



次々世代高性能磁気デバイスの低消費電力稼働化のための新規方式および新規材料

秋田大学 大学院理工学研究科
物質科学専攻 材料理工学コース

吉村 哲

(大学院理工学研究科 附属革新材料研究センター長)

磁性細線メモリ〈IBM提案(2008)の次々世代記録デバイス〉の特長と問題点

特長

記録媒体: 貴金属フリー(安価な材料)の
磁性ナノワイヤー(耐衝撃性)

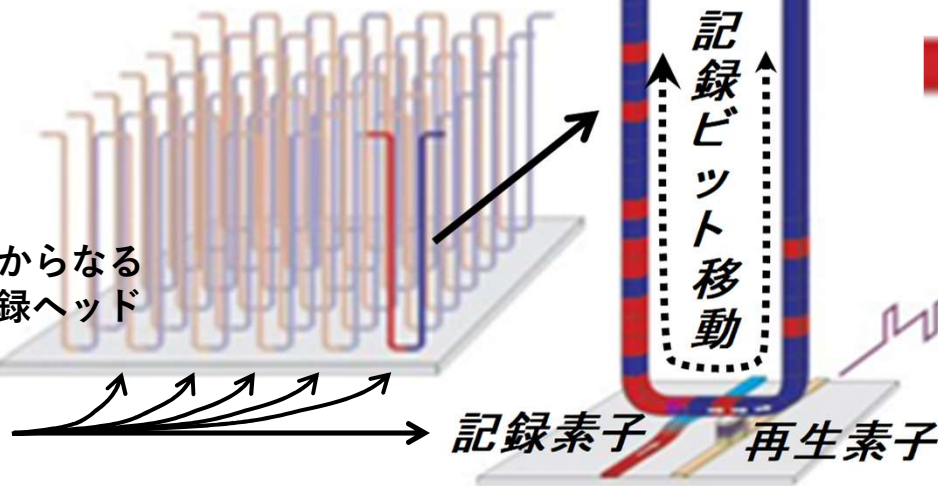
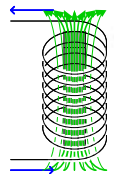
⇒ 情報不揮発性

⇒ 3次元記録
(超大容量: 100 Tbit以上)

記録ビット(磁区)の移動: スピン注入方式

⇒ モーターフリー(低消費電力稼働)

コイルと鉄心からなる
HDD用磁気記録ヘッド



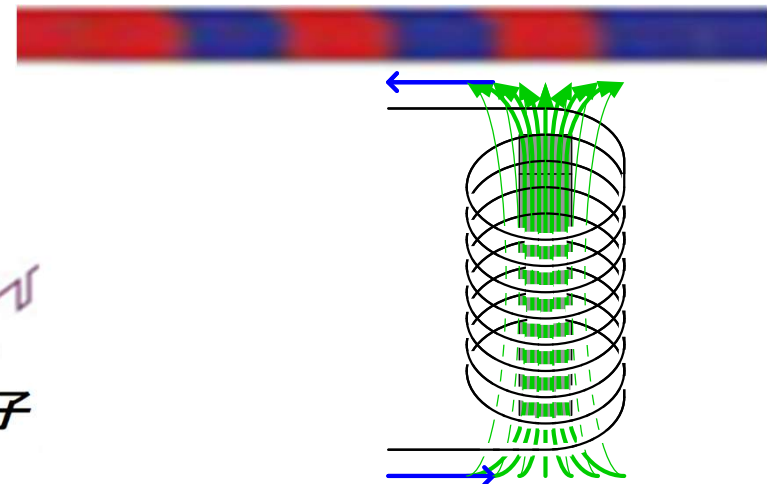
現状、HDD用磁気記録ヘッドを用いた書込みの検証、
磁区移動の機能検証およびそのメカニズムの議論、
が活発に行われているが、デバイス形成には至っていない。

問題点

書込み方式: HDDと同じ電流磁界
(高い消費電力記録)
(困難な書込み)

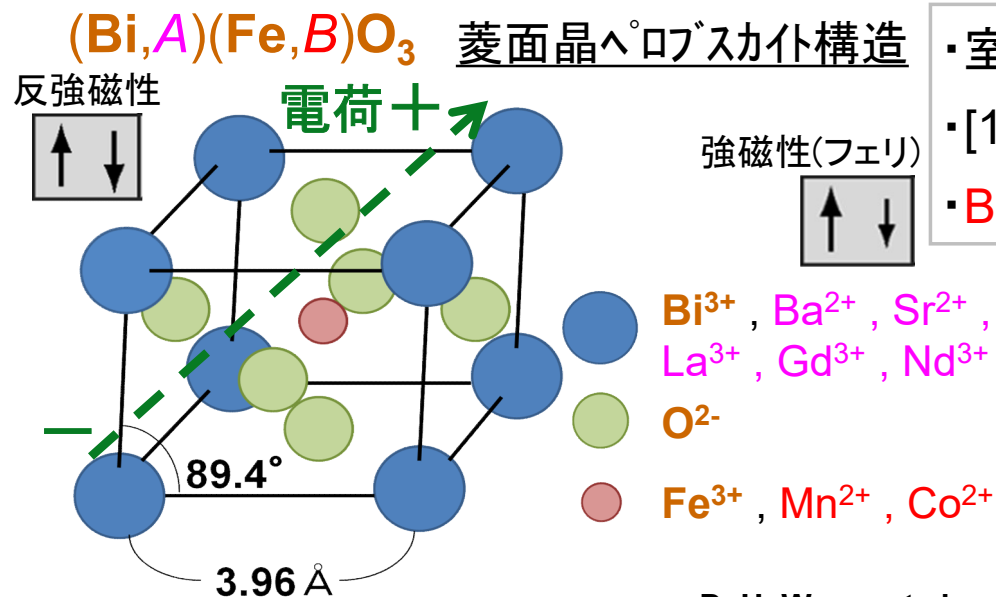
記録素子: HDDと同様の磁気記録ヘッド
(複雑構造な記録素子)
(素子の多数配置)

ナノワイヤー状記録層



材料 強磁性・強誘電薄膜を用いた新記録方式による問題解決の提案

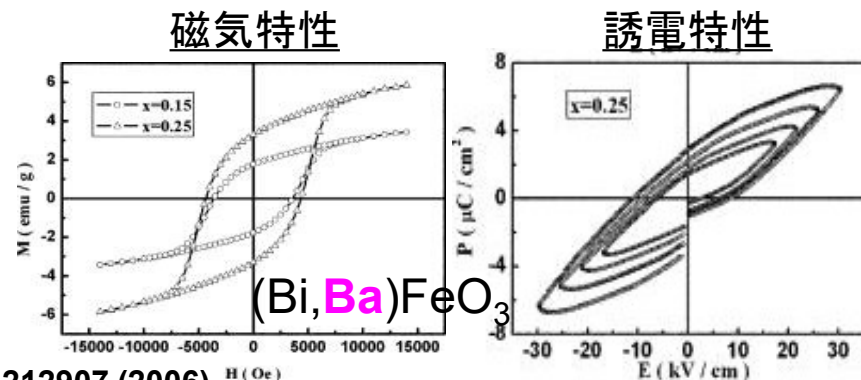
(高消費電力・困難な書込み・複雑素子の多数配置)



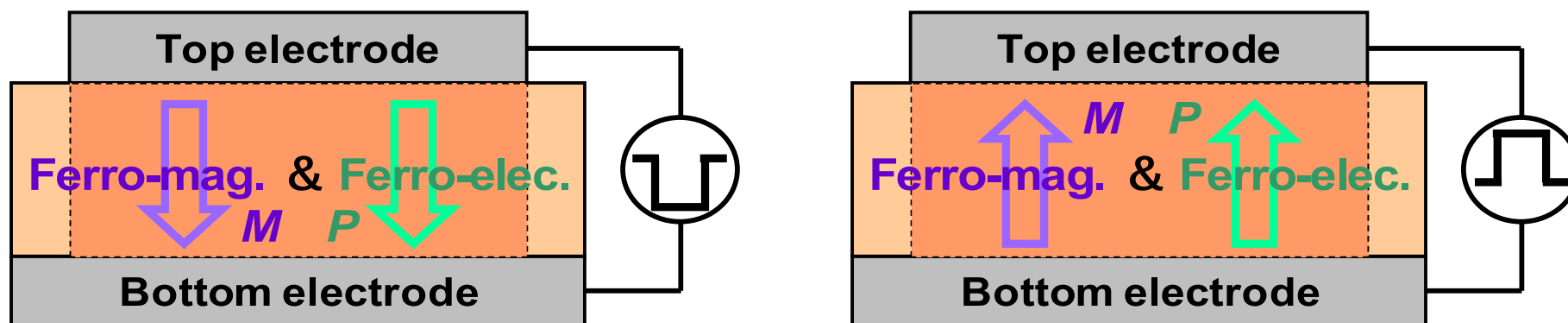
- ・室温で強誘電性を示す ($T_c = 850^\circ\text{C}$)
- ・[111]に自発分極を持つ ($P_s = 100 \mu\text{C}/\text{cm}^2$)
- ・BiやFeの特定元素置換で室温強磁性を示す

D. H. Wang, et al.,

Appl. Phys. Lett., 88, 212907 (2006)



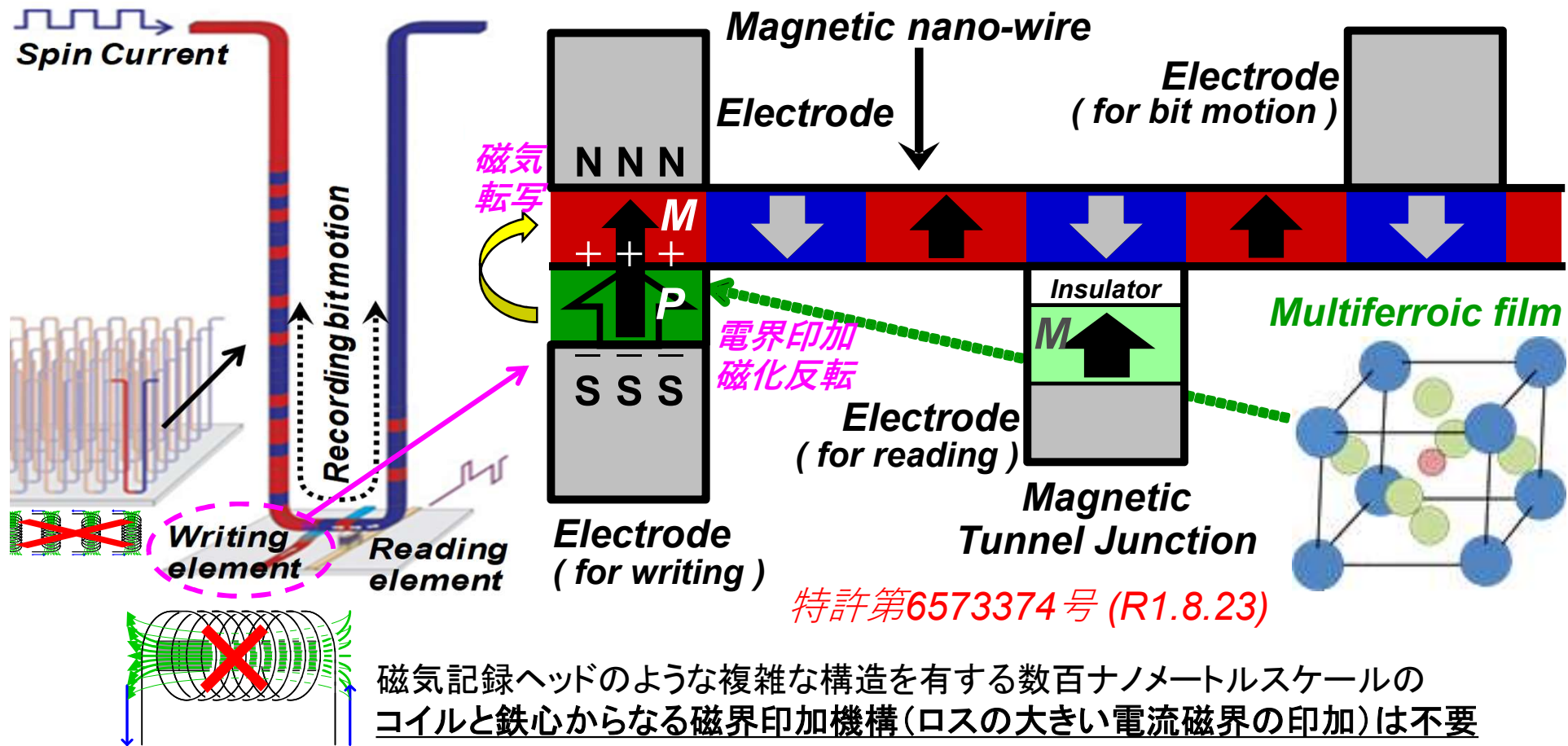
単相型の強磁性・強誘電薄膜を用いた電圧印加のみで完全磁化反転の模式図



- ・書込み時の電流は小 ≪低消費電力≫
- ・強電界の印加が可能 ≪容易な書込み≫
- ・記録素子構造が単純 ≪低製造コスト≫
- ・貴金属を使わない ≪低製造コスト≫

構想1 電界駆動型の低消費電力な磁性細線メモリ

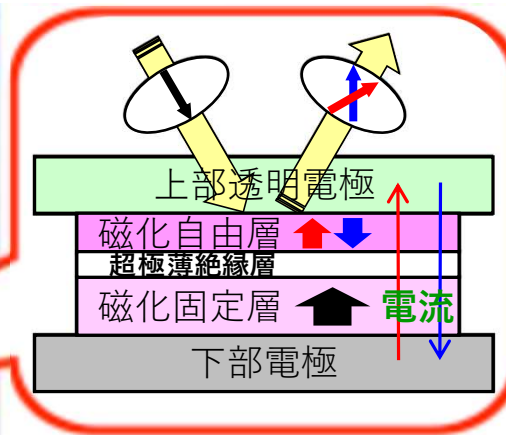
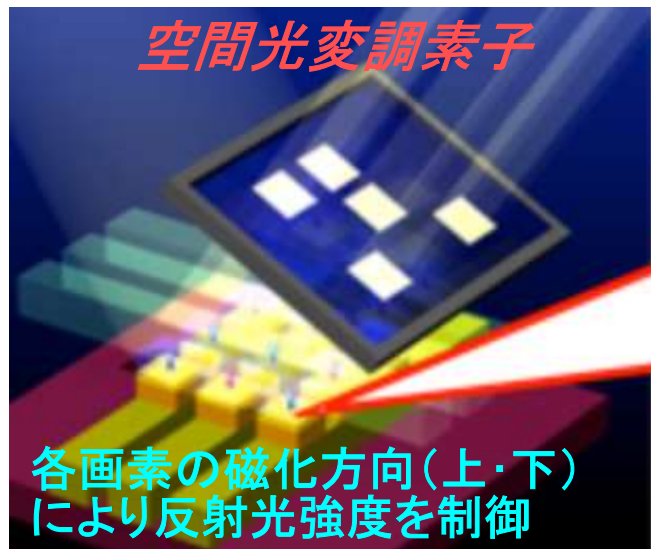
【大容量、低電力稼働・記録、容易な書込、低コスト(材料・製造)、耐衝撃、を全て満たす】



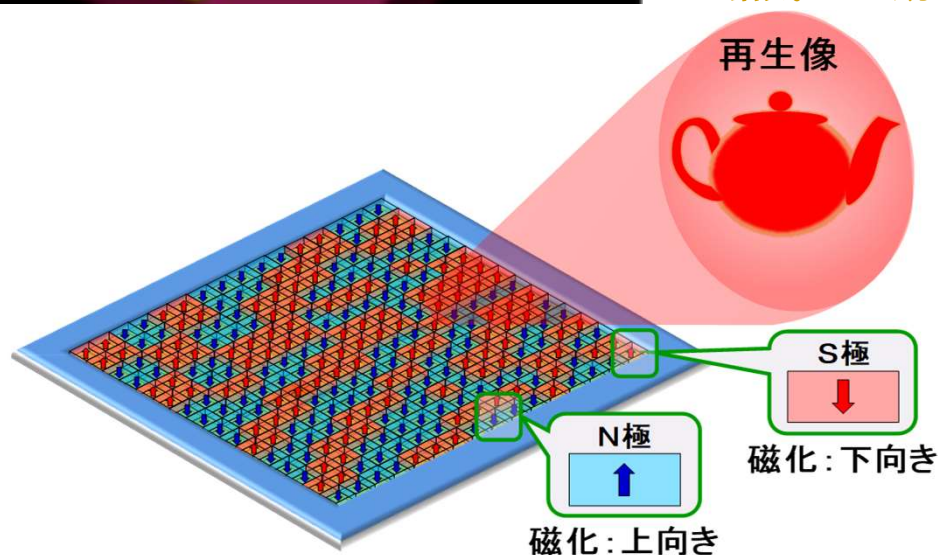
- 書込み: 1. 書込み電極間に電界を印加して強磁性・強誘電薄膜を磁化させる。
2. 強磁性・強誘電薄膜の磁化がワイヤー状磁性薄膜に磁気転写されることで、
記録ビットを形成する。

強磁性・強誘電薄膜を適切に配置・使用することで、書込み電力を飛躍的に低減
記録素子構造を劇的に簡略

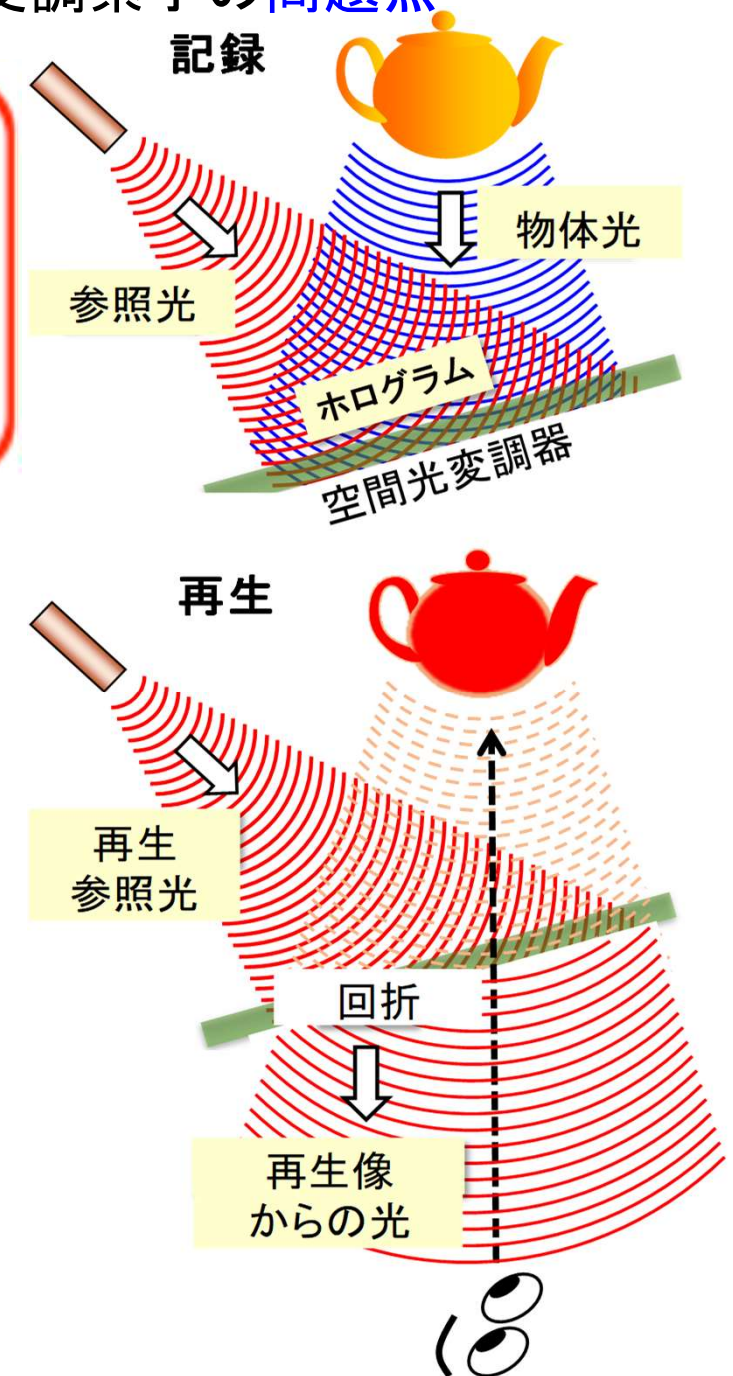
現在提案されている立体映像表示用の空間光変調素子の問題点



「スピン偏極電流」による
磁気Kerr効果の変調

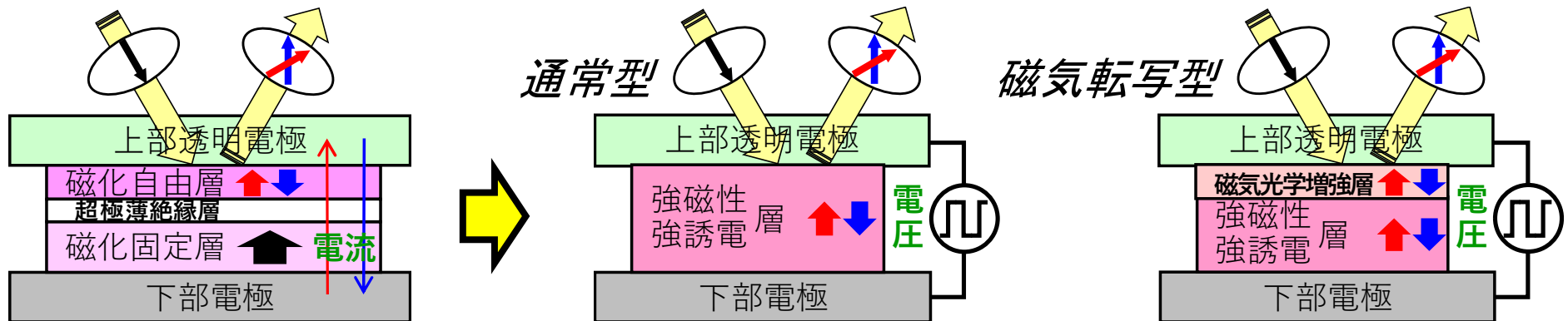


大画面化・高精細化には多数の画素が必要
⇒ 多数の画素に電流を流すことになるので
稼働電力が莫大になる



構想2 電界駆動型の低消費電力な空間光変調素子

【大画面、高精細、低電力稼働、低コスト(材料・製造)、を満たす】



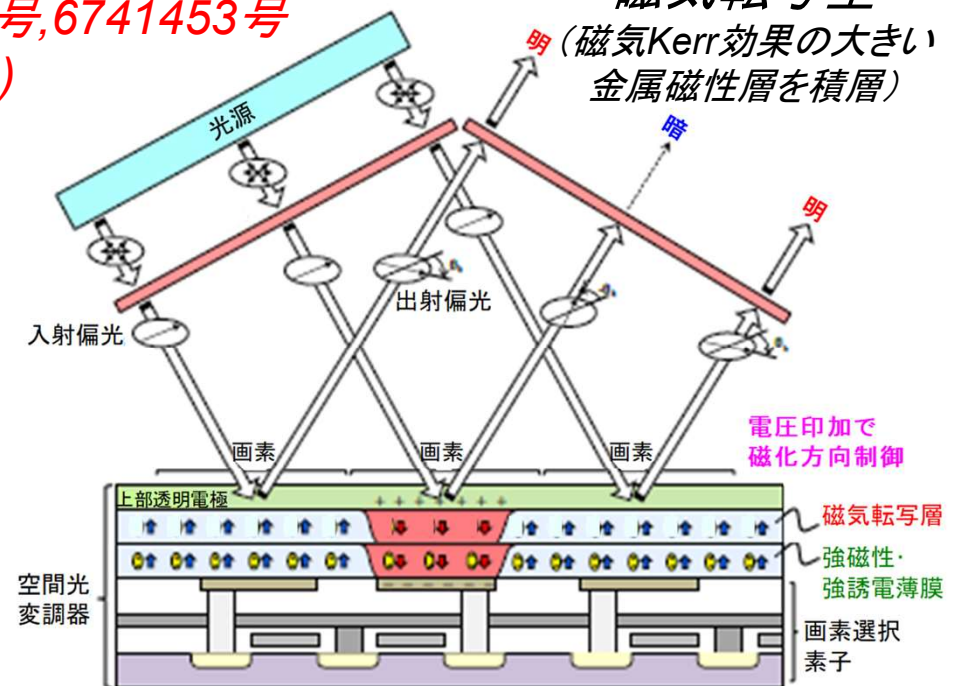
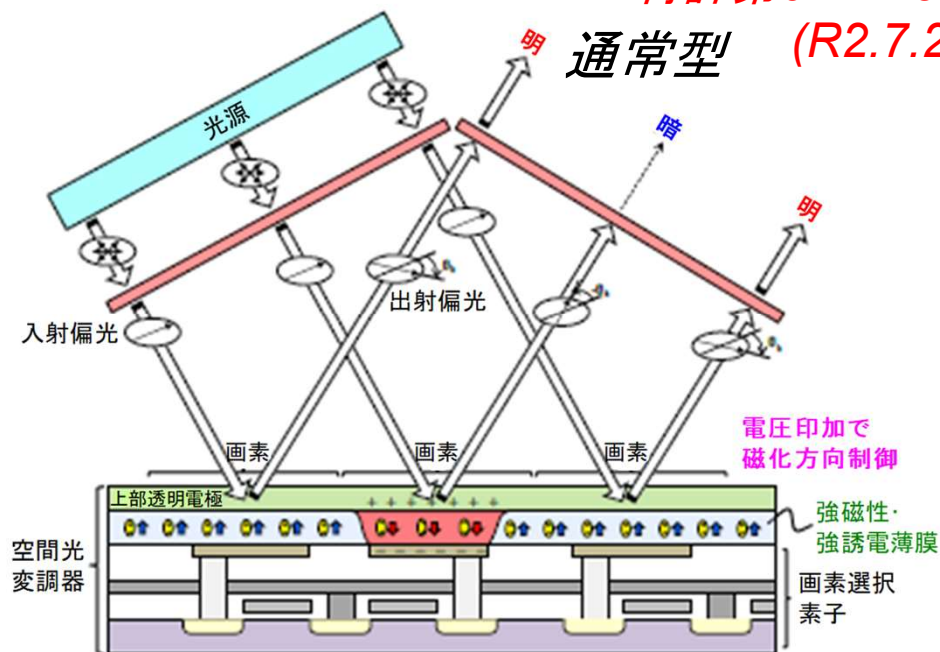
強磁性・強誘電薄膜を用いた電界駆動型空間光変調素子

特許第6741452号, 6741453号

通常型 (R2.7.29)

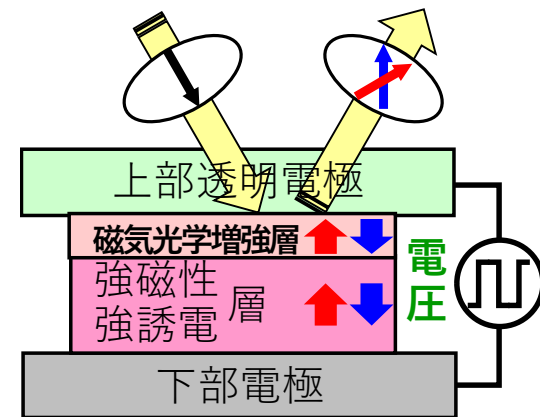
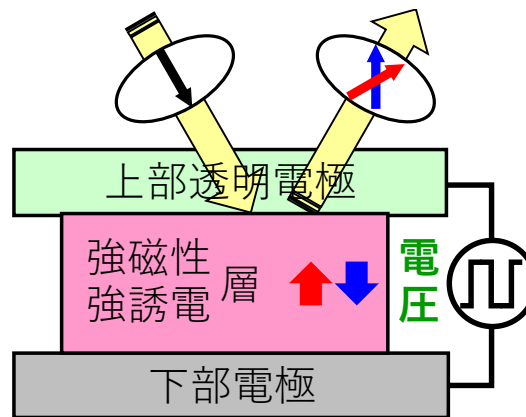
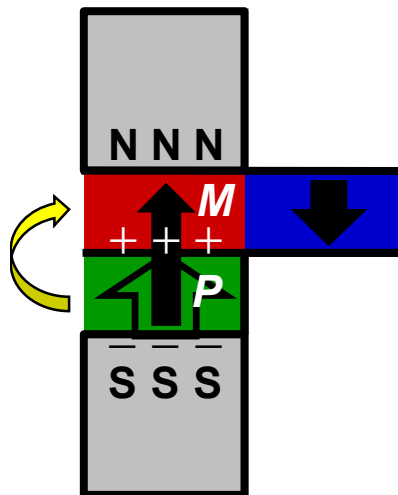
磁気転写型

(磁気Kerr効果の大きい
金属磁性層を積層)

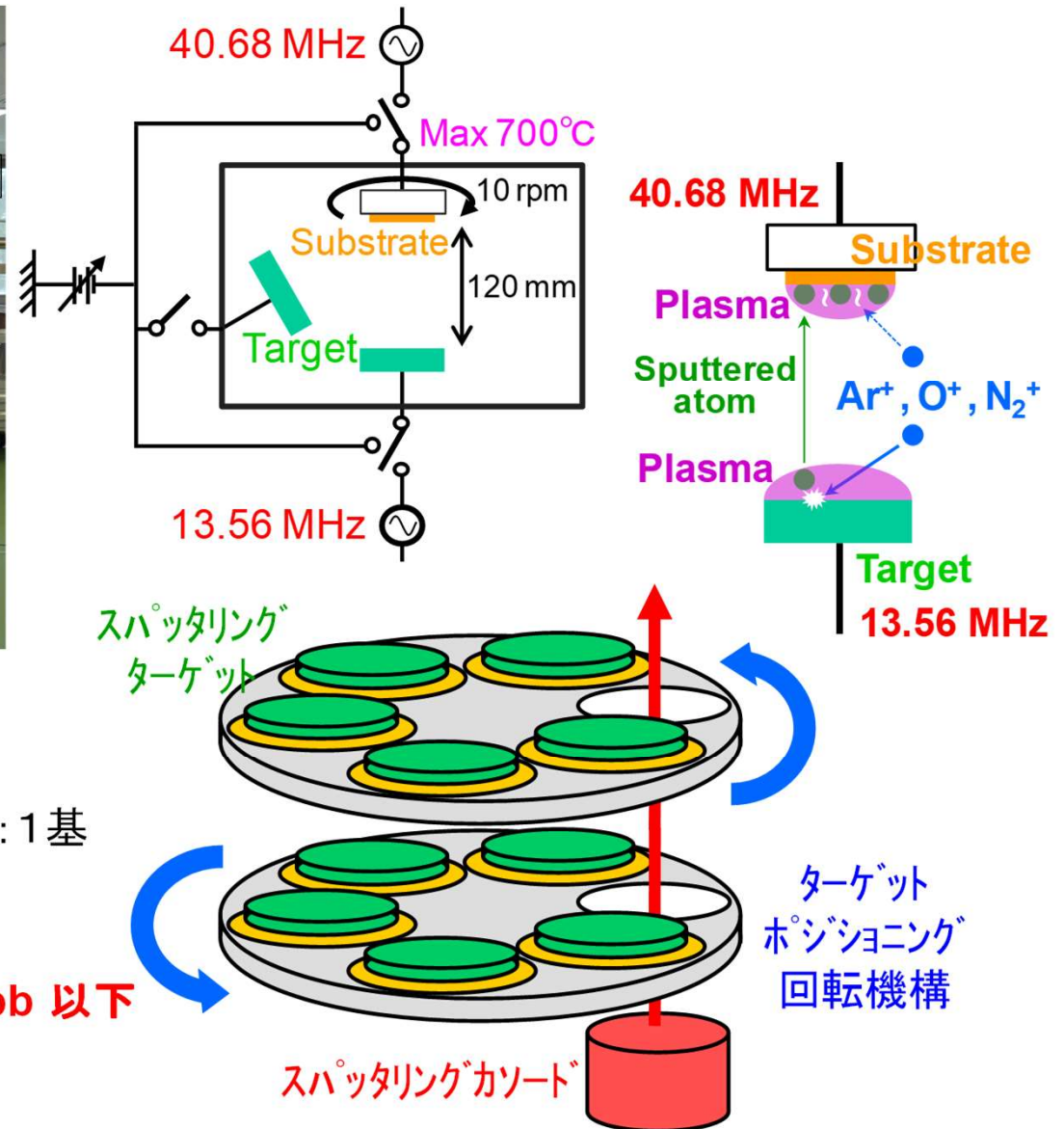
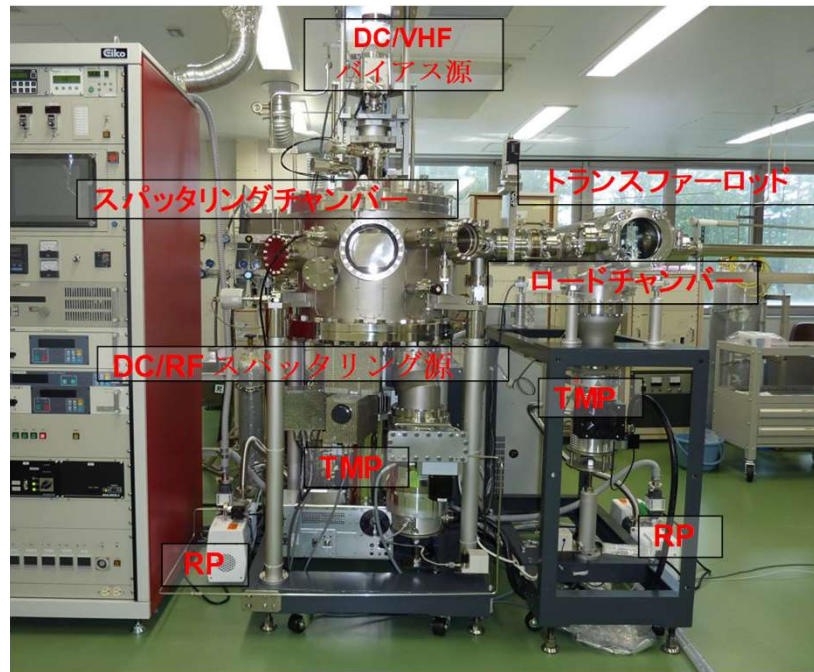


目的

次々世代高性能磁気デバイスの超低消費電力稼働化に向け、
大きな飽和磁化,垂直磁気異方性・大きな磁気Kerr効果を持つ
強磁性・強誘電体薄膜材料の探索および作製、
そしてその薄膜を用いた「電界印加磁化反転」および
「電界印加磁気転写」のデモンストレーションを行う。



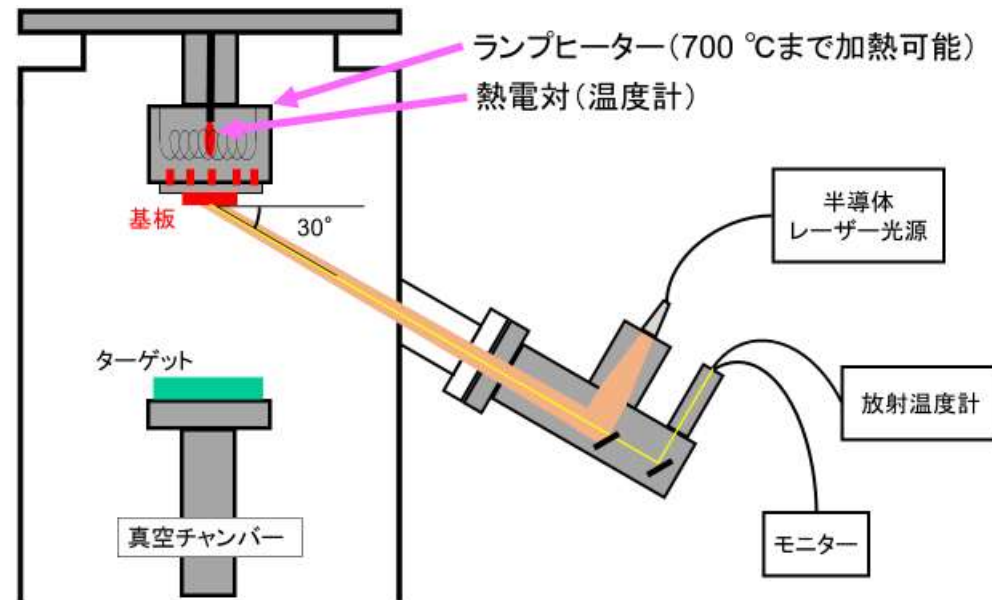
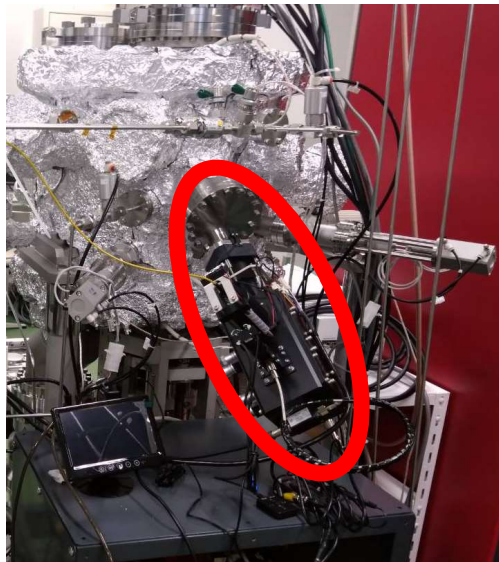
実験装置 超高真空対応スパッタリングシステム(エイコー社製) (秋田大学 地方創生センター2号館(共通機器登録))



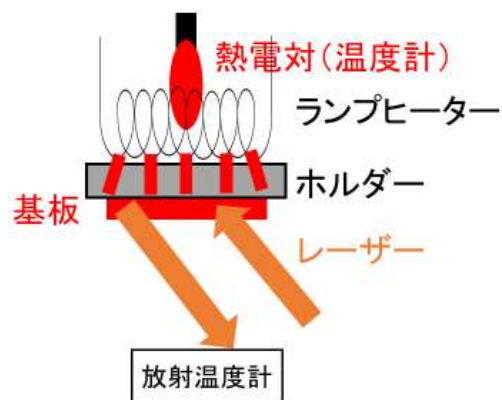
- ・到達真空度: **2×10^{-7} Pa 以下**
- ・最高基板温度: **700 °C** (ランプ加熱)
- ・VHF電源: 1基、RF電源1基、DC電源: 1基
- ・スパッタリングターゲット: **11枚** 収納
- ・**2元同時** スパッタリングが可能
- ・Ar、N₂、O₂ガス中の不純物レベル: **10 ppb 以下**
- ・Ti ゲッターポンプ内蔵

成膜中の薄膜へのVHFプラズマ照射機構と2元同時スパッタリング機構を導入時に特別に追加

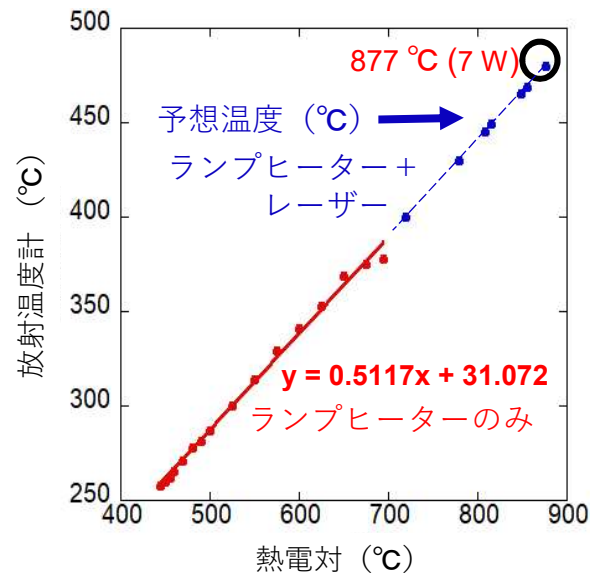
装置改良 酸化物薄膜の高品位化(結晶化促進)のために ~設置位置~ ⇒ レーザーアシスト加熱機構(パスカル社製)の追加設置



~到達温度~



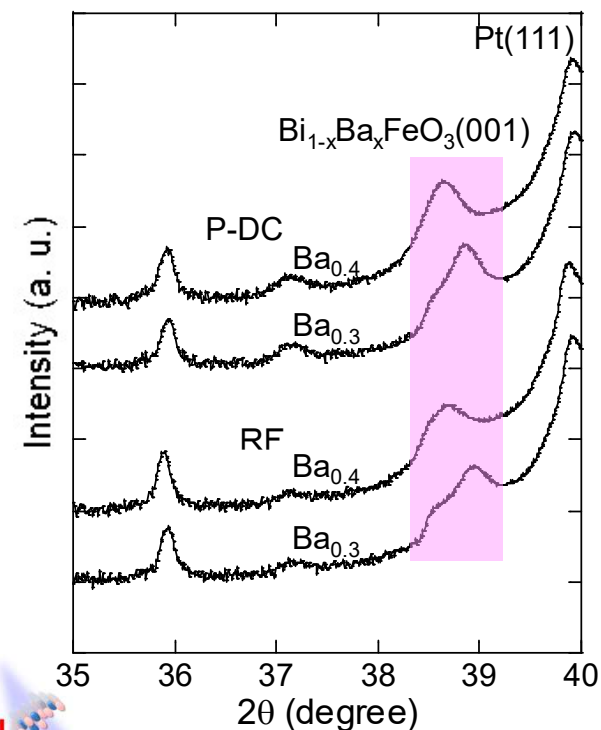
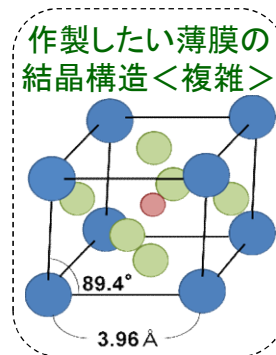
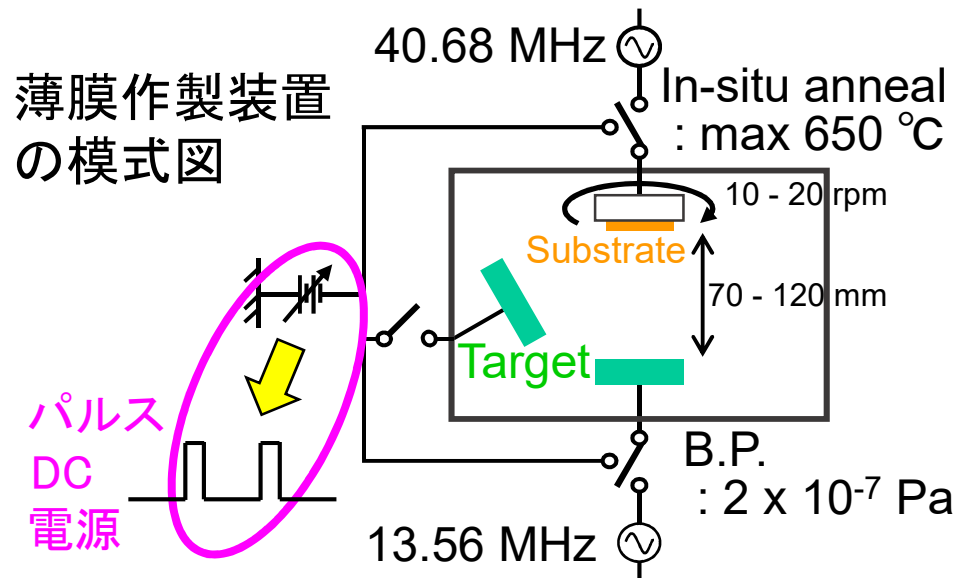
基板付近拡大図



電力(W)	予想処理温度(°C)
0	695
3	779
4	808
5	816
6	858
7	877

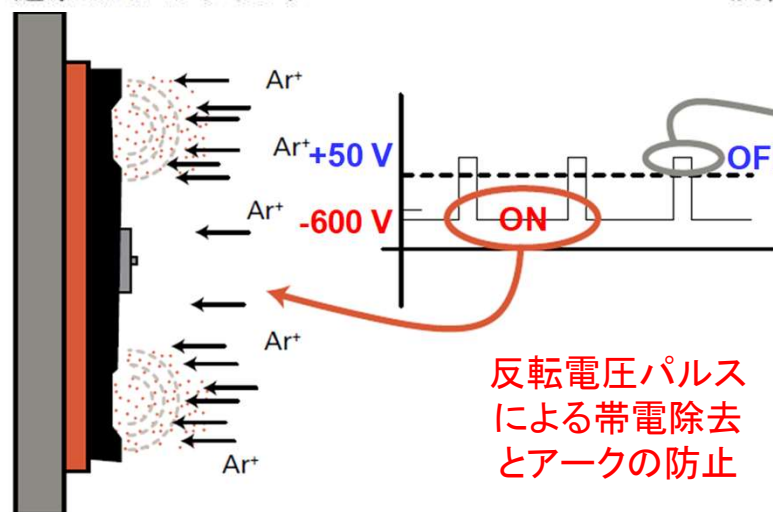
877 °C (7 W) 成膜では薄膜からBi蒸発

装置改良 酸化物薄膜の高品位化(結晶化促進)のために ⇒ 成膜用のパルスDC電源(アルバック社製)の追加設置

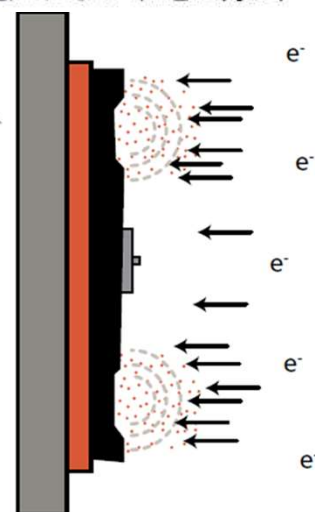


反応性パルスDCスパッタリング成膜のコンセプト

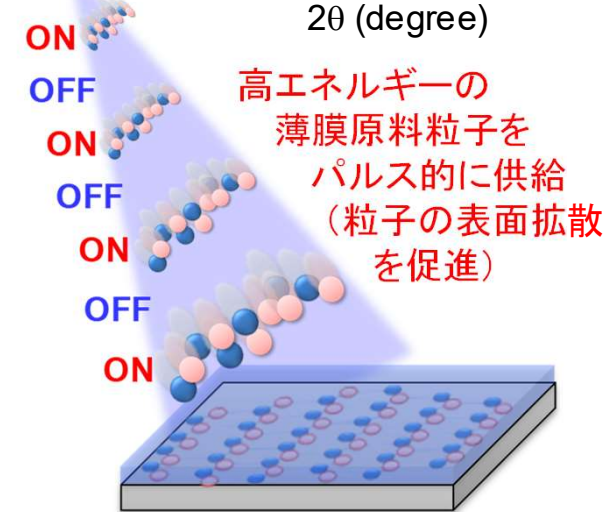
通常のスパッタリング



反転電圧により帯電を除去

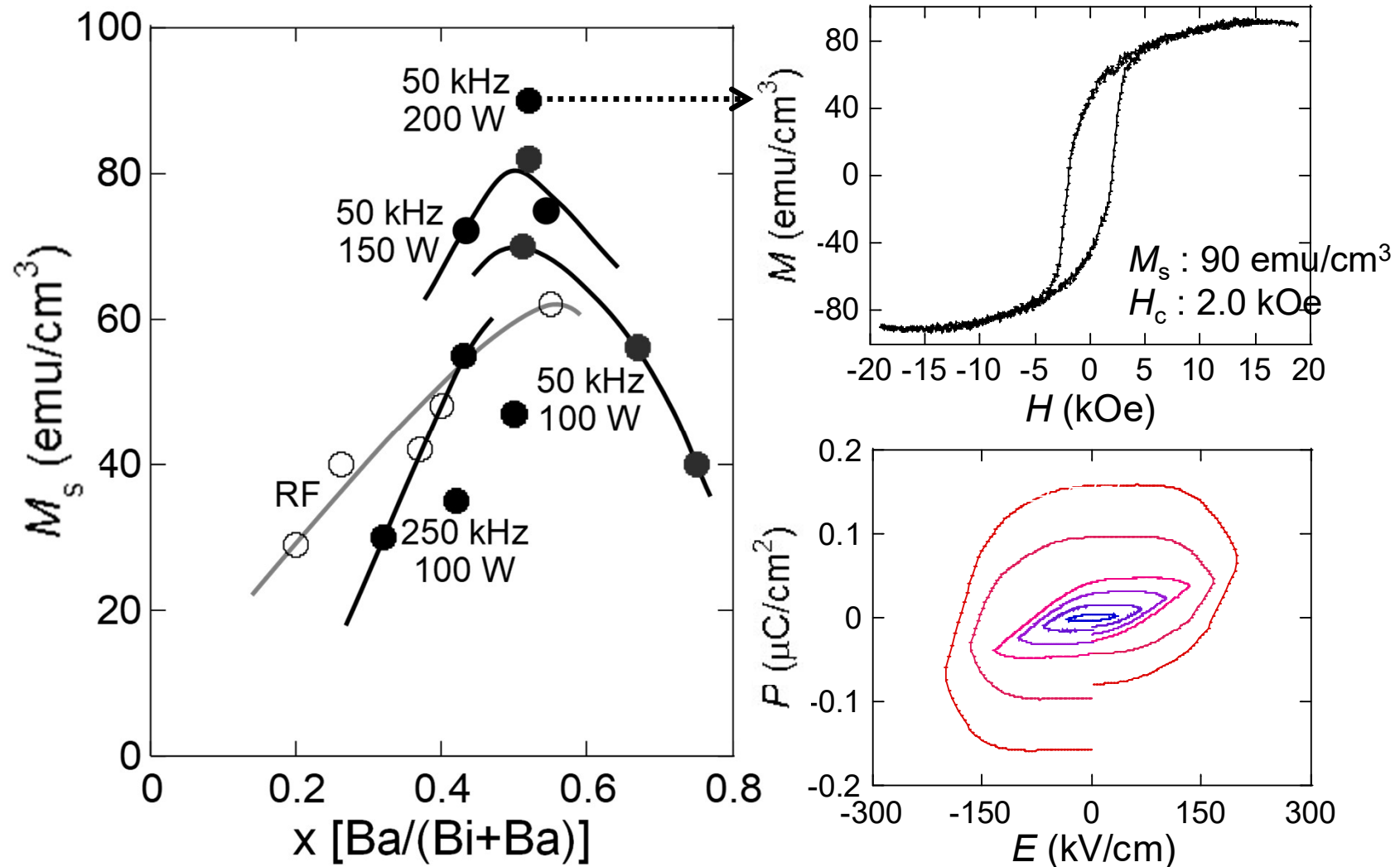


反転電圧パルスによる帯電除去とアークの防止



実験結果 反応性パルスDCスパッタリング法で作製した $(\text{Bi}_{1-x}\text{Ba}_x)\text{FeO}_3$ 薄膜の特性

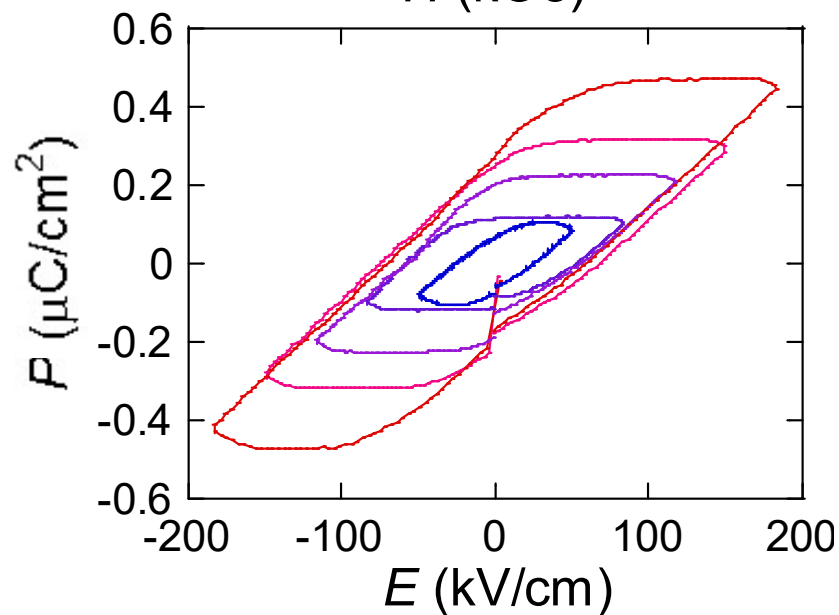
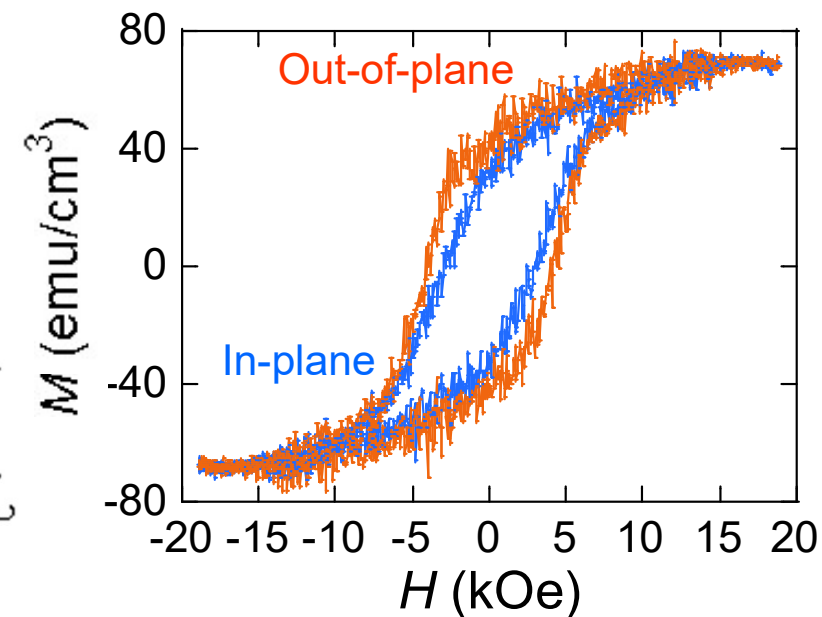
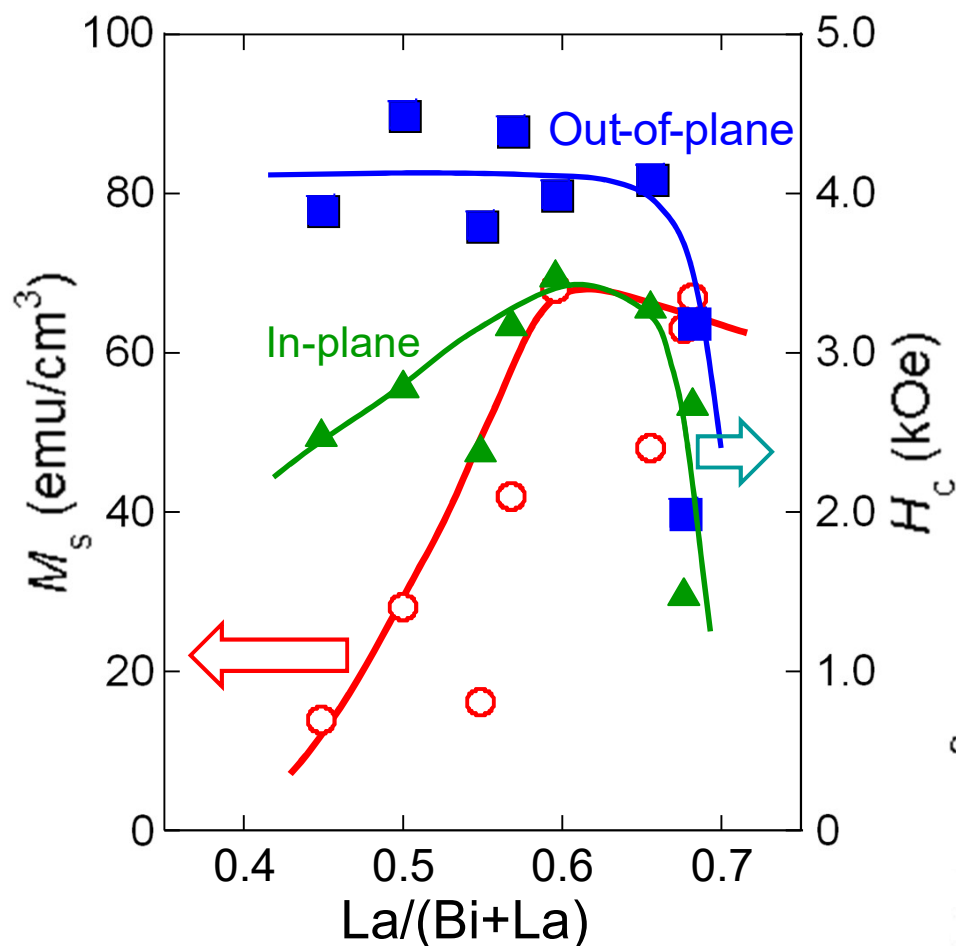
Japanese Journal of Applied Physics, Vol.57, p.0902B7 (2018)



パルスDCスパッタリング成膜の条件を最適化することで
RFスパッタリング成膜の場合に比較して、**1.5倍の飽和磁化**が得られた。
⇒ 磁気デバイスへの応用できる可能性有り！

反応性パルスDCスパッタリング法で作製した(Bi,La)(Fe,Co)O₃ 薄膜の特性

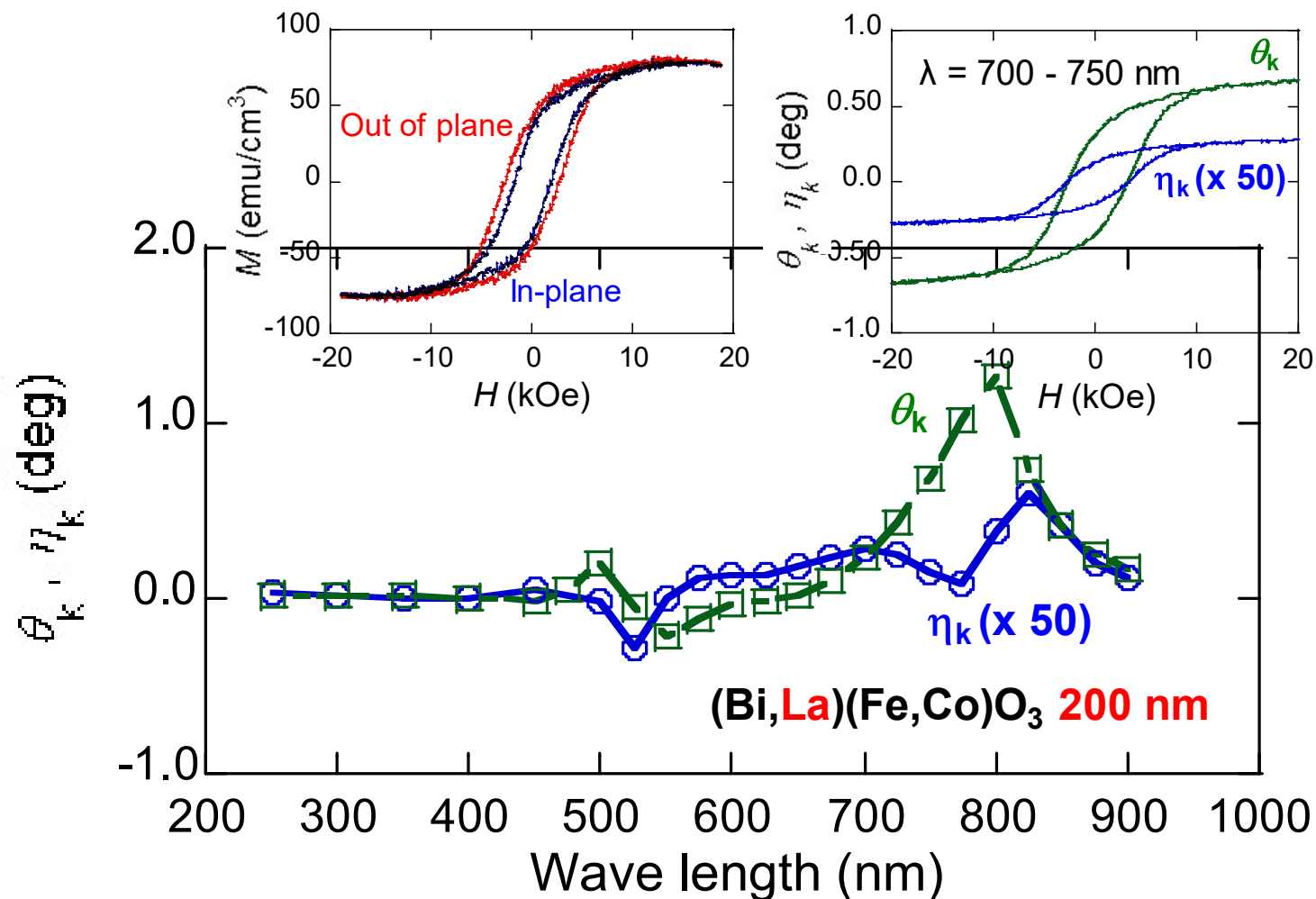
Scientific Reports, Vol.11, p.11118 (2021)



(Bi_{0.5}La_{0.5})(Fe_{0.7}Co_{0.3})O₃ 薄膜において
垂直磁気異方性を得られた。

⇒ 磁性細線メモリへの応用に有用！

反応性パルスDCスパッタリング法で作製した(Bi,La)(Fe,Co)O₃ 薄膜の特性

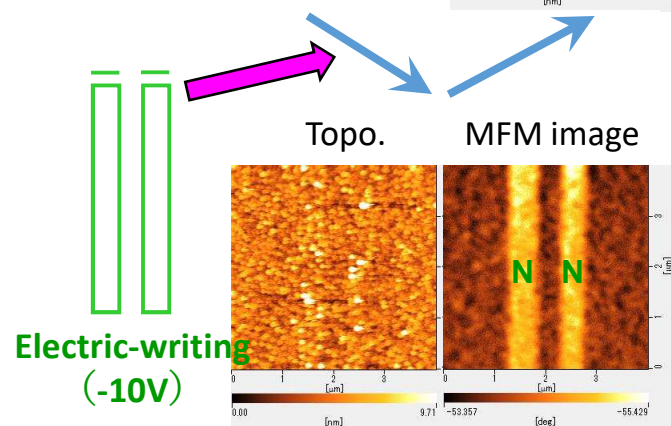
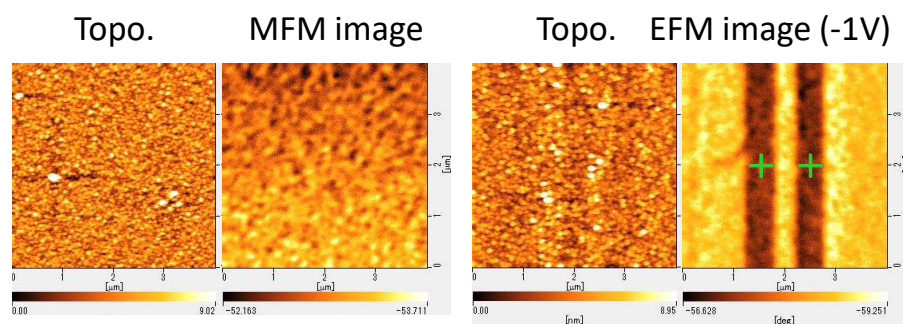


(Bi_{0.5}La_{0.5})(Fe_{1-y}Co_y)O₃ 薄膜において、Fe に対する Co 置換量を増大させることにより、一般的な金属強磁性薄膜では得られない非常に大きな磁気Kerr効果が得られた。

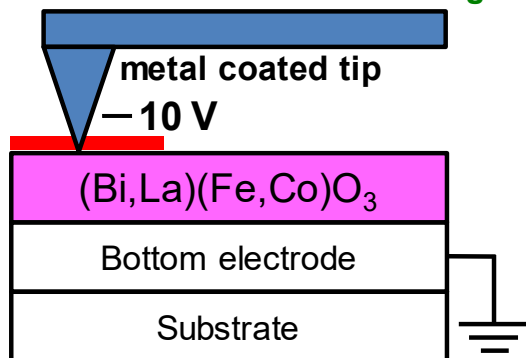
⇒ 空間光変調素子への応用に有用！

(Bi,La)(Fe,Co)O₃ 薄膜における局所(数百nm)電界印加磁化反転の検証

500 nm 幅での電界書き込み



Cross section of electric writing



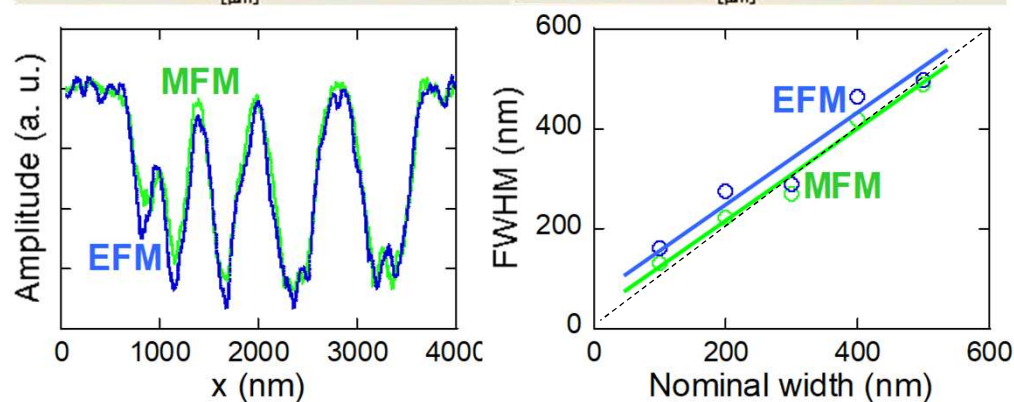
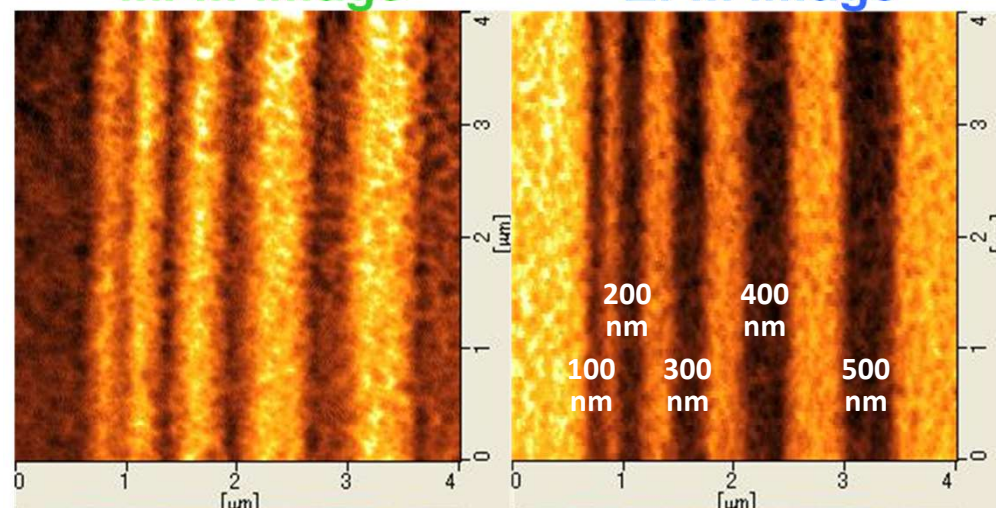
書き込み幅を変化

最小書き込み幅の検討

500 nm → 400 nm → 300 nm → 200 nm → 100 nm

MFM image

EFM image

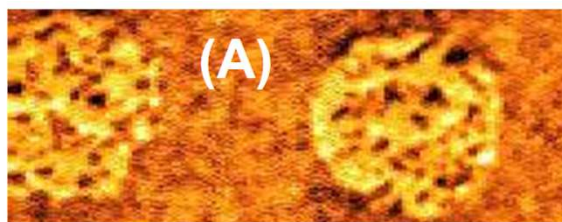
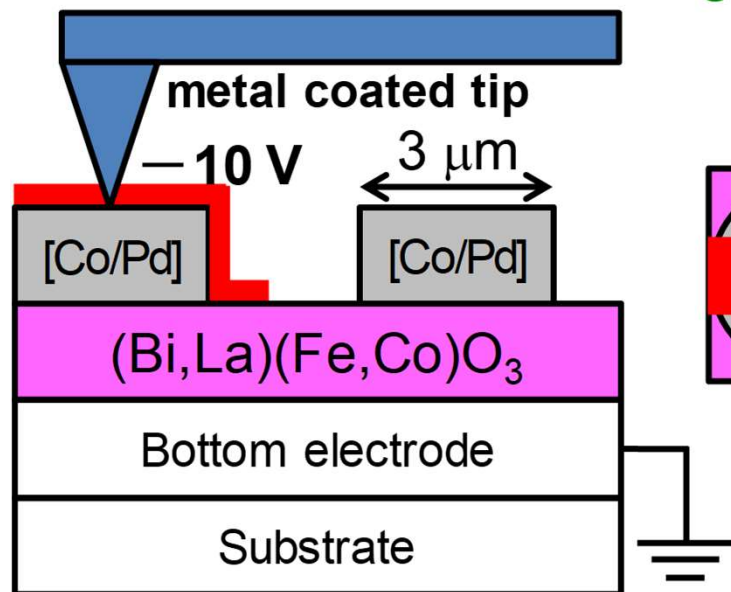


300 nm幅程度までの電界印加において設定通りの磁区
の書き込みが実現(想定されるビット・画素幅: 100 nm程度)

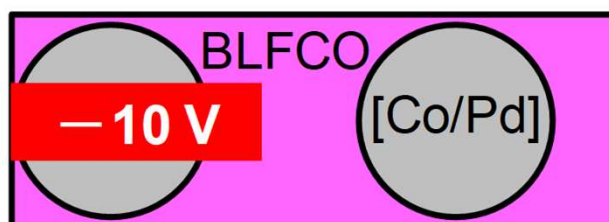
$(\text{Bi}, \text{La})(\text{Fe}, \text{Co})\text{O}_3$ / $[\text{Co}/\text{Pd}]_4$ 積層膜における電界印加磁気転写の検証

Nanotechnology, Vol.34, p.465703 (2023)

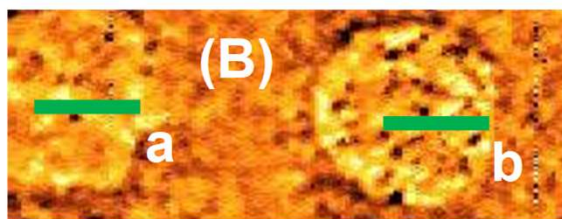
Cross section of electric writing



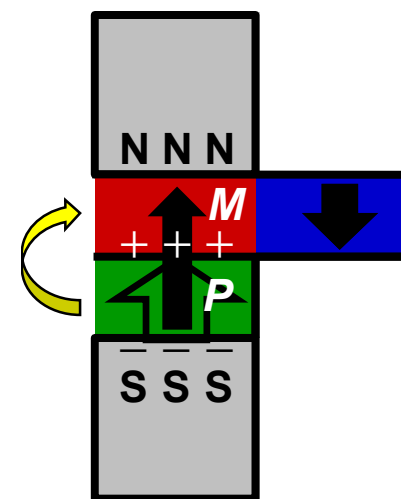
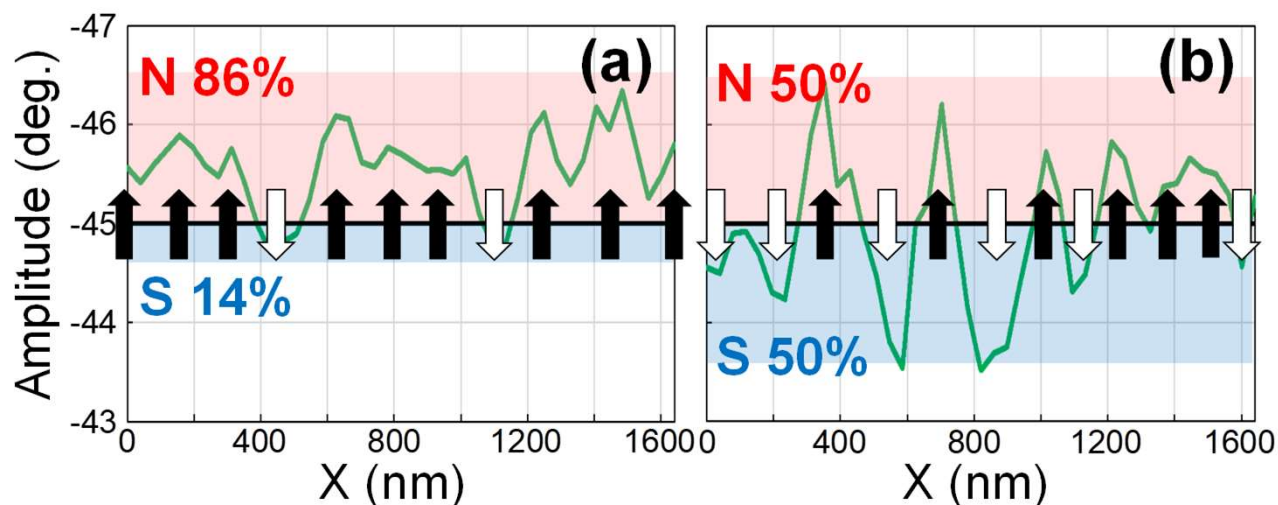
電界書込み前の $[\text{Co}/\text{Pd}]$ ドットは多磁区・消磁状態



電界書込み



電界書込み後の $[\text{Co}/\text{Pd}]$ ドットは黒い部分(S極)が減った



下向きに磁化していた部分の75%程度が上向きに反転（電界印加磁気転写）

まとめ

○ 次々世代磁気デバイスとして広く認識されている

- ・ 超大容量の磁性細線メモリ
- ・ 立体映像表示用の空間光変調素子

について、超低消費電力稼働化するための、強磁性・強誘電薄膜を用いた新規な電界駆動方式を提案した。

○ 上記の磁気デバイスの実現に向けた強磁性・強誘電薄膜において、

- ・ 新しい反応性パルスDCスパッタリングでの高品位な薄膜作製による飽和磁化の大きな改善
- ・ 置換元素種およびそれらの置換量の最適化による、これまで実現されなかったことがない垂直磁気異方性および巨大な磁気Kerr効果の導出を実現した。

○ 上記の強磁性・強誘電薄膜において、

- ・ 単層膜における電界印加磁化反転
- ・ 強磁性薄膜との積層膜における電界印加磁気転写のデモンストレーションに成功した。