

課題番号	GR099
------	-------

**先端研究助成基金助成金(最先端・次世代研究開発支援プログラム)
実施状況報告書(平成24年度)**

本様式の内容は一般に公表されます

研究課題名	スピントロニクス技術を用いた超省電力不揮発性トランジスタ技術の開拓
研究機関・ 部局・職名	独立行政法人産業技術総合研究所・ ナノスピントロニクス研究センター・研究チーム長
氏名	齋藤 秀和

1. 当該年度の研究目的

強磁性体から半導体へのスピン偏極電子注入(スピン注入)は不揮発性トランジスタ(スピントランジスタ)実現のための基盤技術である。昨年度、我々は Fe/MgO トンネル接合を用いて、次世代半導体チャネル材料であるゲルマニウム(Ge)へのスピン注入に世界で初めて成功した。しかし、室温でのスピン注入のためには比較的大きな電流密度(150A/cm²)が必要であった。そこで、本年度はより小さな電流密度でスピン注入を実現するため、MgO に代わる新トンネル障壁層材料を開発する。具体的には、Ge 基トランジスタのゲート酸化膜材料である酸化ゲルマニウム(GeO₂)を導入する。また、Ge へ注入された電子スピンの偏極率を得るために、Ge を用いたスピン発光素子の作製に挑む。本年度は、そのために必要な Si 上の高品位単結晶 Ge 膜作製技術を確立する。

2. 研究の実施状況

新トンネル障壁層 GeO₂を導入することにより、MgO と比較して Ge へのスピン注入に必要な電流密度を約3桁(0.17 A/cm²)の削減に成功した(A. Spiesser *et al.*, Japanese Journal of Applied Physics (2013))。また、Si 基板上の Ge 単結晶薄膜の作製のための成膜装置の改造を行った。

これまでの我々の研究により、半導体へのスピン注入のために必要な電流密度を減少させるためには、酸化物/半導体接合界面の不完全性に起因する界面状態密度を出来るだけ小さくなるように、適切な酸化物絶縁体を用いることが有効であることがわかっている。GeO₂は Ge に対して高品位の界面を形成できるためゲート酸化膜として用いられているが、トンネル障壁材料としての報告例はなかった。そこで、不純ガスの少ないバルク状 GeO₂ 蒸着源の開発を行い、これを用いた高品位 Fe/GeO₂ 強磁性トンネル接合を実現することにより、スピン注入の臨界電流密度の劇的な削減に成功した。この成果は、Ge を用いたスピントランジスタの低消費動作に極めて重要であり、グリーン IT の発展へ大きく貢献できると期待される。また、改造した成膜装置を用いて作製した Si 基板上の Ge 単結晶薄膜の結晶品位を、フォトルミネッセンス法を用いて評価したところ、スピン依存発光の観測に必須である直接遷移発光が観測された。したがって、この結晶を用いることにより、目的である注入された電子のスピン偏極率の直接測定は可能であることが示された。

さらに、最終年度で予定していた Si へのスピン注入を前倒して行った。具体的には、Si 上の Fe/MgO 完全単結晶トンネル接合の作製技術を開発し、p 型 Si への室温でのスピン注入に成功した(A. Spiesser, *et al.*, SPIE Proceedings)。

様式19 別紙1

3. 研究発表等

<p>雑誌論文 計 4 件</p>	<p>(掲載済み一査読有り) 計 2 件 1) S. Iba, H. Saito, A. Spiesser, S. Watanabe, R. Jansen, S. Yuasa, and K. Ando, "Spin Accumulation and Spin Lifetime in p-Type Germanium at Room Temperature", Applied Physics Express 5, (2012) 053004. 2) A. Spiesser, S. Watanabe, H. Saito, S. Yuasa and K. Ando, "Effective Creation of Spin Polarization in p-type Ge from a Fe/GeO₂ Tunnel Contact", Japanese Journal of Applied Physics 52, (2013) 04CM01. (掲載済み一査読無し) 計 1 件 1) A. Spiesser, S. Sharma, H. Saito, S. Yuasa and K. Ando, "Electrical spin injection in p-type Si using Fe/MgO contacts", SPIE Proceedings 8461, (2012). (未掲載) 計 1 件 1) A. Spiesser, Y. Sato, H. Saito, S. Yuasa and K. Ando, "Epitaxial growth of ferromagnetic semiconductor GaMnAs film on Ge(001) substrate", will be published in Thin Solid Films (2013).</p>
<p>会議発表 計 6 件</p>	<p>専門家向け 計 6 件 1) S. Iba, H. Saito, A. Spiesser, S. Watanabe, R. Jansen, S. Yuasa and K. Ando, "Doping concentration dependence of spin accumulation in p-type germanium", International conference on physics and application in spin-related phenomena in semiconductors, 2012, Aug. 5-8, Eindhoven, Netherlands. 2) A. Spiesser, S. Sharma, H. Saito, S. Yuasa and K. Ando, "Electrical spin injection in p-type Si using Fe/MgO contacts", SPIE Nanoscience Engineering 2012, Aug. 12-17, San Diego, USA. 3) S. Iba, H. Saito, A. Spiesser, S. Watanabe, R. Jansen, S. Yuasa and K. Ando, "Spin accumulation in nongenerate and heavily doped p-type germanium", International conference of solid state devices and materials, 2012, Sep. 25-27, Kyoto, Japan. 4) A. Spiesser, S. Watanabe, H. Saito, S. Yuasa and K. Ando, "Effective Creation of Spin Polarization in p-type Ge from a Fe/GeO₂ Tunnel Contact", International conference of solid state devices and materials, 2012, Sep. 25-27, Kyoto, Japan. 5) 揖場聡、齋藤秀和、A. Spiesser、渡邊克、R. Jansen、湯浅新治、安藤功児、"p型 Ge 中の室温におけるスピン蓄積とスピン寿命"、第 73 回秋季応用物理学会講演会、2012 年 9 月 12-15 日、松山 6) S. Iba, H. Saito, A. Spiesser, S. Watanabe, R. Jansen, S. Yuasa and K. Ando, "Spin Accumulation and Spin Lifetime in p-Type Germanium at Room Temperature", 12th Joint MMM/intermag conference, 2013, Jan. 14-18, Chicago, USA. 一般向け 計 0 件</p>
<p>図書 計 0 件</p>	
<p>産業財産権 出願・取得状 況 計 0 件</p>	<p>(取得済み) 計 0 件 (出願中) 計 0 件</p>
<p>Webページ (URL)</p>	
<p>国民との科学・技術対話 の実施状況</p>	<p>"磁石の不思議な世界～聞いて、さわって、体験しよう～"、平成 25 年 3 月 3 日、千葉大学(千葉)、小学生対象、参加人数80名、磁石の性質や役割について講演や体験コーナーを通して理解を深める</p>
<p>新聞・一般雑誌等掲載 計 2 件</p>	<p>1) 科学工業日報、2012年5月10日 5面、"室温でスピン情報入力" 2) 日刊工業新聞、2012年5月16日 20面、"室温で磁性体のスピン情報、p型ゲルマニウムに入力"</p>
<p>その他</p>	

4. その他特記事項

実施状況報告書(平成24年度) 助成金の執行状況

本様式の内容は一般に公表されません

1. 助成金の受領状況(累計) (単位:円)

	①交付決定額	②既受領額 (前年度迄の 累計)	③当該年度受 領額	④(=①-②- ③)未受領額	既返還額(前 年度迄の累 計)
直接経費	126,000,000	93,400,000	16,300,000	16,300,000	0
間接経費	37,800,000	28,020,000	4,890,000	4,890,000	0
合計	163,800,000	121,420,000	21,190,000	21,190,000	0

2. 当該年度の収支状況 (単位:円)

	①前年度未執 行額	②当該年度受 領額	③当該年度受 取利息等額 (未収利息を除 く)	④(=①+②+ ③)当該年度 合計収入	⑤当該年度執 行額	⑥(=④-⑤) 当該年度未執 行額	当該年度返還 額
直接経費	2,787,618	16,300,000	0	19,087,618	19,055,540	32,078	0
間接経費	0	4,890,000	0	4,890,000	4,890,000	0	0
合計	2,787,618	21,190,000	0	23,977,618	23,945,540	32,078	0

3. 当該年度の執行額内訳 (単位:円)

	金額	備考
物品費	9,697,053	スピンの検出用分光装置、半導体成膜用分子線源、半導体基板等
旅費	2,310,802	研究成果発表旅費(松山大学)等
謝金・人件費等	4,799,183	博士研究員人件費
その他	2,248,502	学会参加費、電子顕微鏡写真分析費等
直接経費計	19,055,540	
間接経費計	4,890,000	
合計	23,945,540	

4. 当該年度の主な購入物品(1品又は1組若しくは1式の価格が50万円以上のもの)

物品名	仕様・型・性能 等	数量	単価 (単位:円)	金額 (単位:円)	納入 年月日	設置研究機関 名
電子スピン検出用 分光システム	ルシール社製 Z-VIR2358G	1	4,410,000	4,410,000	2012年11月5日	産業技術総合研 究所
III-V族半導体成膜 装置用分子線源	エイコー社製 MB-3000	1	3,969,000	3,969,000	2012年12月25日	産業技術総合研 究所