

プログラム名：無充電で長期間使用できる究極のエコ IT 機器の実現

PM 名：佐橋政司

プロジェクト名：電圧トルク MRAM プロジェクト

委 託 研 究 開 発

実 施 状 況 報 告 書 (成 果)

平 成 2 7 年 度

研究開発課題名：

電圧トルク素子のダイナミクス・新材料・微細加工技術の開発

研究開発機関名：

国立研究開発法人 産業技術総合研究所

研究開発責任者

野崎 隆行

# I 当該年度における計画と成果

## 1. 当該年度の担当研究開発課題の目標と計画

電圧効果ダイナミクスの解明と高性能化に関して、試行回数  $10^4$  回を目標とした電圧磁化反転の高速評価手法を確立するとともに、現状素子でのエラーレート評価するとともに、低エラーレート化に向けた物性パラメータ設計の方針を明らかにする。電圧効果材料開発に関しては  $\text{MgO}$  誘電層を基本として超薄膜磁性層だけでなく下地層材料を含めた材料・構造設計により、大きな界面磁気異方性と電圧効果の両立を目指す。電圧素子微細加工技術に関しては、現状プロセスのさらなる最適化による素子微細化を試みるとともに、新規導入装置による側壁ダメージ低減プロセスの検討を行う。

## 2. 当該年度の担当研究開発課題の進捗状況と成果

### 2-1 進捗状況

電圧効果ダイナミクスの解明と高性能化に関しては、 $\text{W}$  キャップ層を有する  $\text{FeB}/\text{MgO}$  積層を上部電極フリー層とした電圧駆動型垂直磁化トンネル磁気抵抗素子において、 $10^{-3}$  オーダーのエラー率を得た。また実用化に必要な  $10^{-10} \sim 10^{-15}$  オーダーのエラー率実現に向けての道筋を明らかにした。

電圧効果材料開発に関しては  $\text{Fe}/\text{MgO}$  界面における電圧効果の最適化を目指し、エピタキシャル  $\text{Cr}/$  超薄膜  $\text{Fe}/\text{MgO}$  構造のトンネル磁気抵抗素子を作製し、 $0.4 \text{ mJ}/\text{m}^2$  の界面磁気異方性と約  $300 \text{ fJ}/\text{Vm}$  に達する電圧磁気異方性変化の観測に成功した。

また、電圧素子微細加工技術開発のための専用装置として、エッチング成膜複合加工装置を導入した。導入後立ち上げを行い、基礎的なデータを得ることができた。また、微小素子形成のために既存プロセスの改良も同時に行い、直径  $30\text{-}40 \text{ nm}$  の素子の作製の歩留まりが向上した。

### 2-2 成果

電圧効果ダイナミクスの解明と高性能化に関しては、まずエラー率を高速に評価することを目的に 2 秒間に  $10^5$  回試行できる回路を開発した。その回路を用いて、 $\text{W}$  キャップ層を有する  $\text{FeB}/\text{MgO}$  積層を上部電極フリー層とした電圧駆動型垂直磁化トンネル磁気抵抗素子におけるエラー率を評価した。電圧書込みは磁化の歳差運動を利用した書込みのため、図 1 に示すように電圧パルス幅に対してエラー率が最小値を持ち、最適条件下において  $4 \times 10^{-3}$  のエラー率を確認した。シミュレーション計算を行ったところ、観測されたエラー率を再現するには通常より大きな有効ダンピング定数を仮定する必要があることが分かった。また有効ダンピング定数の低減、及び熱安定性の向上、電圧効果の増大により実用化に必要な  $10^{-10} \sim 10^{-15}$  オーダーのエラー率実現が可能であることを理論的に明らかにした。

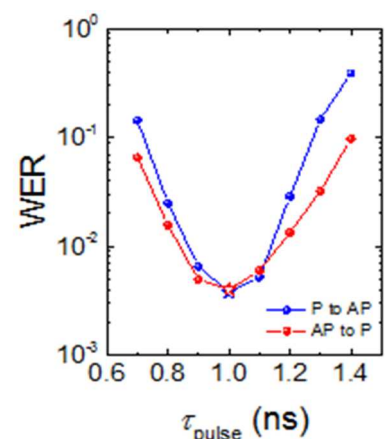


図 1 電圧書込みエラー率の電圧印加時間依存性

電圧効果材料開発に関しては、Fe/MgO 界面における垂直磁気異方性と電圧効果の限界を見極めることを目的として、Cr/超薄膜 Fe/MgO/Fe 構造からなるエピタキシャルトンネル磁気抵抗素子の電圧効果を調べた。成長条件の最適化により Fe/MgO 界面において  $2.1\text{mJ/m}^2$  の界面磁気異方性エネルギーを達成するとともに、電圧印加による超薄膜 Fe の垂直磁気異方性変化を観測することに成功した。図 2 に Fe 膜厚  $0.44\text{nm}$  の場合に観測された界面磁気異方性エネルギーの印加電界強度依存性を示す。負電界方向において明瞭な異方性の増大が見られ、その傾きは約  $300\text{ fJ/Vm}$  と FeB/MgO 系でこれまで観測されている最高値  $100\text{ fJ/Vm}$  の約 3 倍に達することを見出した。

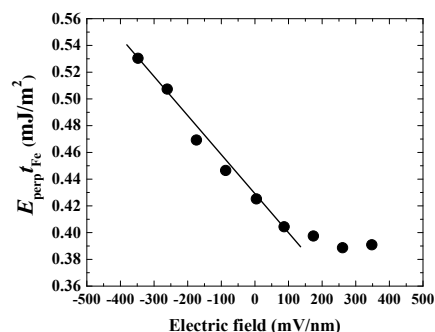


図 2 Cr/超薄膜 Fe(0.44nm)/MgO/Fe 構造における電界磁気異方性変化

電圧素子微細加工技術に関しては、本年度導入したエッチング成膜複合加工装置の立ち上げに注力した。本装置は、エッチング室、スパッタ成膜室、蒸着成膜室、搬送ロボット室およびロードロック室から構成され、清浄な環境下での微細素子形成工程を行うことができる。エッチング室、スパッタ室は  $10^{-7}\text{ Pa}$  の超高真空であり、大気にさらすことなく試料を各チャンバーに移動させることが可能である。エッチング室には 3 種類のイオンソースが装備されているが、産総研ではまずカウフマン型イオンソースについて重点的に立ち上げを行い、従来よりも低電圧で安定に放電することを確認した。スパッタチャンバーには絶縁層形成のための  $\text{SiO}_2$  ターゲットが装着されており、 $\text{SiO}_2$  のスパッタレート、膜厚分布ともに良好であった。また、試料基板を装着するための基板ホルダーを複数個製作し、ホルダーの加工表面を十分に平坦化することにより十分な基板冷却が可能であることがわかった。これによりプラズマのダメージによる試料の劣化を防ぐことができた。本装置を使った MTJ 試料の試作において、エッチングレートを従来機の半分程度にまで遅くし、ミリングによるダメージの低減を狙った。微小 MTJ のためのマスクは電子線リソグラフィを用いて形成した。その結果 100% を超える高い MR 比を得ることができた。これは加工前に CIPT 法により測定した結果をほぼ同じであり、大きな加工ダメージが無いと判断できる。また、エッチングのためのハードマスクプロセスの検討も行った。従来ハードマスクには Ta, Ti などの固い金属材料を用いることが一般的であるが、種々の金属材料の適用検討から始め、最適条件下では  $10\text{ nm}$  程度の非常に小さいマスクパターンも得られた。今後も歩留まり向上を目指して検討を継続する。

### 2-3 新たな課題など

超薄膜領域での材料探索と電圧効果の物理理解、およびダイナミック磁化反転のエラー率向上指針に関して実験による検証には限界があるため、理論サポート体制を構築し、緊密な連携により研究開発を加速する環境を整えて頂いた。

電圧素子微細加工技術に関しては、エッチング成膜複合加工装置を用いた素子加工プロセスとハードマスクプロセスを統合することが次の課題であり、効率的な装置利用、プロセス開発により早期に電圧素子微細加工プロセスを構築したい。

3. アウトリーチ活動報告  
該当無し。