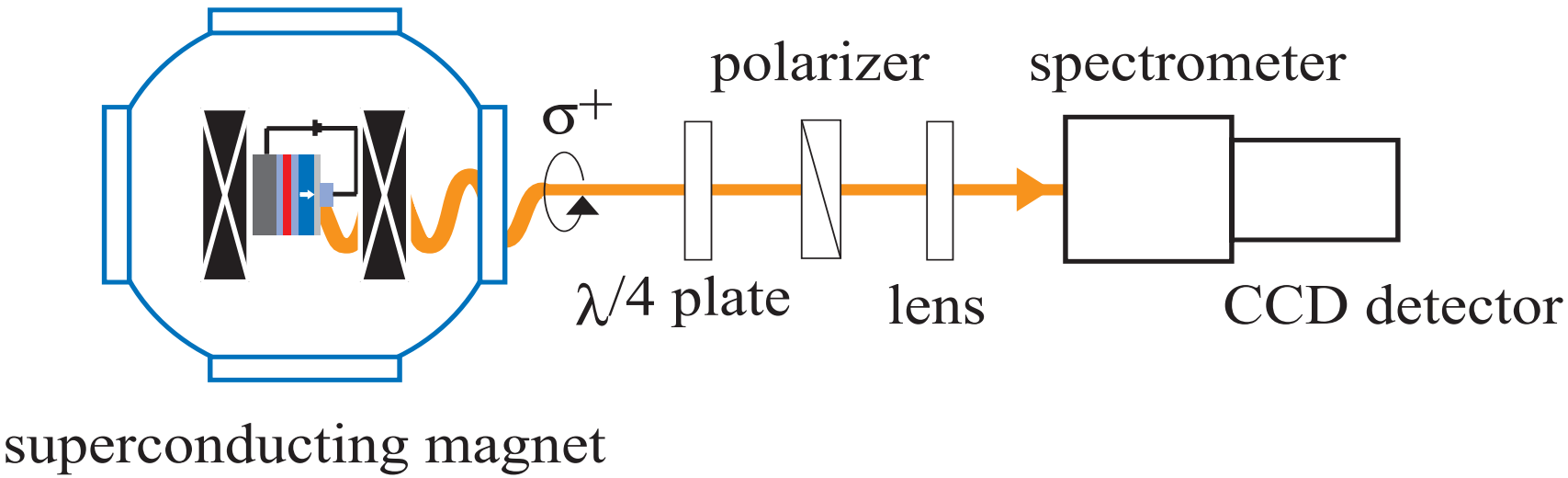
- 再結合過程における発光の円偏光度を解析することで注入された電子のスピン偏極率が算出できる

具体的なデバイス構造



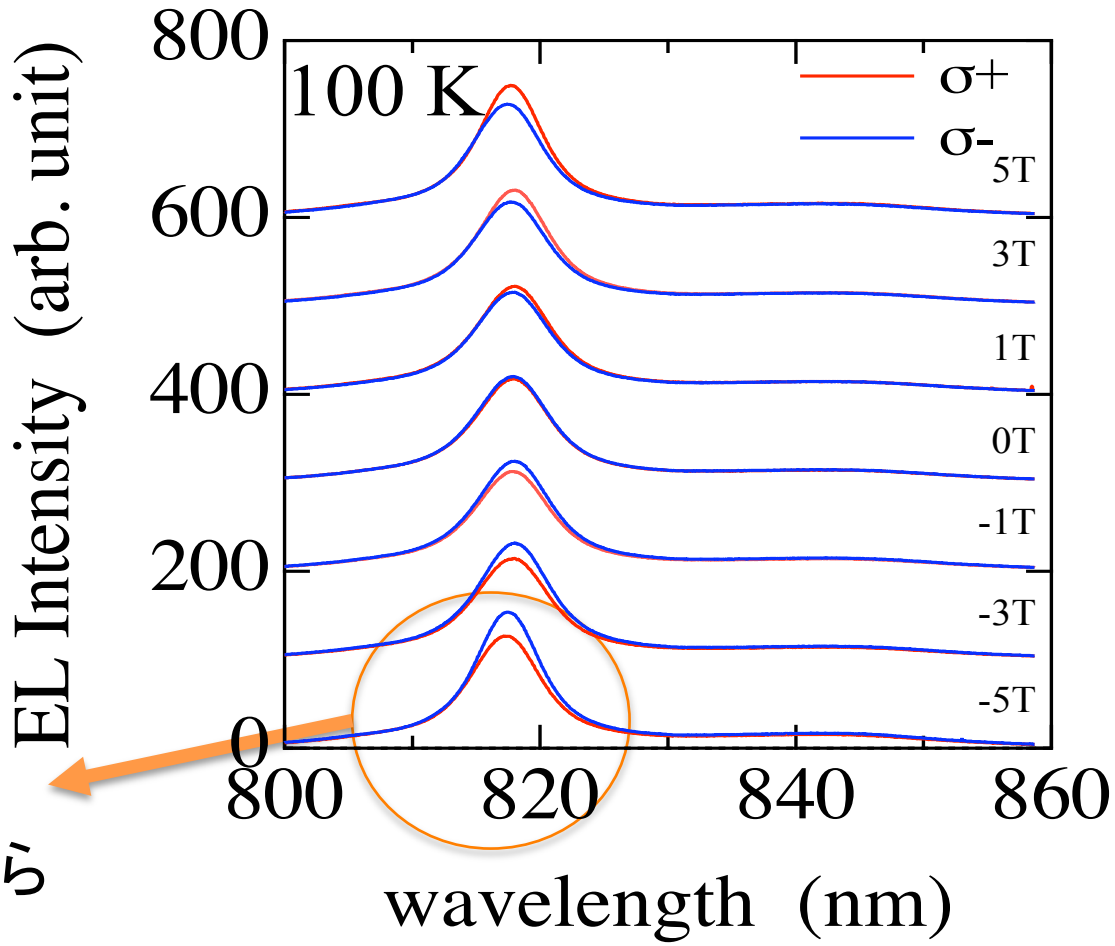
- Fe_3O_4/GaAs−AlGaAs量子井戸（井戸幅20nm）ヘテロ構造

スピン注入による円偏光発光測定系



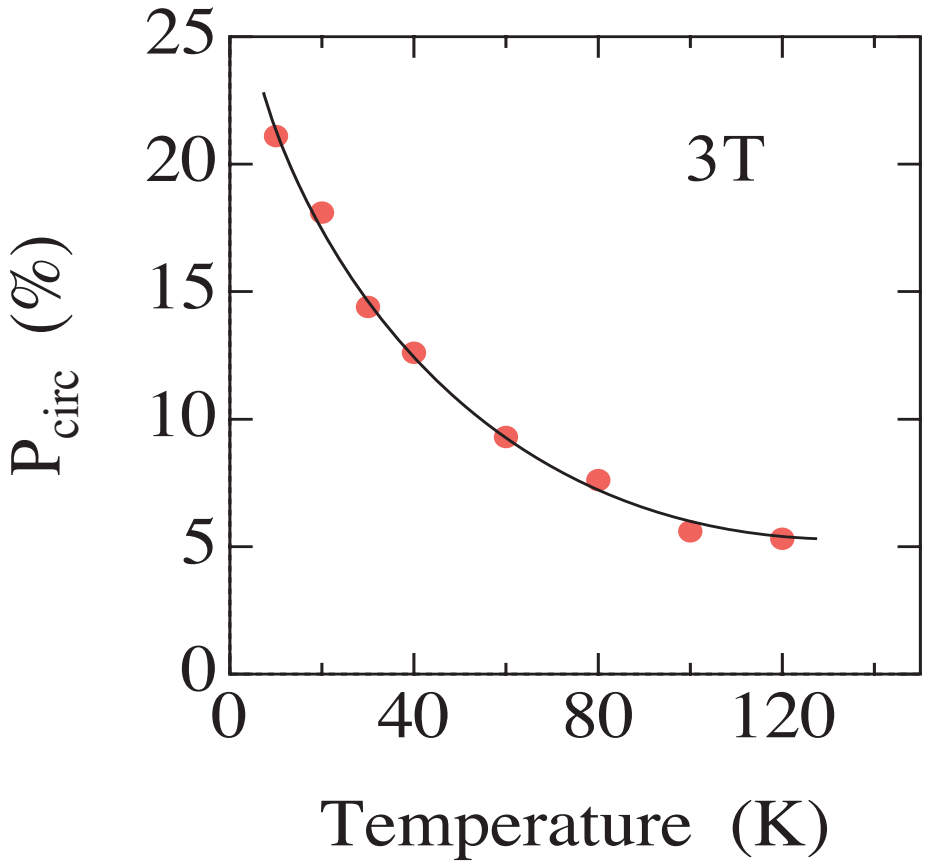
- λ/4板を回転させることで右回り円偏光、左回り円偏光に対応する発光スペクトルを検出

Fe_3O_4/GaAs-AlGaAsヘテロ構造からの発光スペクトル（1） ー 100K



量子井戸からの発光

円偏光度の温度依存性

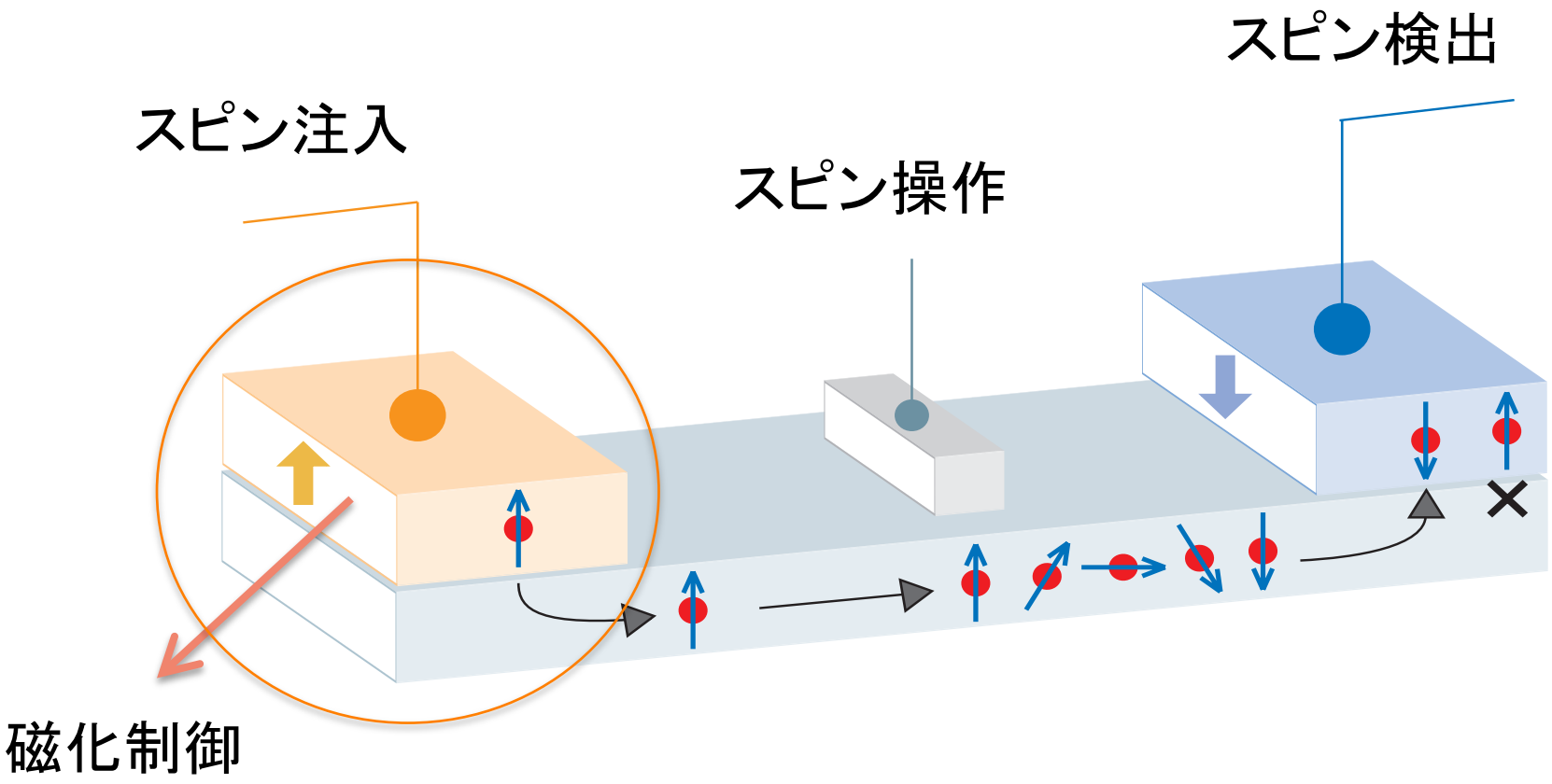


- 120K以下の温度領域において円偏光度が急激に上昇 ー Verwey転移によりFe_3O_4がスピンフィルター

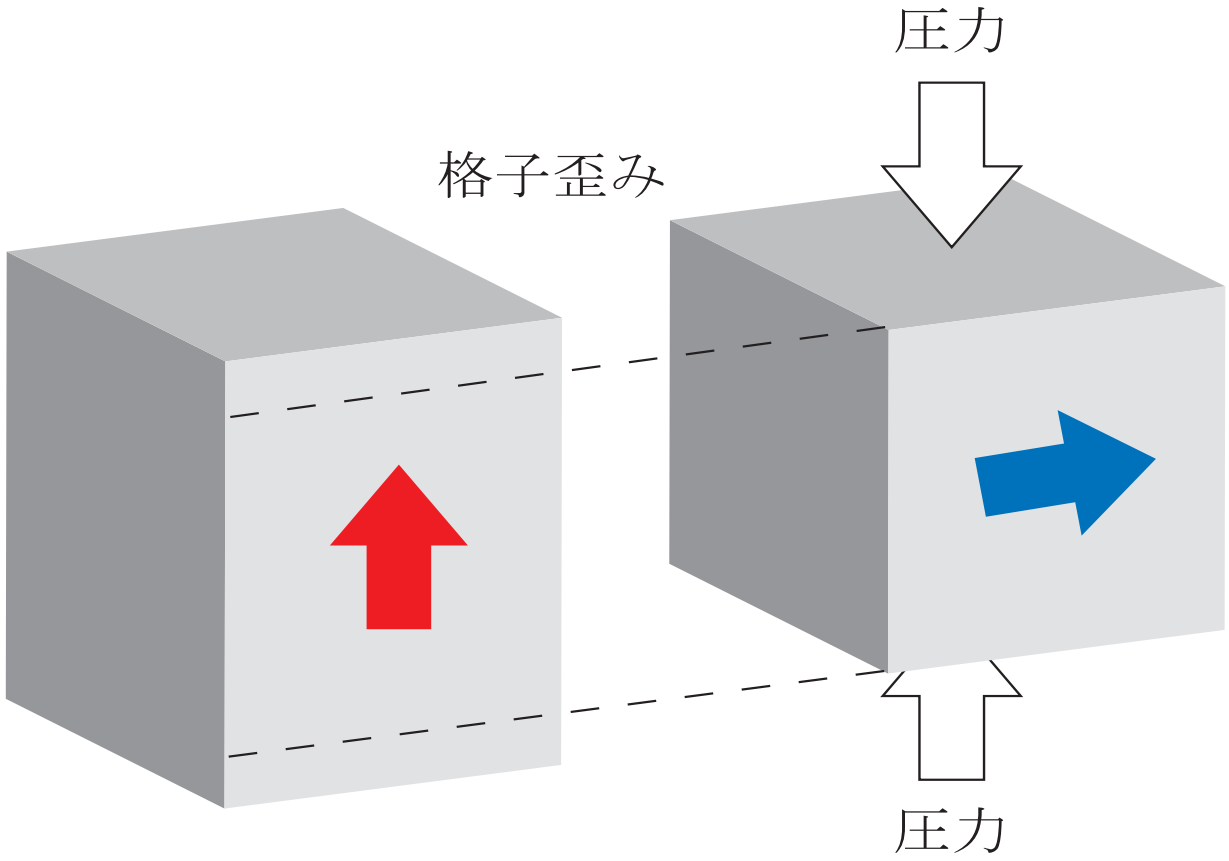
まとめ(2)

- Fe_3O_4単結晶薄膜からGaAs-AlGaAs量子井戸へスピン注入を行い、その際に生じる円偏光発光を解析することでスピン注入効率を推定した。
- 120 K以下の温度領域においてスピン注入効率が顕著となった。
- 低温での顕著なスピン注入効率は、マグネタイトがVerwey転移と関連して絶縁化し、その結果、スピンフィルター絶縁障壁として機能することによると考えられる。

スピントロニクスの基本要素技術としての磁性制御

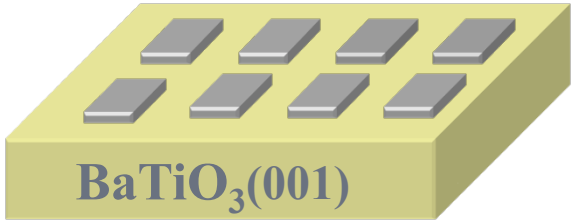


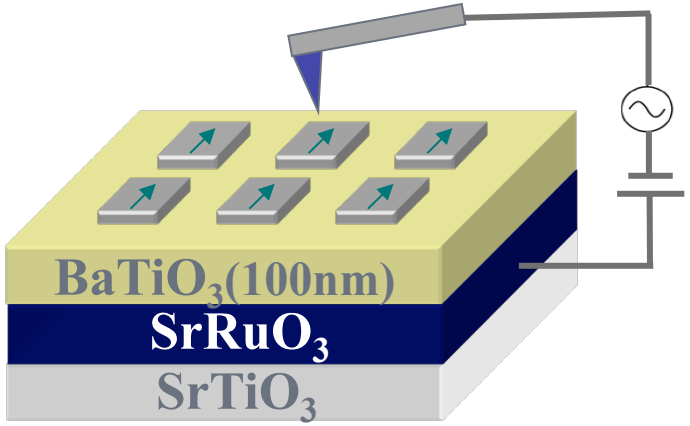
磁気歪み効果



- 格子歪みにより磁化容易軸方向を制御可能

格子歪みを誘起する手法



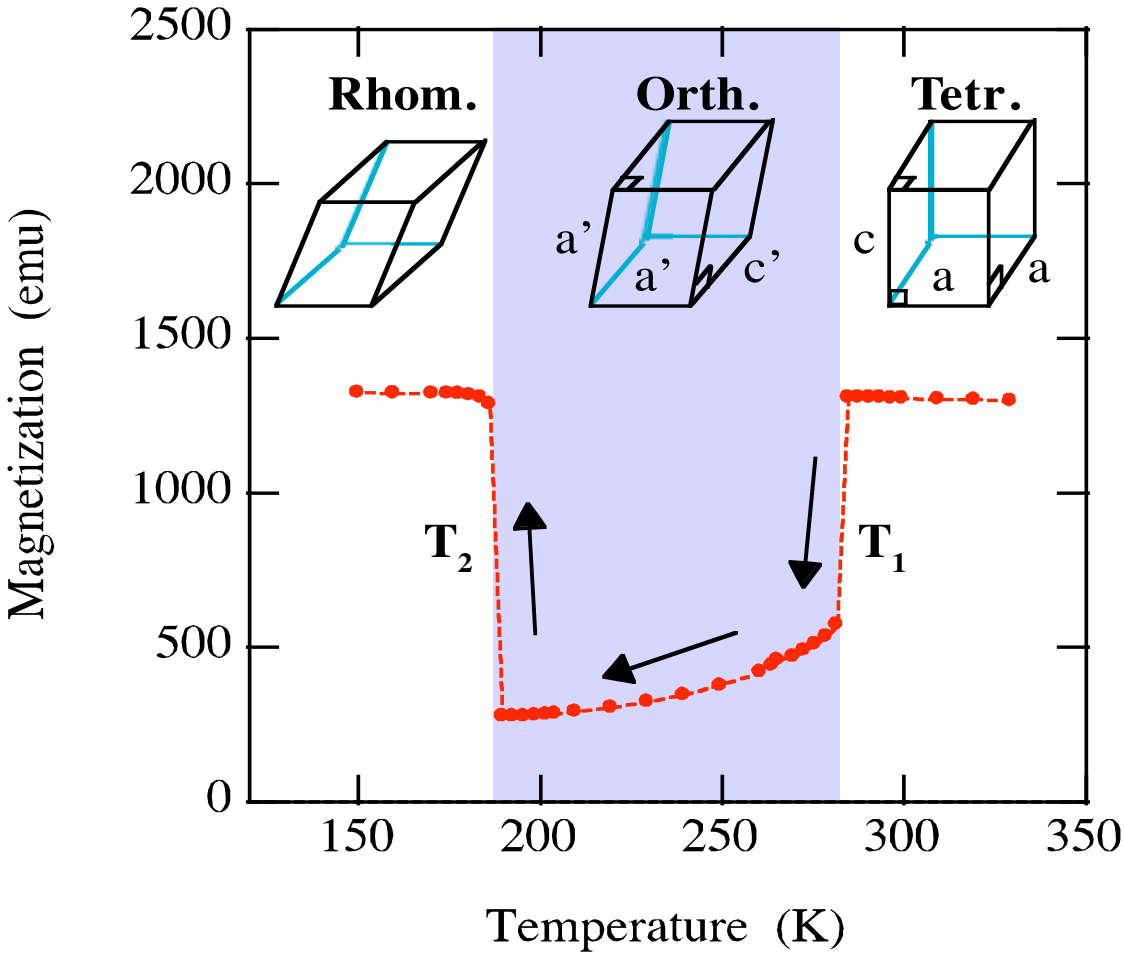


- 構造相転移による方法

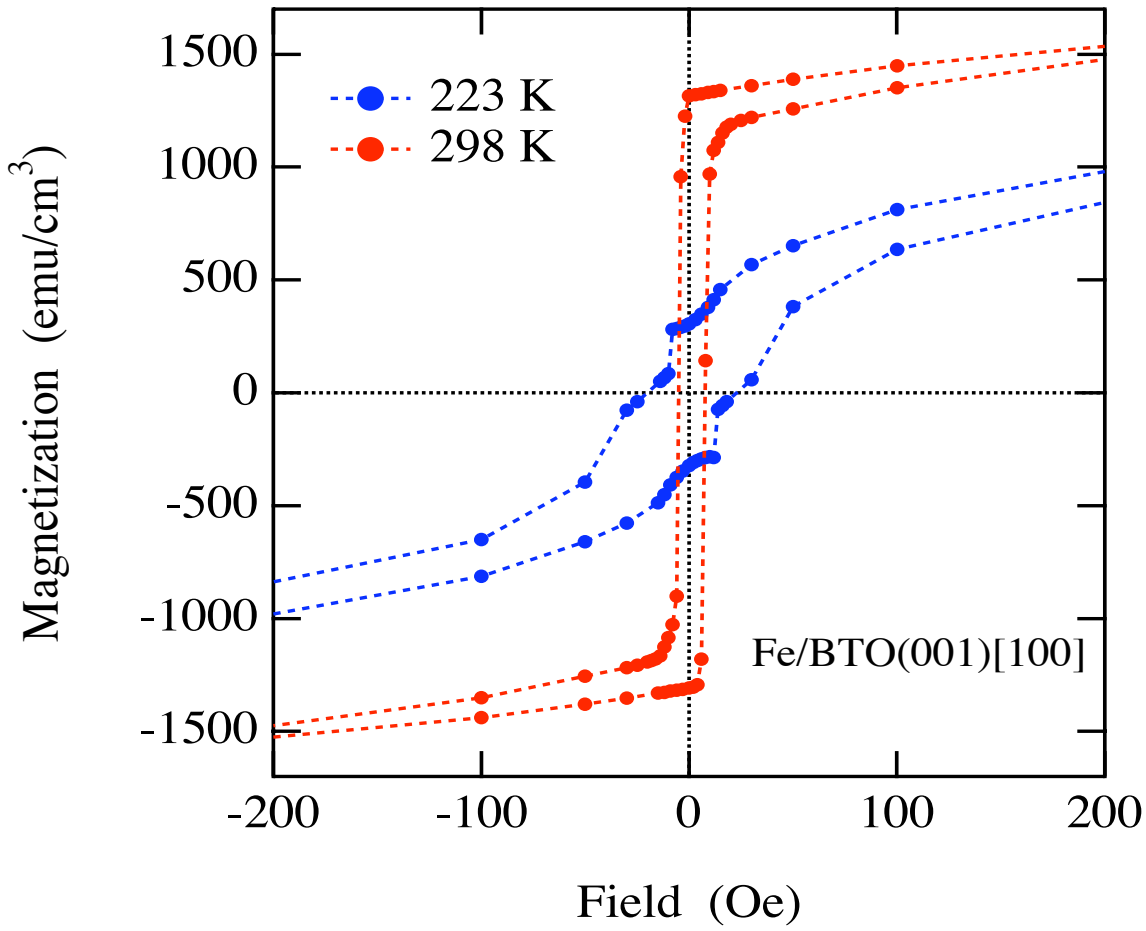
cubic – tetra. phase	393 K
tetra. – othor. phase	278 K
ortho. – rhom. phase	190 K

- 圧電効果による方法

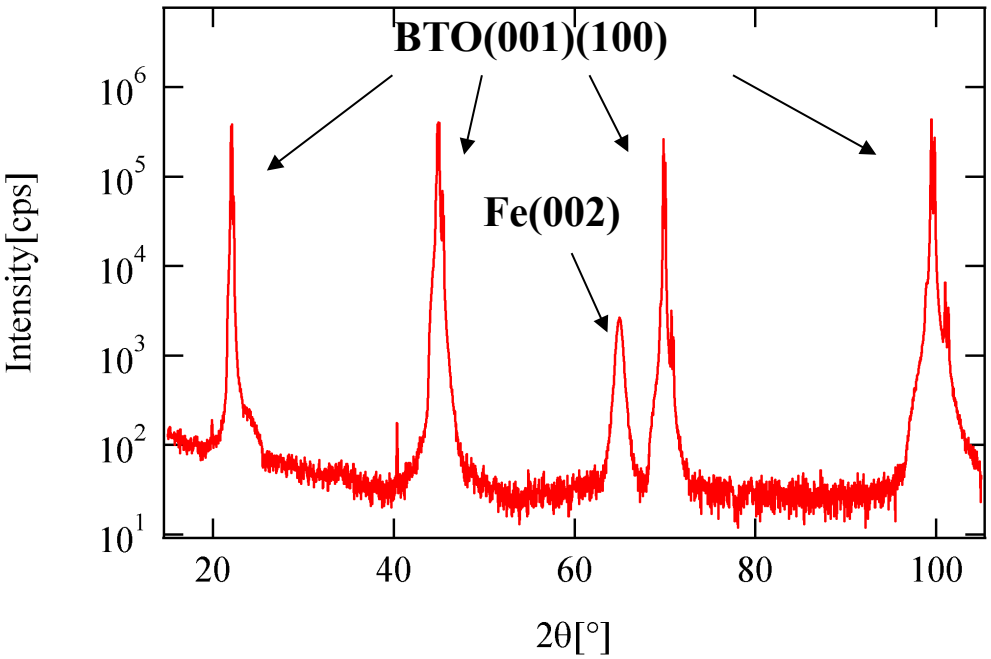
Fe/BaTi0_3ヘテロ構造の磁気特性（1）

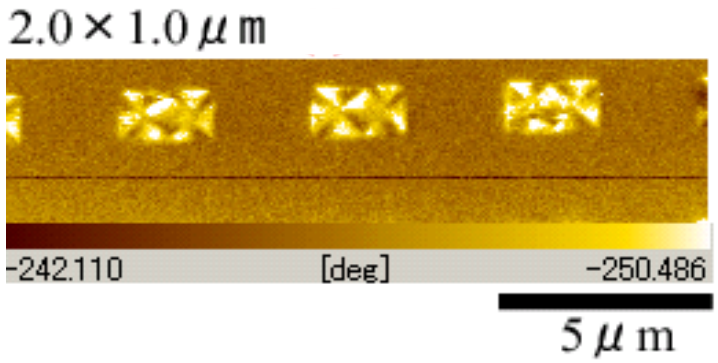


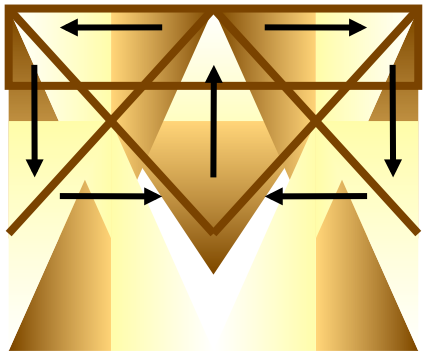
Fe/BaTi0$_3$ヘテロ構造の磁気特性（2）



エピタキシャルFeドット/$BaTiO_3$ヘテロ構造

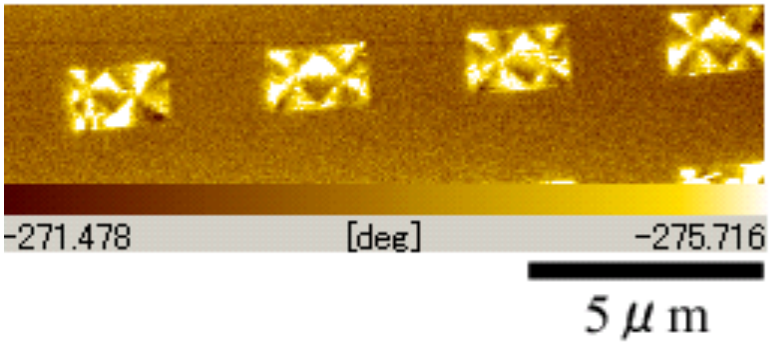




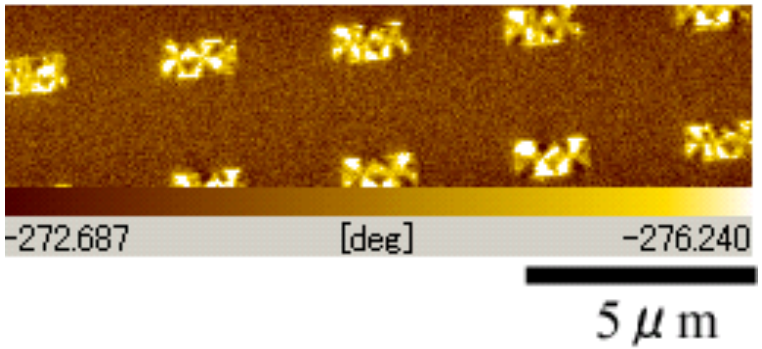


アスペクト比による磁区構造の制御

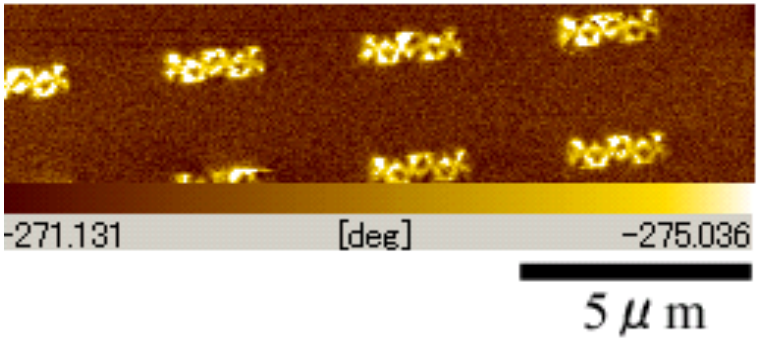
2.0×1.0μm アスペクト比(2)



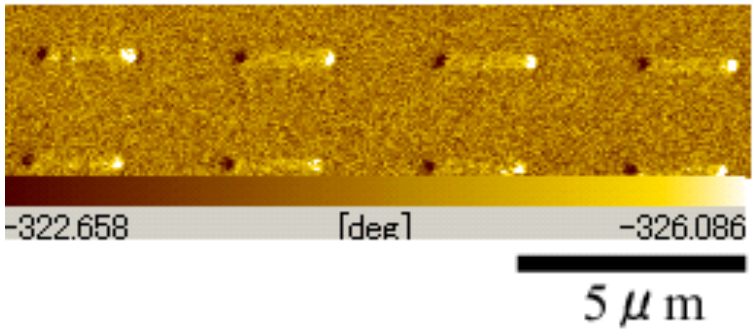
1.5×0.5μm (3)



2.0×0.4μm (5)

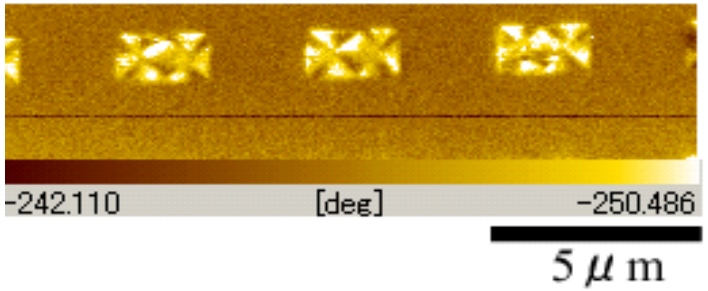


1.9×0.1μm (19)

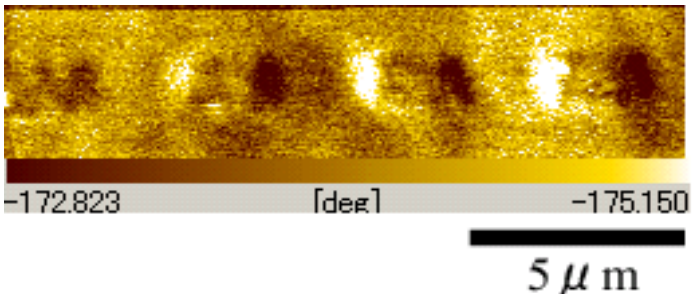


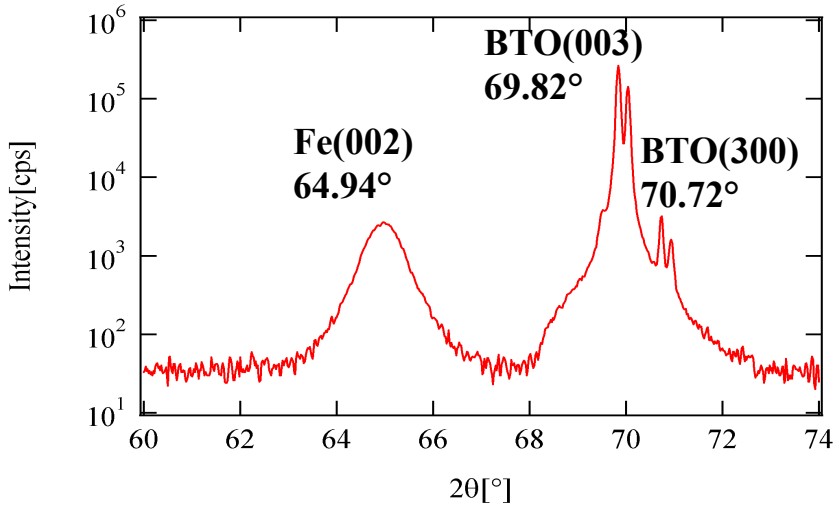
温度履歴による磁区構造変化

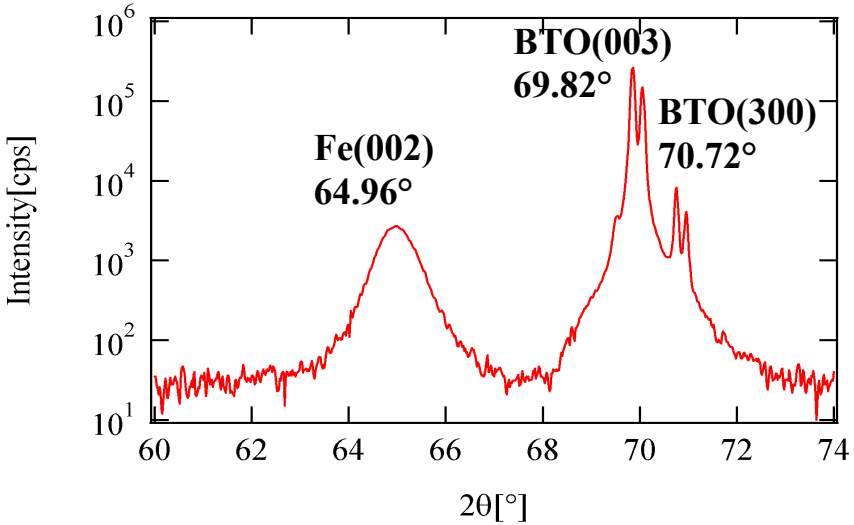
2.0×1.0μm



300K⇔150K



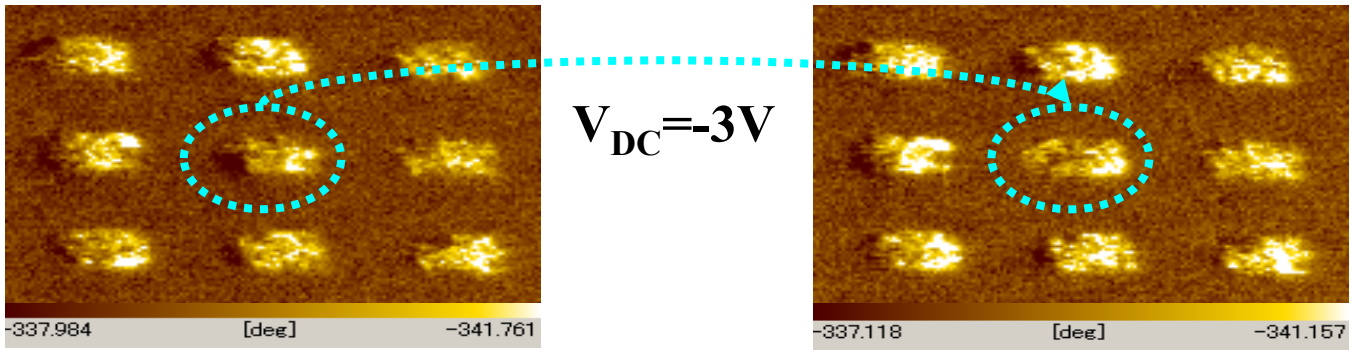


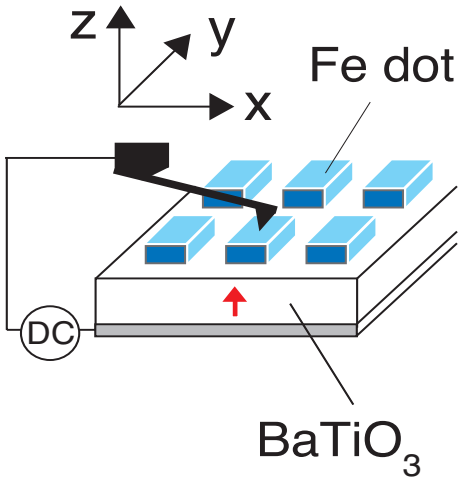


圧電効果による磁区構造変化

Fe dots (2μm×1μm×30nm)/$BaTiO_3$(100nm)/ $SrRuO_3$(200nm)/$SrTiO_3$

MFM





まとめ（3）

- 界面歪み誘起法により、磁気異方性を制御できることを示した。
- Feドット／$BaTiO_3$ヘテロ構造において形状により磁区構造を制御できることを示した。
- Feドット／$BaTiO_3$ヘテロ構造において、CoFeTaBと同様に歪みにより磁気異方性が変化することを観測した。
- Feドット／$BaTiO_3$ヘテロ構造において、圧電効果により磁気異方性を変化させられることを示した。

総括

- Fe_3O_4／GaAsヘテロ構造において、円偏光スピン励起法により、スピン検出法の可能性について検討した。

- Fe_3O_4／GaAs-AlGaAs量子井戸構造を用いて、円偏光発光解析によりスピン注入を行い、Fe_3O_4がスピンフィルターとして機能することを示した。

- Fe／$BaTiO_3$ヘテロ構造において、格子歪みにより磁性制御が可能であることを示した。

スピントロニクスを実現するための必須要素技術