

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：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 2 6 年 度

研究開発課題名：

低 R A ・ 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：

東北大学大学院工学研究科

研究開発責任者

安藤 康夫

## 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

スピン FET などの様々なスピントランジスタ素子が提案されており、その実現に対する期待は非常に大きい。しかし、強磁性体から半導体への高効率なスピン注入が実現されていないことが、トランジスタ素子実現の障害となっている。本研究では、強磁性体、半導体、トンネル絶縁層材料、それぞれについて新規材料を開拓、開発して高効率スピン注入を実現することが目的である。開発した材料および作製技術を、東芝、産総研などの素子開発グループに提供してスピントランジスタの実現を目指す。

H26 年度は、Si 基板上へのハーフメタルホイスラー合金薄膜の作製および評価を行った。高規則度を有するホイスラー合金が半導体基板上に作製出来れば、理想的には非常に高効率なスピン注入が可能となるが、Si や Ge 基板上に高品位なホイスラー合金薄膜を作製することは極めて困難であった。また、高品位なホイスラー合金を作製するためには、下地層となるトンネル絶縁層の作製も重要である。H26 年度は熱処理温度、素子構造依存性などについて系統的な検討を行い、高い  $B2$  規則度を有するホイスラー合金薄膜を得ることを目標とした。規則度の値は 0.5 以上を目標とした(従来値 0.1 ~ 0.2)。また、新規絶縁層材料として  $TiO_2$  薄膜の開発にも着手した。

### 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

(100), (110), (111)方位の Si および Ge 基板上に、ハーフメタルホイスラー合金  $Co_2MnSi$  薄膜をマグネトロンスパッタ法により作製した。いずれの基板上においても 275 ~ 325 の熱処理温度範囲において、薄膜が結晶化し、 $B2$  規則構造を含んでいることが分かった。また、その熱処理温度領域において強磁性を示すことを確認した。しかし、断面 TEM 観察の結果から、基板/ホイスラー合金界面は非常にラフネスが大きくなっており、界面でシリサイドが形成されていることが示唆された。そこで、Si 基板と  $Co_2MnSi$  ホイスラー合金の界面に  $MgO$  トンネル障壁を挿入した、 $Si(100)/MgO(t_{MgO})/Co_2MnSi$  積層膜を作製した。 $MgO$  膜厚の増加とともに  $Co_2MnSi$  の飽和磁化が増大し、2 nm 以上の膜厚で磁化の値が飽和した。このことから、 $MgO$  障壁の挿入によりシリサイドの形成が抑制され、良質な  $Co_2MnSi$  薄膜が形成できたと考えられる。最適条件で作製した試料について微細加工を施し、3 端子ハンル効果測定を行った。その結果、10 K においてハンル信号が観測されたが、0.1%以下と非常に小さな抵抗変化に留まった。この原因として、 $Co_2MnSi$  の規則度が十分でなくスピン分極率が小さくなってしまったこと、および、 $MgO$  膜厚が厚いために高効率なスピン注入ができなかったことが考えられる。

さらに良質なホイスラー合金薄膜を得るために、 $Co_2MnSi$  よりも規則構造が得られやすい  $Co_2Fe_{0.4}Mn_{0.6}Si$  にホイスラー合金組成を変更した。また、東芝グループの研究において、Si 基板上に良質な  $MgO$  障壁層を得るために、界面に極薄の  $Mg$  層を挿入

することが有効であることが明らかとなった。そこで、Mg 層を挿入した、Si(100)/Mg( $t_{Mg}$ )/MgO/Co<sub>2</sub>Fe<sub>0.4</sub>Mn<sub>0.6</sub>Si 多層膜を作製した。図 1(a)に熱処理温度を 550 に固定し、Mg 挿入膜厚を系統的に変化させた試料の XRD パターンを示す。0.6 nm 以上の Mg 膜厚において Co<sub>2</sub>Fe<sub>0.4</sub>Mn<sub>0.6</sub>Si の(400)ピークが急峻になり、また B2 構造の規則線である(200)ピークが明らかに観測された。(400)と(200)ピークの強度比から見積もった B2 規則度の Mg 膜厚依存性を図 1(b)に示す。Mg 膜厚が 0.6 nm 以上で B2 規則構造が得られ、その規則度は目標であった 0.5 を超え、0.7~0.8 程度の高い規則度であった。図 1(c)に飽和磁化の Mg 膜厚依存性を示す。XRD の結果と対応して、Mg 膜厚が 0.6 nm 以上で飽和磁化が増大した。以上のことから、Mg を挿入することで非常に良質な Co<sub>2</sub>Fe<sub>0.4</sub>Mn<sub>0.6</sub>Si 薄膜が得られることが明らかとなり、高効率スピン注入の実現可能性が高まった。また、新規絶縁層開発については、成膜装置の整備を行い TiO<sub>2</sub> 薄膜の作製ができる環境が整った。

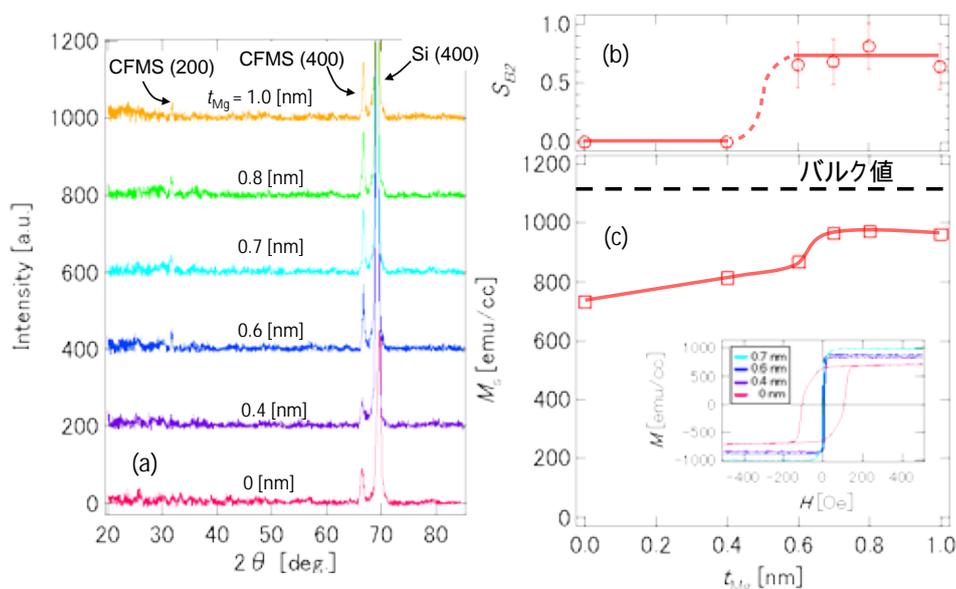


図 1 Si(100)/Mg( $t_{Mg}$ )/MgO/Co<sub>2</sub>Fe<sub>0.4</sub>Mn<sub>0.6</sub>Si 多層膜における  
(a) XRD, (b) B2 規則度, および, (c) 飽和磁化の Mg 挿入膜厚依存性

## 2-2 成果

今年度は Si 基板上に規則度 0.5 以上のホイスラー合金薄膜を得ることが目標であったが、目標を超える 0.7~0.8 の規則度を有するホイスラー合金薄膜を作製することに成功した。東芝グループによる極薄 Mg 挿入効果の知見があったことにより実現できた成果であり、ImPACT プロジェクトのチーム内連係が活かされたものである。高規則度のホイスラー合金は、高いスピン分極率を有していることが先行研究からも分かっており、今後のスピン注入信号の検出に向けて大きな期待が持てる。また、Mg 挿入によって MgO 絶縁層の薄膜化も可能になると考えられ、高効率スピン注入に対して、大きな相乗効果が期待できる。

### 2-3 新たな課題など

得られた結果は非常に有用でかつ優れたものであるが、Mg 挿入によって、何故良質なホイスラー合金薄膜が得られたのか、その理由は必ずしも明らかでない。今後、詳細な構造解析等によってそのメカニズム解明を行う必要がある。また、高効率スピン注入を実現するためには MgO の薄膜化による素子抵抗の低抵抗化が必要不可欠である。今年度検討した試料において、どこまで MgO 層を薄膜化できるのかを抑える必要がある。今後、以上の課題解決と並行して、H27 年度以降に予定している高効率スピン注入実験を行う計画である。

### 3 . アウトリーチ活動報告

研究分担者である大兼准教授が、新潟江南高等学校にて最先端スピントロニクスデバイスを開発する意義について講義した。