

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 7 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：

東北大学大学院工学研究科

研究開発責任者

大兼 幹彦

# 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

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。

H27-28 年度は、H26 年度の結果をもとにして、ホイスラー合金の高品位化を継続して進める。目標とする規則度は 0.8 以上である。また、最も高い規則度が得られた作製条件の試料において、ホイスラー合金/絶縁体/半導体接合を作製し、スピン注入信号の観測を目指す。さらに、ホイスラー合金薄膜と相性の良い、新規絶縁層材料の探索を並行して進め、高効率スピン注入を実現するための接合構造を提案する。さらに、新規絶縁層材料については、H26 年度の調査結果をもとに系統的に探索を行う。ホイスラー合金/絶縁層/半導体接合において、最も高効率なスピン注入を実現するための層構造を明確化することが最終的な目標である。

## 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

Si または Ge 基板上に Mg/MgO/Co<sub>2</sub>(FeMn)Si ホイスラー合金積層膜を作製した。H26 年度までの成果により基板/MgO 界面に極薄の Mg 層を挿入することで規則度が改善する知見が得られていた。今年度はさらに膜厚および熱処理温度を最適化することで最終目標であった 0.8 を超える規則度を有する Co<sub>2</sub>(FeMn)Si 薄膜を得ることに成功した [T. Koike and M. Oogane, Jpn. J. Appl. Phys., accepted]。得られた最適条件を用いてスピン注入用の素子を微細加工により作製し、スピン信号測定を試みた。基板には産総研グループから提供された、Sb が局所的にドーピングされた n 型 δ ドープ Ge 基板を用いた。Fig. 1 に 10 K において測定したスピン注入 (3 端子ハンル効果) 信号の印加電流依存性を示す。印加電流によって信号の計上が劇的に変化する様子が観測された。観測された最も大きな磁気抵抗比は約 6% であり、過去の報告に比べて非常に大きなものであった。さらに注目すべきことは、従来は 3 端子ハンル効果によるスピン注入信号は、2 つの緩和時間を有するローレンツ関数で解析が行われていたが、観測された信号は 3 つの緩和時間を仮定することで実験結果を良く説明できた。この原因は現在のところ不明であるが、今後この原因を明らかにすることで、さらなる磁気抵抗比の増大が期待される。

新規絶縁層材料としてアナターゼ型の TiO<sub>2</sub> 薄膜の作製を行った。アナターゼ型の TiO<sub>2</sub> 薄膜は、Ge 基板およびホイスラー合金と格子ミスマッチが小さいことから、高品質のヘテロ接合を形成可能とする材料である。さらに、Ge/TiO<sub>2</sub> 接合では障壁高さ

が小さくなることが理論的に示唆されており、低抵抗素子を実現するためにも有用な材料である。Ge(100)基板の上に電子ビーム蒸着を用いてTiO<sub>2</sub>薄膜を作製した。種々の基板温度で成膜した結果、300°C以上の基板温度でアナターゼ型のTiO<sub>2</sub>が得られることが分かった。しかし、期待していた(001)配向ではなく、(101)配向の薄膜が得られ、エピタキシャル成長はしていないことがXRDにより確認された。また、600°C以上の高温ではTi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>層が副層として形成されてしまうことも分かった。Fig. 2に300°Cで成膜したGe-sub./TiO<sub>2</sub>薄膜の断面TEM像を示す。TEM像から、高品質な結晶質のTiO<sub>2</sub>薄膜がGe基板界面近傍から形成されていることが分かった。しかし、界面2層程度はアモルファス層が形成されてしまっており、これがエピタキシャル成長を阻害した原因と考えられる。今後はこのアモルファス層の形成を抑えることで、エピタキシャル成長したTiO<sub>2</sub>薄膜が得られると期待される。

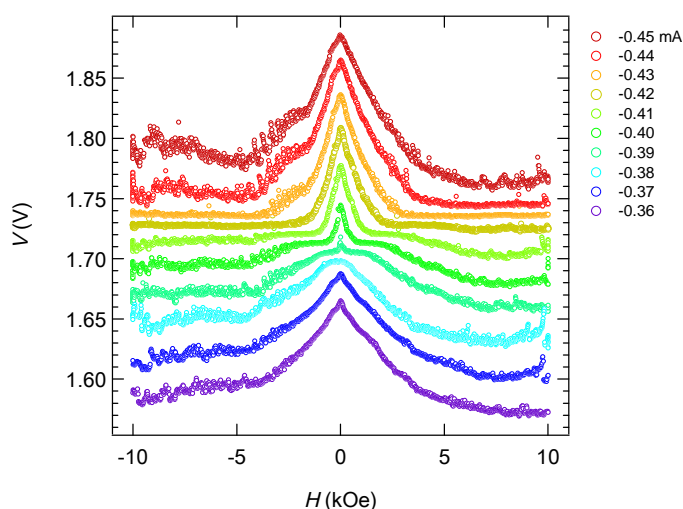


Fig. 1 Ge/Mg/MgO/Co<sub>2</sub>(FeMn)Si 素子におけるスピン注入信号の電流依存性

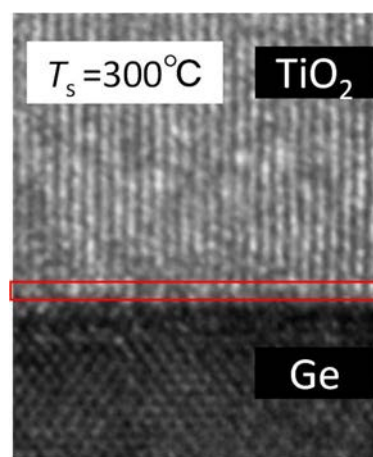


Fig. 2 Ge/TiO<sub>2</sub> 薄膜の断面 TEM 像

## 2-2 成果

今年度は極薄 Mg 層の挿入および熱処理温度の最適化によって、目標であった規則度 0.8 以上のホイスラー合金薄膜を Si および Ge 基板の上に作製することに成功した。また、Ge 基板の上に作製したスピン注入素子において、10 K で約 6% の磁気抵抗比を観測した。Table 1 に他グループとの磁気抵抗比の比較を示す。表から分かる通り、磁気抵抗比は先行研究に比べて非常に大きいことが分かる。

また、新規絶縁層材料の開発についても大きな進展が得られた。Ge 基板の上に高品質なアナターゼ型 TiO<sub>2</sub> 薄膜を作製することができた。得られた薄膜は想定していた(001)配向膜ではなかったが、これは Ge 基板表面の酸化の影響であることが TEM 観察によって明らかになっている。従って、今後この酸化アモルファス層の形成を抑制することで、(001)配向のエピタキシャル TiO<sub>2</sub> 薄膜が作製できると考えられる。

Table 1 他グループとの磁気抵抗比の比較

Stack	Temp. [K]	MR ratio [%]	Group	Reference
Si(100)/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Fe <sub>80</sub> Ni <sub>20</sub>	300	0.12	Twente univ.	Nature (2009)
"	5	0.34	"	"
Si(100)/SiO <sub>2</sub> /CoFe	300	0.004	NRL	Nature Comm. (2011)
"	10	0.021	"	"
Si(100)/MgO/Fe	300	—	TDK	APEX (2011)
"	8	0.015	"	"
Si(100)/MgO/CoFe	300	0.03 (Local)	Kyoto Univ. TDK	APEX (2015)
Si(100)/MgO/CoFe	300	0.1 (Local)	TOSHIBA	JAP (2014)
<b>Ge(100)/MgO/CFMS</b>	<b>10</b>	<b>6.2</b>	<b>Our Data</b>	<b>—</b>

### 2-3 新たな課題など

高品質なホイスラー合金を用いることで、大きな磁気抵抗比が観測されたが、そのメカニズムは不明である。また、観測されたスピン注入信号の形状は、複数の緩和メカニズムが存在していることを示唆しているが、その原因も明確でない。これらを明らかにすることで、さらにスピン注入信号を増大させるための指針が得られると考えられる。また、TiO<sub>2</sub> 薄膜についても、現状では(101)配向膜となっており、これを解決することで低抵抗なスピン注入素子を実現できると考えられる。

### 3. アウトリーチ活動報告

福島県立磐城高等学校にて最先端スピンエレクトロニクスデバイスを開発する意義について講義した。