

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5月14日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究（A）

研究期間：2010～2012

課題番号：22686003

研究課題名（和文）強磁性合金上へのシリコンゲルマニウム単結晶成長と縦型スピンスピン素子への応用

研究課題名（英文）Epitaxial growth of SiGe films on ferromagnetic alloys and its application to vertical spin devices

研究代表者

浜屋 宏平（HAMAYA KOHEI）

九州大学・大学院システム情報科学研究所・准教授

研究者番号：90401281

研究成果の概要（和文）：

強磁性ホイスラー合金 $\text{Fe}_3\text{Si}(111)$ 面と IV 族半導体 $\text{Ge}(111)$ 面の原子マッチングが極めて良好であることに着目し、低温 MBE 法を利用して、界面異種反応の究極的低減を実現することで、Ge 薄膜を Fe_3Si 上にエピタキシャル成長する革新的技術を開発した。これにより、 $\text{Fe}_3\text{Si}/\text{Ge}/\text{Fe}_3\text{Si}$ からなる全単結晶縦型スピンスピン伝導素子を実現する基盤技術が構築され、『極短チャンネル化』や『3 次元高集積化』を期待させる縦型半導体スピンドバイス実現の可能性が示された。

研究成果の概要（英文）：

For vertical-metallic source/drain spin transistors, we focused on the high-quality fabrication of semiconductor channels on a ferromagnetic metal. Using molecular beam epitaxy and atomic arrangements between Fe_3Si and Ge at the (111) plane, we have developed Si atomic termination method for the Fe_3Si surface. As a result, we demonstrated epitaxial growth of high-quality Ge films on Fe_3Si . This study will open a new way for vertical-type Ge-channel transistors with metallic source/drain contacts.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	14,900,000	4,470,000	19,370,000
2011年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
2012年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
総計	19,900,000	5,970,000	25,870,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎 / 応用物性・結晶工学

キーワード：エピタキシャル成長, ポスト CMOS, スピントランジスタ

1. 研究開始当初の背景

シリコン(Si)LSI 技術は、今まさにスケールアップ則 (ムーアの法則: 微細化=素子性能の向上) の物理的な限界に直面しつつあり、集

積化や高速動作化に伴う消費電力の増大は、デジタル家電や携帯端末等の電子機器の最大の課題となっている。また、半導体素子にとって致命的な欠点は、電源を切ると情報を失

うという揮発性であり、素子を使用しない場合でも電源をオンしておく必要があるため、電子機器の待機電力の増大が避けられない(全体の消費電力の約20%)。このような背景から、CMOS 技術に変わって高度情報化社会における中心を担う新しい超低消費電力(不揮発性・高性能)電子デバイス(Beyond CMOS 技術)の実現が望まれている。現在提案されている横型構造を基本とする半導体スピントランジスタでは、極低消費電力化を狙った極短チャネル化や MTJ のような縦型構造からなる多くの金属スピントロニクス素子との効率的な融合、および3次元高集積化など、構造面で克服すべき課題も山積している。

2. 研究の目的

本研究では、スピントランジスタの基本構造として「強磁性体/半導体/強磁性体」からなる全単結晶縦型構造を研究開発するためのシリコン・ゲルマニウム(SiGe)結晶成長法を開発する。具体的には、これまで誰も実現していない強磁性合金上への高品質半導体エピタキシャル成長技術を独自に開発する。これにより、横型スピントランジスタ構造では技術的に困難な『極短チャネル化』や『3次元高集積化』を可能とする超低消費電力(不揮発性・高性能)電子デバイス(Beyond CMOS)への可能性を拓く。

3. 研究の方法

本研究では、半導体 SiGe を結晶成長するための分子線エピタキシー(MBE)装置を購入し、高品質な半導体薄膜を形成できるような特別な環境を整備した。また、現有の MBE 装置で作製可能な強磁性金属の結晶構造に関して、詳細な構造解析を行い、Ge 薄膜を作製する直前の金属薄膜表面状態を明確にした。その結果、本研究では次のことに注目することが重要であるという結論に至った。

我々が注目する強磁性合金 Fe_3Si という材料は、理想的な D0_3 構造を形成することができれば、(111)結晶面で Fe 面と Si 面の積層構造である[図 1(a)]。しかし実際は、若干の不規則構造を含んでいることが判明してきており、Ge を成長させるための最表面は、Fe と Si の混在面であることが明らかになってきた[図 1(b)]。そこで本研究では、Ge を成長させるための Fe_3Si 最表面に、Fe または Si を 1~2 原子層形成する「原子層終端技術」を

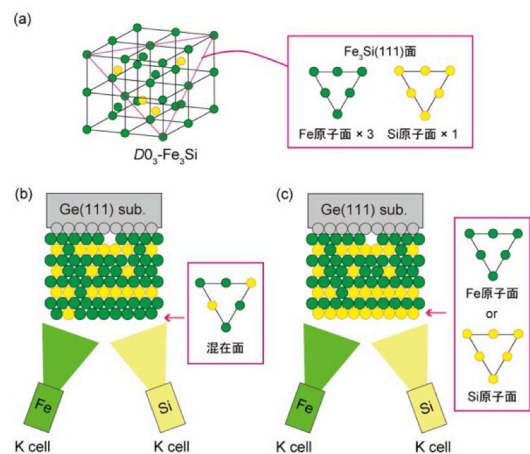


図 1. (a) 強磁性合金 Fe_3Si の結晶構造と (111) 結晶面の原子配列. (b) MBE 成長後の $\text{Fe}_3\text{Si}(111)$ 薄膜の模式図. (c) 原子層終端技術の模式図. $\text{Fe}_3\text{Si}(111)$ 表面を Fe 面または Si 面で 1~2 原子層だけ完全に終端する。

開発した。

4. 研究成果

終端技術を用いる前に、Ge の成長初期における Fe_3Si の表面平坦性の悪化を抑制するための傾斜温度成長技術を検討した。傾斜温度成長技術とは、基板温度 200°C 程度から結晶成長を開始し、成長の進行に伴って基板温度を徐々に上げていく手法である。これにより、成長初期における Fe_3Si の表面平坦性の悪化を抑制しつつ、且つ結晶成長の進行に伴って基板温度が上昇するため、Ge の結晶化促進が見込めること判った。

次に、図 1(c)に示した原子層終端技術を検討した。Fe-K セルと Si-K セルのシャッターの両方を開け、Ge(111)基板表面に Fe と Si を化学量論組成比(Fe:Si=3:1)で同時蒸着し、Fe₃Si 薄膜を成長した後、Fe-K セルのシャッターを先に閉じ、蒸着時間換算で Si を 1~2 原子層蒸着した後、Si-K セルのシャッターを閉じると、Si 面終端された Fe₃Si 薄膜の表面が形成される[図 1(c)]。Fe₃Si 表面に Si を 1 原子層蒸着した試料表面の RHEED パターンは、明瞭なストリークパターンであり、試料表面に終端処理を施す前とほとんど変化はない。ここで、Fe₃Si 表面に蒸着する Si 原子層が 1.5 nm 以上になると、RHEED パターンのピーク強度が弱くなっていくことを確認している。これは、Fe₃Si 薄膜成長時の基板温度(130 °C)では、Si が全く結晶化しないため、Fe₃Si 表面上に非晶質 Si 層が形成されていくだけであるためと考えられる。つまり、Fe₃Si 表面に Si 原子層を蒸着する前とほとんど同等の RHEED パターンが得られている状態を Fe₃Si 表面の『Si 面終端』と定義し、以後の検討を行なった。

Si 面終端した Fe₃Si 上への Ge 薄膜成長条件は、基板温度 200 °C ~ 400 °C の傾斜温度条件を用いた。図 2(a)には、Si 面終端処理を施した Fe₃Si 上に成長した Ge 薄膜表面の RHEED パターンを示す。驚くべきことに、明瞭なストリークパターンが観察され、Ge 薄膜の二次元エピタキシャル成長を実現することに成功した。ちなみに、Si 原子層が 1.5 nm 以上で RHEED パターンのピーク強度が弱くなった Fe₃Si 薄膜上に、同条件で Ge 薄膜を蒸着しても、ストリークパターンは得られなかった。つまり、図 2(a)に示すように、Fe₃Si 最表面のみを(数原子だけ)Si 原子面で終端することが、極めて有効である。

同様に、Fe 面終端した Fe₃Si 上への Ge 薄

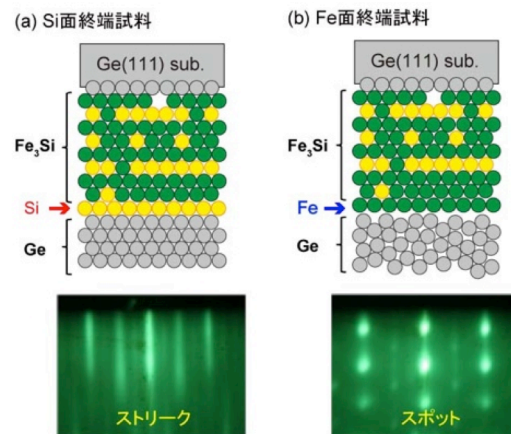


図 2. 強磁性合金 Fe₃Si 上への Ge 薄膜成長時に観測した RHEED パターン(下)とその模式図(上)。(a)Si 面終端の結果と(b)Fe 面終端の結果. 表面原子の違いで、Ge 薄膜のエピタキシャル成長への効果は大きく異なる。

膜成長を行った。上記の Si 面終端と同様の手順で、Fe₃Si 表面に Fe 原子を 1 原子層蒸着して Fe 単一原子面を創り出した後も明瞭なストリークパターンが観察されることから、Fe 面終端を施してもその試料表面は平坦であることを確認した。この試料を Fe 面終端試料とし、この上に Si 面終端試料と同条件で Ge 薄膜を成長した。その結果、Si 面終端試料のそれとは大きく異なり、Ge 薄膜表面の RHEED パターン[図 2(b)]はスポットパターンであり、三次元島状成長となってしまったことが明らかになった。Fe₃Si 表面の Fe 原子面は Fe₃Si 上への Ge 薄膜の二次元成長を妨げ、単一原子層終端を施す前より悪化するという非常に興味深い事実を見出した。この結果は、Fe₃Si(111)の Si 単一原子面のみが、その上に Ge を二次元エピタキシャル成長させるのに極めて有効であることを示している。

良好な二次元エピタキシャル成長を実現した Si 面終端試料の断面 TEM 観察を行なった(図 3)。Si 面終端した Fe₃Si(111)上に高品質 Ge 薄膜が均一に形成されていることが判る。図 3(b)には Ge/Fe₃Si 界面付近の高分解能

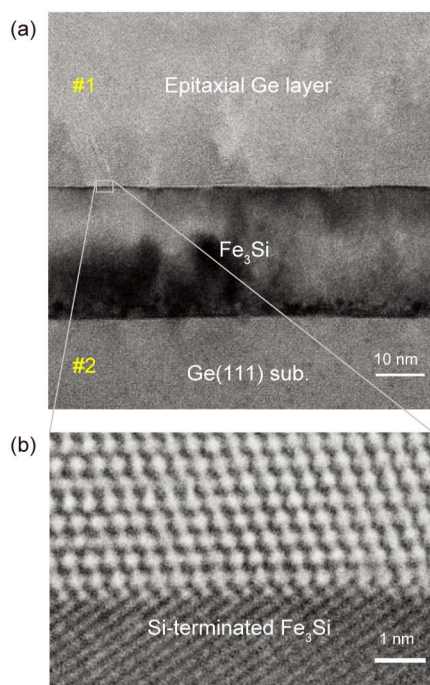


図 3. (a) エピタキシャル Ge 薄膜/強磁性合金 $\text{Fe}_3\text{Si}/\text{Ge}$ 基板からなる 3 層構造の断面 TEM 写真。
(b) $\text{Ge}/\text{Fe}_3\text{Si}$ 原子層エピタキシャル界面の様子。

断面 TEM 像を示す。驚くべきことに、金属上に Ge 薄膜を直接成長させているにもかかわらず、 $\text{Ge}/\text{Fe}_3\text{Si}(111)$ 界面は原子層レベルで平坦であり、その品質は下地である $\text{Fe}_3\text{Si}/\text{Ge}$ 接合界面に匹敵するほどである。また、Ge 薄膜のナノビーム ED パターン[point #1]は、基板である単結晶 Ge [point #2]とほぼ同等であることが判った。まさに、原子層制御 MBE 技術を駆使し、金属上への半導体 Ge の高品質単結晶成長に世界で初めて成功した結果である。既に、この $\text{Ge}(111)$ 上に既存技術で Fe_3Si 薄膜を高品質に形成することにも成功しており、縦型スピントランジスタの基本構造となる $\text{Fe}_3\text{Si}/\text{Ge}/\text{Fe}_3\text{Si}$ 構造の創成に成功したと言える。今後、この構造を利用した縦型スピントランジスタの実現を目指し、研究を進める予定である。

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 11 件)

- ①. M. Kawano, S. Yamada, K. Tanikawa, K. Sawano, M. Miyao, and K. Hamaya, “An ultra thin buffer layer for Ge epitaxial growth on Si”, Applied Physics Letters, 査読有, vol. 102, 2013, 121908-1~3. [<http://dx.doi.org/10.1063/1.4798659>]
- ②. S. Yamada, J. Sagar, S. Honda, L. Lari, G. Takemoto, H. Itoh, A. Hirohata, K. Mibu, M. Miyao, K. Hamaya, “Room-temperature structural ordering of a Heusler-compound Fe_3Si ”, Physical Review B, 査読有, vol. 84, 2012, 174406-1~7. [DOI: [10.1103/PhysRevB.86.174406](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.86.174406)]
- ③. S. Yamada, K. Tanikawa, M. Miyao, and K. Hamaya, “Atomically controlled epitaxial growth of single-crystalline germanium films on a metallic silicide”, Crystal Growth & Design, 査読有, vol. 12, 2012, 4703–4707. [DOI: [10.1021/cg300791w](https://doi.org/10.1021/cg300791w)]
- ④. K. Kasahara, S. Yamada, K. Sawano, M. Miyao, and K. Hamaya, “Mechanism of Fermi Level Pinning at Metal/Germanium Interfaces”, Physical Review B, 査読有, vol. 84, 2011, 205301-1~5. [DOI: [10.1103/PhysRevB.84.205301](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.84.205301)]
- ⑤. K. Hamaya, T. Murakami, S. Yamada, K. Mibu, and M. Miyao, “Local structural ordering in low-temperature-grown epitaxial $\text{Fe}_{3+x}\text{Si}_{1-x}$ films on $\text{Ge}(111)$ ”, Physical Review B, 査読有, vol. 83, 2011, 144411-1~7. [DOI: [10.1103/PhysRevB.83.144411](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.83.144411)]

など

[学会発表] (計 12 件)

- ①. 河野 慎, 山田晋也, 谷川昂平, 宮尾正信, 浜屋宏平, “強磁性金属上への単結晶 Ge 薄膜の高品質成長”, 第 42 回結晶成長国内会議, NCCG-42, 11aD02, 11/11, 2012, 福岡.
- ②. K. Hamaya, S. Yamada, and M. Miyao, “SiGe spintronics with single-crystalline ferromagnetic Schottky-tunnel contacts”, Pacific Rim Meeting, Honolulu, Hawaii, Oct.7-12, 2012. **(invited)**.
- ③. S. Yamada, M. Kawano, K. Tanikawa, M. Miyao, and K. Hamaya, “Atomically controlled heteroepitaxy of a single-crystalline germanium film on a metallic silicide”, SSDM2012, C-5-3, 9/26, 2012, Kyoto, Japan.
- ④. 山田晋也, 谷川昂平, 宮尾正信, 浜屋宏平, “原子層制御分子線エピタキシーによる金属上への単結晶 Ge 薄膜の成長”, 第 73 回応用物理学会学術講演会, 9/13, 13p-J-8, 2012, 愛媛.
- ⑤. K. Kasahara, S. Yamada, M. Miyao and K. Hamaya, “Marked suppression of the Fermi-level pinning at atomically matched Fe₃Si/p-Ge(111) contacts”, 2011 International Conference on Solid State Devices and Materials, SSDM 2011, E5-3, 9/29, 2011, Nagoya, Japan.

など

[その他]

ホームページ等

http://nano.ed.kyushu-u.ac.jp/~hamaya_lab/index.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

浜屋 宏平 (HAMAYA KOHEI)

九州大学・大学院システム情報科学研究所

・准教授

研究者番号 : 90401281