

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年4月30日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22360127

研究課題名（和文） ハーフメタル強磁性体／Si界面の原子層制御による室温動作スピントランジスタの創出

研究課題名（英文） Atomically-control of halfmetal/Si interface for spin-transistors

## 研究代表者

宮尾 正信 (MIYAO MASANOBU)

九州大学・大学院システム情報科学研究院・特任教授

研究者番号：60315132

## 研究成果の概要（和文）：

本研究では、ハーフメタルをソース・ドレイン電極とした Si 系スピントランジスタの創製を目指し、その基盤技術を構築した。スピン注入・検出の高温化を目的とし、3元系ホイスラー合金からなるハーフメタルのエピタキシャル成長技術の開発を行うと共に、ハーフメタル/Si 界面の電気伝導特性の制御手法を創出し、室温スピン注入を実証した。

## 研究成果の概要（英文）：

To achieve Si-based spin-transistors, a new epitaxial growth technique of half-metal on Si has been developed. Moreover, by optimizing the electrical transport properties at half-metal/Si interfaces, injection of spin-polarized electrons has been realized at room temperature.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	6,000,000	1,800,000	7,800,000
2011年度	4,800,000	1,440,000	6,240,000
2012年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
総計	14,300,000	4,290,000	18,590,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学、電子・電気材料工学

キーワード：半導体、Si系スピントランジスタ、次世代LSI

## 1. 研究開始当初の背景

トランジスタの微細化で高性能化を推進してきた集積回路が、スケール限界に直面しつつある。従って、集積回路を用いた高度情報通信機器・携帯端末・デジタル家電等では、トランジスタの高密度集積や高速動作化に伴い、消費電力の増大が大きな問題となっている。トランジスタでは、電源を切ると情報を失う揮発特性が一般的であるから、電子機器の待機電力は増大する一方である。即

ち、高度情報ユビキタス社会の中心を担う、新たな動作原理に立脚した、超低消費電力トランジスタの創成が希求されている。

その有力候補が、電子の有するスピン機能を活用したスピントランジスタである。しかし、強磁性体で形成したソース電極から Si にショットキー接触を介してスピン注入することは極めて困難であり、提案以来その研究開発は足踏み状態にあった。最近、我々は、分子線エピタキシャル成長(MBE)を高度化

し、強磁性 Fe<sub>3</sub>Si 合金(スピン偏極率：43%)を Si 上にエピタキシャル成長することに成功した。この原子レベルで平坦なヘテロ界面を利用し、スピン散乱を極小化した結果、Si へのスピン注入を実現した。液体窒素温度を超える 150K で明瞭なスピン信号が電氣的検出された。これは、『強磁性体電極からショットキー障壁を介して Si チャンネルにスピン注入・検出』した世界で初めての実験結果であり、スピントランジスタの実現に拍車をかける画期的な研究成果である。

このシーズ技術を基盤とし、本テーマでは、『スピン注入・検出の高温化(室温)と室温動作スピントランジスタの創出』を目指し、研究を進める。

## 2. 研究の目的

本研究では、ハーフメタルをソース・ドレイン電極とした Si 系スピントランジスタの創製を目指し、その基盤技術を構築することを目的とする。

スピン注入・検出の温度を高温化(室温化)するブレイクスルーのポイントが『ハーフメタル強磁性体(スピン偏極率：100%)のエピタキシャル成長技術の創成』である。ハーフメタル電極の採用が Si へのスピン注入効率を飛躍的に向上させ、スピン注入・検出の高温化(室温)を実現する鍵となる。

このアイデアの基、本研究では以下の2点を具体的目標とし、研究を推進する。

(1) ハーフメタル強磁性体(スピン偏極率：100%)と期待できる3元系ホイスラー合金(Co<sub>2</sub>FeSi)を Si 上に原子層制御エピタキシャル成長する技術を開発し、スピン注入効率の高いショットキー電極(ソース・ドレイン)を形成する。

(2) 「ハーフメタル/Si 界面のショットキー障壁巾を制御し、電子注入効率を飛躍的に増大する。これにより、室温でのスピン注入を実証する。

## 3. 研究の方法

我々のシーズ技術をベースに、3元系ホイスラー合金からなるハーフメタル(スピン偏極率：100%)のエピタキシャル成長技術の検討を行う。

まず、我々の独自技術(「2元系強磁性シリサイド(Fe<sub>3</sub>Si)の原子層エピタキシャル成長」を、ハーフメタル(スピン偏極率：100%)である3元系フルホイスラー合金(Co<sub>2</sub>FeSi)に展開する。堆積速度比(Co:Fe:Si)の精密制御等を行い、「原子レベルで平坦なヘテロ界面を有するハーフメタル強磁性体/Si 積層構

造を実現」する。次に、「Si へのスピン注入・検出技術(150K)」を、このハーフメタル強磁性体/Si 積層構造に適用する。ショットキー界面(Co<sub>2</sub>FeSi/Si)の障壁巾を制御することで、「Si へのスピン注入・検出を高温化」する手法を検討する。スピン伝導特性を解析し、主要パラメータ(スピン注入効率、スピン緩和距離、スピン検出効率等)を抽出する。これらの結果を基に、デバイス構造の適正化を進め、スピン注入効率を向上することにより、室温でのスピン注入を実現する。

## 4. 研究成果

### (1) SOI(Si-on-Insulator) 上における Co<sub>2</sub>FeSi の原子層制御エピタキシャル成長

当該研究グループが保有している原子層制御エピタキシャル成長技術を3元系(Co, Fe, Si)に展開し、SOI 上における強磁性体(Co<sub>2-x</sub>Fe<sub>x</sub>Si)のMBE成長を検討した。

形成した強磁性体/Si 構造の結晶性、磁気特性、及び規則度を強磁性体の組成(x)の関数として系統的に評価すると共に、電子顕微鏡法を用いて、規則度と界面急峻性の関係を系統的に検討した。以上により、高規則度を有する強磁性体薄膜をSOI基板上に原子層で制御しエピタキシャル成長する指針を明らかにした。

### (2) ハーフメタル強磁性体の高品位エピタキシャル成長

SOI 上における3元系ホイスラー合金(Co<sub>2</sub>FeSi)のエピタキシャル成長の検討を行い、3元系合金の成長では基板温度(結晶成長温度)、分子線堆積速度、及び分子線堆積速度比(Co:Fe:Si)の制御が重要であることを明らかにした。形成したCo<sub>2</sub>FeSi/Si 構造の結晶性及び磁性特性の評価結果を結晶成長法にフィードバックし、急峻なヘテロ界面を有するハーフメタル強磁性体/Si 積層構造を実現した。

### (3) Co<sub>2</sub>FeSi/Si 界面の電気伝導特性の制御

原子層ドーピング技術を用いて、Si 表面近傍に不純物を局所的にドーピングし、電氣的障壁幅を制御する手法を高度化した。スピン注入に最適な障壁幅を実現するため、原子層ドーピングや強磁性体薄膜成長のプロセス条件の適正化を進めた。形成された障壁層の電気特性を測定し、障壁幅と接合界面の品質性を評価した。

### (4) Co<sub>2</sub>FeSi/Si 界面におけるスピン注入の実証

Co<sub>2</sub>FeSi 電極からSi内部へ室温スピン注入するには、Co<sub>2</sub>FeSi 電極/Si 接合の障壁巾を

極薄化する必要がある。そこで、原子層ドーピング法等による不純物の局所的ドーピングの高度化を図った。ダイオードの順方向電流の電界勾配(理想因子)から接合界面の品質性を、逆方向電流の温度特性から電子注入効率を算定した。それらを原子層ドーピングや結晶成長にフィードバックしてハーフメタル強磁性体/Si 界面構造を適正化し、室温スピン注入を実証した。

#### 5. 主な発表論文等

(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 6 件)

- ① K. Yamane, K. Hamaya, Y. Ando, Y. Enomoto, K. Yamamoto, T. Sadoh, and M. Miyao,  
“Effect of atomically controlled interfaces on Fermi-level pinning at metal/Ge interfaces”,  
Applied Physics Letters, 査読有, Vol. 96, pp. 2104-1-3, 19 (2010)  
<http://dx.doi.org/10.1063/1.3368701>
- ② K. Hamaya, Y. Ando, T. Sadoh, and M. Miyao,  
“Source-Drain Engineering Using Atomically Controlled Heterojunctions for Next-Generation SiGe Transistor Applications”,  
Japanese Journal of Applied Physics, 査読有, Vol. 50, pp. 010101-1-7 (2011)  
DOI: 10.1143/JJAP. 50.010101
- ③ S. Oki, S. Yamada, T. Murakami, M. Miyao, K. Hamaya,  
“Influence of Al co-deposition on the crystal growth of Co-based Heusler-compound thin films on Si(111)”,  
Thin Solid Films, 査読有, Vol. 520, pp. 3419-3422 (2012)  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2011.10.080>,
- ④ S. Yamada, K. Hamaya, T. Murakami, Varaprasad, Y. K. Takahashi, A. Rajanikanth, K. Hono, and M. Miyao,  
“Low-temperature grown quaternary Heusler-compound  $\text{Co}_2\text{Mn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Si}$  films on Ge(111)”,  
Journal of Applied Physics, 査読有, Vol. 109, pp. 07B113-1-3 (2011)  
<http://dx.doi.org/10.1063/1.3563039>

- ⑤ Y. Ando, K. Kasahara, S. Yamada, Y. Maeda, K. Masaki, Y. Hoshi, K. Sawano, M. Miyao and K. Hamaya,  
“Temperature evolution of spin accumulation detected electrically in a nodegenerated silicon channel”,  
Phys. Rev. B, 査読有, Vol. 85, pp. 035320-1-5 (2012)  
DOI:10.1103/PhysRevB. 85. 035320

- ⑥ M. Miyao, M. Kurosawa, K. Toko, Y. Tojo, and T. Sadoh,  
“(Invited) Hybrid- Formation of Ge-on-Insulator Structures on Si Platform by SiGe-Mixing-Triggered Rapid-Melting Growth --- A Road to Artificial Crystal ---”,  
ECS Transactions, 査読有, Vol. 50, pp. 59-70 (2013)  
doi: 10.1149/05005.0059ecst

[学会発表] (計 3 件)

- ① K. Hamaya and M. Miyao,  
“(招待講演) Electrical Spin Injection and Detection in Si using Ferromagnetic-Silicide Contacts”,  
APAC-SILICIDE 2010, 25-AM-VI-1, 7/25, Tsukuba (July 24-26, 2010)
- ② M. Miyao, T. Sadoh, and K. Hamaya,  
“(基調講演) Novel Growth-techniques of SiGe-based Hetero-structures for Post-scaling Devices”,  
ICS17 2011, 8/29, Leuven, Belgium (Aug. 28-Sep. 1, 2011)
- ③ M. Miyao, M. Kurosawa, K. Toko, Y. Tojo, and T. Sadoh,  
“(招待講演) Hybrid-Formation of Ge-on-Insulator Structures on Si Platform by SiGe-Mixing-Triggered Rapid-Melting Growth --- A Road to Artificial Crystal ---”,  
PRIME 2012, ECS Pacific RIM Meeting 2012, E6-2635, 10/9, Hawaii, U. S. A. (October 7-12, 2012)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

[その他]  
ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

宮尾 正信 (MIYAO MASANOBU)  
九州大学・大学院システム情報科学研究  
院・特任教授  
研究者番号：60315132

### (2) 研究分担者

佐道 泰造 (SADOH TAIZOH)  
九州大学・大学院システム情報科学研究  
院・准教授  
研究者番号：20274491