

平成27年3月31日

プログラム名：革新的研究開発推進プログラム（ImPACT）

「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 PM

プロジェクト名：スピンFETプロジェクト

委 託 研 究 開 発

実 施 状 況 報 告 書（成果）

平成26年度

研究開発課題名：

低RA・高スピン偏極ソース/ドレイン電極の開発

研究開発機関名：

株式会社東芝 研究開発センター

研究開発責任者

斉藤 好昭

# 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

本プロジェクトでは、スピンドレイン電極に用いる、高性能な強磁性/(トンネル障壁)/半導体接合を開発することを目的とする。ソース/ドレイン電極の接合特性が、オン電流の磁気応答感度や素子動作速度に直接影響し、高い磁気応答感度には高スピン偏極率が、高速動作には低RA接合特性を得ることがそれぞれ重要となる。

初年度であるH26年度は、現在まで構築してきたスピン注入・スピン伝導・スピン検出技術を発展させ、強磁性/MgO/Si(100)接合の界面構造とスピン信号強度およびスピン寿命との相関を調べ、それら相関を明らかにするとともに、スピン偏極率( $P_{Si}$ )20%以上が得られる強磁性/MgO/半導体接合の構造および作製条件を見出すことを目標とした。

以下に、H26年度に得られた成果と進捗状況を以下に示す。

## 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

H26年度は、[図1](#)に示した強磁性/MgO/Si(100)接合を有する試料を作製し、Si(100)基板の表面処理のプロセス条件が、強磁性/MgO/Si(100)接合の界面構造とスピン信号強度およびスピン寿命へ及ぼす影響を調べた。Si(100)の(2×1)洗浄表面処理を行った後に強磁性/MgO電極を作製した試料(試料1)と、表面処理を行わず(1×1)表面上に強磁性/MgO電極を作製した試料(試料2)とを比較した結果、試料1のSi/MgO界面の平坦性が改善されること、それに伴い、[図2](#)に示したように、スピン信号強度が増大することが明らかとなった。また、スピン信号強度の増大が観測されたプロセスで作製した試料1のスピン偏極率( $P_{Si}$ )は、20 Kで36%、室温(300K)で21%であった。以上より、H26年度の目標が達成された。成果の詳細を以下に示す。

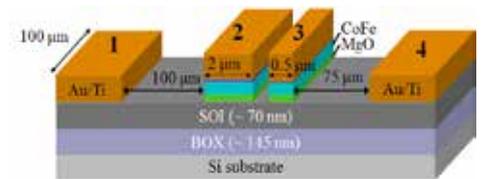


図1 作製した試料概略図

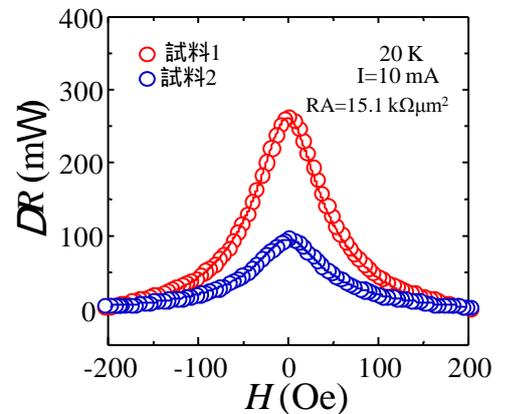


図2 試料1, 2の3端子 Hanle 信号

### 2-2 成果

強磁性/MgO/Si(100)接合を有する試料([図1](#))を作製し、Si(100)基板の表面処理のプロセス条件が、強磁性/MgO/Si(100)接合の界面構造とスピン信号強度およびスピン寿命へ及ぼす影響を調べた。試料1では(2×1)洗浄表面処理を行った SOI(Si on insulator)基板上へ Mg/MgO を成膜し、試料2では(1×1)洗浄表面処理を行った SOI 基板上へ Mg/MgO を成膜した。MgO は蒸着法で、Mg、強磁性体(CoFe)はスパッタ法で作製した。蒸着とスパッタは、真空を破ることなく真空一環で成膜することが可能である。SOI 基板の不純物濃度は約  $5 \times 10^{18} / \text{cm}^3$  であり、縮退した低抵抗な金属的特性を示すことを確認した。また、SOI 基板上にウェッジ状の MgO トンネルバリアを形成し、同一基板内に MgO トンネル障壁膜厚が異なる多くの試料を作製した。MgO 膜厚依存性から強磁性/MgO/Si(100)接合の実効障壁高さを見積もったところ、試料1では 0.37 eV、試料2では 0.36 eV とほぼ同じであることが明らかとなった。MgO 及び CoFe 層の結晶

性については、反射高速電子線回折(RHEED)法と断面透過型電子顕微鏡(断面 TEM)観察から評価し、Si(100)上にMgO/CoFeがエピタキシャル成長していることが確認された。また界面ラフネスの評価には断面 TEM 観察に加え、X線低角入射反射率測定を用いた。スピン信号強度の違いを評価する方法としては、3端子および4端子 Hanle 法、Local-MR 信号および Nonlocal-MR 信号を取得し比較した。

図3に、試料1, 2の断面 TEM 観測結果を示す。試料1は試料2と比較してSi/MgOの界面の平坦性が良く、プロセス条件を変更すると、界面平坦性が改善されることが明らかとなった。X線低角入射反射率測定も同様の傾向を示していること、再現性も確認できたことから、Si(100)の(2×1)洗浄表面処理を行った後に強磁性/MgO電極を作製すると、Si/MgOの界面の平坦性が改善されると考えられる。また、再現性も含め、Si(100)の(2×1)洗浄表面処理を行った後に強磁性/MgO電極を作製すると、スピン信号強度が増大することが確認された(図2)。

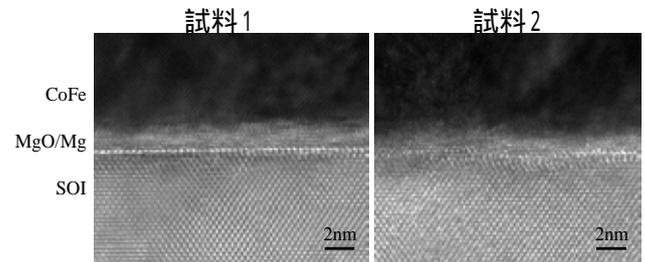


図3 試料1, 2の断面 TEM 写真

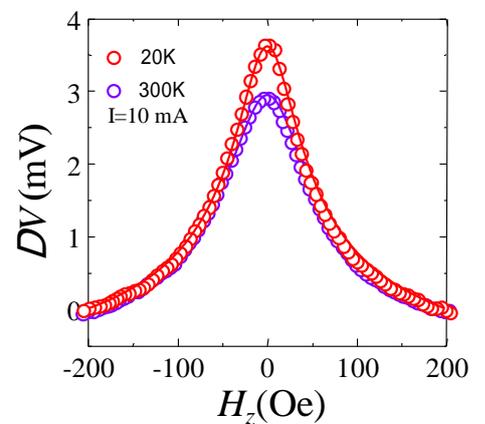


図4 試料1の3端子 Hanle 信号

次に、スピン信号強度の増大が観測されたプロセス条件で作製した試料1のスピン偏極率( $P_{Si}$ )の絶対値を求めるため、3端子および4端子 Hanle 信号を測定した。図4にそれぞれ、20 K、300 Kで測定した3端子 Hanle 信号の結果を示す。SOI基板のSi膜厚が約70 nmと薄いことを考慮した、改良した拡散方程式の理論式(J. Appl. Phys. 117, 17C707 (2015)

の式(3)参照)と、標準の4端子 Hanle の理論式から求めたスピン偏極率( $P_{Si}$ )<sub>i</sub>は、それぞれ、 $P_{Si}=36\%$ 、 $P_{Si}=32\%$ と求まり、良い一致を示した。エッジの磁区の影響のためか、Nonlocal-MR 信号強度は、4端子 Hanle の信号強度よりわずかに大きく、4端子 Hanle から求めた $P_{Si}=32\%$ の値は、その大きさを過小評価していると考えられる。したがって、3端子 Hanle から求めた $P_{Si}=36\%$ より絶対値が $P_{Si}=32\%$ とわずかに小さいことが矛盾なく理解できる。図4の室温で測定された3端子 Hanle から求められたスピン偏極率の絶対値は、 $P_{Si}=21\%$ (300 K)であった。スピン偏極率が室温で20%を超えたことから、H26年度の目標が達成された。

### 2-3 新たな課題など

特に無し

### 3. アウトリーチ活動報告

特に無し