

「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

H23 年度 実績報告

湯浅新治

産業技術総合研究所ナノスピントロニクス研究センター・研究センター長

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. 研究実施体制

(1) 産総研グループ

- ① 研究代表者: 湯浅 新治 (産業技術総合研究所 ナノスピントロニクス研究センター、研究センター長)
- ② 研究項目
 - ・原子発光分光レートモニターを用いた酸化物 MBE 成膜技術の開発

(2) キヤノンアネルバグループ

- ① 主たる共同研究者: 恒川 孝二 (キヤノンアネルバ株式会社 開発統括部門プロセス開発センター、プロセス開発第一部長)
- ② 研究項目
 - ・革新的な酸化物のスパッタ装置と成膜プロセスの開発

(3) 大阪大グループ

- ① 主たる共同研究者: 鈴木 義茂 (大阪大学大学院 基礎工学研究科、教授)
- ② 研究項目
 - ・Au/FeCo/MgO/Fe 構造をベースとしたトンネル接合素子において、アシスト磁場下におけるパルス電圧誘起磁化反転の実験実証を進める。
 - ・電圧印加下における磁気光学スペクトル観測を行い、超薄膜 Fe(Co)および FePd(Pt)層の軌道磁気モーメント変化の直接観測を通して、電界効果の起源解明を試みる。

§ 2. 研究実施内容

(2-1) 原子発光分光レートモニターを用いた酸化物 MBE 成膜技術の開発

高品質な酸化物超薄膜の作製では酸素雰囲気中での精密な組成制御が重要な鍵となる。H23年度は、酸素雰囲気中においても多元素の成長レートを同時に検出可能な原子発光分光レートモニターを金属 MBE 装置に導入した。まず Fe 単元素でのレートモニタリングを試みたが、電子ビーム蒸着源からの発光が大きなバックグラウンドとなり、S/N 比が 1 と非常に低く、正確なレート制御が困難であることが明らかとなった。そこで、元素からの発光のみを効率よく検出するため、発光信号伝送路内に水晶ロッドを導入し、長さ調整による最適化を行った。図 1 は S/N のロッド長さ依存性の一例である。水晶ロッドの導入により S/N 比は最大で約 3.5 倍にまで改善され、プログラム上でのアベレーシングと組み合わせることで正確なレート制御が可能となった。一方で、2元素同時蒸着に関しては、フィルターによる異種材料間のスペクトル分離が十分ではなく、フィルター間の干渉が問題となることが明らかとなったため、プログラム上で補正を行う検討を進めている。

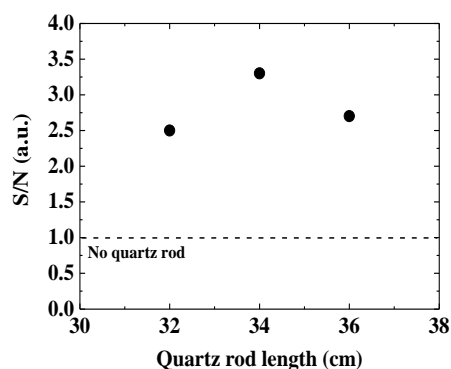


図 1 原子発光分光レートモニター S/N 比の水晶ロッド長さ依存性

(2-2) 革新的な酸化物のスパッタ装置と成膜プロセスの開発

H23年度は、前年度にキヤノンアネルバにて開発を行った酸化物用スパッタ成膜チャンバを用いて、酸化物材料の成膜評価に着手した。酸化物スパッタの特徴として、スパッタリング過程で形成される負イオンがターゲット表面近傍のシース電圧 (V_{dc}) により加速されて高エネルギー粒子となり、この粒子が基板に衝撃を与えることで堆積酸化物の結晶性や化学組成比を劣化させることが知られている。そのため、良質な酸化物薄膜を形成するには V_{dc} の低減が必要不可欠である。本プロジェクトで開発した成膜チャンバには DC/RF(13.56 MHz)の兼用カソードと 60 MHz の VHF 専用カソードの 2 カソードが搭載されており、投入電力の高周波化による V_{dc} の低減を試みている。

まず、本設備の性能評価を行うために、既存技術との比較評価が容易な酸化物である酸化マグネシウム (MgO) を用いて諸特性 (放電特性、結晶性) の評価を行った。図 3 に、通常用いられる 13.56 MHz の交流電力と本設備の特徴である 60 MHz の交流電力での MgO スパッタ時における放電特性を示す。13.56 MHz の場合には、 V_{dc} は約 75 V であるのに対し、60 MHz の場合には数 V 程度まで小さくなった。また、放電圧力も 0.018 Pa まで低圧にしても十分安定な放電を維持していることから、薄膜作製に重要な低圧放電と低 V_{dc} の両立を実現することができた。さらに、投入電力を 3 倍にしても、13.56 MHz の V_{dc} の半分以下になるため、高周波化によってより広い

プロセスウィンドウを確保できることが分かった。一方、周波数の高周波化によって、MgO の結晶性が劣化することも分かった。現在のところ原因を特定中であるが、高周波化によって基板ステージやチャンバ内シールドのインピーダンスが最適条件からずれている可能性や、膜中へのコンタミ増加などの問題が明らかになっている。そのため、当初の開発予定より遅れているが、ハード構成の最適化を行うことで本年度中には解決できると考えている。

成膜チャンバの性能評価に加えて、Ni フェライトの成膜プロセスの開発も行った。60 MHzのスパッタでは上記のような問題が生じることが分かったため、本開発には 13.56 MHz の RF スパッタを用いた。アモルファス酸化 Si 上に低圧条件で Ni フェライトを室温成膜し、真空中で 700°C 加熱処理を施すと 30 nm の薄膜でも非常に結晶性のよい Ni フェライトが得られること分かった(図 4 参照)。

さらに 13.56MHz の RF スパッタを用いて、アモルファス酸化 Si 上に(001)配向成長した膜厚 2nm の極薄 MgO 膜を室温成膜し、それをテンプレートとして膜厚 30nm の Co フェライト薄膜をやはり 13.56MHz の RF スパッタで室温成膜した試料を作製した。MgO をテンプレートとした場合、Co フェライト膜は as-deposited の状態においても(001)に高配向していることがわかった(図 5 参照)。本結果は、極薄 MgO をトンネルバリアとした磁気トンネル接合において、MgO トンネルバリア上に(001)配向したスピネルフェライト膜を形成できる可能性を示唆している。

60 MHz の VHF スパッタにおける問題点が解決したら、本成膜プロセスと組み合わせて更な

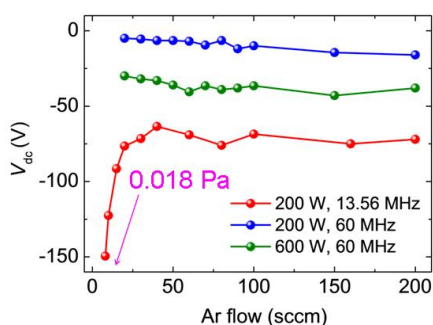


図 3 MgO ターゲット表面近傍におけるシース電圧の周波数による比較。

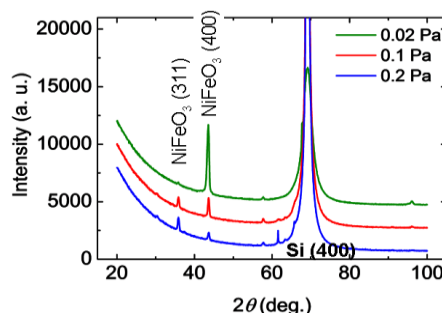


図 4 アモルファス酸化 Si 上に成膜した Ni フェライト薄膜(30 nm)の XRD パターン。

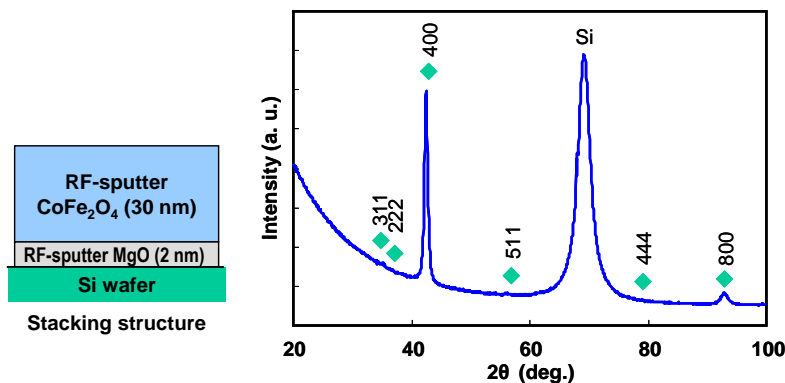


図 5 (001)配向した膜厚 2nm の MgO 膜をテンプレートとして RF スパッタ成膜した Co フェライト薄膜(30 nm)の XRD パターン。

(2-3) 電圧印加磁化反転技術の開発

電圧印加磁化反転の問題

点の一つは電圧や電界が時間反転対称性を破らないために双方向磁化反転が困難である点にある。この問題を解決する方法の一つとしてダイナミック双方向磁化反転を提唱した。そのためにまず、マクロスピンシミュレーションを行いその実現可能性を確かめた(図6)。さらに、実際に FeCo 超薄膜/MgO/Fe トンネル接合を作成して高速パルス電圧の印加に対する応答を調べた。その結果、適当な条件下では反転確率がパルス長に対して振動的に変化することを見出した(図7)。

FePd/MgO/Fe トンネル磁気抵抗素子において電圧印加磁気異方性変化を見出した。これらの素子の磁気光学スペクトルの測定をした(図8)。

SPrin8において FePd 系および Fe 系の超薄膜の軌道角運動量の定量評価を行った。さらに電圧印加下での軌道角運動量の定量評価を可能にするための装置及び素子開発を行った。

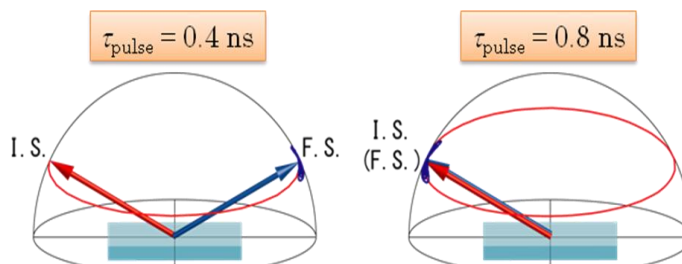


図6 電圧印加ダイナミック双方向磁化反転のシミュレーション

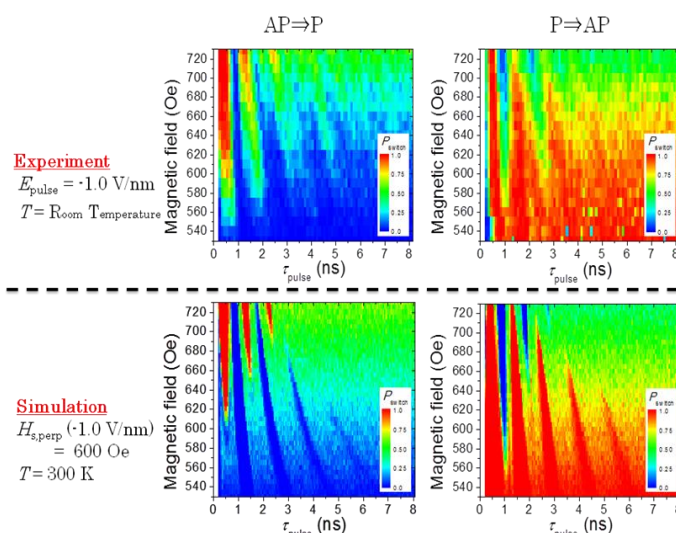


図7 高速パルスによる磁化反転の実験結果(上)とシミュレーション結果(下)

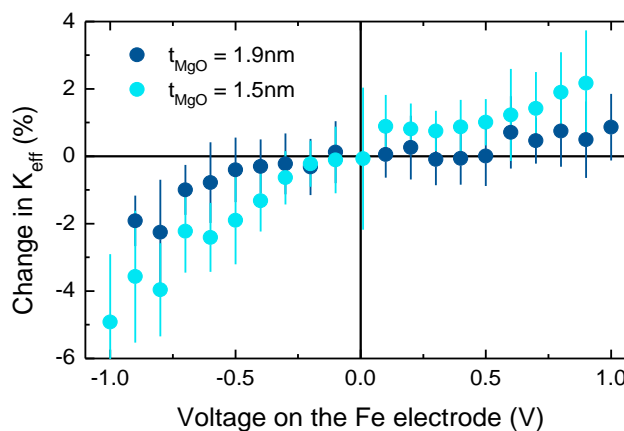


図8 FePd の電圧効果

§3. 成果発表等

(3-1) 原著論文発表

●論文詳細情報

1. Y. Shiota, T. Nozaki, F. Bonell, S. Murakami, T. Shinjo, Y. Suzuki,
"Induction of coherent magnetization switching in a few atomic layers of FeCo using voltage pulses", *Nature Materials*, Vol. 11, pp.39-43, 2012 (DOI:10.1038/nmat3172).
2. F. Bonell, S. Murakami, Y. Shiota, T. Nozaki, T. Shinjo, Y. Suzuki, "Large change in perpendicular magnetic anisotropy induced by an electric field in FePd ultrathin films", *Applied Physics Letters*, Vol. 98, pp232510_1-3, 2011, (DOI:10.1063/1.3599492).
3. Y. Suzuki, H. Kubota, A. Tulapurkar, and T. Nozaki, "Spin control by application of electric current and voltage in FeCo-MgO junctions", *Phil. Trans. R. Soc. A*, September 28, 2011 369 (1951) 3658-3678, (DOI:10.1098/rsta.2011.0190)

(3-2) 知財出願

- ① 平成 23 年度特許出願件数(国内 2 件)
- ② CREST 研究期間累積件数(国内 2 件)