

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. 研究計画の概要

Si 集積回路(Si-ULSI)が直面しているスケールリング限界の打破を目指して、SiGe ヘテロ半導体を ULSI に活用する研究が盛んに行われている。この様なヘテロ半導体に、「スピン機能」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 ULSI の創製が可能となる。我々はそのブレークスルーを、スピン偏極型強磁性シリサイドをソース(S)/ドレイン(D)としたスピントランジスタに求め、研究を行っている。

### 2. 研究の進捗状況

現在までに、(1)DO<sub>3</sub>型 Fe<sub>3</sub>Si/SiGe 積層構造の原子層制御成長を実現すると共に、(2)磁気特性の解明と制御を推進している。更に、(3)より高いスピン偏極率を求め、ハーフメタル合金(L2<sub>1</sub> 型 Fe<sub>3-x</sub>Mn<sub>x</sub>Si)の探索研究も行っている。

#### (1) DO<sub>3</sub>型 Fe<sub>3</sub>Si/SiGe 積層構造の原子層制御成長

Fe<sub>3</sub>Si/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、Fe<sub>3</sub>Si/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。Fe<sub>3</sub>Si/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、Fe<sub>3</sub>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 Fe<sub>3</sub>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、Fe<sub>3</sub>Si 層の組成比を精密に制御することにより、Fe<sub>3</sub>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 Fe<sub>3</sub>Si/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、Fe<sub>3</sub>Si/SiGe 界面を原子層レベルで平坦に保持しつつ、Fe<sub>3</sub>Si の規則相化(DO<sub>3</sub> 相化)を促進する手法を確立した。

#### (2) Fe<sub>3</sub>Si/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(L2<sub>1</sub> 型 Fe<sub>3-x</sub>Mn<sub>x</sub>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(L2<sub>1</sub>型 Fe<sub>3-x</sub>Mn<sub>x</sub>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。

### 3. 現在までの達成度

①当初の計画以上に進展している。

(理由)

領域内の複数の研究グループと連携研究を行っており、研究の推進に役立っている。

### 4. 今後の研究の推進方策

当初の計画通り、他グループとの連携研究を有効に進めつつ、強磁性シリサイド/SiGeヘテロ半導体構造のスピン機能の実証に向け、研究を推進する。

### 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 20 件)

- [1] K. Hamaya, H. Itoh, O. Nakatsuka, K. Ueda, K. Yamamoto, M. Itakura, T. Taniyama, T. Ono, and M. Miyao, “Ferromagnetism and Electronic Structures of Nonstoichiometric Heusler-Alloy Fe<sub>3-x</sub>Mn<sub>x</sub>Si Epilayers Grown on Ge(111),” Phys. Rev. Lett. Vol.102, No.13, pp.13204-1-3, 2009.(査読有)
- [2] K. Ueda, K. Hamaya, K. Yamamoto, Y. Ando, T. Sadoh, Y. Maeda, and M. Miyao, “Low-Temperature Molecular Beam Epitaxy of a Ferromagnetic Full-Heusler Alloy Fe<sub>2</sub>MnSi on Ge(111),” Appl. Phys. Lett. Vol.93, No.11, pp.112108-1-3, 2008. (査読有)
- [3] K. Hamaya, K. Ueda, Y. Kishi, Y. Ando, T. Sadoh, and M. Miyao, “Epitaxial Ferromagnetic Fe<sub>3</sub>Si/Si(111) Structures with High-Quality Heterointerfaces,” Appl. Phys. Lett. Vol.93, No.13, pp.132117-1-3, 2008.(査読有)
- [4] M. Miyao, K. Ueda, Y. Ando, M. Kumano, T. Sadoh, K. Narumi, Y. Maeda, “Atomically controlled hetero-epitaxy of Fe<sub>3</sub>Si/SiGe for spintronics application,” Thin Solid Films Vol.517, No.1, pp.181-183, 2008.(査読有)
- [5] K. Ueda, T. Sadoh, Y. Ando, T. Jonishi,

K. Narumi, Y. Maeda, M. Miyao, “Temperature dependent epitaxial growth of ferromagnetic silicide Fe<sub>3</sub>Si on Ge substrate,” Thin Solid Films Vol.517, No.1, pp.422-424, 2008.(査読有)

[学会発表] (計 72 件)

- [1] M. Miyao, K. Hamaya, T. Sadoh, K. Ueda, Y. Ando, Y. Nozaki, K. Matsuyama, H. Itoh, and Y. Maeda, “Atomically Controlled Epitaxial Growth of Ferromagnetic Heusler Alloys for Group-IV-Semiconductor Spintronic Applications (invited),” IUMRS-ICA, ZI-4, Dec.9-13, 2008, Nagoya, Japan.
- [2] M. Miyao, H. Kanno, K. Ueda and T. Sadoh, “Recent Progress in Low-Temperature Epitaxy of Silicon Based Heterostructures for Novel Devices (invited),” 2007 MRS Spring Meeting, F8-3, Apr.9-13, 2007, San Francisco, USA.
- [3] M. Miyao, K. Ueda, M. Kumano, T. Sadoh, K. Narumi, Y. Ando, and Y. Maeda, “Atomically Controlled Hetero-Epitaxy of Fe<sub>3</sub>Si/SiGe for Spintronics Application (invited),” ICSI-5, 5th International Conference on Silicon Epitaxy and Heterostructures, S7-I27, May 20-24, 2007, Marseille, France.
- [4] Y. Ando, T. Jonishi, K. Narumi, K. Ueda, T. Sadoh, M. Miyao, and Y. Maeda, “RBS study of epitaxial growth of ferromagnetic Fe<sub>3</sub>Si on Ge (invited),” European MRS 2007 Spring Meeting, B-13-1, May 28 - Jun. 1, 2007, Strasburg, France.
- [5] M. Miyao, “Advanced Silicon Based Heterostructure Technologies for Future Devices (invited),” The 21st Century COE, Oct. 15-17, 2007, Osaka, Japan.

[その他]

- [1] 第 68 回応用物理学会学術講演会(於 北海道工大) 講演奨励賞受賞: 安藤裕一郎, 5p-Q-2, 「Fe<sub>3</sub>SiGe ヘテロエピタキシャル成長層の軸配向性の成長温度依存性の考察」
- [2] 第 54 回応用物理学関係連合講演会(於 青山学院大学) 講演奨励賞受賞: 上田公二, 29a-P6-4, 「Fe<sub>3</sub>Si/SiGe ヘテロエピタキシャル成長に与える基板効果」