

平成 27 年 3 月 31 日

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：単結晶・高集積化・3次元化プロジェクト

委 託 研 究 開 発

実 施 状 況 報 告 書 (成 果)

平成 2 6 年 度

研究開発課題名：

新材料開発による単結晶素子の高性能化

研究開発機関名：

物質・材料研究機構

研究開発責任者：

宝野 和博

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

26～27年度における目標は、(1)非 MgO 系トンネルバリア新材料の開発において、100%超のトンネル磁気抵抗効果と数 Wnm^2 の RA 積、(2)CPP-GMR 用材料および素子の高性能化において、従来と同等以上の MR 比と従来 0.02Wnm^2 程度であった RA 値を 0.1Wnm^2 程度まで高めること、(3)新規強磁性材料の探索において、 200emu/cm^3 程度以下の低飽和磁化の垂直磁気異方性材料、(4)ナノ構造解析による磁気抵抗素子の構造と磁気伝導特性の因果関係の解明、等である。

各項目の具体的な計画としては、以下のとおりである。

(1) 低障壁スピネル材料等の開発

低 RA 積を実現するには、障壁高さが MgO よりも低い新規材料を開発することが最も有効であると考えられる。一般に障壁高さが低くなると、トンネル磁気抵抗比も低くなるので、整合トンネルで高い磁気抵抗比を維持しなければならない。そのためには、強磁性層と格子整合の良い新規バリア材料を開拓する必要がある。そこで、本研究では電子構造計算を参考にして、低 RA 積が得られるスピネル系の新規バリア材料を探索する。また、スピネル系以外の酸化物についても検討を行う。

(2) ホイスラー合金系 CPP-GMR 素子の高性能化

ホイスラー合金を用いた CPP-GMR 素子では、トンネル磁気抵抗素子と同等の磁気抵抗比が低温で得られるが、室温では MR 比が低温の $1/3$ 程度にまで低下する。この大きな温度依存性の原因を解明し、MR 比の温度依存性を改善することが CPP-GMR 素子応用のためには必須の研究課題である。また CPP-GMR 素子はすべての層が金属であるために、典型的な素子抵抗 RA が 0.02Wnm^2 と低すぎる。そのため、スペーサと強磁性層の組み合わせとそれらの界面を改質することにより、RA を最適値 0.1Wnm^2 程度にまで高める必要がある。これらはいずれも界面に関わる問題として解決できる可能性があるので一体的に研究を進める。XMCD や磁気伝導特性の基礎的評価により、MR 比の温度依存性の本質を調べることで、酸化物を含めた新規スペーサー層の開発等によって素子抵抗を増加させること等を行う。

(3) 低 Ms 高 Ku 新規磁性材料の探索

磁化が低く、スピン分極率が高く、さらに 10 年の記録保持のための磁気異方性が 1MJ/m^3 以上の新規強磁性材料の探索を行う。バルクで高い異方性が得られない立方晶系材料の場合は、界面磁気異方性の付与による高磁気異方性の達成を目指す。

(4) ナノ構造解析

上記の研究開発は、収差補正 STEM 等の最新の電子顕微鏡技術等を用いたナノ構造解析に基づいて進捗させる。ナノ構造解析によって構造と磁気伝導特性の因果関係を明らかにすることにより、効率的な新材料探索と素子の最適化・高性能化を図る。

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

低障壁スピネル材料の開発に関しては、電子構造計算や熱力学データ、格子定数を参考にして、Mg-Al-O 系以外の新材料の検討を進めた。Mg-Al-O よりも強酸化を必要とする材料系も候補物質として考えているため、酸化プロセスの見直しを行い、成膜装置にも必要な変更を行いつつある。ナノ構造解析は、酸化プロセスを再検討する上でも非常に重要であるため、障壁層の構造解析・ナノ分析も集中的に行った。

CPP-GMR については、MR 比の大きな温度依存性の起源を解明するために、深さ分解 XMCD による非磁性層/ホイスラー層の界面磁性の温度依存性の評価、並びに異方性磁気抵抗効果 (AMR 効果) を利用したバルク領域のスピン偏極率の温度依存性の評価を行った。

2-2 成果

障壁層の研究については、障壁層周辺の組成プロファイルを精密に評価した結果、元素拡散による各層の組成変化が起こることが分かった。Fig.1 は、薄い Co_2FeAl ホイスラー層 (1.2nm) を電極層に、 MgO を障壁層に用いた積層構造の断面 TEM 像である。平坦な障壁が形成されていることが分かる。Fig.2 は、EDS による、この積層構造の膜厚方向の組成プロファイルである。 MgO 障壁層中に Al に拡散して取込まれている様子が分かる。この Al 原子拡散は、成膜条件やポストアニールの有無にも依存するが、概ねほとんどの $\text{Co}_2\text{FeAl}/\text{MgO}$ 積層において観測され、 Co_2FeAl の膜厚が薄いときには、強磁性層は CoFe 合金に近い組成となる。このことは超薄膜ホイスラー層を用いたときの問題となるが、同時に障壁層はスピネル系の組成になっており、このような原子拡散を利用したスピネルバリアの形成法も今後利用できると思われる。詳細なナノ構造解析によって初めて明らかになった事実であり、ナノ構造解析の有用性も示している。

CPP-GMR に関しては、材料系の基礎的評価を中心に行った。Fig.3 に総価電子数 N_V の異なる Co_2MnZ 及び Co_2FeZ 薄膜における AMR 効果による抵抗変化 r の温度依存性を示す。 r はフェルミ準位近傍の局在 d 電子状態数を反映するため、有限温度では電子占有確率の広がりによるスピン偏極状態の変化を間接的に反映することが予測される。実験の結果、 N_V がハーフメタルギャップ中心近傍においては r の温度依存性は極めて小さいが、 N_V がギャップ端に近い組成では、大きな温度依存性を示すことが分かった。このことから、 N_V がギャップ中心近傍の組成においてはバルクスピン偏極率の温度依存性は小さく、MR 比の温度依存性はほぼ界面起因であることが分かってきた。深さ分解 XMCD によって $\text{Co}_2\text{MnSi}/\text{Ag}$ と $\text{Co}_2\text{FeSi}/\text{Ag}$ 界面の Co 磁気モーメントを測定した結果、Ag 界面のステイフネス低下を示唆する結果も得られており、今後 MR 比の温度依存性改善のためには原子レベルでの界面制御が重要であることが明らかになった。

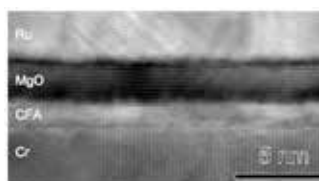


Fig.1. Cr/ $\text{Co}_2\text{FeAl}/\text{MgO}/\text{Ru}$ 積層膜の断面 TEM 像.

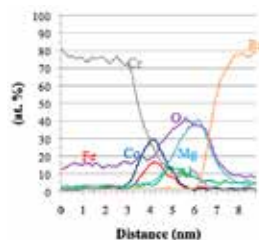


Fig.2. Cr/ $\text{Co}_2\text{FeAl}/\text{MgO}/\text{Ru}$ 積層膜の組成プロファイル.



Fig.3. $\text{Co}_2\text{MnZ}, \text{Co}_2\text{FeZ}$ 薄膜における AMR 効果による抵抗変化 D_r の温度依存性.

2-3 新たな課題など

これまでの単結晶素子のほとんどは MgO 基板上に作製されてきたが、サイズが小さいこと、ウェハーボンディングへの展開を考慮すると Si 単結晶上に試料作製することが望ましい。今後、Si(100) 基板上への単結晶素子の作製プロセス等を検討する。

3 . アウトリーチ活動報告

なし