

平成 26 年 6 月 10 日現在

機関番号：17701

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2010～2013

課題番号：22686032

研究課題名(和文)シリサイド半導体ひずみ超格子によるバンド構造の能動的制御

研究課題名(英文)Control of band structure in strained silicide structures

研究代表者

寺井 慶和 (TERAI, Yoshikazu)

鹿児島大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：90360049

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 18,600,000円、(間接経費) 5,580,000円

研究成果の概要(和文)：シリサイド半導体  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>は、近赤外の波長領域で受・発光機能を示す新規シリコン光エレクトロニクス材料である。本研究では、能動的にひずみを導入し、 $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>のバンド構造を制御することを目的とした。その結果、 $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>エピタキシャル膜のa軸方向へのひずみ導入が、間接遷移型から直接遷移型へのバンド構造制御に有効であることを見出した。また、その研究過程で、低残留キャリア濃度の高品質  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>エピタキシャル膜の作製にも成功した。

研究成果の概要(英文)：Semiconducting silicide,  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>, is a novel silicon-optoelectronic material which shows photoresponse and light emission in the wavelength range of near infrared. In this study, we have studied the strain-induced modification of band structure in  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>. In the results, it was revealed that an introduction of strain along a-axis direction of the  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> epitaxial film is effective to control the band structure from indirect transition type to direct transition one. In addition, we have succeeded in the growth of high quality  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> epitaxial film with low residual carrier concentration.

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：結晶成長 半導体光物性

## 1. 研究開始当初の背景

シリサイド半導体  $\beta\text{-FeSi}_2$  は Si 基板上へのエピタキシャル成長が可能であり、Si では達成できない優れた光学機能を有する。例えば、光通信波長である  $1.5\ \mu\text{m}$  帯で発光を示す、Si より光吸収係数が 100 倍大きい ( $\alpha=10^5\ \text{cm}^{-1}$  at  $1\ \text{eV}$ )、そして半導体最大の屈折率 5.6 を示すといった光学的特徴を有する。よって、 $\beta\text{-FeSi}_2$  は Si 基板上の光・電子融合素子に適した材料であり、Si ベースのオプトエレクトロニクス材料として期待されている。斜方晶の  $\beta\text{-FeSi}_2$  (半導体相) は、立方晶の  $\gamma\text{-FeSi}_2$  (金属相) がヤン・テラー効果によって格子変形した後に形成される。そのため、 $\beta\text{-FeSi}_2$  のバンド構造はひずみに強く依存し、電気伝導や光学遷移といった諸物性もひずみにより変化すると考えられる。特に、Si 基板上に作製した  $\beta\text{-FeSi}_2$  エピタキシャル膜では、 $\beta\text{-FeSi}_2/\text{Si}$  ヘテロ界面で生じるひずみにより、単結晶とは異なるバンド構造を有すると予測されていた。

研究代表者は変調分光法の一つであるフォトレフレクタンス (PR) 法により、Si(111) 基板上に作製した  $\beta\text{-FeSi}_2$  エピタキシャル膜のバンド構造を詳細に調べてきた。その結果、熱処理により誘起される格子体積変化率と、直接遷移エネルギーに相関があることをはじめて明らかにした。この成果は、格子変形に伴う  $\beta\text{-FeSi}_2$  のバンド構造変化を示すはじめての実験的証拠であった。しかしながら、ひずみの能動的制御と、ひずみとバンド構造変化に関する詳細な情報は得られていなかった。能動的ひずみ導入による  $\beta\text{-FeSi}_2$  バンド構造の制御は、 $\beta\text{-FeSi}_2$  の直接遷移化につながる基盤技術と期待され、そのためひずみの制御技術の構築とバンド構造との相関を解明する必要があった。

## 2. 研究の目的

Si 基板上に作製した  $\beta\text{-FeSi}_2$  エピタキシャル膜では、 $\beta\text{-FeSi}_2/\text{Si}$  ヘテロ界面における格子不整合率に起因して  $\beta\text{-FeSi}_2$  膜内へのひずみ導入される。そこで本研究では、種々の手法を用いてヘテロ界面で発生するひずみを制御し、そのひずみ導入  $\beta\text{-FeSi}_2$  エピタキシャル膜のバンド構造を評価することで、ひずみとバンド構造の詳細な相関、およびバンド構造制御への指針を探索することを目的とした。薄膜構造のヘテロ界面で発生するひずみの制御手法としては、「エピタキシャル方位の制御」、「熱処理による格子変形の促進」、「Ge 添加によるひずみ制御」に関する研究を行い、導入したひずみとバンド構造との相関の解明を目指した。また、 $\beta\text{-FeSi}_2/\text{Si}$  ひずみ超格子を作製し、ヘテロ界面数によるひずみ導入効果を明らかにすることも目的とした。

## 3. 研究の方法

## (1) エピタキシャル方位によるひずみ制御とバンド構造との相関

$\beta\text{-FeSi}_2$  の結晶構造は斜方晶であり、Si(111) および Si(001) 基板上へのエピタキシャル関係はそれぞれ  $\beta\text{-FeSi}_2(110)(101)//\text{Si}(111)$ 、 $\beta\text{-FeSi}_2(100)//\text{Si}(001)$  となる。そのため、ヘテロ界面で発生するひずみは両者で異なると考えられる。具体的には、Si(111) 基板上の  $\beta\text{-FeSi}_2$  エピタキシャル膜では a 軸方向に引っ張りひずみ、b,c 軸方向には圧縮ひずみが導入される。それに対し、Si(001) 基板上では a 軸方向に圧縮ひずみ、b,c 軸方向に引っ張りひずみが導入される。このように、成長方位に依存して  $\beta\text{-FeSi}_2$  膜内に導入されるひずみが異なり、それらのバンド構造を調べることでひずみとバンド構造変化の相関を明らかにする。

## (2) 熱処理による格子変形の促進

ひずみの制御技術として、成長後の熱処理により格子変形を促進させる手法を検討した。 $\beta\text{-FeSi}_2$  と Si との格子不整合率は大きいいため、as-grown の状態ではヘテロ界面に欠陥が導入され、ひずみの導入が不十分となっている可能性がある。そこで、成長後に熱処理を行い、ヘテロ界面での欠陥低減によるひずみ導入効果の増大について検証した。

## (3) Ge 添加によるひずみ制御

$\beta\text{-FeSi}_2$  の Si サイトの一部を原子半径の大きい Ge で置換することにより  $\beta\text{-FeSi}_2$  の格子が増大し、その結果ヘテロ界面で発生するひずみが増大すると考えられる。したがって、Ge 添加量によりヘテロ界面でのひずみを制御可能であると期待される。しかしながら、Ge 添加  $\beta\text{-FeSi}_2$  エピタキシャル膜の成長報告例はなかったため、その成長技術の構築と Ge 添加量に依存したバンド構造変化について調査した。

(4)  $\beta\text{-FeSi}_2/\text{Si}$  ひずみ超格子の作製とヘテロ界面数とひずみ効果の検証

(1)-(4)では Si 基板上に成長したエピタキシャル薄膜におけるひずみ効果を検証してきた。これらのエピタキシャル薄膜では一つの  $\beta\text{-FeSi}_2/\text{Si}$  ヘテロ界面が存在し、そこで発生するひずみによりバンド構造変化が誘起されていた。ここでは、ヘテロ界面数を更に増やした  $\beta\text{-FeSi}_2/\text{Si}$  ひずみ超格子を作製し、ヘテロ界面数とひずみ効果との相関を検証した。このひずみ超格子では、ヘテロ界面が増加することにより  $\beta\text{-FeSi}_2$  層内に導入されるひずみが増加し、より直接遷移化に近づくバンド構造変化が得られると期待される。

(5) 低残留キャリア濃度  $\beta\text{-FeSi}_2$  エピタキシャル膜における電気伝導機構の解明

(1)-(5)の研究を遂行する過程で、残留キャリア濃度が  $10^{16}\ \text{cm}^{-3}$  の高品質  $\beta\text{-FeSi}_2$  エピタキシャル膜の作製に成功した。この残留キャリア濃度は従来報告値 ( $10^{18}\text{-}10^{20}\ \text{cm}^{-3}$ ) と比較し、2-4 桁も低い値となっている。低残留

キャリア濃度  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> 薄膜の作製は、最終目標である発光、光電変換素子などの光デバイスの作製には必要不可欠であり、本研究過程においてはじめて達成された。そこで、 $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> 薄膜に真性の電気伝導特性を明らかにするため、ホール効果の温度依存性を測定した。

#### 4. 研究成果

##### (1) エピタキシャル方位によるひずみ制御とバンド構造との相関

分子線エピタキシー(MBE)法により、成長方位の異なる  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>(110)(101)//Si(111) と  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>(100)//Si(001) エピタキシャル膜を作製し、高分解能 X 線回折(HR-XRD)によりその格子変形を調べた。その結果、 $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>/Si ヘテロ界面での格子不整合に対応して、前者では a 軸方向への引っ張りひずみと b,c 軸方向への圧縮ひずみ、後者では a 軸方向への圧縮ひずみと b,c 軸方向に引っ張りひずみが確認された。よって、成長方位により  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> 膜内へ導入されるひずみが制御可能であることが明らかとなった。これらのエピタキシャル膜において PR 測定を行い、ブリルアンゾーンの Y 点における直接遷移エネルギーを評価した。その結果を図 1 に示す。横軸はひずみがないバルク単結晶の a 軸格子定数からの変化量となっている。図より a 軸格子定数の伸張および収縮量の増大に伴い、直接遷移エネルギーが減少することが明らかとなった。これはヘテロ界面から導入されたひずみにより  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> 薄膜のバンド構造が変化した証左であり、その直接遷移エネルギーの減少も理論計算の予測と符合するものである。詳細な解析の結果、b,c 軸方向へのひずみ導入より、a 軸方向へのひずみ導入がバンド構造変化に大きく影響を与えることを明らかにした。

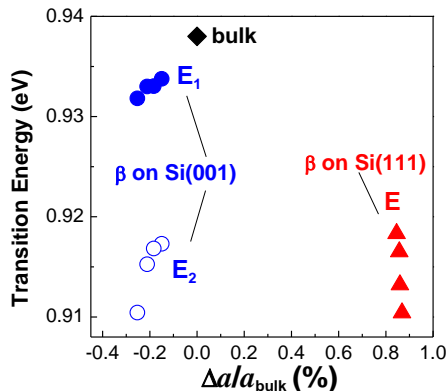


図 1 a 軸格子定数の変化量と直接遷移エネルギーとの関係

##### (2) 熱処理による格子変形の促進

ヘテロ界面で発生するひずみを有効的に  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> 層へ導入することを目的に、成長後の熱処理を行い格子変形との相関を調べた。代表的な結果として、 $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>(100)//Si(001) エピタキシャル膜での結果を図 2 に示す。図 2 は成長後、真空中で 600, 700 800 °C で熱処理を

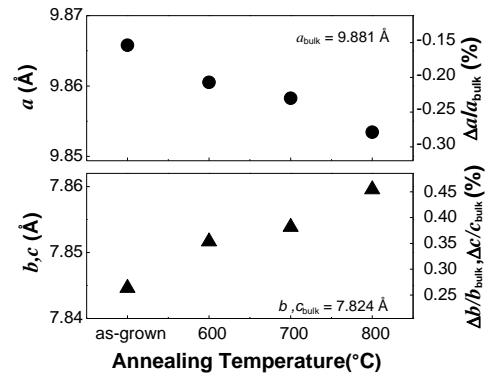


図 2  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>(100)//Si(001) エピタキシャル膜での熱処理温度に依存した格子定数変化

行った際の格子定数変化の結果である。熱処理温度の増加に伴い、a 軸は伸張、b,c 軸は収縮した。この格子変化はバルク値から離れる方向に変化、すなわち熱処理温度の増加に伴い格子変形が促進されていることを意味する。この結果は、熱処理により  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>/Si ヘテロ界面における格子不整合値を減少させる方向へ  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> の格子が変形すること示しており、熱処理が  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> 層へのひずみの導入に有効であると考えられる。

##### (3) Ge 添加によるひずみ制御

$\beta$ -FeSi<sub>2</sub> の Si サイトの一部を原子半径の大きい Ge で置換した Ge 添加  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> では、無添加  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> より格子定数が増大すると考えられる。 $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> の格子定数が変化することにより、ヘテロ界面で発生するひずみ量も変化するため、Ge 添加量によりひずみを能動的に制御できると考えられる。しかし、Ge 添加  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> の作製報告例はなかったため、その MBE 成長技術を構築することを目的とした。MBE 法により、Fe, Si, Ge を同時供給することで Ge 添加  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> の作製を行った。その結果、Ge 添加濃度が約 10% まで格子定数の増大が確認され、はじめて Ge 添加  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> の作製に成功した。

作製した Ge 添加  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>(100)//Si(001) エピタキシャル膜で測定した直接遷移エネルギーの Ge 濃度依存性を図 3 に示す。この結果より、Ge 濃度の増加に伴いバンド構造が変化し、直接遷移エネルギーが低エネルギー側に

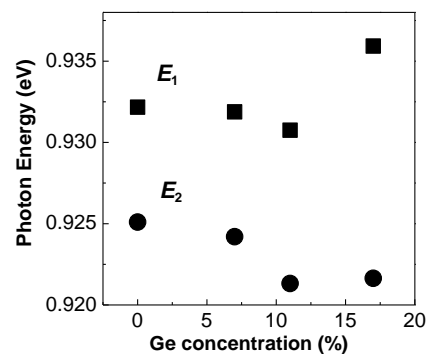


図 3 Ge 濃度と直接遷移エネルギーの関係

シフトすることが確認された。このシフトの起源としては、ヘテロ界面でのひずみ量の変化と Ge 添加によるバンドギャップの減少という、2つの効果が考えられる。今後、異なる成長方位のエピタキシャル膜を作製することで、より詳細な起源を明らかにする必要がある。

#### (4) $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>/Si ひずみ超格子の作製とヘテロ界面数とひずみ効果の検証

(1)-(4)の研究において、 $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>/Si ヘテロ界面で発生するひずみが  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> 層へ導入され、バンド構造変化が誘起できることを実証した。ここでは、ヘテロ界面とひずみの効果をより詳細に調べるため、ヘテロ界面数と直接遷移エネルギーとの相関について検証した。単一ヘテロ界面を有する試料(SH)とダブルヘテロ界面構造試料(DH)の PR スペクトルを図4に示す。SH 構造に対しダブルヘテロ界面を有する DH 構造では、直接遷移エネルギーが約 10 meV 低エネルギー側にシフトすることが明らかとなった。これは、ヘテロ界面数の増加により  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> 層へ導入される実効的なひずみが増加したことを示す。

次に、更にヘテロ界面数を増加させた  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>/Si ひずみ超格子を作製し、ひずみ効果を調べた。このひずみ超格子は 20 nm の  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> と Si を 2 周期交互積層した構造となっている。まず、PR スペクトルから得られた直接遷移エネルギーは 0.922 eV と DH 試料の 0.929 eV より更に低エネルギー側にシフトした。よって、ヘテロ界面数の増加により、さらにひずみ量が増加させることができたと解釈できる。次に、この超格子を酸素中で熱処理し、Si のみを酸化させることでヘテロ界面を意図的に消失させた。その際の直接遷移エネルギーの変化を図5に示す。構造解析の結果、熱処理時間が 5, 15, 45 時間の時に  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>/Si ヘテロ界面が消失することを確認した。図5より、ヘテロ界面が消失する際に直接遷移エネルギーの増減が変化しており、この結果もヘテロ界面がバンド構造変化に強く影響を与えている証左と位置づけられる。

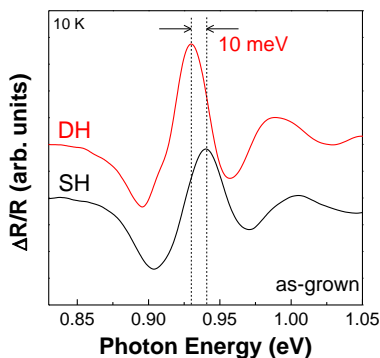


図4 シングルヘテロ(SH)試料とダブルヘテロ(DH)試料の PR スペクトル

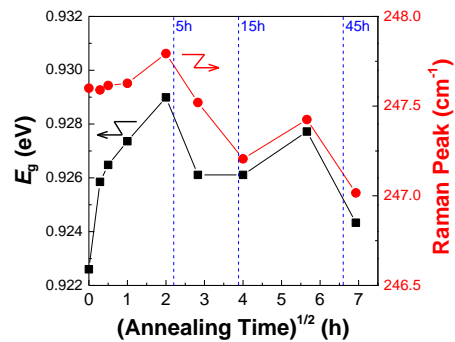


図5 ひずみ超格子におけるヘテロ界面の消失と直接遷移エネルギーとの相関

#### (5) 低残留キャリア濃度 $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> エピタキシャル膜における電気伝導機構の解明

本研究以前の報告では、 $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> 薄膜の残留キャリア濃度は  $10^{18}$ - $10^{20}$  cm<sup>-3</sup> 程度であり、その伝導型も *p* 型 *n* 型が混在していた。また、これらの膜中には多量の不純物と結晶欠陥が存在し、その電気伝導は欠陥バンド伝導が全温度領域で支配的であった。すなわち、 $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> 薄膜に真性の電気伝導機構は明らかにされていなかった。本研究により、残留キャリア濃度が  $10^{16}$  cm<sup>-3</sup> の高品質  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> 薄膜の作製にはじめて成功した。そこで、その電気伝導機構を調べた。図6に抵抗率の温度依存性を示す。この結果、高温領域(190K~室温)ではバンド伝導、中温領域(80~190K)では局在伝導、低温領域(80K以下)ではホッピング伝導が支配的であり、温度に依存して伝導機構が変化することが明らかとなった。このような伝導機構の変化は  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> に特有の効果であり、今後のデバイス設計において重要な指針を与える結果である。

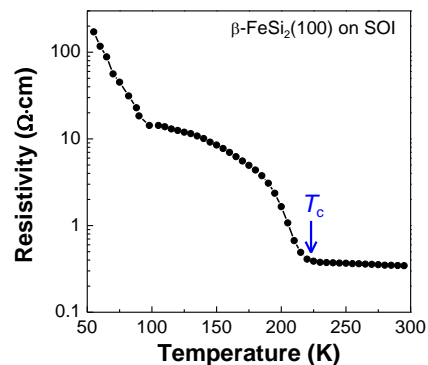


図6  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> エピタキシャル膜における比抵抗の温度依存性

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計7件)

1. “Conduction Properties of  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> Epitaxial Films with Low Carrier Density”, Yoshikazu Terai, Nozomu Suzuki, Keiichi Noda and Yasufumi Fujiwara, *Physica Status Solidi* (c)

10 (2013) pp.1696-1698. (査読有り)  
(DOI : 10.1002/pssc.201300342)

2. “Growth condition dependence of Ge-doped  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> epitaxial film by molecular beam epitaxy”, Keiichi Noda, Yoshikazu Terai, and Yasufumi Fujiwara, *Journal of Crystal Growth*, 378 (2013) pp.376-380. (査読有り)  
(DOI : 10.1016/j.jcrysgro.2012.11.010)

3. “Effect of residual impurities on transport properties of  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> epitaxial films grown by molecular beam epitaxy”, Y. Terai, K. Yoneda, K. Noda, N. Miura, and Y. Fujiwara, *Journal of Applied Physics*, 112 (2012) pp.013702/1-5. (査読有り)  
(DOI : 10.1063/1.4731246)

4. “Growth condition dependence of direct bandgap in  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> epitaxial films grown by molecular beam epitaxy”, K. Noda, Y. Terai, N. Miura, H. Uono, and Y. Fujiwara, *Physics Procedia* 23 (2012) pp.5-8. (査読有り)  
(DOI : 10.1016/j.phpro.2012.01.002)

5. “Photoluminescence and Photoreflectance Studies in Si/ $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>/Si(001) Double Heterostructure”, K. Yoneda, Y. Terai, K. Noda, N. Miura, and Y. Fujiwara, *Physics Procedia* 11 (2011) pp.185-188. (査読有り)  
(DOI : 10.1016/j.phpro.2011.01.025)

6. “Bandgap modifications by lattice deformations in  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> epitaxial films”, Y. Terai, K. Noda, K. Yoneda, H. Uono, Y. Maeda and Y. Fujiwara, *Thin Solid Films* 519 (2011) pp.8468-8472. (査読有り)  
(DOI : 10.1016/j.tsf.2011.05.021)

7. “Temperature dependence of direct transition energies in  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> epitaxial films on Si(111) substrate”, K. Noda, Y. Terai, K. Yoneda, and Y. Fujiwara, *Physics Procedia* 11 (2011) pp.181-184. (査読有り)  
(DOI : 10.1016/j.phpro.2011.01.024)

[学会発表] (計 27 件)

1. “ $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> 薄膜におけるラマンスペクトルの温度依存性”, 山口陽己, 塚本裕明, 服部 哲, 東 貴彦, 寺井慶和, 2014 年 第 61 回応用物理学会春季学術講演会、青山学院大学相模原キャンパス、2014 年 3 月 19 日

2. “ $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> エピタキシャル膜における FKO 振動の観測と表面フェルミ準位の評価”, 塚本裕明, 山口陽己, 服部 哲, 東 貴彦, 寺井慶和, 2014 年 第 61 回応用物理学会春季学術講演会、青山学院大学相模原キャンパス、2014 年 3 月 19 日

3. “スパッタリング法による低残留キャリア密度  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> 多結晶薄膜の作製と電気伝導機構の評価”, 服部 哲, 東 貴彦, 塚本裕明, 山口陽己, 寺井慶和, 2014 年 第 61 回応用物理学会春季学術講演会、青山学院大学相模原キャンパス、2014 年 3 月 19 日

4. “ $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>/Si 多結晶薄膜における PR スペクトルの評価”, 東 貴彦, 服部 哲, 塚本裕明, 山口陽己, 寺井慶和, 2014 年 第 61 回応用物理学会春季学術講演会、青山学院大学相模原キャンパス、2014 年 3 月 19 日

5. “Conduction Properties of  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> Epitaxial Films with Low Carrier Density”, Yoshikazu Terai, Nozomu Suzuki, Keiichi Noda and Yasufumi Fujiwara, *Asia-Pacific Conference on Green Technology with Silicides and Related Materials*, July 28, 2013, Tsukuba, Japan.

6. “Effects of hetero-interface on direct bandgap energy in  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>/Si heterostructures”, Y. Terai, K. Noda, Y. Fujiwara, *Asian School-Conference on Physics and Technology of Nanostructured Materials*, August 27, 2013, Vladivostok, Russia.

7. “ $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> ナノ粒子における近赤外発光ピークの寿命評価”, 寺井 慶和, 前田 佳均, 2013 年 第 74 回応用物理学会秋季学術講演会、同志社大学京田辺キャンパス、2013 年 9 月 20 日

8. “ $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>/Si DH 構造における直接遷移エネルギーとヘテロ界面との相関”, 寺井慶和, 野田 慶一, 藤原 康文, 第 73 回応用物理学会学術講演会, 13p-F2-4, 愛媛大学城北地区・松山大学文京キャンパス, 愛媛県松山市, 9 月 11-14 日(2012).

9. “Si(111)基板上への Ge 添加  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> エピタキシャル膜の作製”, 野田 慶一, 寺井慶和, 藤原 康文, 第 73 回応用物理学会学術講演会, 13p-F2-5, 松山大学文京キャンパス, 愛媛県松山市, 9 月 11-14 日(2012).

10. “Growth condition dependence of Ge doping into  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> epitaxial film by MBE method”, K. Noda, Y. Terai, and Y. Fujiwara, *31st Electronic Materials Symposium*, We2-6, pp. 39-40, ラフォーレ修善寺、伊豆市、7 月 11 日 (2012).

11. “第一原理計算による  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> 直接遷移端変化の検証”, 野田慶一, 寺井慶和, 高石洋輔, 伊藤博介, 鶴殿治彦, 藤原康文, 第 59 回応用物理学関係連合講演会, 16p-E1-4, 早稲田大学 早稲田キャンパス, 3 月 16 日 (2012).

12. “低残留キャリア濃度  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> エピタキシャル膜における磁気抵抗”、寺井慶和、三浦直行、野田慶一、藤原康文、第 59 回応用物理学関係連合講演会、16p-E1-5、早稲田大学 早稲田キャンパス、3 月 16 日 (2012).
13. “Photoreflectance and time-resolved photoluminescence studies in ion-beam synthesized  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>”, Y. Terai, K. Noda, K. Yoneda, Y. Maeda, and Y. Fujiwara, Asian School-Conference on Physics and Technology of Nanostructured Materials, III.26.06, Vladivostok, Russia, August 21-28 (2011).
14. “Growth condition dependence of direct bandgap in  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> epitaxial films grown by molecular beam epitaxy”, K. Noda, Y. Terai, K. Yoneda, N. Miura, K. Katayama, H. Udono, and Y. Fujiwara, Asian School-Conference on Physics and Technology of Nanostructured Materials, III.26.07, Vladivostok, Russia, August 21-28 (2011).
15. “Dependence of direct bandgap energies on growth condition in  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> epitaxial films on Si(001) substrate”, K. Noda, Y. Terai, and Y. Fujiwara, 7th Handai Nanoscience and Nanotechnology International Symposium, PH-38, Icho-Kaikan, Osaka University, Osaka, Japan, November 10-11 (2011).
16. “Investigation of direct bandgap energies of  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> epitaxial films by photoreflectance”, K. Noda, Y. Terai, and Y. Fujiwara, International Symposium on Materials Science and Innovation for Sustainable Society 2011, PT3-30, Hotel Hankyu Expo Park, Osaka, Japan, November 28-30 (2011).
17. “低残留キャリア濃度  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> エピタキシャル膜における電気特性の温度依存性”、三浦直行、寺井慶和、米田圭佑、野田慶一、藤原康文、第 72 回応用物理学会学術講演会、1p-W-6、山形大学小白川キャンパス、山形市、9 月 1 日 (2011).
18. “ $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> エピタキシャル膜における直接遷移エネルギーの成長条件依存性”、野田慶一、寺井慶和、三浦直行、鶴殿治彦、藤原康文、第 72 回応用物理学会学術講演会、1p-W-7、山形大学小白川キャンパス、山形市、9 月 1 日 (2011).
19. “IBS  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> における 1.5  $\mu$ m 発光の寿命評価”、寺井慶和、野田慶一、三浦直行、前田佳均、藤原康文、第 72 回応用物理学会学術講演会、1p-W-8、山形大学小白川キャンパス、山形市、9 月 1 日 (2011).
20. “ $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> 薄膜における残留キャリア濃度の熱処理温度依存性”、米田圭佑、寺井慶和、野田慶一、三浦直行、藤原康文、第 58 回応用物理学関係連合講演会、26p-KU-1、神奈川工科大学、厚木市、3 月 26 日 (2011).  
【講演奨励賞受賞記念講演】
21. “Si(001)基板上  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> エピタキシャル膜における PR スペクトルの成長条件依存性”、野田慶一、寺井慶和、米田圭佑、三浦直行、片山広、鶴殿治彦、藤原康文、第 58 回応用物理学関係連合講演会、26p-KU-2、神奈川工科大学、厚木市、3 月 26 日 (2011).
22. “ $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> における光励起キャリアの緩和過程の検証”、寺井慶和、野田慶一、米田圭佑、三浦直行、前田佳均、藤原康文、第 58 回応用物理学関係連合講演会、26p-KU-3、神奈川工科大学、厚木市、3 月 26 日 (2011).
23. “Band-gap Modifications of  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> Epitaxial Films by Lattice Deformations”, Y. Terai, K. Noda, K. Yoneda, H. Udono, Y. Maeda, and Y. Fujiwara, Asia-Pacific Conference on Semiconducting Silicides and Related Materials, 25-PM-V-5, Tsukuba, Ibaraki, July 24-26 (2010).
24. “Temperature dependence of direct transition energies in  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> epitaxial films on Si(111) substrate”, K. Noda, Y. Terai, K. Yoneda, and Y. Fujiwara, Asia-Pacific Conference on Semiconducting Silicides and Related Materials, 24-P8, Tsukuba, Ibaraki, July 24-26 (2010).
25. “Photoluminescence and Photoreflectance Studies in Si/ $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>/Si(001) Double Heterostructure”, K. Yoneda, Y. Terai, K. Noda, N. Miura, and Y. Fujiwara, Asia-Pacific Conference on Semiconducting Silicides and Related Materials, 24-P9, Tsukuba, Ibaraki, July 24-26 (2010).
26. “SOI 基板上に成長した  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> エピタキシャル膜における残留キャリア濃度の評価”、米田圭佑、寺井慶和、野田慶一、三浦直行、藤原康文、第 71 回応用物理学会学術講演会、17a-NH-7、長崎大学、長崎市、9 月 17 日 (2010).
27. “ $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> エピタキシャル膜における光伝導スペクトルの評価”、寺井慶和、米田圭佑、野田慶一、三浦直行、藤原康文、第 71 回応用物理学会学術講演会、17a-NH-8、長崎大学、長崎市、9 月 17 日 (2010).
6. 研究組織  
(1) 研究代表者  
寺井 慶和 (TERAI Yoshikazu)  
鹿児島大学 理工学研究科・准教授  
研究者番号：90360049