

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：電圧駆動 MRAM 開発タスクフォース

委 託 研 究 開 発

実 施 状 況 報 告 書 (成 果)

平成 29 年度

研究開発課題名：

電圧駆動 MRAM のための新材料素子の開発

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

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

電圧駆動 MRAM を実現するために、(i) 300% を超える MR 比、(ii) 電圧効果 1000 fJ/Vm 以上、(iii) 磁気異方性エネルギー $2\sim 3 \text{ mJ/m}^2$ 以上の磁気抵抗素子の開発が必要である。平成 29 年度は、非磁性材料として、MgO 系のみならずスピネル系や半導体化合物材料を、磁性層については Fe 基合金、Mn 基フェリ磁性材料の他、ホイスラー合金系材料等を用い、新規材料を用いた研究に注力する。ナノ構造解析を駆使することで、格子整合と界面の高品質化を図り、電圧効果の向上に重きを置き、適度な RA 値を持つ素子で高い MR 比の実現を目指す。

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

大きな TMR 比の実現に関しては、 $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ を用いた強磁性トンネル接合 (MTJ) 素子の TMR 比増大という成果が得られた。磁気異方性の電圧効果に関しては、Cr/Fe/MgAlO 構造の界面垂直磁気異方性が量子井戸状態の形成によって影響を受け、特定の電圧領域では電圧効果が増大する現象を明らかにした。これらに加え応用上非常に重要な成果として、スピネルバリア MTJ の多結晶素子の実現に成功した。

2-2 成果

スピネルバリア MTJ の多結晶素子化の実現

絶縁バリア層として強磁性層と格子整合性が極めて良い MgAl_2O_4 (スピネル) による無欠陥 MTJ の活用が大きな TMR 比、電圧効果、磁気異方性エネルギーの実現のために有効であると期待されている。より大きな室温 TMR 比の実現とより幅広いスピネルバリアの活用のため、下地構造の選択に強い制約がある単結晶素子に加えて、アモルファス CoFeB 強磁性層を用いた多結晶素子化について集中的な検討を行った。アモルファス CoFeB 上に結晶スピネル層を得ることは MgO とは異なり非常に困難である。この問題解決のために、極薄の MgO 層の挿入と、スピネルバリア中の Mg-Al 組成調整を行うことによって高度なスピネル層の結晶化を実現した (Ikhtiar *et al.*, Appl. Phys. Lett. 2018, APL Featured 論文に選定、特許出願 2017-116613)。MgO 挿入層はスピネルバリアの結晶テンプレートとして有効に働き、また、Mg リッチ組成のスピネル (Mg-Al-O) を用いることによって、この MgO 挿入層が非常に薄くても ($< 0.1 \text{ nm}$) 結晶化可能であることがわかった (模式図、図 1(a))。この結果、図 1(b) に示すように、格子整合した CoFeB/Mg-Al-O/CoFeB 積層 MTJ 構造が実現された。室温 TMR 比は最大で 260% に達し、下地を選ばず作製可能な多結晶素子においてもスピネルバリアを介した良好なコヒーレントトンネル効果が実現された。また、TMR 比のバイアス電圧依存性も良好であり、 V_{half} 値 $> 1.4 \text{ V}$ が得られ、同プロセスで作製した MgO バリア

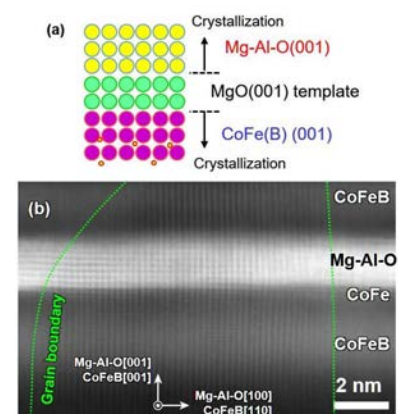


図 1. (a) MgO 極薄テンプレート層による CoFeB およびスピネル層の結晶化の模式図。(b) 得られた格子整合 CoFeB/Mg-Al-O/CoFeB 多結晶 MTJ の断面 STEM 像

素子の 0.8 V よりも明確に大きく、スピネルバリアの特長である高電圧出力化が達成されている。

Cr/Fe/MgAlO 積層構造における量子井戸状態の形成と電圧効果の増大

MgO と比較して Fe に対する格子整合性が良いスピネルバリアを用いることで、垂直磁気異方性やその電圧効果 (VCMA) がどのように変化するかを調べた。垂直磁気異方性の大きさについては、Cr/Fe/MgO に比べて Cr/Fe/MgAlO ではやや小さな値 ($K_u \sim 1.0 \text{ MJ/m}^3$) となったが、MTJ の微分コンダクタンス測定によって量子井戸状態の形成が確認され、同時に磁気異方性の電圧効果 (VCMA) にその影響が見られた。図 3 は VCMA の測定結果であり、量子井戸に起因すると考えられる振動的振舞いが生じることで、局所的には 300 fJ/Vm を超える大きな VCMA が生じている。更に、Fe 原子層数が 1 層変わるだけで VCMA 特性が大きく変化することも分かる。量子井戸が VCMA に及ぼす効果の機構解明により、大きな VCMA を得るための指針が得られると期待される。

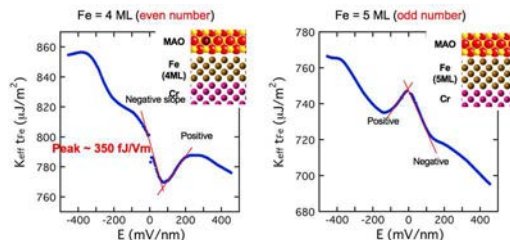


図 3. Cr/Fe/MgAlO の VCMA.

新規半導体バリア CuIn_{1-x}Ga_xSe₂ を用いた MTJ の TMR 比の増大

低 RA を実現できる新規半導体バリア材料として注目を集めている CuIn_{1-x}Ga_xSe₂ に関し、 $x=1$ とすることで、Co₂FeGa_{0.5}Ge_{0.5} 電極を用いた MTJ において、TMR 比の大幅な改善を実現することができた。従来、TMR 比は室温約 40% であったが、CuGaSe₂ を用いることで 70% (@RA=0.4Ωμm²) まで増大した (図 4)。なお、CuInSe₂ バリアよりも CuGaSe₂ バリアの方が大きな TMR 比を示すことは第一原理計算による理論予測と一致しており、更に Fe/ CuIn_{1-x}Ga_xSe₂ 界面では大きな垂直磁気異方性や VCMA も理論予測されている。

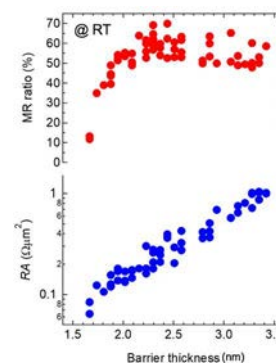


図 4. CuInSe₂ バリアを用いた MTJ の特性.

単結晶磁気抵抗素子のウエハー接合に向けたキャップ層最適化

前年度までの研究において、単結晶磁気抵抗素子を Si 基板上に作製するための下地として NiAl が有用であることを示し、これは産総研の大面积ウエハーへのプロセスへ展開されている。さらにウエハー接合へ展開するためには、磁気抵抗素子側の積層構造にダメージを与えない多結晶電極と単結晶素子側のキャップ層の組み合わせを見つける必要がある。本年度、epi-Ta/poly-Au, epi-Au/poly-Ta, epi-Au/poly-Au の 3 種の組み合わせにおける接合実験を行い、ウエハー接合後の TEM 観察によって、膜の平坦性へのダメージを評価した結果、epi Au/poly-Au の組み合わせで最も平坦性の高い界面状態が保持されていることがわかった。この結果、接合後の CPP-GMR 素子において、接合前と同様の MR が得られることを確認することができ

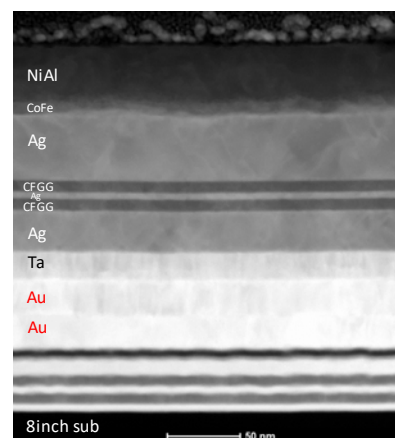


図 5 接合後の単結晶磁気抵抗素膜+多結晶電極の TEM 像

た。これらの知見は、単結晶 TMR 素子の接合に向けた有用な知見になると期待される。

2-3 新たな課題など

なし

3. アウトリーチ活動報告

なし