

機関番号： 82718
 研究種目： 基盤研究(C)
 研究期間： 2008~2010
 課題番号： 20613015
 研究課題名(和文) 半絶縁性シリコン・カーバイド基板を用いた鉄シリサイド半導体の電気特性評価
 研究課題名(英文) Electrical Characteristics of β -FeSi₂ thin films on semi-insulating SiC substrates
 研究代表者
 秋山 賢輔 (AKIYAMA KENSUKE)
 神奈川県産業技術センター・電子技術部・主任研究員
 研究者番号： 70426360

研究成果の概要(和文)：

Si 基板上的 3C-SiC エピタキシャル薄膜上に、スパッタ法にて鉄シリサイド(β -FeSi₂)薄膜のエピタキシャル成長を実現した。(100)面及び(111)面いずれの 3C-SiC 上においても(100)配向した β -FeSi₂ 薄膜がエピタキシャル成長することが確認され、(100)3C-SiC 上には 2 回対象を有する β -FeSi₂ 薄膜が、(111)3C-SiC 上には 3 回対象を有する β -FeSi₂ 薄膜がそれぞれエピタキシャル成長した。

半絶縁性 4H-SiC 基板上に成長したエピタキシャル β -FeSi₂ 薄膜の電気伝導特性評価より、正孔が伝導キャリアとなる p 型であり、室温でのキャリア濃度は $1.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ であった。さらに、室温及び 30K でのキャリア移動度はそれぞれ 12 及び $140 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ であり既報の溶媒法にて作製された単結晶データを上回る高い結晶性が確認された。

研究成果の概要(英文)：

(100)-oriented β -FeSi₂ films were epitaxially grown on a SiC (3C-SiC)-buffered Si(100) and (111) substrate by co-sputtering iron and silicon. These epitaxial films had double-domain and triple-domain structure on (100)3C-SiC and (111)3C-SiC layer, respectively.

The Hall measurements revealed that the epitaxial β -FeSi₂ films on semi-insulating 4H-SiC showed p-type conductivity with the hall concentration of $1.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ at 295K. The Hall mobility was 12 and $140 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ at 295K and 30K, respectively, indicating the high crystal quality of the epitaxial β -FeSi₂ films.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|-----------|-----------|
| 2008年度 | 1,700,000 | 510,000 | 2,210,000 |
| 2009年度 | 900,000 | 270,000 | 1,170,000 |
| 2010年度 | 900,000 | 270,000 | 1,170,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,500,000 | 1,050,000 | 4,550,000 |

研究分野：時限

科研費の分科・細目：元素戦略

キーワード：鉄シリサイド、半導体

1. 研究開始当初の背景

鉄(Fe)とシリコン(Si)で構成される鉄シリサイド(β -FeSi₂)は、熱電素子材料として長い研究の歴史のあるシリサイド半導体であるが、良質な薄膜成長技術の飛躍的進展により半導体としての基礎物性の理解と発光素子や受光素子、太陽電池への応用など広範囲な研究がわが国を中心に進められている。また、資源と環境の観点から、 β -FeSi₂ 半導体は砒素(As)などの有毒元素を含まず(環境低負荷)、安全、かつ地殻に豊富(希少元素を含まない)な元素で構成されるいわゆる『環境にやさしい(光)半導体=エコ機能性材料』としてその価値が再認識され始めている。

本研究は、高純度で高品質な β -FeSi₂ 結晶が Si 上でのみ形成されているために(1)デバイス設計が限定される、(2)電気伝導特性評価にて基板 Si の影響が無視できないという問題が指摘されていた。

2. 研究の目的

本研究は SiC という Si 以外の半導体上への β -FeSi₂ エピタキシャル薄膜作製技術を確認することにより、

- 1) SiC 半導体上へのエピタキシャル成長機構を明らかにし、
- 2) 半絶縁性 SiC 半導体上にエピタキシャル成長した高品質 β -FeSi₂薄膜の電気伝導特性、機構を明らかにすることを目的に行った。

3. 研究の方法

極性を有する SiC 半導体の基板面方位を変えて、 β -FeSi₂ エピタキシャル成長への基板の共有結合性とイオン結合性の影響を調べ、エピタキシャル成長検討した。立方晶 SiC(3C-SiC)エピタキシャル膜作製は、モノシラン及びアセチレンガスを原料とした減圧 CVD 装置にて 1200°C の Si 基板温度で行った。

β -FeSi₂ 薄膜のエピタキシャル成長ではマグネトロン・スパッタ法にてアルゴン雰囲気下で 750°C の基板に Fe と Si を 1:2 の原子比で供給し膜作製を行い、さらに実績を有する有機金属化学析出(MOCVD)法で作製した。Fe と Si の出発原料にはカルボニル鉄とモノシランを用い、基板温度 750°C で検討した。

得られた薄膜は 4 軸のゴニオメータを備えた高精度の X 線回折評価装置を用いて結晶構造、配向の結晶完全性及び格子定数評価を行った。ホール効果測定にてキャリア密度と移動度を評価し、20~400K での温度域でのキャリア密度と移動度の温度依存性を調べ、不純物準位や伝導機構を調査した。

4. 研究成果

- (1) 図 1 に (a)SiC/Si(100) 基板および (b)SiC/Si(111) 基板上の堆積膜の XRD θ -2 θ ス

キャン・プロファイルを示す。3C-SiC 上では(100)面および(111)面いずれにおいても(100)単一配向した β -FeSi₂ 薄膜のエピタキシャル成長が確認された。

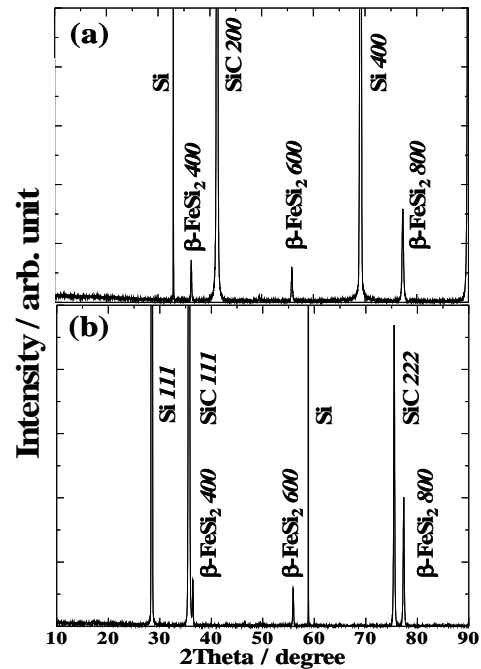


Fig.1 XRD θ -2 θ scan profiles of the thin films deposited on (a) SiC/Si(100) and (b) SiC/Si(111).

さらに図 2 に示す極点評価より 3C-SiC とのエピタキシャル関係は以下のとおりであった。

(100) β -FeSi₂ // (100)SiC,
[010] / [001] β -FeSi₂ // [010]SiC

(100) β -FeSi₂ // (111)SiC,
[010] / [001] β -FeSi₂ // [110]SiC

これらは Si で報告されるエピタキシャル関係とは異なったものであり、特に(100)3C-SiC 面上は B タイプの β -FeSi₂ のドメインエピタキシャル成長が示唆された。

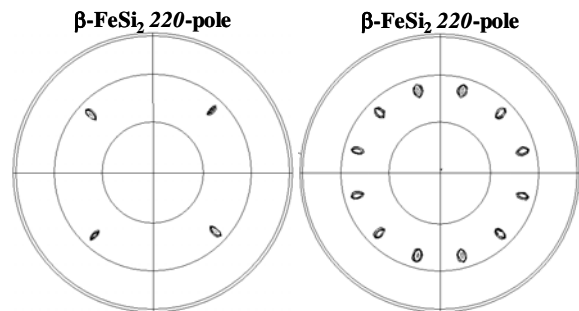


Fig.2 β -FeSi₂ 220-pole figure of the thin films deposited on (a) SiC/Si(100) and SiC/Si(111).

(2) 図 2 に 4H-SiC 基板の上にマグネトロン・スパッタ法及び有機金属気相成長法 (MOCVD 法) にてエピタキシャル成長させた β -FeSi₂ 薄膜の微細構造を示す。マグネトロン・スパッタ法、MOCVD 法いずれにおいても (100) 単一配向した β -FeSi₂ 薄膜のエピタキシャル成長が確認された。さらに β -FeSi₂ 220 回折ピークの極点評価より、いずれのエピタキシャル薄膜も面内に 3 回対称なドメイン構造を有することが分かった。

MOCVD 法で直接成長させた薄膜は数百 nm の微細粒で構成される (Fig.2(a') 参照) が、スパッタ法にて微細で密度の高い初期核上の薄膜では数十 μm からなるドメインで構成された (Fig.2(b) 参照)。

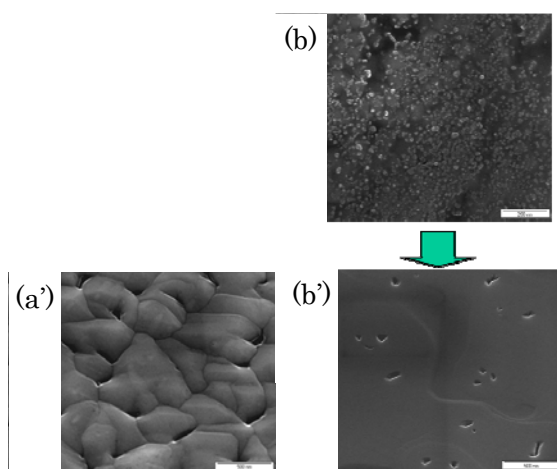


Figure 2: SEM images of β -FeSi₂ films. (a') shows a film deposited by rf-sputtering on 4H-SiC, appearing as a dense, granular surface. (b) shows a film deposited by MOCVD on β -FeSi₂, showing a smoother surface with larger, more uniform domains.

(3) 図 2(b) 試料をホール効果測定にて電気伝導特性評価した結果、試料は測定温度範囲において p 型伝導を示した。室温でのキャリア濃度は $1.5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ を示し、測定温度の低下とともに減少してキャリアの凍結が見られた。その傾きから求められた活性化エネルギーは 0.06eV であり、Zn 溶媒から成長した β -FeSi₂ 単結晶のそれと一致した。

ホール移動度は室温にて $12 \text{cm}^2/\text{Vs}$ であり、測定温度の低下とともに増大した。その温度依存性は 195K を境に $T^{-2.4}$ から $T^{-0.8}$ に変化し、30K において最大値 $140 \text{cm}^2/\text{Vs}$ を示した。

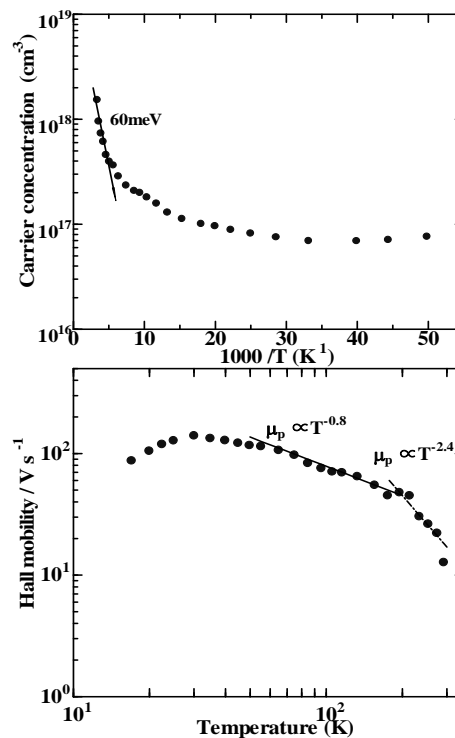


Figure 3: Temperature dependence of (a) carrier concentration and (b) hall mobility of epitaxial β -FeSi₂ on semi-insulating 4H-SiC.

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 K. Akiyama, T. Kadowaki, Y. Hirabayashi and S. Kaneko, Epitaxial Growth of Fe₃Si Thin Films on Si Substrate with MgO Buffer Layer, Transactions of Materials Research Society of Japan, 査読有, vol.34, 2009, 63-65.
- ② Y. Hirabayashi, S. Kaneko, K. Akiyama, Hetero-epitaxial Growth of 3C-SiC with Smooth Surface on Si(001) using Acetylene Gas, Materials Science Forum, 査読有, vol.600-603, 2009, 247-250.
- ③ Y. Hirabayashi, K. Akiyama and S. Kaneko, High Temperature Characteristics for UV Responsivity of 3C-SiC pn Photodiode, Materials Science Forum, 査読有, vol.615-617, 2009, 881-884.
- ④ K. Akiyama, S. Kaneko, K. Yokomizo and M. Itakura, Iron disilicide formation by Au-Si eutectic reaction on Si substrate, Applied Surface Science, 査読有, vol.256, 2009, 1244-1248.

- ⑤ T. Kondo, H. Funakubo, K. Akiyama, H. Enta, Y. Seki, M.H. Wang, T. Uchida and Y. Sawada, Deposition of undoped indium oxide thin films on stripe-patterned substrates by spray CVD, Journal of Crystal Growth, 査読有, vol.311, 2009, 642-646.
- ⑥ T. Kondo, Y. Sawada, H. Funakubo, K. Akiyama, T. Kiguchi, M. W. Wang, and T. Uchida, Good Conformability of Indium-Tin Oxide Thin Films Prepared by Spray Chemical Vapor Deposition, Electrochemical and Solid-State Letters, 査読有, vol.12, 2009, D42-44.
- ⑦ K. Akiyama, S. Kaneko, T. Kadowaki, and Y. Hirabayashi, Epitaxial orientation of β -FeSi₂ on 3C-SiC/Si(111), Japanese Journal of Applied Physics, 査読有, vol.49, 2010, 08JF06 1-3.
- ⑧ K. Akiyama, T. Kadowaki, Y. Hirabayashi, M. Yoshimoto, H. Funakubo and S. Kaneko, Epitaxial Growth of (100)-oriented β -FeSi₂ Film on 3C-SiC(100) plane, Journal of Crystal Growth, 査読有, vol.316, 2010, 10-14.
- ⑨ S. Kaneko, T. Nagano, K. Akiyama, T. Ito, M. Yasui, Y. Hirabayashi, H. Funakubo and M. Yoshimoto, Large constriction of lattice constant in epitaxial magnesium oxide thin film: Effect of point defects on lattice constant, Journal of Applied Physics, 査読有, vol.107, 2010, 073523 1-3.
- ⑩ S. Kaneko, K. Akiyama, T. Ito, M. Yasui, M. Soga, Y. Hirabayashi, H. Funakubo and M. Yoshimoto, Large lattice mismatch on epitaxial thin film ~coincidence site lattice expanded on polar coordinates system~, Japanese Journal of Applied Physics, 査読有, vol.49, 2010, 08JE02 1-4.
- ⑪ S. Kaneko, T. Ito, K. Akiyama, M. Yasui, C. Kato, S. Tanaka, Y. Hirabayashi, A. Mastuno, T. Nire, H. Funakubo and M. Yoshimoto, Nano-strip grating lines self-organized by a high speed scanning CW laser, Nanotechnology, 査読有, vol.22, 2011, 175307 1-6.

[学会発表] (計 10 件)

- ① Epitaxial Growth of Fe₃Si Thin Films on Si with MgO buffer layer, The 21st Conference on Crystal Growth and Epitaxy-West.
- ② Epitaxial growth of β -FeSi₂ thin film on SiC by co-sputtering of iron and silicon, The 31st International Symposium on Dry Process.
- ③ Au コート Si 基板上 β -FeSi₂ のフォトルミネッセンス発光, 第 70 回応用物理学会学術講演会
- ④ Epitaxial growth of semiconducting iron die-silicide thin film on SiC, 2nd International

Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications.

- ⑤ 鉄シリサイド半導体薄膜の電気伝導特性に及ぼす微細構造の影響, 第 57 回応用物理学関係連合講演会.
- ⑥ Epitaxial Growth of (100) β -FeSi₂ Film on 4H-SiC(001), 2010 International Symposium on Dry Process.
- ⑦ Photoluminescence properties of β -FeSi₂ grains on Si substrate with Au coat layer, 3rd International Congress on Ceramics.
- ⑧ Photoluminescence properties of β -FeSi₂ on Cu- or Au-coated Si, International Conference on Nanotechnology, Optoelectronics and Photonics.
- ⑨ 半絶縁性 4H-SiC 基板上エピタキシャル β -FeSi₂ 薄膜の電気伝導特性, 第 71 回応用物理学会学術講演会.
- ⑩ 半絶縁性 4H-SiC 基板上 β -FeSi₂ 薄膜の電気伝導特性, 第 58 回応用物理学関係連合講演会.

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: 光半導体装置及びその製造方法

発明者: 秋山賢輔 他

権利者: 神奈川県

種類: 特許

番号: 特願 2010-062891

出願年月日: 2010 年 3 月 18 日

国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等

<http://www.kanagawa-iri.go.jp/kitri/kouhou/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

秋山 賢輔 (AKIYAMA KENSUKE)

神奈川県産業技術センター・電子技術
部・主任研究員

研究者番号: 70426360

(2) 研究分担者

平林 康男 (HIRABAYASHI YASUO)

神奈川県産業技術センター・電子技術
部・主任研究員

研究者番号: 30426358

金子 智 (KANEKO SATORU)

神奈川県産業技術センター・電子技術
部・主任研究員

研究者番号: 19656170