

平成 22 年 4 月 28 日現在

研究種目：特定領域研究

研究期間：2007～2010

課題番号：19048030

研究課題名（和文） シリコンベース素子を用いたスピン注入効率の最適化

研究課題名（英文） Development of Si-based Spintronic Devices

研究代表者

秋永 広幸 (AKINAGA HIROYUKI)

独立行政法人産業技術総合研究所・ナノ電子デバイス研究センター・副研究センター長

研究者番号：90221712

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学 ・ 電子デバイス・電子機器

キーワード：MBE, エピタキシャル、磁性、スピンエレクトロニクス、ナノ材料、半導体物性

## 1. 研究計画の概要

本研究課題では、スピンエレクトロニクスとシリコンテクノロジーとの融合を推進するため、シリコンベース素子を用いたスピン注入効率の最適化に焦点を絞り、(1) シリコンベース強磁性体の開発、(2) 強磁性体金属/シリコンヘテロ構造におけるスピン偏極電子注入の実証、(3) スピン流を用いたシリコンベースデバイス機能の実証、を行う。スピンエレクトロニクスをシリコンベース半導体テクノロジーに適用し、さらにプロトタイプデバイスを作製することによってその技術的課題を抽出しようとする試みは現在までに実施されておらず、極めて独創性の高い研究計画である。より具体的には、(1) シリコンあるいはシリコンカーバイドなど IV 族半導体に遷移金属をドーピングする技術を開発し、それら IV 族半導体そのものをスピン偏極電子源とする。(2) 強磁性体金属とシリコンとの界面に絶縁体薄膜を導入する技術を開発し、熱的に安定な MIS 接合を作製するとともに、トンネル現象を用いたスピン偏極電子注入を実現する。(3) (2) 番にて開発した MIS 接合を用いて、そのスピン注入効率を最大・最適化するとともに、シリコンベーススピン発光素子等に適用し、素子特性に与えるスピン依存現象の解析と技術的課題の抽出を行う。これらを通じて、beyondCMOS 世代を担うナノエレクトロニクス研究開発の種と、強磁性体金属からなる各種ストレージデバイスの微細化を進める上で必要不可欠なシリコンベース半導体素子との接合に関する学理・技術に関する現実的知見を得ることを目指す。

## 2. 研究の進捗状況

本研究開始以前は、Fe<sub>3</sub>Si 表面の凹凸を抑えることが出来なかったが、Fe<sub>3</sub>Si 層の形成を低温分子線エピタキシー(MBE)法で行い、その後、250℃で熱アニールすることにより、平坦な Fe<sub>3</sub>Si 膜の成膜が可能になることを平成 19 年度までに報告した。また、このヘテロ界面を積層したエピタキシャル磁気トンネル接合を作製できるようになり、平成 20 年度は Fe<sub>3</sub>Si on CaF<sub>2</sub>(2nm) / Fe<sub>3</sub>Si(5nm) / CaF<sub>2</sub>(2nm) 共鳴トンネル構造の設計と、その Si(111) 基板における MBE 法によるエピタキシャル成長を行った。そして、これらの成果を受け、平成 21 年度は、Fe<sub>3</sub>Si / CaF<sub>2</sub> ヘテロ接合からなる共鳴トンネルダイオードの動作実証を行った。一方、平成 20 年度に、MBE 法により、MgO(001) 基板への Fe<sub>4</sub>N 膜のエピタキシャル成長を実現し、さらに、a 軸に高配向した Fe<sub>4</sub>N(100nm) / MgO(2nm) / Fe<sub>4</sub>N(30nm) 磁気トンネル接合(MTJ)構造の MBE 成長に成功した。そして、平成 21 年度においては、この Fe<sub>4</sub>N のスピン偏極度などの評価を行った。

## 3. 現在までの達成度

ほぼ予定通りに研究が進んでいる。また予期せぬ成果として、当該特定領域研究に参画する他の研究グループと共同研究を推進したことにより、Pr<sub>12.5</sub>Co<sub>77.5</sub>B<sub>10</sub> の磁気光学性能指数が特に波長 400nm 付近で高いことが明らかになり、青色領域での新しい光スピントロニクス材料開発に成功した。

## 4. 今後の研究の推進方策

平成 22 年度は、以上 3 年間で開発した技術

を用いて、Fe<sub>3</sub>Si / CaF<sub>2</sub> 磁気共鳴トンネルダイオードを作製し、その動作実証と「室温で300%を超える磁気抵抗比」という当研究課題の目標達成を目指して研究を進めていく。また、Fe<sub>4</sub>N からなる MTJ 構造に関しては、平成 22 年度中に、磁気抵抗効果による評価を行う。

#### 5. 代表的な研究成果

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 15 件)

W. Wang, F. Takano, and H. Akinaga, “Structural, magnetic, and magnetotransport properties of Mn-Si films synthesized on a 4H-SiC(0001) wafer”, Phys. Rev. B 75, 165323-1-10 (2007). 査読有.

T. Harianto, K. Sadakuni, H. Akinaga, and T. Suemasu, “Fabrication and Current-Voltage Characteristics of Fe<sub>3</sub>Si/CaF<sub>2</sub>/Fe<sub>3</sub>Si Magnetic Tunnel Junction”, Jpn. J. Appl. Phys. 47, 6310-6311 (2008). 査読有.

W. Wang, F. Takano, H. Ofuchi, and H. Akinaga, “Local structural, magnetic and magneto-optical properties of Mn-doped SiC films prepared on a 3C SiC(001) wafer”, New J. Phys. 10, 055006 (2008). 査読有.

A. Narahara, K. Ito, T. Suemasu, Y. K. Takahashi, A. Ranajikanth, and K. Hono, “Spin polarization of Fe<sub>4</sub>N thin films determined by point-contact Andreev Reflection”, Appl. Phys. Lett. 94, 202502 (2009). 査読有.

K. Sadakuni, T. Harianto, H. Akinaga, and T. Suemasu, “CaF<sub>2</sub>/Fe<sub>3</sub>Si/CaF<sub>2</sub> Ferromagnetic Resonant Tunneling Diodes on Si(111) by Molecular Beam Epitaxy”, Appl. Phys. Express 2, 063006 (2009). 査読有.

[学会発表](計 22 件)

H. Akinaga, F. Takano, H. Shima, and T. Suemasu, “Spin and Functional-oxide electronics as beyond CMOS candidates”, Moscow International Symposium on Magnetism 2008, June 21, 2008, Moscow, Russia (Invited).

H. Akinaga, F. Takano, H. Shima, and T. Suemasu, “Development of silicon-based spintronic materials and devices”, Asian Magnetism Conference 2008, Dec. 12, 2008, Busan, Korea (Invited).

末益 崇, 榎原明理, Teddy Harianto,

貞国健司, 秋永広幸, “強磁性体 Fe<sub>3</sub>Si, Fe-N 膜から Si へのスピン注入”, 応用物理学会 2008 年秋季学術講演会, 2008 年 9 月 3 日, 中部大学, 愛知, (Invited).

H. Akinaga, F. Takano, H. Shima, and T. Suemasu, “Development of silicon-based spintronic devices”, 第 32 回日本磁気学会学術講演会, 2008 年 9 月 12 日, 東北学院大学, 宮城. (Invited)

貞国健司, 鈴野光史, 末益崇, 原田一範, 秋永広幸, “Local Epitaxy 法を用いた Fe<sub>3</sub>Si/CaF<sub>2</sub> 多層構造による強磁性 RTD の作製”, 第 57 回応用物理学関係連合講演会, 18p-TM-6, 2010 年 3 月 18 日, 東海大学, 神奈川.