

平成22年 3月31日現在

研究種目：特定領域研究

研究期間：2006～2009

課題番号：18063018

研究課題名（和文）強磁性シリサイドの形成とソース/ドレインエンジニアリング

研究課題名（英文）Growth of Ferromagnetic Silicide for Source/Drain Engineering

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所・教授

研究者番号：60315132

研究成果の概要（和文）：

Si-LSI のスケーリング限界を打破する為、シリコンゲルマニウム(SiGe)チャネル技術にスピン機能を融合したスピントランジスタ(スピン MOSFET)の実現を目指して研究を行った。強磁性シリサイド( $\text{Fe}_3\text{Si}$ )をソース・ドレインとしたスピントランジスタを創出する為、低温分子線成長法を高度化して SiGe 上への  $\text{Fe}_3\text{Si}$  薄膜の原子層制御エピタキシャル成長技術を確立すると共に、 $\text{Fe}_3\text{Si}/\text{Si}$  界面のショットキー障壁を制御して Si へのスピン注入/検出を実証した。LSI へのスピン機能の融合を可能とする重要な成果である。

研究成果の概要（英文）：

The spin-based electronic (spintronic) technologies are promising to break through the scaling limits of the CMOS. In particular, group-IV semiconductor spintronics, compatible with the conventional Si-LSI, is desired. In line with this, we have investigated high-quality formation of the ferromagnetic silicide ( $\text{Fe}_3\text{Si}$ ) on SiGe to realize source-drain (S/D) engineering of spin-transistors. Consequently, we have developed a technique for the atomically-controlled epitaxial growth of  $\text{Fe}_3\text{Si}$  on SiGe and demonstrated the electrical spin injection and detection in Si.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	11,900,000	0	11,900,000
2007年度	11,900,000	0	11,900,000
2008年度	14,900,000	0	14,900,000
2009年度	14,900,000	0	14,900,000
年度			
総計	53,600,000	0	53,600,000

研究分野：半導体工学

科研費の分科・細目：応用物理・工学基礎、応用物性・結晶工学

キーワード：電子デバイス・機器、集積回路、スピントロニクス、シリコンゲルマニウム

## 1. 研究開始当初の背景

CMOS(相補型)トランジスタの微細化(スケーリング)で高性能化(低消費電力/高速動

作)を推進してきたシリコン集積回路(Si-LSI)は、スケーリング則の物理的限界に直面している。その結果、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。また、半導体トランジスタでは、電源を切ると情報を失う揮発特性が一般的であることから、電子機器の待機電力(全体の消費電力の約 20%)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低消費電力駆動、且つ不揮発性機能を有する超低消費電力トランジスタの創成が希求されている。

## 2. 研究の目的

LSI のスケール限界を打破する為、SiGe ヘテロ半導体を創製し、デバイス性能を向上する研究が国内外で行われている。このような SiGe ヘテロ半導体に、「スピンの機能」をも導入する事が出来れば、デバイス性能は飛躍的に向上し、21 世紀のユビキタス情報通信に対応した未来型 LSI の創製が可能となる。我々はそのブレークスルーを強磁性シリサイド( $\text{Fe}_3\text{Si}$ )をソース(S)/ドレイン(D)としたスピントランジスタの実現に求めている。本研究では、 $\text{Fe}_3\text{Si}/\text{SiGe}$  ヘテロ界面を原子層レベルで制御する手法を確立すると共に、その界面特性を適正化してスピン機能を実証することを目的に検討を行った。

## 3. 研究の方法

本研究では、分子線成長法を用いて強磁性体シリサイド/SiGe の成長を行った。成長条件(堆積速度、組成比、成長温度)を精密制御すると共に、電子顕微鏡法、ラザフォード後方散乱法、試料振動式磁気特性評価法を用いて成長層を評価し、評価結果をフィードバックして成長条件を適正化した。

さらに、強磁性体シリサイド/SiGe 界面のショットキー障壁を制御してスピン注入効率を向上し、半導体へのスピン注入を検証した。

## 4. 研究成果

族半導体をチャネルとしたスピントランジスタの創出を目指し、強磁性体シリサイド/SiGe 高品位形成とスピン機能の実証を行った。主な成果は以下の通りである。

### (1) $\text{DO}_3$ 型 $\text{Fe}_3\text{Si}/\text{SiGe}$ 積層構造の原子層制御成長

$\text{Fe}_3\text{Si}/\text{SiGe}$  界面構造と成長条件に関するデータを定量的に解析すると共に、それらの結果を基に、 $\text{Fe}_3\text{Si}/\text{SiGe}$  ヘテロ界面を原子層レベルで平坦化する手法を探索した。 $\text{Fe}_3\text{Si}/\text{SiGe}$  ヘテロ界面の格子不整合率は SiGe 基板の Ge 濃度の増加につれ減少する。

従って、高 Ge 濃度の SiGe 基板を用いる事により、格子不整合の小さなヘテロ界面の形成が可能となる。しかし、Ge-Ge 結合の強度は Si-Si 及び Si-Ge 結合よりも弱い為、高 Ge 濃度基板上では、Si 基板上よりもヘテロ界面での原子混合が生じやすくなる。そこで、 $\text{Fe}_3\text{Si}$  の成長レートを低速化して供給原子の表面移動を促進させる事により  $\text{Fe}_3\text{Si}$  層の成長温度を低温化し、界面の原子混合の抑制を検討した。更に、 $\text{Fe}_3\text{Si}$  層の組成比を精密に制御することにより、 $\text{Fe}_3\text{Si}$  層の格子定数を SiGe 基板に完全整合させる手法を検討した。以上により、原子層レベルで平坦な  $\text{Fe}_3\text{Si}/\text{SiGe}$  ヘテロ界面が実現できた。更に、ポストアニール法を検討し、 $\text{Fe}_3\text{Si}/\text{SiGe}$  界面を原子層レベルで平坦に保持しつつ、 $\text{Fe}_3\text{Si}$  の規則相化( $\text{DO}_3$  相化)を促進する手法を確立した。

### (2) $\text{Fe}_3\text{Si}/\text{SiGe}$ 積層構造の磁気特性の解明と制御

強磁性シリサイド/SiGe 構造のマクロな磁気特性及び微細電極形状に加工したシリサイド薄膜のミクロな磁気特性の評価を行った。その結果、強磁性シリサイド/SiGe 構造には、結晶構造の対称性では説明できない一軸異方性が発現する事が判明した。これは、成長初期における強磁性シリサイド/SiGe 界面層の原子配列の異方性や結晶薄膜に導入された一軸歪みに起因する可能性があるが、その詳細については今後の解明が必要である。また、微細加工したシリサイド薄膜の磁気特性を形状因子(幅、長さ)の関数として系統的に解析し、形状磁気異方性の発現を明らかにすると共に、磁化方向が制御されたスピン注入電極を実現する為の設計指針を明らかにした。

### (3) ハーフメタル合金( $\text{L}_{21}$ 型 $\text{Fe}_{3-x}\text{Mn}_x\text{Si}$ )の探索研究

より高いスピン偏極率を求め、ハーフメタル合金強磁性シリサイド( $\text{L}_{21}$  型  $\text{Fe}_{3-x}\text{Mn}_x\text{Si}$ )の探索を行い、成長界面における供給原子の表面移動と原子混合を制御する事により、高品質エピタキシャル成長を Ge 基板上に実現した。

### (4) 高品質 $\text{Fe}_3\text{Si}/\text{Si}$ 界面を利用したシリコンへのスピン注入とその電気的検出

原子層レベルで制御された急峻な界面を有する  $\text{Fe}_3\text{Si}/\text{Si}$  構造を用い、スピン注入電極とスピン検出電極が空間的に分離された非局所電圧測定デバイスを作製した。反転磁界の異なる注入電極と検出電極の磁化配置に依存した非局所電圧信号の観測に成功し、ショットキー障壁を介した Si 中へのスピン注入を実証した。Si 系スピントランジスタの実

現を加速する成果である。

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 29 件 )

- (1) Molecular beam epitaxial growth of ferromagnetic Heusler alloys for group-IV semiconductor spintronic devices: M. Miyao, K. Hamaya, T. Sadoh, H. Itoh, Y. Maeda (Thin Solid Films 518, pp.S273-277 (2010))(査読有)
- (2) Epitaxial growth of a full-Heusler alloy Co<sub>2</sub>FeSi on silicon by low-temperature molecular beam epitaxy: S. Yamada, K. Yamamoto, K. Ueda, Y. Ando, K. Hamaya, T. Sadoh, M. Miyao (Thin Solid Films 518, pp.S278-280 (2010)) (査読有)
- (3) Significant growth-temperature dependence of ferromagnetic properties for Co<sub>2</sub>FeSi/Si (111) prepared by low-temperature molecular beam epitaxy: S. Yamada, K. Hamaya, K. Yamamoto, T. Murakami, K. Mibu, and M. Miyao (Appl. Phys. Lett., Vol.96, No.082511 pp1-3 (2010)) (査読有)
- (4) Highly ordered Co<sub>2</sub>FeSi Heusler alloys grown on Ge(111) by low-temperature molecular beam epitaxy: K. Kasahara, K. Yamamoto, S. Yamada, T. Murakami, K. Hamaya, K. Mibu, and M. Miyao (Journal of Applied Physics Vol.107, No.9, pp.B105-1-3 (2010)) (査読有)
- (5) Effect of atomically controlled interfaces on Fermi-level pinning at metal/Ge interfaces: K. Yamane, K. Hamaya, Y. Ando, Y. Enomoto, K. Yamamoto, T. Sadoh, and M. Miyao (Applied Physics Letters Vol.96, No. 16, pp.2104-1-3 (2010)) (査読有)
- (6) Electrical Detection of Spin Transport in Si Using High-quality Fe<sub>3</sub>Si/Si Schottky Tunnel Contacts : Y. Ando, K. Kasahara, Y. Enomoto, T. Murakami, K. Hamaya, T. Kimura, K. Sawano, and M. Miyao ( J. Magn. Soc. Jpn. Vol.34, No.3, pp316-322 (2010)) (査読有)
- (7) Magnetic properties of epitaxially grown Fe<sub>3</sub>Si/Ge(111) layers with atomically flat heterointerfaces : Y. Ando, K. Hamaya, K. Kasahara, K. Ueda, Y. Nozaki, T. Sadoh, Y. Maeda, K. Matsuyama, and M. Miyao (Journal of Applied Physics Vol.105, No.7, pp.07B102-1-3 (2009)) (査読有)
- (8) Ferromagnetism and Electronic Structures of Nonstoichiometric Heusler-Alloy Fe<sub>3-x</sub>MnxSi Epilayers Grown on Ge(111) : K. Hamaya, H. Itoh, O. Nakatsuka, K. Ueda, K. Yamamoto, M. Itakura, T. Taniyama, T. Ono, and M. Miyao (Phys. Rev. Letters Vol.102, No.13, pp137204-1-4, (2009)) (査読有)
- (9) Electrical injection and detection of spin-polarized electrons in silicon through an Fe<sub>3</sub>Si/Si Schottky tunnel barrier : Y. Ando, K. Hamaya, K. Kasahara, Y. Kishi, K. Ueda, K. Sawano, T. Sadoh, and M. Miyao (Applied Physics Letters Vol.94, No.18, pp182105-1-3 (2009)) (査読有)
- (10) Low Temperature Hetero-Epitaxy of Ferromagnetic Silicide on Ge Substrates for Spin-Transistor Application : Y. Ando, K. Ueda, M. Kumano, T. Sadoh, K. Narumi, Y. Maeda, and M. Miyao (IEICE Transaction on Electronics, Vol.E91-C, No.5, pp708-711 (2008)) (査読有)
- (11) Low Temperature Formation of Multi-Layered Structures of Ferromagnetic Silicide Fe<sub>3</sub>Si and Ge : K. Ueda, Y. Ando, M. Kumano, T. Sadoh, Y. Maeda and M. Miyao (Applied Surface Science Vol.254, No.19, pp6215-6217 (2008)) (査読有)
- (12) Low-Temperature Molecular Beam Epitaxy of a Ferromagnetic Full-Heusler Alloy Fe<sub>2</sub>MnSi on Ge(111) : K. Ueda, K. Hamaya, K. Yamamoto, Y. Ando, T. Sadoh, Y. Maeda, and M. Miyao (Appl. Phys. Lett. Vol.93, No.11, 112108, pp1-3 (2008)) (査読有)
- (13) Epitaxial Ferromagnetic Fe<sub>3</sub>Si/Si(111) Structures with High-Quality Heterointerfaces: K. Hamaya, K. Ueda, Y. Kishi, Y. Ando, T. Sadoh, and M. Miyao (Appl. Phys. Lett. Vol.93, No.13, 132117, pp1-3 (2008)) (査読有)
- (14) Low Temperature Epitaxial Growth of Full Heusler Alloy Fe<sub>2</sub>MnSi on Ge(111) Substrates for Spintronics Application : K. Ueda, Y. Ando, K. Yamamoto, M. Kumano, K. Hamaya, T. Sadoh, K. Narumi, Y. Maeda, and M. Miyao (ECS Transactions, Vol.16 No.10, pp273-276 (2008)) (査読有)
- (15) Characterization of Fe<sub>3</sub>Si/Si Schottky Contact for Future Spin-Transistor : Y. Kishi, M. Kumano, K. Ueda, T. Sadoh, and M. Miyao (ECS Transactions,

- Vol.16 No.10, pp277-280 (2008)) (査読有)
- (16) Atomically controlled hetero-epitaxy of Fe<sub>3</sub>Si/SiGe for spintronics application : M. Miyao, K. Ueda, Y. Ando, M. Kumano, T. Sadoh, K. Narumi, Y. Maeda (Thin Solid Films Vol.517, No.1, pp181-183 (2008)) (査読有)
- (17) Low temperature epitaxial growth of Fe<sub>3</sub>Si on Si(111) substrate through ultra-thin SiO<sub>2</sub> films : K. Ueda, M. Kumano, T. Sadoh, M. Miyao (Thin Solid Films Vol.517, No.1, pp425-427 (2008)) (査読有)
- (18) Temperature dependent epitaxial growth of ferromagnetic silicide Fe<sub>3</sub>Si on Ge substrate : K. Ueda, T. Sadoh, Y. Ando, T. Jonishi, K. Narumi, Y. Maeda, M. Miyao (Thin Solid Films Vol.517, No.1, pp422-424 (2008)) (査読有)
- (19) Influence of Substrate Orientation on Low-Temperature Epitaxial Growth of Ferromagnetic Silicide Fe<sub>3</sub>Si on Si : K. Ueda, R. Kizuka, H. Takeuchi, A. Kenjo, T. Sadoh, and M. Miyao (Thin Solid Films Vol.515, No.22, pp.8250-8253 (2007)) (査読有)
- (20) Low-Temperature Epitaxial Growth of [Fe<sub>3</sub>Si/SiGe]<sub>n</sub> (n=1-2) Multi-Layered Structures for Spintronics Application : T. Sadoh, K. Ueda, Y. Ando, M. Kumano, K. Narumi, Y. Maeda, and M. Miyao (ECS Transactions, Vol.11, No.6, pp473-480 (2007)) (査読有)
- (21) Effect of Fe/Si Ratio on Epitaxial Growth of Fe<sub>3</sub>Si on Ge Substrate : M. Kumano, Y. Ando, K. Ueda, T. Sadoh, K. Narumi, Y. Maeda, M. Miyao, (ECS Transactions, Vol.11, No.6, pp481-486 (2007)) (査読有)
- (22) Formation of Fe<sub>3</sub>Si/Ge/Fe<sub>3</sub>Si Multi-Layer by Double Heteroepitaxy on High Quality Fe<sub>3</sub>Si/Ge Substrate for Spintronics Application : K. Ueda, Y. Ando, M. Kumano, T. Sadoh, Y. Maeda and M. Miyao, (ECS Transactions, Vol.11, No.6, pp487-492 (2007)) (査読有)
- (23) Axial orientation of molecular-beam-epitaxy-grown Fe<sub>3</sub>Si/Ge hybrid structures and its degradation : Y. Maeda, T. Jonishi, K. Narumi, Y. Ando, K. Ueda, M. Kumano, T. Sadoh, and M. Miyao ( Appl. Phys. Lett. Vol.91, No.17, pp.171910 -1-2 (2007)) (査読有)
- (24) Low Temperature Hetero-Epitaxy of Ferromagnetic Silicide on Ge Substrates for Spin-Transistor Application : Y. Ando, K. Ueda, M. Kumano, T. Sadoh, K. Narumi, Y. Maeda, and M. Miyao ( 電子情報通信学会 信学技報 ED2007-101, pp.221-224 (2007) )
- (25) Fe<sub>3</sub>Si/Ge(111)ヘテロエピタキシャル成長の軸配向性の評価:平岩佑介, 安藤裕一郎, 熊野 守, 上田公二, 佐道泰造, 宮尾正信, 鳴海一雅, 前田佳均 ( 電子情報通信学会 信学技報 SDM2007-230, pp.35-38 (2007) ) (査読無)
- (26) 強磁性体シリサイド/半導体積層構造の低温エピタキシャル成長 - Si 系スピントロノクスの創出を目指して - : 佐道泰造, 熊野 守, 安藤裕一郎, 上田公二, 権丈 淳, 宮尾正信 (九州大学中央分析センター報告 第 25 号, pp.7-11 (2007)) (査読無)
- (27) Atomically controlled molecular beam epitaxy of ferromagnetic silicide Fe<sub>3</sub>Si on Ge : T. Sadoh, M. Kumano, R. Kizuka, K. Ueda, A. Kenjo, and M. Miyao (Appl. Phys. Lett. Vol.89, No.18, 182511, pp1-3 (2006)) (査読有)
- (28) スピントロニクス用強磁性シリサイド (Fe<sub>3</sub>Si)/SiGe の低温形成 : 佐道泰造, 上田公二, 熊野 守, 宮尾正信 (電気材料研究会資料 EFM-06-17, pp.11-14(2006) ) (査読無)
- (29) 半導体ヘテロ成長技術の進展と未来型デバイスの夢 : 宮尾正信 (九州大学中央分析センター報告第 24 号, pp.11-16 (2006)) (査読無)
- [学会発表](計 105 件)
- (1) (招待講演) スピン注入を目指した強磁性ホイスラー合金 / SiGe ヘテロ構造の高品質形成 : 浜屋宏平 (第 14 回半導体スピン工学の基礎と応用 PASPS-14, 東京, 2009 年 12 月 21 日~22 日)
- (2) (招待講演) ソース/ドレインの強磁性シリサイド化とスピン注入: Si 系スピントランジスタの実現を目指して : 宮尾正信, 浜屋宏平, 木村 崇, 伊藤博介, 澤野憲太郎 (第 70 回応用物理学学会学術講演会, 富山, 2009 年 9 月 8-11 日)
- (3) (招待講演) Atomically Controlled Epitaxial Growth of Ferromagnetic Heusler Alloys for SiGe Based Spintronics : M. Miyao, K. Hamaya, K. Kasahara, S. Yamada and K. Sawano (SiNEP-09, Spain, (Sep. 20-23, 2009))
- (4) (招待講演) Molecular Beam Epitaxial Growth of Ferromagnetic Heusler Alloys for Group-IV Semiconductor Spintronic Devices : M. Miyao,

- K.Hamaya, T.Sadoh, H.Itoh and Y.Maeda (ICSI-6, 648513, Los Angeles, USA, (May 17 - 22, 2009))
- (5) (招待講演) 強磁性ホイスラー合金の原子層制御エピタキシャル成長と SiGe スピントロニクス: 宮尾正信, 浜屋宏平, 上田公二, 安藤裕一郎, 佐道泰造, 能崎幸雄, 松山公秀, 伊藤博介, 前田佳均 (第 69 回応用物理学会学術講演会, 3p-E-4, 愛知, 2008 年 9 月 2-5 日)
- (6) (招待講演) Atomically Controlled Epitaxial Growth of Ferromagnetic Heusler Alloys for Group-IV-Semiconductor Spintronic Applications: M. Miyao, K. Hamaya, T. Sadoh, K. Ueda, Y. Ando, Y. Nozaki, K. Matsuyama, H. Itoh, and Y. Maeda (IUMRS-ICA 2008, ZI-4, Nagoya, Japan (Dec. 9-13, 2008))
- (7) (招待講演) Atomically Controlled Epitaxy of Ferromagnetic Silicide on SiGe for SiGe-Channel Schottky Source/Drain Spin Transistor: T. Sadoh, K. Ueda, Y. Ando, Y. Kishi, K. Hamaya, Y. Maeda, and M. Miyao (NSC-JST Nano Device Workshop, Sn. 2-1, 2008, Taipei, Taiwan (Jul.30-31, 2008))
- (8) (招待講演) Advanced Silicon Based Heterostructure Technologies for Future Devices: M. Miyao (The 21st Century COE, Osaka, Japan, (Oct. 15-17, 2007))
- (9) (招待講演) Atomically Controlled Hetero-Epitaxy of Fe<sub>3</sub>Si/SiGe for Spintronics Application: M. Miyao, K. Ueda, M. Kumano, T. Sadoh, K. Narumi, Y. Andoh, and Y. Maeda (ICSI-5, 5th International Conference on Silicon Epitaxy and Heterostructures, S7-127, Marseille France, (May 20 - 24, 2007))
- (10) (招待講演) Recent Progress in Low-Temperature Epitaxy of Silicon Based Heterostructures for Novel Devices: M. Miyao, H. Kanno, K. Ueda and T. Sadoh (2007 MRS Spring Meeting, F8-3, San Francisco, CA, USA, (Apr.9-13, 2007))

## 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・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

浜屋 宏平 (HAMAYA KOHEI)  
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: 90401281

### (3) 連携研究者

なし。