

新しい磁気転写電荷誘起方式の 高感度・高出力磁界センサ

秋田大学 工学部 物質科学科
教授 吉村 哲

2024年3月14日

従来技術とその問題点

Society 5.0社会を実現するためには、フィジカル空間に多数のセンサを配置する必要がある。位置を可視化するための磁界センサについても、需要が飛躍的に増加することが確実である。本背景のもと、高感度、高出力、低消費電力、且つ小型化可能な磁気センサが求められている。

従来技術とその問題点

既に実用化もしくはは提案されている小型化可能な磁気センサーには、強磁性多層積層膜を用いた「①トンネル磁気抵抗素子」や強磁性・強誘電薄膜を用いた「②マルチフェロイック素子」があるが、①では、出力が小さい、電力消費が大きい、②では、感度が悪い、等の問題があり、広く利用されるまでには至っていない。

従来技術とその問題点

「②マルチフェロイック素子」

強磁性・強誘電薄膜

$(\text{Bi}, A)(\text{Fe}, B)\text{O}_3$ 菱面晶へキサカイト構造

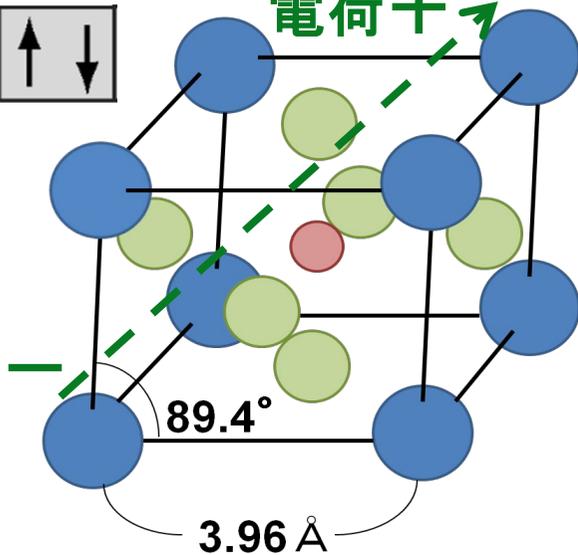
- ・室温で強誘電性を示す ($T_c = 850 \text{ }^\circ\text{C}$)
- ・[111]に自発分極を持つ ($P_s = 100 \text{ } \mu\text{C}/\text{cm}^2$)
- ・BiやFeの特定元素置換で室温強磁性を示す

反強磁性



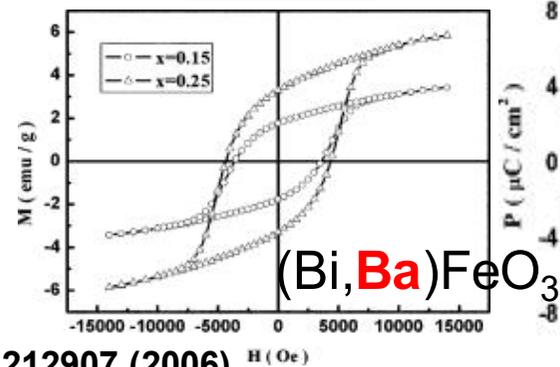
電荷+

強磁性(フェリ)

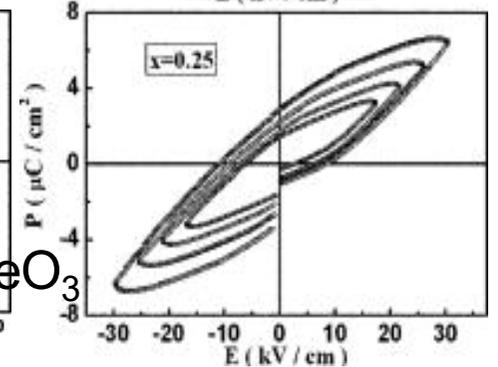


- Bi^{3+} , Ba^{2+} , Sr^{2+} , La^{3+} , Gd^{3+} , Nd^{3+}
- O^{2-}
- Fe^{3+} , Mn^{2+} , Co^{2+}

磁気特性



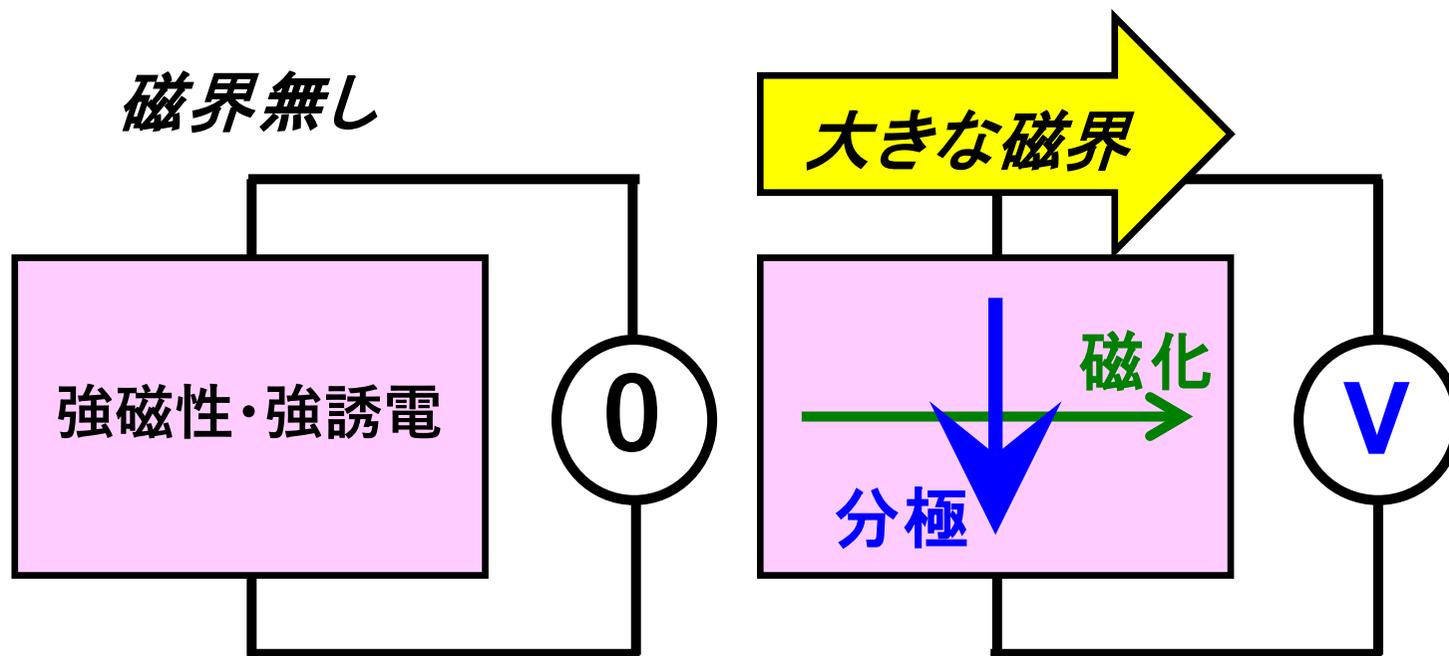
誘電特性



D. H. Wang, et al.,
Appl. Phys. Lett., 88, 212907 (2006)

従来技術とその問題点

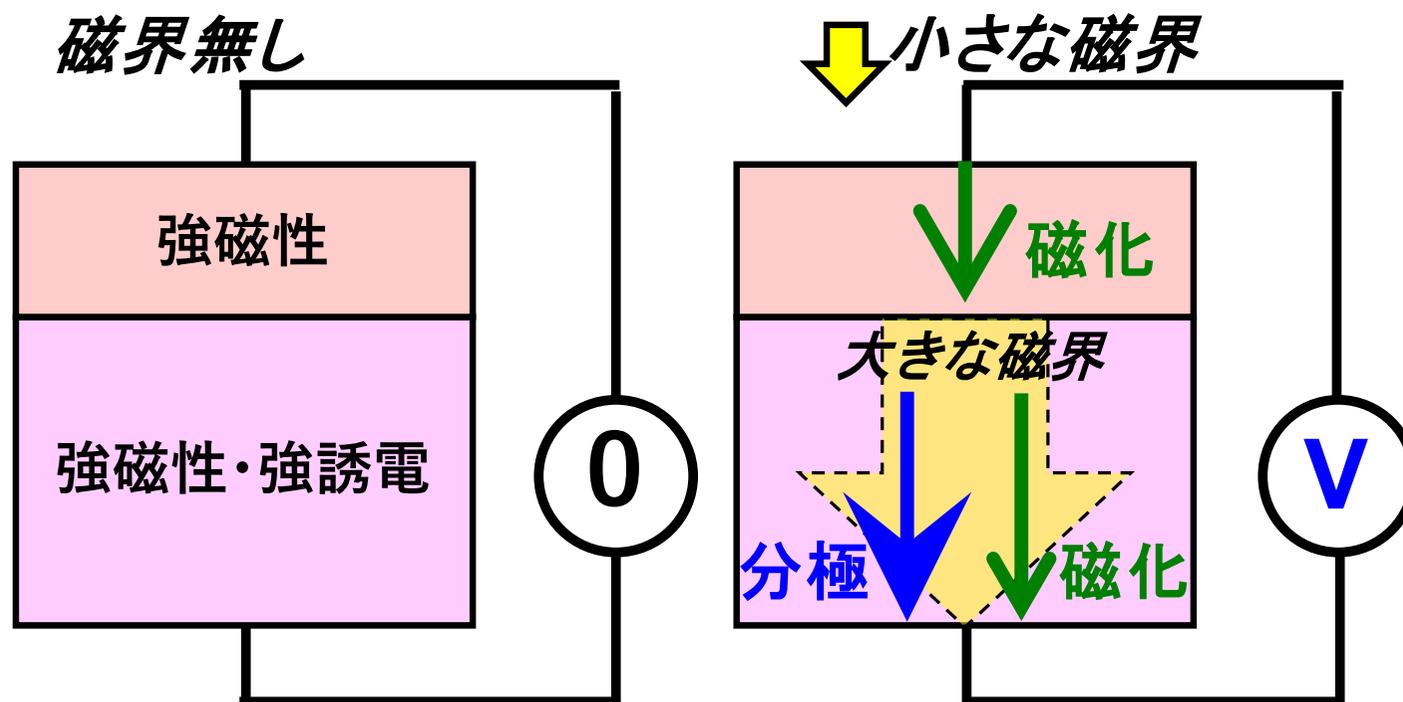
「②マルチフェロイック素子」



現在知られている強磁性・強誘電材料薄膜は、一般に磁化容易方向が面内方向であり、かつ保磁力が大きい（数百Oe以上）ため、大きな磁界（数百Oe以上）が印加されて初めて電気磁気効果（出力電圧）が得られる。

新技術の特徴・従来技術との比較

「磁気転写電荷誘起型磁界センサ」



垂直磁気異方性を有するソフト磁性層が外部磁場によって容易に磁化され、磁化されたソフト磁性層から発生する大きな磁界が垂直磁気異方性を有する強磁性・強誘電層を磁化して、磁化された強磁性・強誘電層に電気分極が発生する。

新技術の特徴・従来技術との比較

- ・ 容易に磁化される強磁性体であるソフト層が強磁性・強誘電層に積層されているので、感度を高めることが可能である。
- ・ また電気分極が電気信号として検出されるので、出力比を高めることが可能である。
- ・ 外部電圧を常に印加しておく必要がないので、従来公知のトンネル磁気抵抗素子に比べて消費電力を低減できる。

新技術の特徴・従来技術との比較

強磁性・強誘電薄膜とソフト磁性薄膜との積層膜を用いた「磁気転写電荷誘起型磁界センサ」

- 「①トンネル磁気抵抗素子」で問題であった、低い出力と高い消費電力を改善することができる。
- 「②マルチフェロイック素子」で問題であった、低い感度を改善することができる。
- 本センサは、Society 5.0用のセンサや磁気記録デバイスの情報再生素子なども含め、様々な用途への適用性が期待できる。

新技術の特徴・従来技術との比較

「磁気転写電荷誘起型磁界センサ」新規提案の道

磁気記録装置 (HDD)

磁性細線メモリ

磁界センサ

問題点

コイルとコアを用いた
電流磁界での書込み
《高い書込み電力》

コイルとコアを用いた
電流磁界での書込み
《高い書込み電力》

磁気トンネル接合を用いた
磁気抵抗効果
《高い電力・低い出力》

強磁性・強誘電での
電気磁気効果
《低い感度》

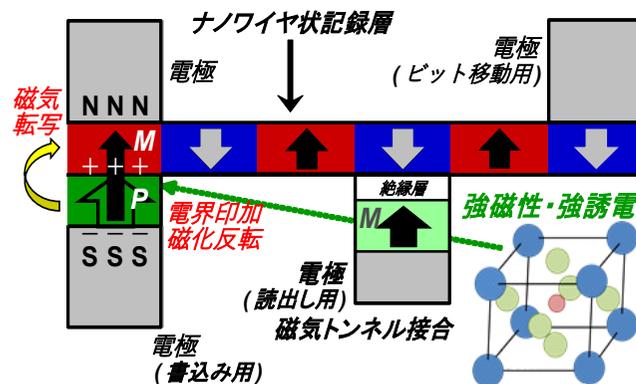
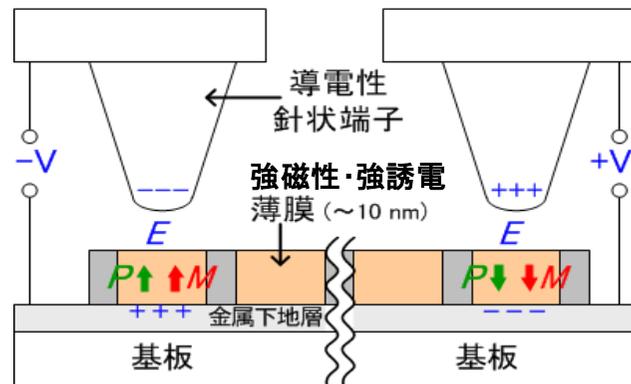
金属磁性膜の磁化反転が必要
(そのまま適用不可で改良)

強磁性・強誘電薄膜を用いた
「電界印加磁化反転」
【特許第5771788号 (2015)】

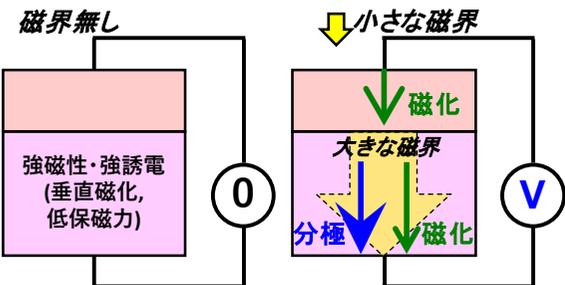
強磁性・強誘電薄膜を用いた
「電界印加磁気転写」
【特許第6573374号 (2019)】

磁化の転写方向を
逆にする
(逆動作)

発表者の提案



強磁性・強誘電薄膜を用いた
「磁気転写電荷誘起」
【特許出願予定 (2023)】



新技術の特徴・従来技術との比較

「磁気転写電荷誘起型磁界センサ」新規提案の道

問題点

磁気記録装置 (HDD)

コイルとコアを用いた
電流磁界での書込み
《高い書込み電力》

磁性細線メモリ

コイルとコアを用いた
電流磁界での書込み
《高い書込み電力》

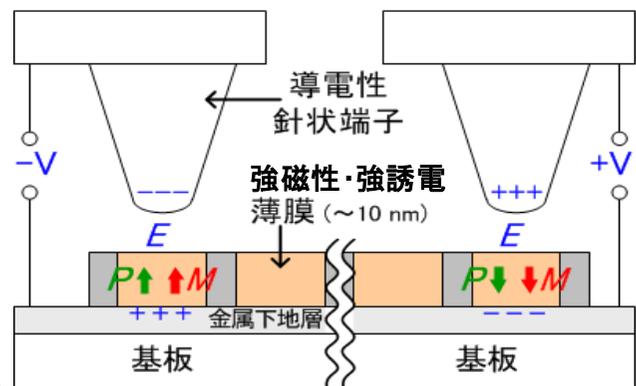
磁界センサ

磁気トンネル接合を用いた
磁気抵抗効果
《高い電力・低い出力》
強磁性・強誘電での
電気磁気効果
《低い感度》

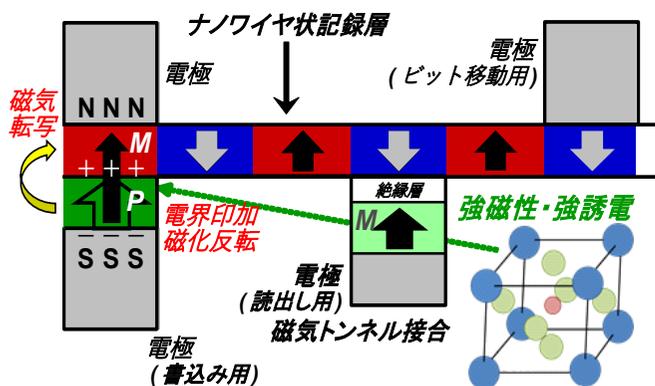


発表者の提案

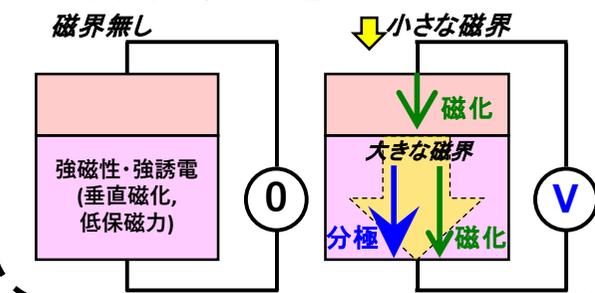
強磁性・強誘電薄膜を用いた
「電界印加磁化反転」
【特許第5771788号 (2015)】



強磁性・強誘電薄膜を用いた
「電界印加磁気転写」
【特許第6573374号 (2019)】

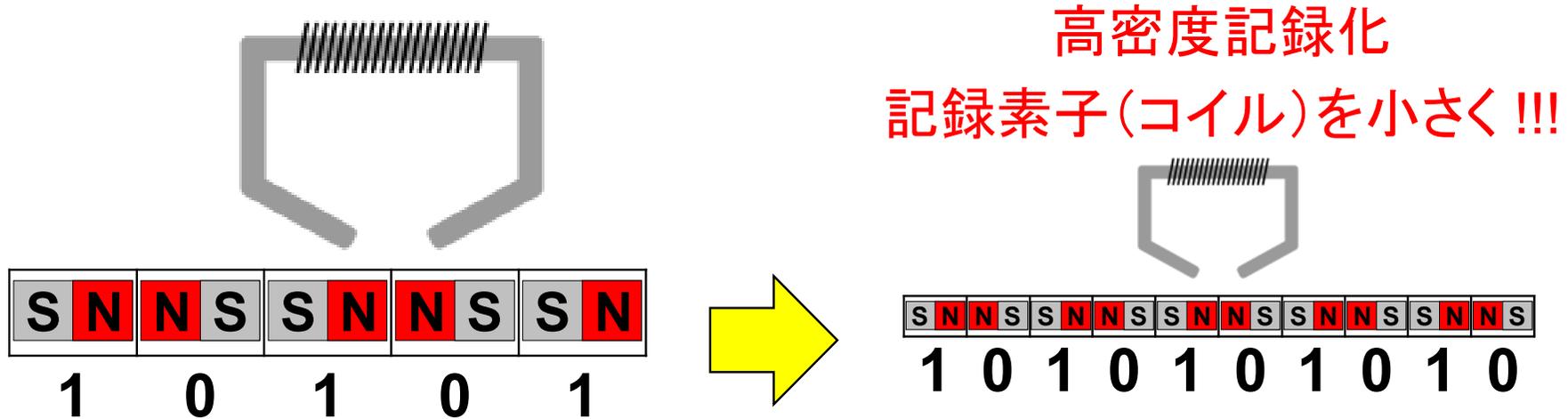


強磁性・強誘電薄膜を用いた
「磁気転写電荷誘起」
【特許出願予定 (2023)】



新技術の特徴・従来技術との比較

磁気記録装置(HDD)の問題点



- ・ コイルと鉄心を小さく作りこむ必要がある：製造コストが高くなる
 - ・ リングヘッドにおけるコイルの巻き数(N)が少なくなる
 - ・ コイルが細くなる分、コイルに流せる電流(I)が少なくなる
- ⇒ コイルからの磁界 ($H_{\text{coil}} \propto N \cdot I$) が小さく、N,S方向を変えられない

リングヘッド(電流磁界)を使用しない新たな書込み方法が必要!!!

新技術の特徴・従来技術との比較

「電界印加磁化反転」用の材料

強磁性・強誘電薄膜

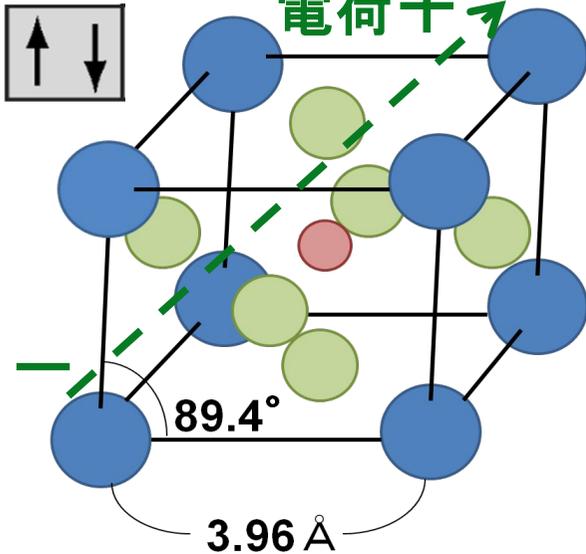
$(\text{Bi}, \text{A})(\text{Fe}, \text{B})\text{O}_3$ 菱面晶へキサカイト構造

反強磁性



電荷+

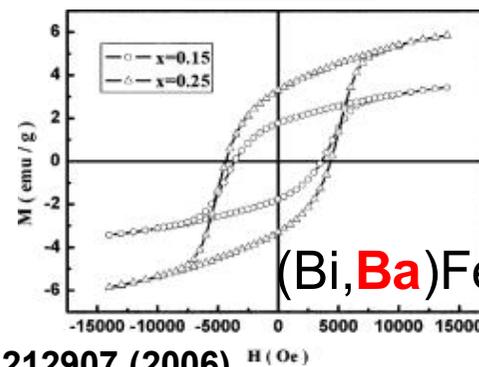
強磁性(フェリ)



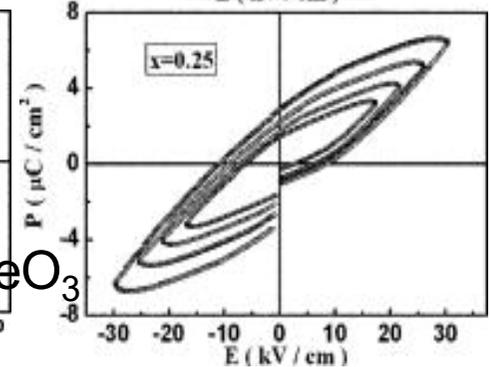
- Bi^{3+} , Ba^{2+} , Sr^{2+} , La^{3+} , Gd^{3+} , Nd^{3+}
- O^{2-}
- Fe^{3+} , Mn^{2+} , Co^{2+}

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

磁気特性



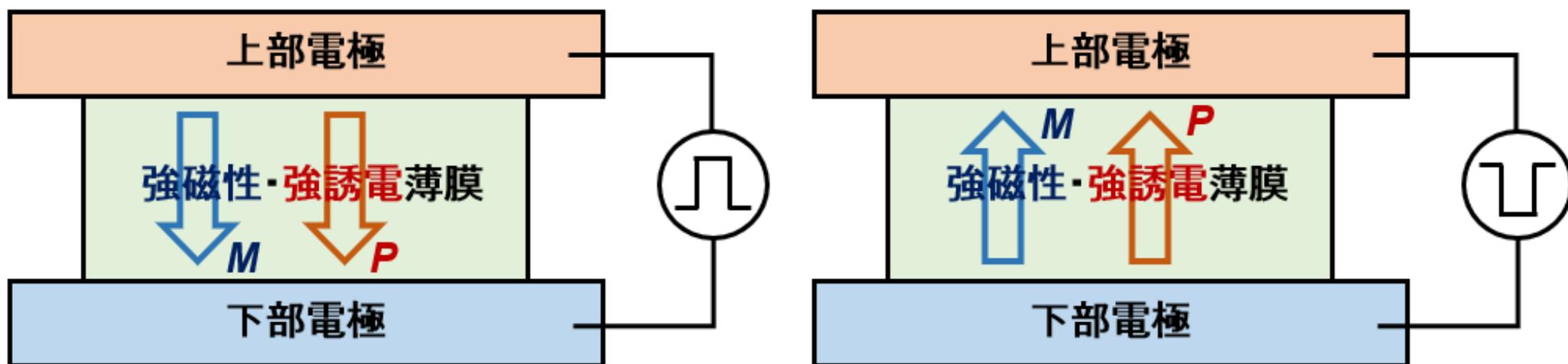
誘電特性



D. H. Wang, et al.,
Appl. Phys. Lett., 88, 212907 (2006)

新技術の特徴・従来技術との比較

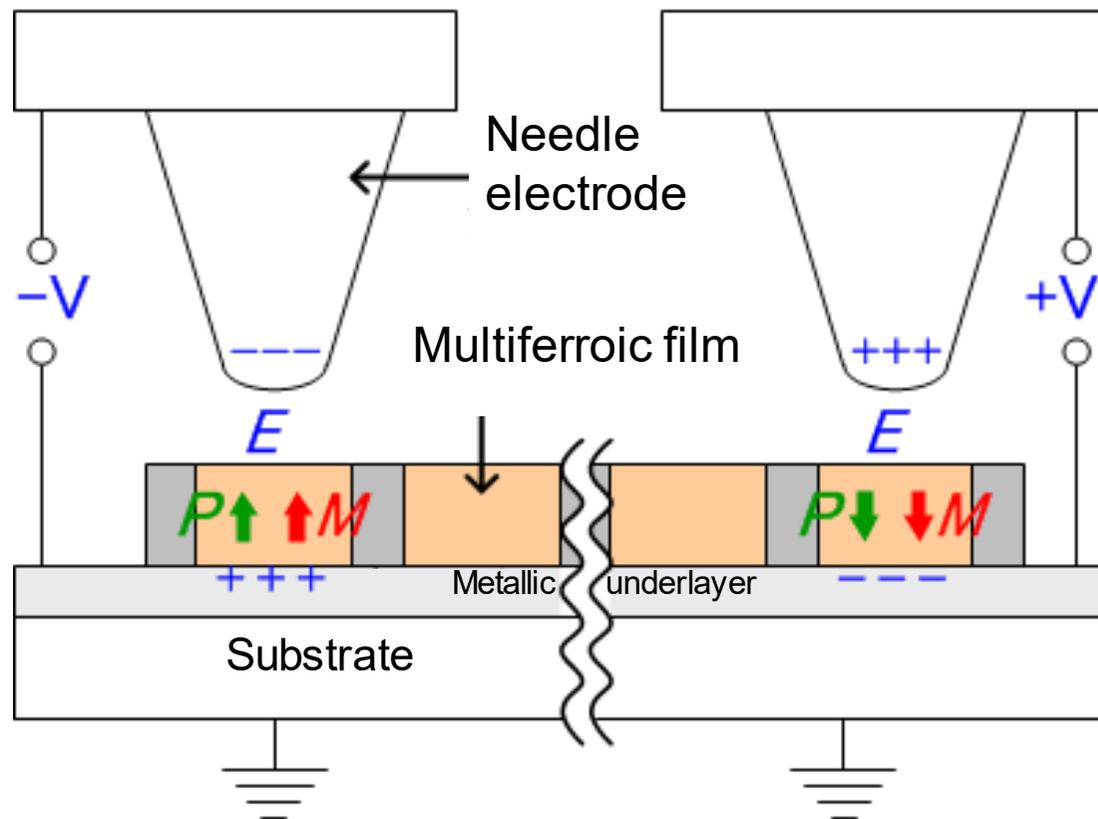
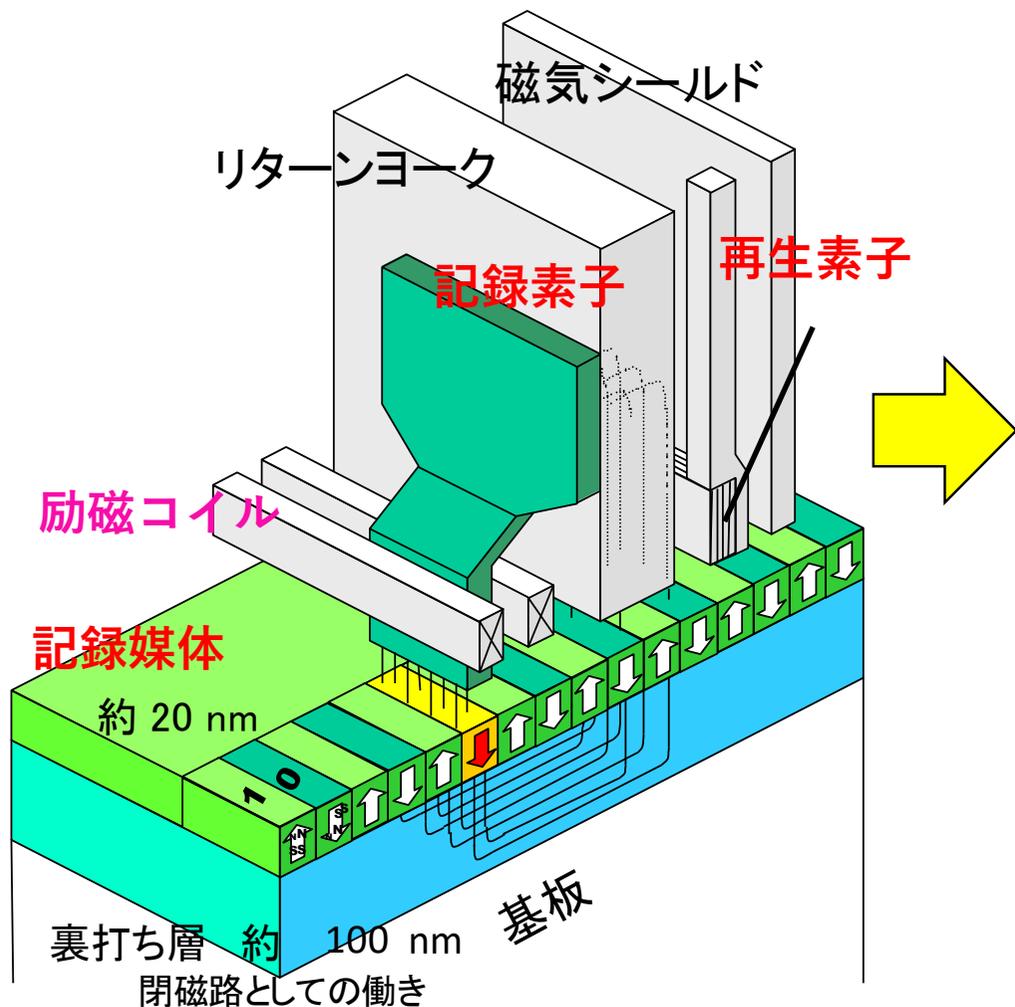
「電界印加磁化反転」の模式図



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

新技術の特徴・従来技術との比較

「電界印加磁化反転」の応用（磁気記録装置(HDD)）

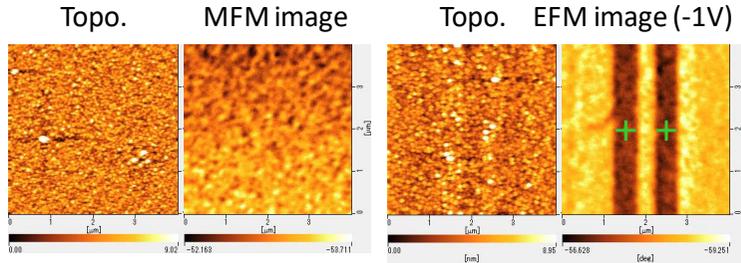


特許第5771788号

新技術の特徴・従来技術との比較

「電界印加磁化反転」のデモンストレーション

500 nm 幅での電界書込み

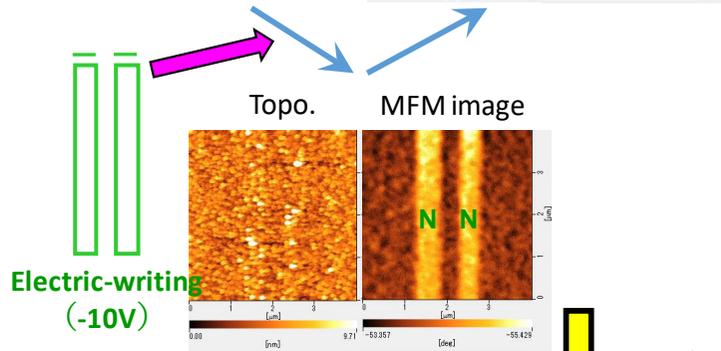
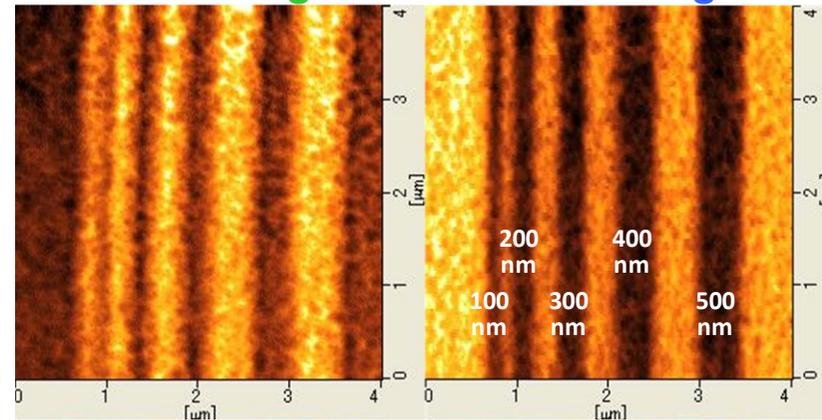


最小書込み幅の検討

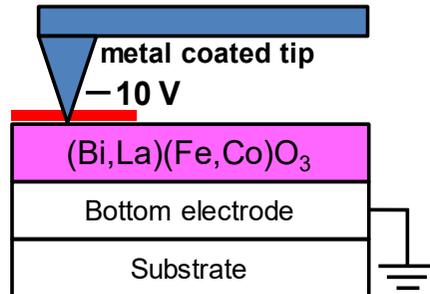
500 nm → 400 nm → 300 nm → 200 nm → 100 nm

MFM image

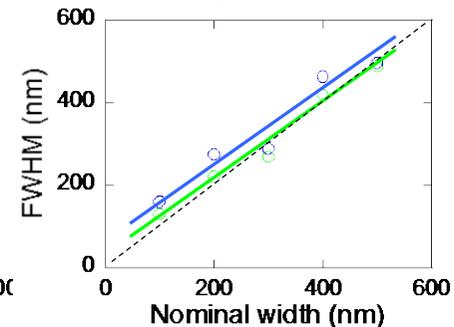
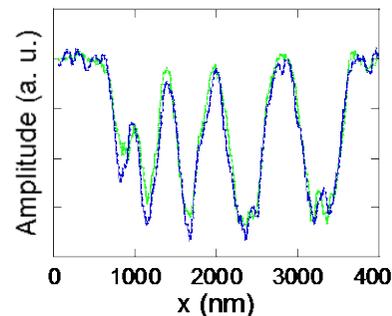
EFM image



Cross section of electric writing



書込み幅を変化



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

新技術の特徴・従来技術との比較

「磁気転写電荷誘起型磁界センサ」新規提案の道

磁気記録装置 (HDD)

問題点
コイルとコアを用いた
電流磁界での書込み
《高い書込み電力》

磁性細線メモリ

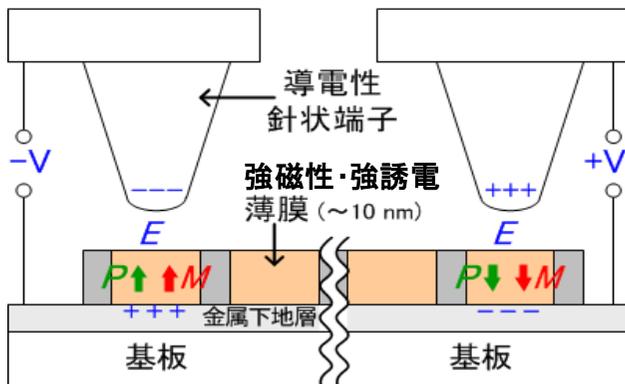
問題点
コイルとコアを用いた
電流磁界での書込み
《高い書込み電力》

磁界センサ

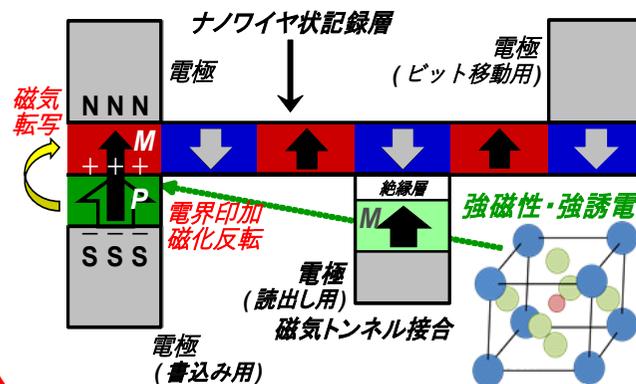
問題点
磁気トンネル接合を用いた
磁気抵抗効果
《高い電力・低い出力》
強磁性・強誘電での
電気磁気効果
《低い感度》

金属磁性膜の磁化反転が必要
(そのまま適用不可で改良)

強磁性・強誘電薄膜を用いた
「電界印加磁化反転」
【特許第5771788号 (2015)】

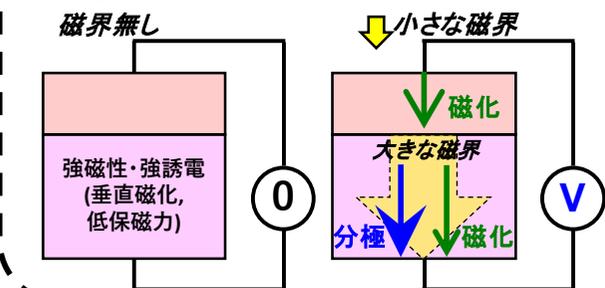


強磁性・強誘電薄膜を用いた
「電界印加磁気転写」
【特許第6573374号 (2019)】



磁化の転写方向を
逆にする
(逆動作)

強磁性・強誘電薄膜を用いた
「磁気転写電荷誘起」
【特許出願予定 (2023)】

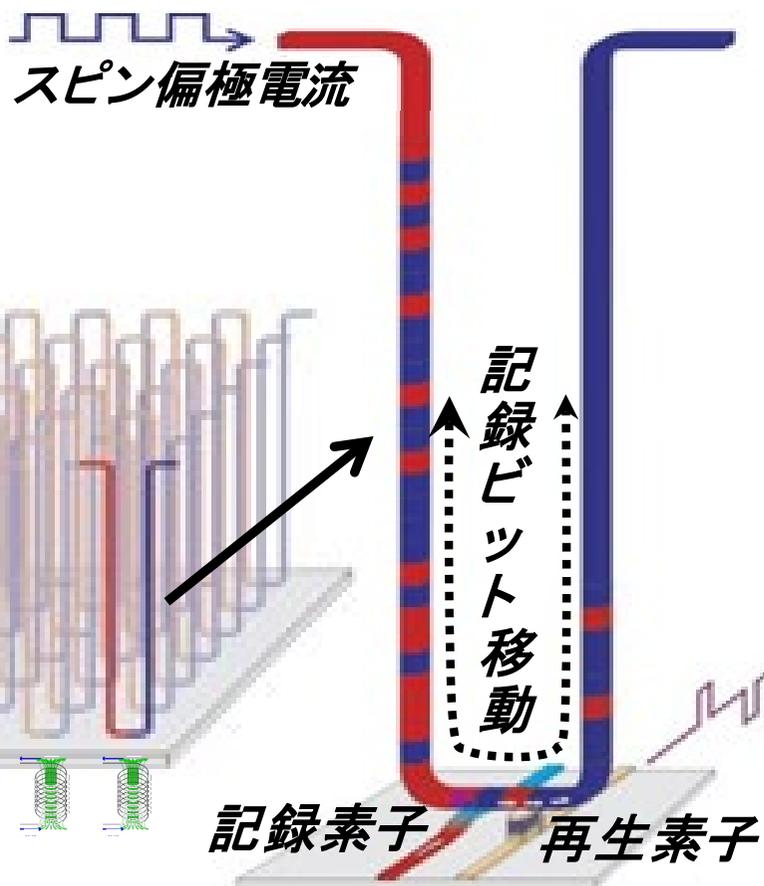


問題点

発表者の提案

新技術の特徴・従来技術との比較

磁性細線メモリの特長と問題点



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)

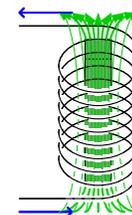
記録ビット(磁区)の移動: スピン注入方式

⇒ モーターフリー(低消費電力稼働)

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)



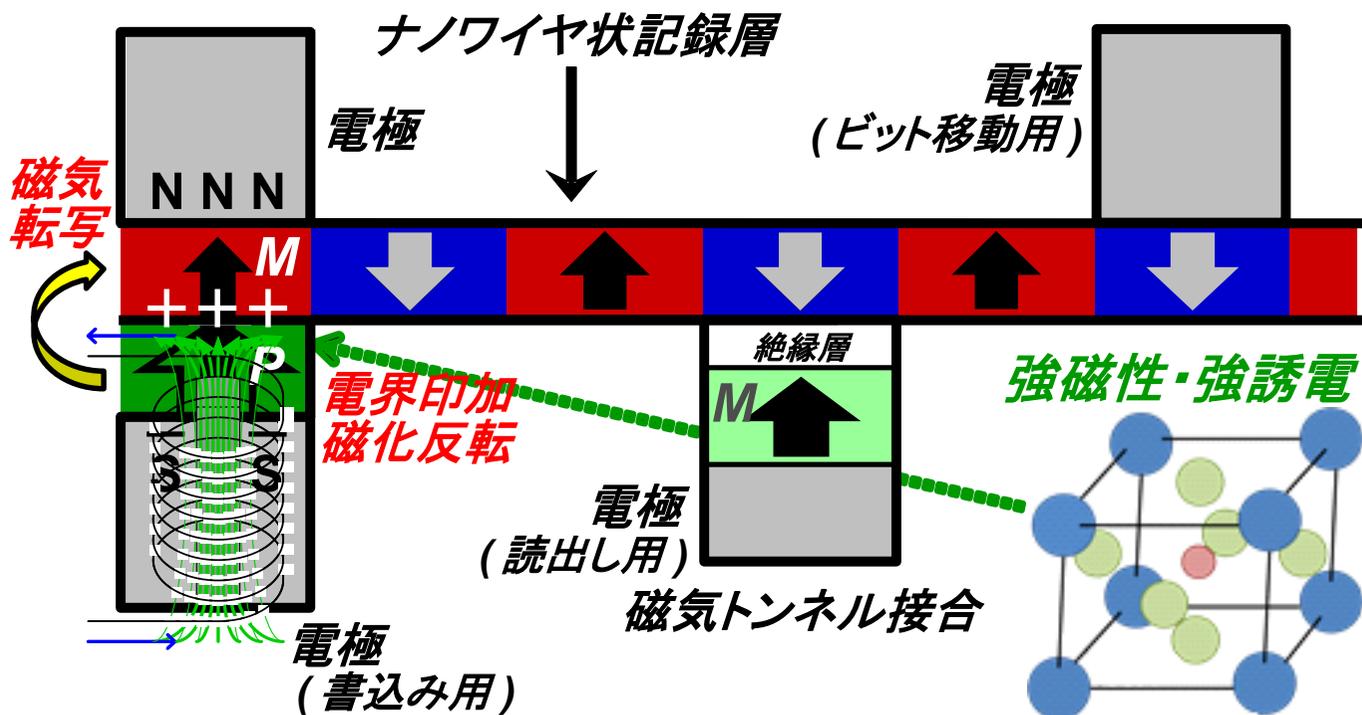
記録素子: HDDと同様の磁気記録ヘッド

(複雑構造な記録素子)

(素子の多数配置)

新技術の特徴・従来技術との比較

「電界印加磁気転写」の応用（磁性細線メモリ）



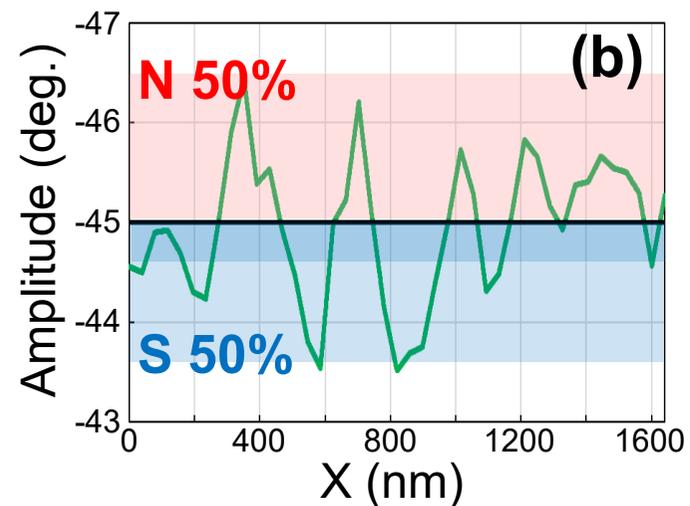
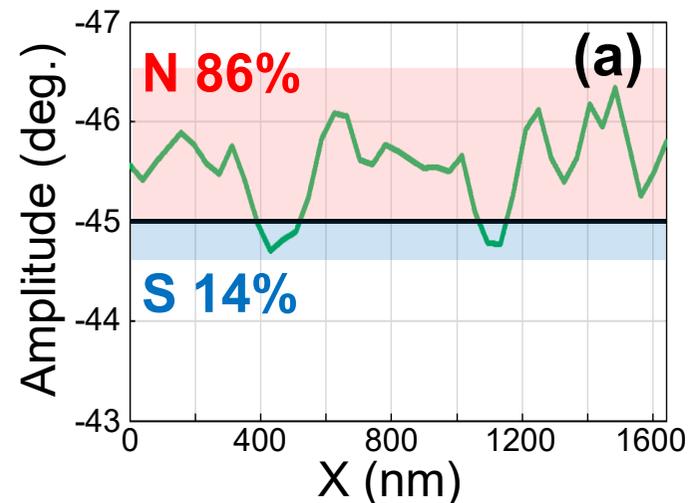
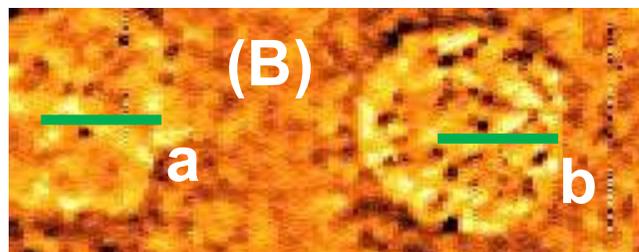
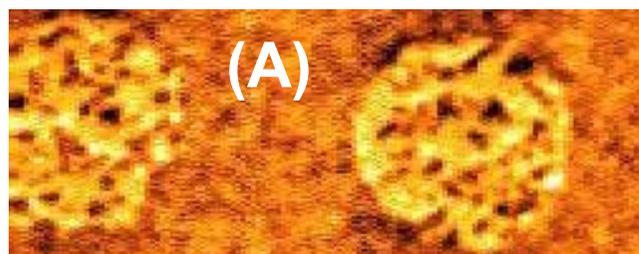
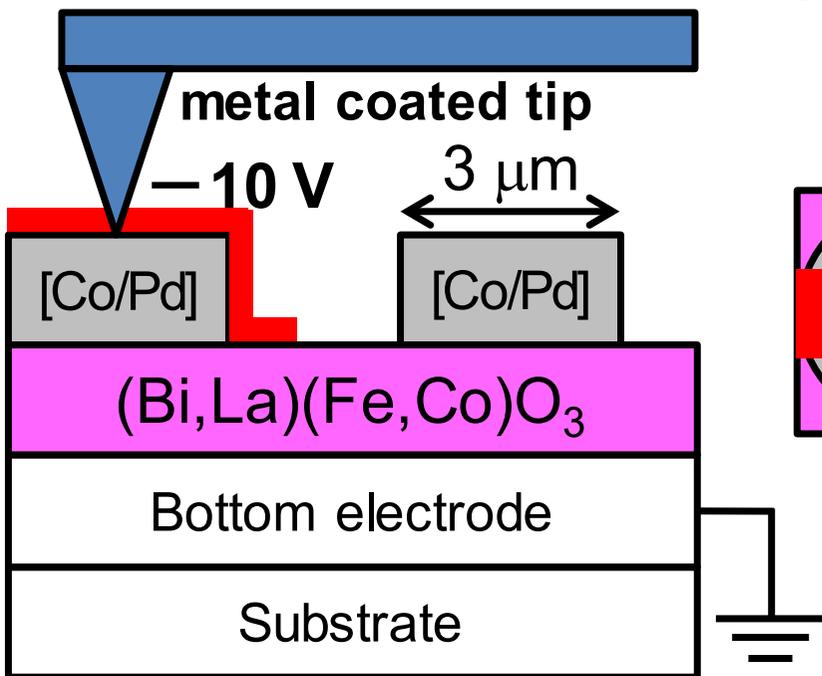
- 強磁性・強誘電薄膜を適切に配置・使用することで、
- ・書き込み電力を飛躍的に低減
 - ・記録素子構造を劇的に簡略

特許第6573374号

新技術の特徴・従来技術との比較

「電界印加磁気転写」のデモンストレーション

Cross section of electric writing



新技術の特徴・従来技術との比較

「磁気転写電荷誘起型磁界センサ」新規提案の道

磁気記録装置 (HDD)

磁性細線メモリ

磁界センサ

問題点

コイルとコアを用いた
電流磁界での書込み
《高い書込み電力》

コイルとコアを用いた
電流磁界での書込み
《高い書込み電力》

磁気トンネル接合を用いた
磁気抵抗効果
《高い電力・低い出力》
強磁性・強誘電での
電気磁気効果
《低い感度》

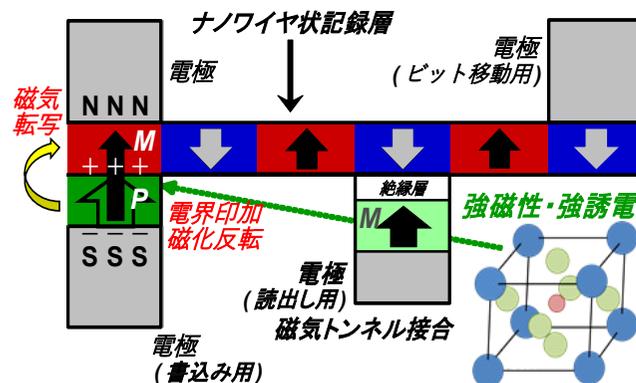
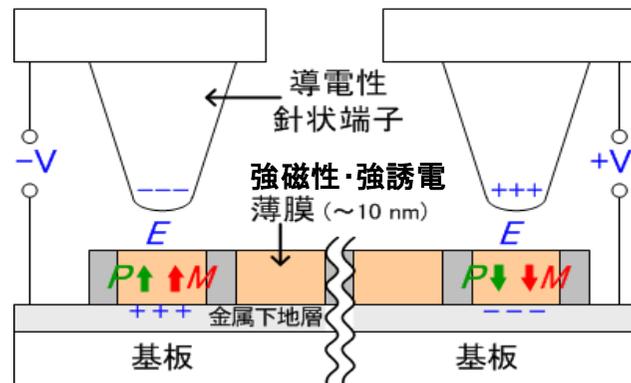
金属磁性膜の磁化反転が必要
(そのまま適用不可で改良)

強磁性・強誘電薄膜を用いた
「電界印加磁化反転」
【特許第5771788号 (2015)】

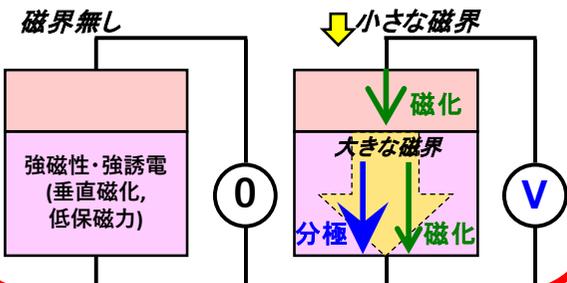
強磁性・強誘電薄膜を用いた
「電界印加磁気転写」
【特許第6573374号 (2019)】

磁化の転写方向を
逆にする
(逆動作)

発表者の提案

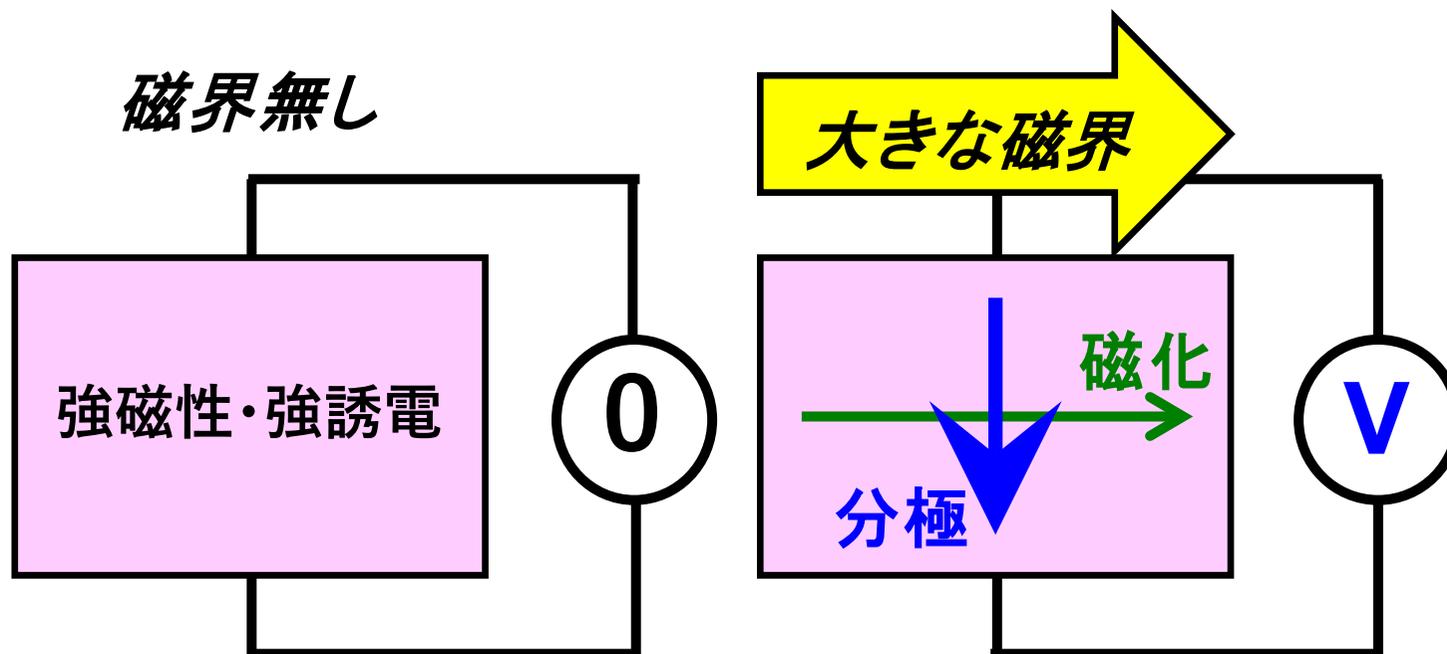


強磁性・強誘電薄膜を用いた
「磁気転写電荷誘起」
【特許出願予定 (2023)】



新技術の特徴・従来技術との比較

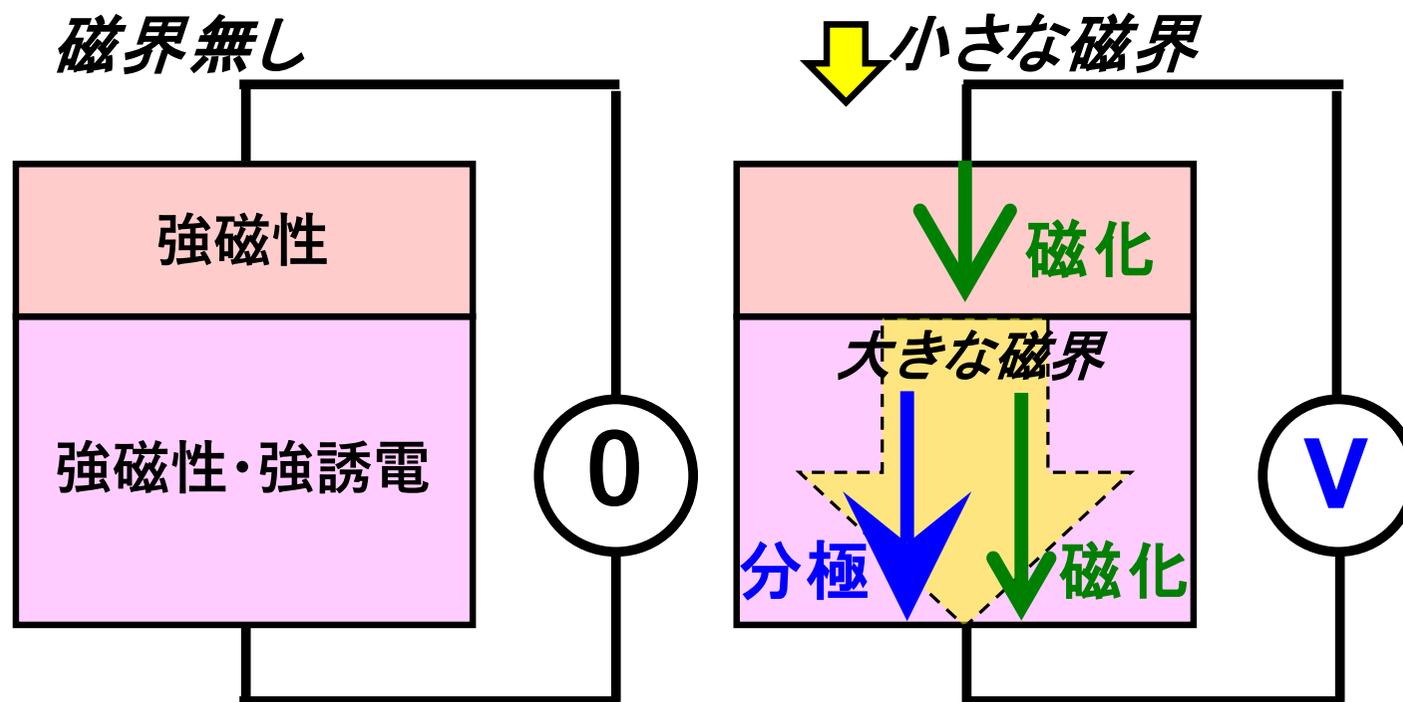
マルチフェロイック素子-磁界センサの問題点



信号出力は高いが感度が極めて悪い。
(大きな磁界が印加されて初めて磁化方向
が変化して電気分極(出力電圧)が現れる)

新技術の特徴・従来技術との比較

「磁気転写電荷誘起」の応用（磁界センサ）



信号出力が高くて感度も非常に高い。
(小さな磁界でも磁化方向が転写で変化し
容易に電気分極(出力電圧)が現れる)

想定される用途

- Society 5.0用のセンサ
- 磁気記録デバイスの情報再生素子

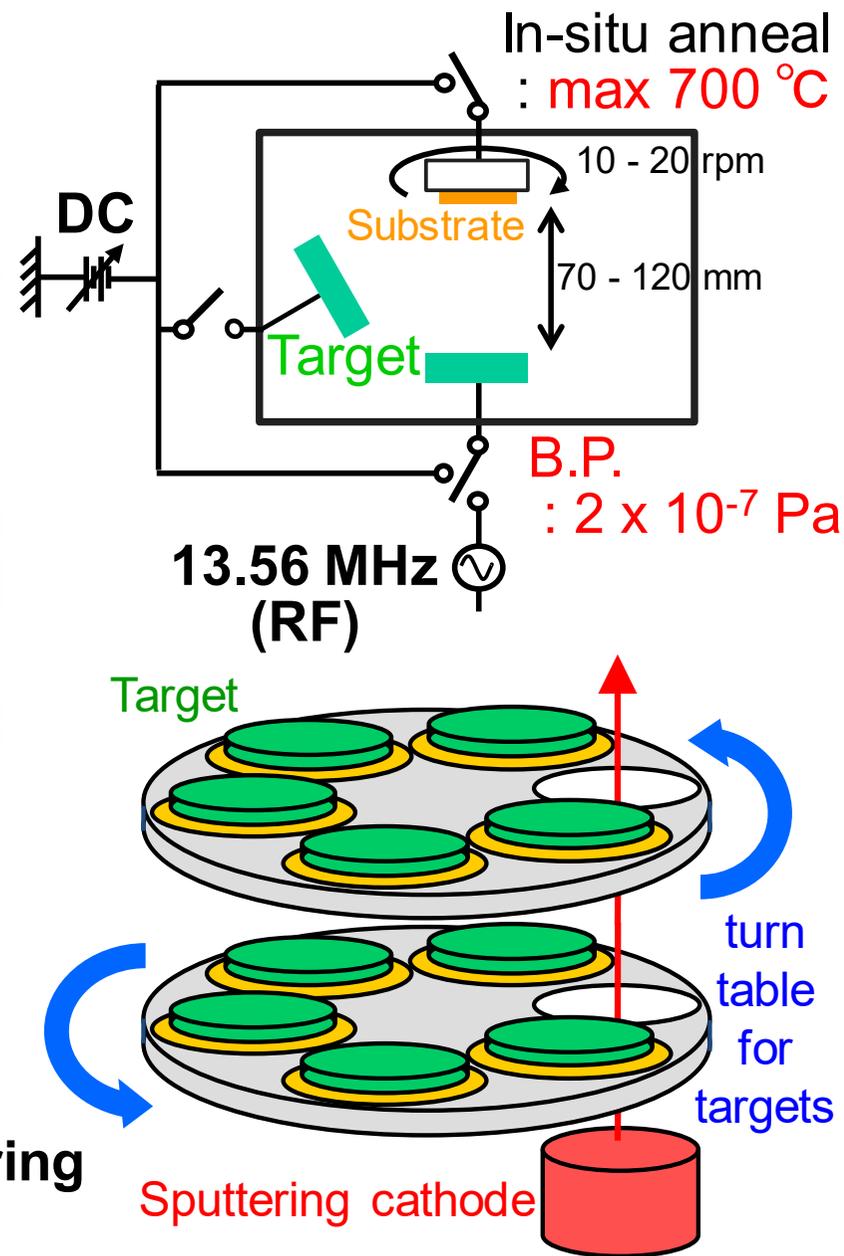
検出するべき磁界が小さい、
周りからのノイズが大きい、
電気配線や電力供給が容易でない、
などの環境下では、本センサは有効である。
(高感度・高出力・低消費電力 であるため)

実用化に向けた課題

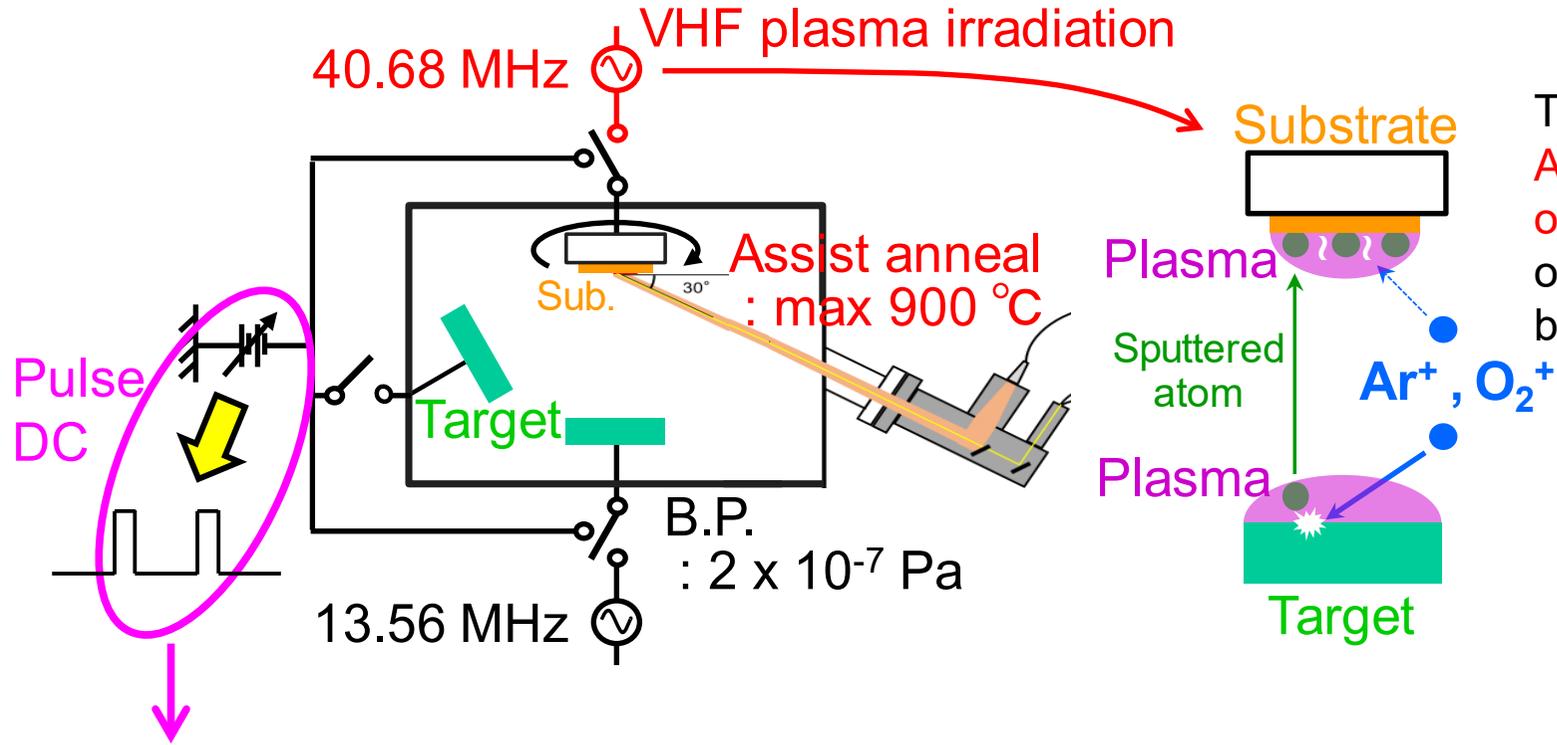
- 現在、ソフト磁性薄膜について、高飽和磁化・垂直磁気異方性・低保磁力、な材料を探索中。（実用化に必要なと見積もられる特性の50%以上は達成している。）
- また、強磁性・強誘電薄膜については、種々の特性を有する材料を、既に探索・作製済み。
- そして、強磁性・強誘電薄膜とソフト磁性薄膜との積層膜を作製し、その動作（磁気転写電荷誘起）を検証している。

企業への期待

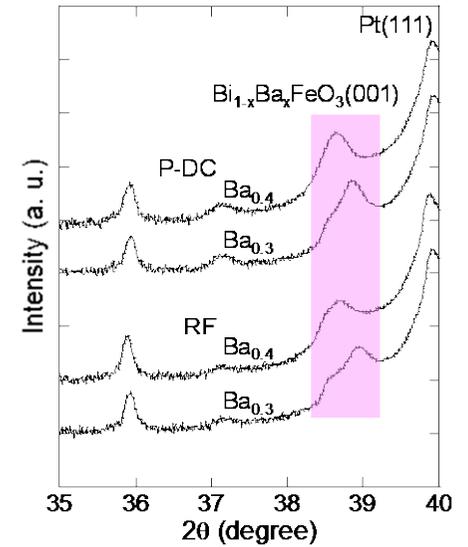
- 新材料薄膜や新デバイスに興味を持つ企業との共同研究を希望。
- また、金属・酸化物・窒化物など、多種多様な薄膜を高品位に作製できる、工夫を凝らした薄膜作製装置を保有しているので、薄膜材料や薄膜デバイスの開発をお手伝いすることが可能。



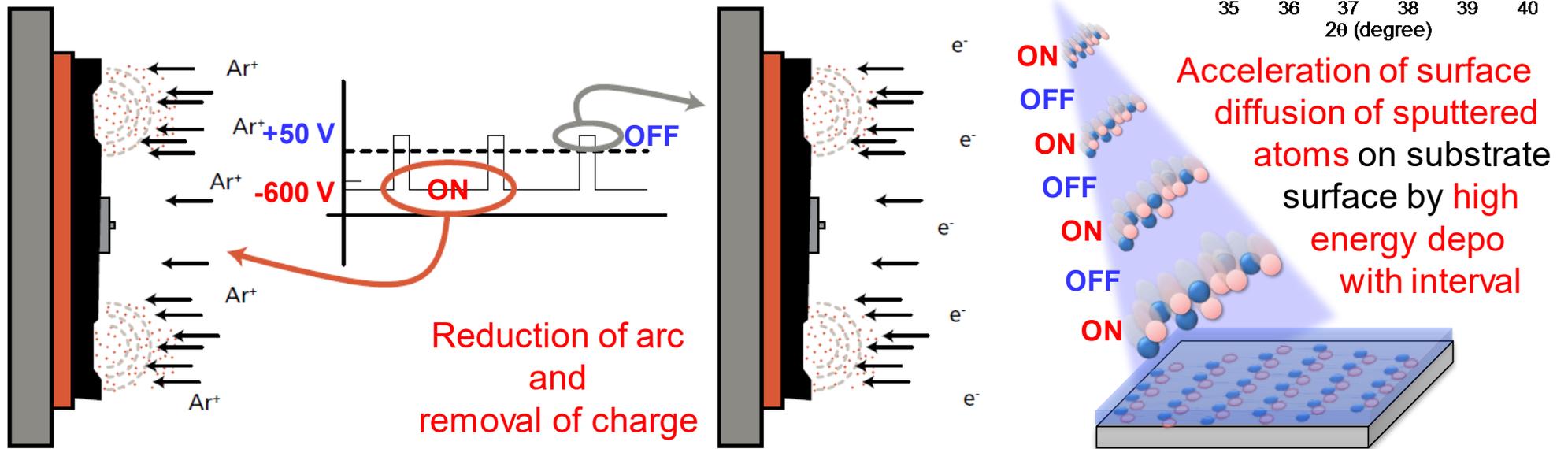
Base Pressure : 2.0×10^{-7} Pa
10 targets for one cathode + 1 target for co-sputtering
Process gas : Ar, O₂, N₂ (impurity level < 10 ppb)
Maximum substrate temperature : 700 °C



This method is effective for **Acceleration of migration of sputtered atoms** on substrate surface by **low energy ion irradiation**



Concept of pulsed DC reactive sputtering



本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : 磁気転写電荷誘起型
磁界センサ
- 出願番号 : 特願2024-021362
- 出願人 : 秋田大学
- 発明者 : 吉村 哲

産学連携の経歴

- 2014年-2015年 磁気記録媒体メーカーと
共同研究実施
- 2016年- 光磁気デバイスメーカーと
共同研究実施
- 2020年-2021年 JST-トライアウト事業に採択
(磁気特性評価装置メーカーと)
- 2023年 磁性材料メーカーと
共同研究実施

お問い合わせ先

秋田大学産学連携推進機構
特任准教授 藤原 将司

TEL 018-889-2712

FAX 018-837-5356

e-mail staff@crc.akita-u.ac.jp