

「次世代エレクトロニクスデバイスの創出に資する
革新材料・プロセス研究」
平成 21 年度採択研究代表者

湯浅 新治

(独)産業技術総合研究所 エレクトロニクス研究部門・研究グループ長

革新的プロセスによる金属／機能性酸化物複合デバイスの開発

§ 1. 研究実施の概要

H21 年度は、主に酸化物成膜装置の作製・改造を行い、次年度以降にプロセス・素子開発を本格的に開始するための準備を行った。それと並行して電圧印加磁化反転の予備的な実験を開始した。

酸化物成膜装置の作製・改造については、キヤノンアネルバの既存の磁気トンネル接合膜用のスパッタ装置のチャンバにプラズマ発光モニターを装着し、酸化物層形成プロセスにおけるプラズマ発光スペクトルを確認した。次年度はプラズマ発光スペクトルと膜質との関係を調査する。また、産総研の既存の金属 MBE 成膜チャンバに酸素クラッキングセルと高温金属セル 3 基を装着し、酸化物 MBE 成膜チャンバに改造した。次年度は、これらの成膜装置を用いて、まずはスピネルフェライト系酸化物薄膜から作製を開始する。

電圧印加磁化反転に関しては、予備的な実験として通常のトンネル磁気抵抗素子において強磁性層の膜厚を数原子層とすることにより、バイアス電圧印加による磁気異方性変化を電気測定により検出が可能な素子を開発した。これにより、ノイズスペクトルの測定から電圧印加が磁気異方性に与える影響を定量的に評価することに成功した。また、マクロスピモデルシミュレーションにより、電圧誘起磁化反転を実現するための実験条件最適化を行った。

§ 2. 研究実施体制

(1)「産総研」グループ

- ① 研究分担グループ長:湯浅 新治(産業技術総合研究所、研究グループ長)
- ② 研究項目

- 項目(1)スパッタ成膜プロセスの開発
- 項目(2)電圧印加磁化反転技術の開発
- 項目(3)不揮発性スイッチング素子の開発

(2)「キャノンアネルバ」グループ

①研究分担グループ長:恒川 孝二(キャノンアネルバ株式会社、課長)

②研究項目

- 項目(1)スパッタ成膜プロセスの開発
- 項目(2)電圧印加磁化反転技術の開発
- 項目(3)不揮発性スイッチング素子の開発

(3)「大阪大学」グループ

①研究分担グループ長:鈴木 義茂(大阪大学、教授)

②研究項目

- 項目(2)電圧印加磁化反転技術の開発

§ 3. 研究実施内容

項目(1) スパッタ成膜プロセスの開発

我々は、スパッタ法を用いて高品質な酸化物薄膜を作製し、さらに強磁性金属との積層化を行うことによって新しい機能を発現する金属／機能的酸化物複合構造を作製することを最終目標としている。そのために、まず手始めにスパッタ法による高品質酸化物の作製技術の開発を行った。当研究グループでは既に磁気トンネル接合膜の MgO トンネル障壁層の形成において、スパッタ法を用いて良質な MgO 膜を形成するプロセス条件を見出している。しかし、膜形成におけるプラズマ状態と膜質との関係は未だ不明な点が多い。そこで先ず手始めに、膜質とデバイス特性との関係がよく知られている磁気トンネル接合膜の MgO トンネル障壁をモデル材料として利用し、プラズマ状態と膜質およびデバイス特性(トンネル磁気抵抗特性)との関係を明らかにする。

H21 年度は、プラズマ発光モニターを既存のスパッタ装置に取り付け、プラズマ発光スペクトルを観測した。図1は実際に MgO トンネル障壁層を RF スパッタリングで形成する時のプラズマ条件におけるプラズマ発光スペクトルの観測例である。ターゲットは MgO 焼結ターゲットを用いた。スパッタガスとしては Ar ガスのみを用い、酸素ガスは混ぜていない。ターゲットに投入する電力密度は 0.95 W/cm^2 とした。このような成膜条件で観測された発光スペクトルからは Ar に関するスペクトルしか得られなかった。基板上には MgO 薄膜が堆積していることから、気相中を酸素が移動していることは確かであるため、発光を伴う活性種はほとんど存在せず、発光を伴わない活性種またはイオンが MgO 薄膜形成の主要因になっていると推察される。

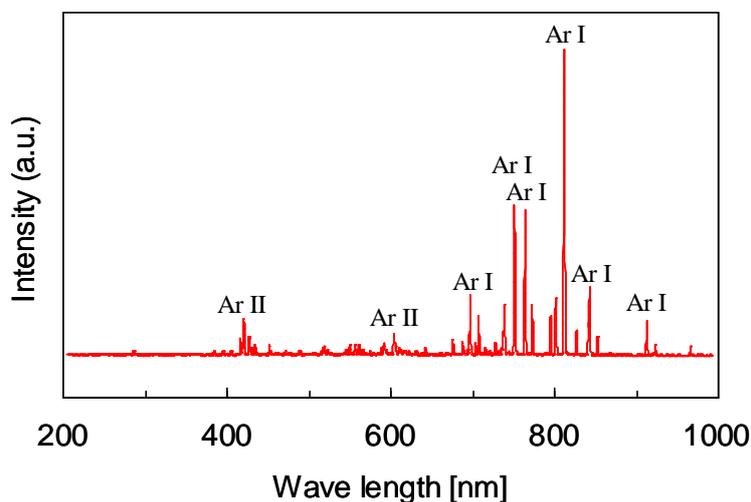


図1 MgO トンネル障壁層の RF スパッタ成膜時におけるプラズマ発光スペクトル

項目(2) 電圧印加磁化反転技術の開発

我々はこれまでに Au/超薄膜 Fe(Co)/MgO/Polyimide/ITO 構造において、磁気光学効果を用いて電圧印加による磁気異方性変化の観測を行ってきた。しかし、この素子構造の場合、抵抗

がギガΩオーダーと非常に高く、電圧磁化反転の実現に必要な極短パルス電圧の印加が困難であった。そこで H21 年度は上部 Polyimide/ITO 層を強磁性 Fe 層に置き換えた強磁性トンネル接合素子を作製し、電圧誘起磁気異方性制御、およびその定量評価を行った。

具体的な素子構造は MgO 基板 /Cr(10 nm)/Au(50 nm)/Fe₈₀Co₂₀(0.5~0.8 nm)/MgO(1.0~1.8 nm)/Fe(10 nm)/Au(5 nm)であり、FeCo 層、および MgO 層をウェッジ状に成膜した。この膜を微細加工により素子サイズ 200 × 800 nm²のトンネル接合素子とし、DC バイアス電圧下でのマグノイズスペクトル測定により電圧誘起磁気異方性エネルギー変化の定量評価を行った。図2に FeCo 膜厚 0.68 nm、MgO 膜厚 1.5 nm で面直外部磁場 H_{ex}=2500 Oe 印加下でのマグノイズピーク周波数のバイアス電界依存性を示す。この膜厚領域では FeCo 膜は垂直磁化膜となっており、ピーク周波数は $f=\gamma(H_{\text{perp}}+H_{\text{ex}})/2\pi$ で表される。ここで γ はジャイロ磁気定数、 H_{perp} は FeCo 膜の垂直磁気異方性磁界である。ピーク周波数のシフトから垂直磁気異方性磁界の変化を評価することが可能である。電圧の印加に対して線形な異方性磁界の変化が観測されており、直線フィッティングから見積もられる界面磁気異方性エネルギー変化は、1 V/nm の電界で約 37 $\mu\text{J}/\text{m}^2$ であることが分かった。同様の評価を異なる FeCo 膜厚、MgO 膜厚についても行った結果、今回作製した膜厚領域範囲では異方性エネルギー変化は約 25~35 $\mu\text{J}/\text{m}^2$ とほぼ一定であった。本素子開発、および測定開発により、電界誘起磁気異方性変化の厳密な定量評価が可能となった。

次に、磁気異方性変化を用いた電圧誘起磁化反転を実現するための実験条件の最適化を目的として、マクロスピンシミュレーションを行った。1 軸異方性を有する面内磁化膜に対して、パルス電圧印加（立ち上り&立ち下り時間: 0.1ns, パルス幅: t_{pulse} ）により 200 Oe の垂直磁気異方性磁界変化が生じる

場合の計算結果を図3に示す。外部磁場は面直方向に印加しており、その他の材料パラメータは全て実験で得られた値を用いている。赤色の領域が磁化反転が生じた条件である。ダイナミック磁化反転の特徴を反映して複雑な縞模様構造が見られるが、600 Oe 以上の面直磁場下において、非常に広い領域で反転可能な条件が存在することが分かった。今後はこの計算結果を元に、実験による電圧誘起磁化反転の実証を目指す。

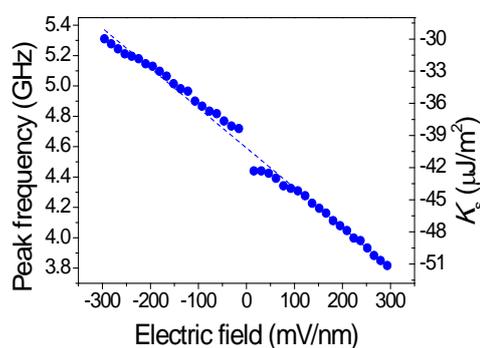


図2 マグノイズピーク周波数、および界面磁気異方性エネルギーのバイアス電界依存性

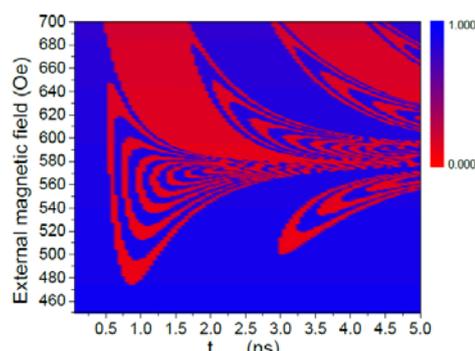


図3 パルス電圧誘起磁化反転のパルス幅、面直外部磁場強度依存性 (0:反転、1:非反転)

項目(3) 不揮発性スイッチング素子の開発

H21年度は、酸化物成膜チャンバの改造を行った。これまでにMgO-MTJ素子の開発で実績のある複合成膜装置(産総研)の金属蒸着チャンバ(10連Eガン、RHEED、基板加熱、ウェッジ成膜機構など有り)に、高温セル3基と酸素クラッキング・セルを組み込んだ(図4, 5)。この改造により、Fe, Co, Niを含有するスピネル・フェライト系酸化物のMBE成長が可能となり、また、既存装置で培った磁性金属多層膜やトンネル接合膜の上への酸化物の積層も可能となる。次年度は、この装置を用いてCoフェライトやNiフェライト薄膜を作製し、酸化物磁性体の電圧印加磁化反転の研究を行う。また、Fe₃O₄薄膜を作製して、磁気抵抗素子の作製を試みる。なお、この成膜チャンバは超高真空対応であり、BaやBiなどの蒸気圧の高い材料はチャンバ汚染の原因となる恐れがあるため、本チャンバでは蒸着は行わない。次年度は、蒸気圧の高い材料を含む酸化物薄膜のための専用の成膜チャンバを作製し、既存の複合成膜装置に接続する予定である。

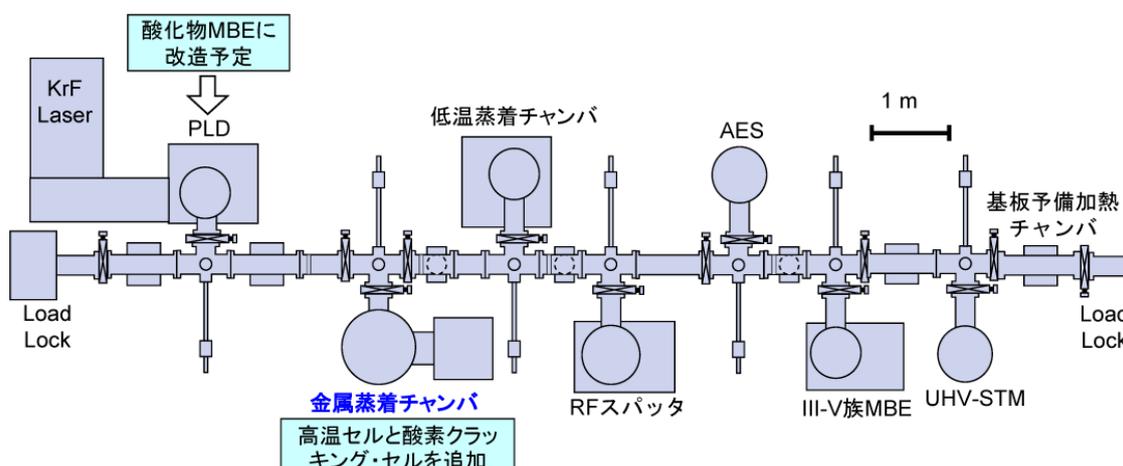


図4 複合成膜装置の改造

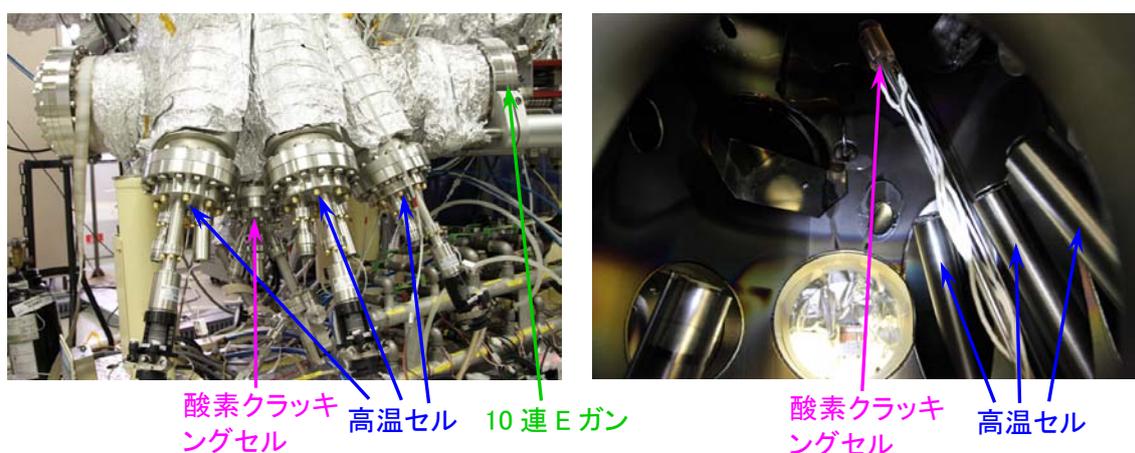


図5 金属蒸着チャンバに組み込んだ高温セルと酸素クラッキングセル