

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 7 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：

国立研究開発法人物質・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

- (1) 低  $RA$  および高  $MR$  比を示す TMR 素子の開発のために、スピネル系酸化物を中心に、低障壁バリア材料の開発する。
- (2) ホイスラー合金系 CPP-GMR 素子に関して、大きな  $\Delta RA$  を示す新規磁性材料ならびにスペーサー材料の探索。
- (3) 低  $M_s$  および高  $K_u$  の新規磁性材料の開発とその  $MR$  素子化のために、フェリ磁性体系の高スピントラップ材料の探索する。
- (4) ナノ構造解析により、電圧効果を示す垂直薄膜の界面構造と電圧効果の因果関係を明らかにし材料開発にフィードバックする。

### 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  $RA$  で高い  $MR$  比を実現する  $Mg_{1-x}Ti_xO$  や  $Cu(In_{0.8}Ga_{0.2})Se_2$  バリア (特願 2016-125316) を開発した。また、スピネル系についても新材料系 (特許出願準備中) を見出す等、十分な成果を得た。ホイスラー合金系 CPP-GMR 素子に関しては、NiAl 界面層による  $MR$  の増大 (特願 2015-229532) や、NiAl バッファ層による Si 基板上へのエピタキシャル成長 (特願 2015-237601) を実現した。これらの研究全般を通じて、ナノ構造解析により構造と伝導特性の関係を解明したことが、素子開発への効率的な研究展開に繋がった。

#### 2-2 成果

$MgO$  に  $Ti$  を少量ドーピングすることで得られる NaCl 構造の  $Mg_{1-x}Ti_xO$  バリアが、低障壁バリア材料であることを実証した。さらに、Fig. 1 は  $RA$  に対する TMR 比を  $Mg_{1-x}Ti_xO$  バリアと  $MgO$  バリアに対してプロットした図であり、低  $RA$  領域では  $Mg_{1-x}Ti_xO$  バリアが  $MgO$  を超える TMR 比を示すことが分かる。 $Mg_{1-x}Ti_xO$  の他にも低障壁バリアとなる新材料を開発しており、半導体である  $Cu(In_{0.8}Ga_{0.2})Se_2$  を用いた強磁性トンネル接合の作製に成功した。 $1\Omega\mu m^2$  以下の低  $RA$  特性と室温 40% の TMR が得られた。

スピネルバリアの作製方法の開発にも大きな進展があり、 $MgAlO$  バリアを酸化物ターゲットの直接スパッタ法で形成するプロセスを確立した。Fig. 2 はその結果の一例であり、Fe 電極層と組み合わせた強磁性トンネル接合で 245% という大きな TMR を実現した。界面の平坦性も改善されており、純 Fe を使ったトンネル接合では最高レベルの TMR 比である。なお、 $MgAlO$  以外のスピネル系の新規バリアの開発にも成功しており、現在特許申請準備中である。

ホイスラー合金を用いた CPP-GMR 素子では、 $AgZn$  をスペーサー層とした素子で  $MR$  比の増大が得られた (特願 2015-071954)。ナノ構造解析によって、この  $MR$  増大は  $AgZn$  スペーサーによるものではなく、 $Zn$  の拡散によるホイスラー層の規則度の増加によるものであることが明らかになった。NiAl 層をホイスラー層とスペーサー層の間に挿入した実験では、Fig. 2 に示したように、NiAl によって界面のスピン依存散乱が増大し、最高で室温 77% という巨大な

CPP-GMR を得ることに成功した (特願 2015-229532)。 $\Delta RA$  は  $31 \text{ m}\Omega\mu\text{m}^2$  という大きな値に達しており、従来の約 3 倍である。

NiAl はバッファ層としても極めて重要であり、Si 単結晶基板の上に NiAl バッファ層をエピタキシャル成長させ、その上に CPP-GMR の積層構造を形成することにより、Si 基板の上に成長した単結晶 CPP-GMR 素子を作製することに成功した (特願 2015-237601)。Fig. 4 は NiAl のエピタキシャル成長を示す TEM 像である。同時に示した回折像から、NiAl 層、Ag 層、 $\text{Co}_2\text{Fe}(\text{Ga}_{0.5}\text{Ge}_{0.5})$  (CFGG) 層が単結晶成長していることが分かる。また、Si 基板との界面ではシリサイドが形成されていることも確認できる。MR 比については、アニール耐性を高める工夫を施すことで、Si 基板上でも MgO 基板の場合と同等の MR 比が得られている。単結晶で得られた CPP-GMR の特性を、広く応用展開する上で極めて重要な成果である。この単結晶多層膜をもちいて Si ウェーハーボンディングを行い、良好な接合が得られることが確認された。今後、この手法を単結晶 MTJ 作製に応用する。

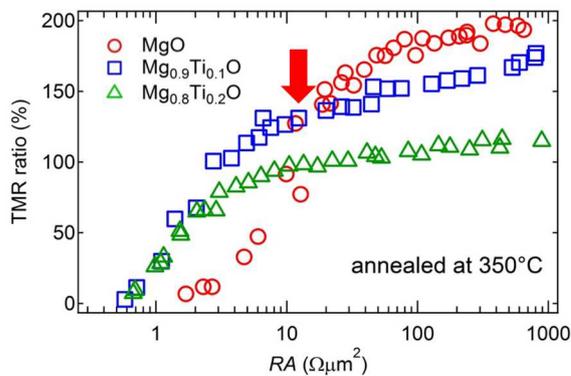


Fig.1. MgTiO、MgO バリアを用いたトンネル接合の TMR の RA 依存性。

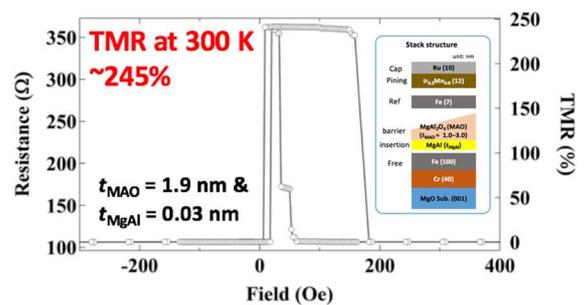


Fig. 2. 直接スパッタ法で作製した MgAlO バリアトンネル接合の TMR.

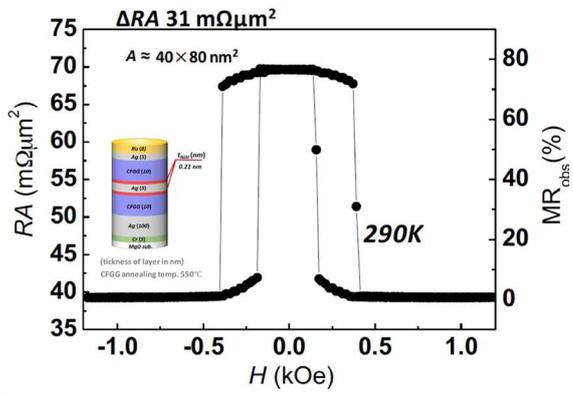


Fig. 3. NiAl 界面層を挿入したホイスラー合金 CPP-GMR.

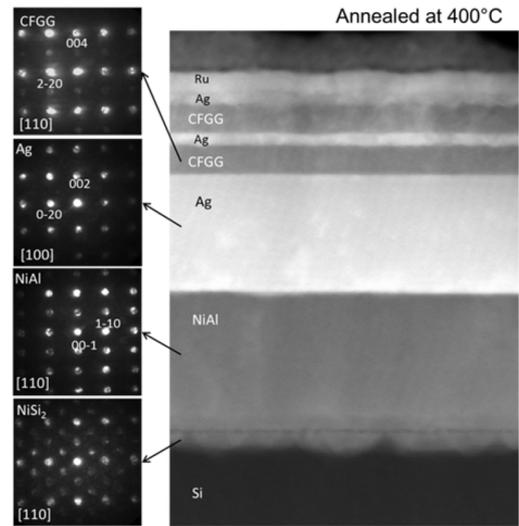


Fig. 4. Si 基板上に成長させたエピタキシャル CPP-GMR 膜のナノ構造.

### 2-3 新たな課題など

なし。

### 3. アウトリーチ活動報告

国際ワークショップ “Heusler Alloys for Spintronic Devices”、The 26th Magnetic Recording Conference で講演を行った。