

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 19 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289093

研究課題名(和文) 異方性ひずみ導入によるシリサイド半導体のバンド構造制御

研究課題名(英文) Control of electronic structure by anisotropic strain in semiconducting silicide

研究代表者

寺井 慶和 (TERAI, Yoshikazu)

九州工業大学・大学院情報工学研究院・教授

研究者番号：90360049

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、異方性ひずみ導入による鉄シリサイド半導体のバンド構造制御を目的とし、ひずみ評価技術の構築、ひずみ緩和メカニズムの検証、SiGe上への鉄シリサイドエピタキシャル成長、異方性ひずみの評価および発光寿命の評価を行った。その結果、偏光ラマン分光法によりひずみ評価技術の構築し、Si欠陥によりひずみ緩和が生じることを明らかにした。SiGe(111)上の鉄シリサイドエピタキシャル成長にもはじめて成功し、その試料においてバンド構造変化を確認した。また、発光寿命評価では鉄シリサイド半導体のバンド間遷移による発光寿命の決定に成功した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to control the band structure of semiconducting iron silicide by introducing anisotropic strain. The evaluation technology of strain, the strain relaxation mechanism, the epitaxial growth of iron silicide on strain relaxed SiGe, and photoluminescence(PL) lifetime were investigated. evaluated. As a result, a strain evaluation technique by polarized Raman spectroscopy was established. The strain relaxation due to Si defects was confirmed. The epitaxial growth of iron silicide on strain relaxed SiGe was succeeded for the first time. In the investigation of photoluminescence lifetime, the intrinsic PL lifetime due to the band-to-band transition of iron silicide was obtained.

研究分野：半導体光物性

キーワード：シリサイド半導体 鉄シリサイド バンド構造制御 ひずみ導入

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、数少ないシリコンオプトエレクトロニクス材料の一つである。その最大の特徴として、「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 倍大きく、Si では吸収できない近赤外光を吸収できる」という、Si では達成できない光学的機能があげられる。よって、 $\beta\text{-FeSi}_2$ は Si 基板をプラットフォームとした新規発光源、近赤外領域の太陽電池材料として応用が期待されている。斜方晶の $\beta\text{-FeSi}_2$ (半導体相) は、立方晶の $\gamma\text{-FeSi}_2$ (金属相) がひずみにより格子変形 (ヤン・テラー効果) することで形成される。そのため、 $\beta\text{-FeSi}_2$ のバンド構造はひずみに大きく依存し、電気伝導や光学遷移といった諸物性も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示すと予測されている。例として、Migas 等の第一原理計算の結果では [D. B. Migas, *et al.*, *Phys. Rev. B*, **62** (2000) 11063]、ひずみフリーの単結晶では間接遷移型であるのに対し、Si 基板上のエピタキシャル膜では、ヘテロ界面で生じるひずみによりバンド構造が直接遷移型に変化することが示されている。しかし、このようなひずみによるバンド構造変化を実証する実験結果はなく、理論予想の範疇に留まっていた。そこで、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 基板上の $\beta\text{-FeSi}_2$ エピタキシャル膜におけるバンド構造とひずみの相関を詳細に調べた。その結果、格子変形に伴うバンド構造変化を示すはじめての実験的証拠を得た。また、この結果は先に述べた理論計算と定性的に一致し、ひずみの増大とともに $\beta\text{-FeSi}_2$ のバンド構造が直接遷移に近づくものであった。よって、ひずみによる $\beta\text{-FeSi}_2$ のバンド構造制御が可能が十分期待される。

2. 研究の目的

ひずみ導入による $\beta\text{-FeSi}_2$ のバンド構造変化は実証されたが、 $\beta\text{-FeSi}_2/\text{Si}$ ヘテロ界面で生じるひずみ量は不十分であり、バンド構造が直接遷移に変化するには至っていない。直接遷移化の実現のため、 $\beta\text{-FeSi}_2$ 層へ更にひずみを導入する技術が必要である。また、それに伴い $\beta\text{-FeSi}_2$ におけるひずみ評価技術の構築が必要不可欠である。このような学術的背景のもと、新たな研究展開として「異方性ひずみ導入による $\beta\text{-FeSi}_2$ バンド構造の直接遷移化と発光・受光機能の飛躍的向上」という着想に至った。本研究では、ひずみ量を増大させる手法として $\beta\text{-FeSi}_2/\text{SiGe}$ ヘテロ界面を用いる。その際、斜方晶である $\beta\text{-FeSi}_2$ の a 軸を異方的に伸張させ、バンド構造の直接遷移化について検証することを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、ひずみ導入による $\beta\text{-FeSi}_2$ のバンド構造制御を目的とするため、ひずみの評価技術は必要不可欠である。これまで、高分解能 X 線回折を用いて膜内部のひずみ評価を行ってきたが、局所ひずみの評価としては不十分であった。また、ひずみによるバンド構造変化を抑制する因子については調査されておらず、効率よくバンド構造制御を行うための指針が不十分であった。そこで、本研究では第 1 段階としてバンド構造変化が確認されている $\beta\text{-FeSi}_2(110)(101)/\text{Si}(111)$ エピタキシャル膜を研究対象とし、ひずみ評価技術の構築と阻害因子の調査を行った。その後、ひずみ量の増大を目的に、 $\text{SiGe}(111)$ 上への $\beta\text{-FeSi}_2$ エピタキシャル成長を実現した。そして、Ge 濃度に依存した異方性ひずみ導入量の評価およびひずみ導入に伴うバンド構造変化の検証を行った。さらに、発光素子開発を念頭に $\text{Si}/\beta\text{-FeSi}_2/\text{Si}$ ダブルヘテロ構造を作製し、真性発光寿命を求めた。下記に具体的な方法を列挙したそれぞれの研究方法について記述した。

【方法 1】 $\beta\text{-FeSi}_2$ エピタキシャル膜のラマンモードの解明と局所ひずみ評価

【方法 2】バンド構造変化の抑制因子の検証

【方法 3】 $\text{SiGe}(111)$ 上への $\beta\text{-FeSi}_2$ エピタキシャル成長の実現

【方法 4】Ge 濃度に依存した異方性ひずみ導入量とバンド構造変化の検証

【方法 5】不純物制御した高品質 $\beta\text{-FeSi}_2$ 多結晶薄膜の作製と、ひずみ量、電気・発光特性、バンド構造の評価

【方法 6】 $\text{Si}/\beta\text{-FeSi}_2/\text{Si}$ ダブルヘテロ構造の作製と、 $1.5\mu\text{m}$ 発光特性の評価

4. 研究成果

【成果 1】 $\beta\text{-FeSi}_2$ エピタキシャル膜のラマンモードの解明と局所ひずみ評価

$\beta\text{-FeSi}_2$ では、観測されるラマン線のモード同定はなされておらず、 $\beta\text{-FeSi}_2$ のひずみ評価にはその同定が必要である。そこで本研究では、 a 軸配向した $\beta\text{-FeSi}_2(100)/\text{Si}(001)$ エピタキシャル膜において偏光ラマンスペクトルを測定し、ラマン散乱強度の結晶回転角度依存性からラマン線のモード同定を行った。図 1 に示した無偏光で測定したラマンスペクトルでは、約 17 本の $\beta\text{-FeSi}_2$ に起因するラマン線が観測された。全てのラマン線において、散乱強度の回転角度依存性を測定した結果、 $\theta = 0^\circ$ で極小値を示すラマン線 ($193, 200, 248, 400, 494\text{ cm}^{-1}$) と $\theta = 45^\circ$ で極小を示すラマン線 ($175, 276, 284, 299, 326, 410, 441\text{ cm}^{-1}$) の二つのグループに分類可能であった。

β -FeSi₂ のラマンテンソルから得られる散乱強度の θ に対する依存性は、

$$S_{A_g} = A[(c-b)/2] \sin^2 2\theta, \quad S_{B_{3g}} = A(f \cos 2\theta)^2$$

(A は定数, b, c, f はラマンテンソル成分) となる。すなわち A_g -mode と B_{3g} -mode の散乱強度がそれぞれ $\sin 2\theta, \cos 2\theta$ で変化することから、 A_g -mode と B_{3g} -mode が同定された。図 1 中に示した赤と青の矢印は、この結果を示したものである。また、更なる情報としてそれぞれのラマン線がどの分子結合に由来するか検討した。その結果も含め、振動モードの同定に成功した結果を表 1 にまとめた。

次に、格子変形と局所ひずみ変化の相関を明らかにするため、バンド構造変化が確認されている β -FeSi₂(110)(101)/Si(111)エピタキシャル膜でラマンスペクトルを測定した。図 2 に格子定数の変化量とラマンシフトの変化量を示した。これより、格子変形に伴い Fe-Fe 結合は低波数側へシフトし、Fe-Si と Si-Si 結合は高波数側へシフトすることが明らかとなった。これより、局所ひずみが A_g -mode、 B_{3g} -mode といった振動対称性に強く依存せず、Fe 原子と Si 原子で局所ひずみが大きく異なることが明らかとなった。

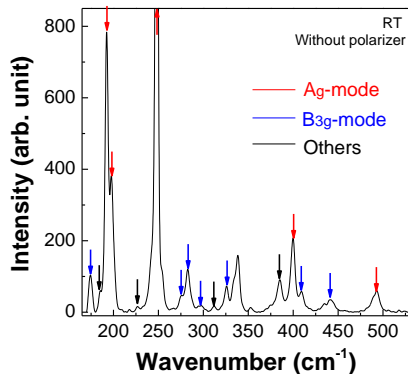


図 1 β -FeSi₂ エピタキシャル膜における無偏光のラマンスペクトル

表 1 ラマンシフト、モード、結合原子の相関

ラマンシフト (cm ⁻¹)	モード	結合原子
194	A _g	Fe – Fe
197		
249		
400		
494		
175	B _{3g}	Fe – Fe
276		
284		
299		Fe(Si) – Si
327		
410		
441		

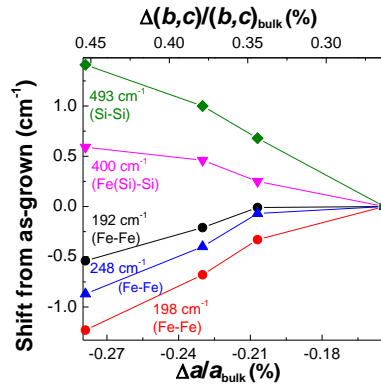


図 2 格子定数変化量とラマンシフト変化量との相関

【成果 2】バンド構造変化の抑制因子の検証

β -FeSi₂ に欠陥や転位が存在する場合、原子配列の乱れが生じ、導入したひずみが緩和されてしまう可能性がある。そこで本研究では、成長温度(T_s)により実効的な Si 供給量を変化させ、Si 組成比の異なる β -FeSi₂ エピタキシャル膜を作製した。そして、PR 測定により直接遷移エネルギー(E_g)を評価することで、Si 欠陥と電子構造変化との相関を検証した。図 3 に直接遷移エネルギーの T_s 依存性を示す。図より T_s の低下に伴い E_g が高エネルギー側へシフトし、400°C 試料では β -FeSi₂ 単結晶とほぼ同じ E_g を示すことが明らかとなった。低温成長では Si 基板からの Si 供給量が減少し、 β -FeSi₂ 中に Si 空孔が形成されやすくなる。よって、膜中の Si 空孔の増加によりひずみが緩和することが明らかとなった。よって、 β -FeSi₂ へのひずみ導入では、精密な組成制御が必要であり特に Si 空孔密度の抑制が重要である指針が得られた。

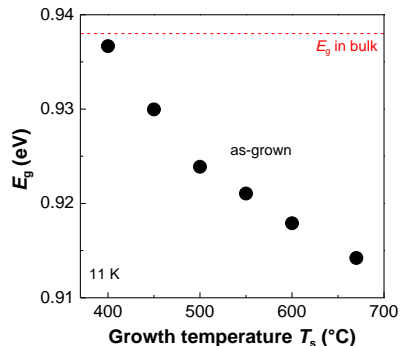


図 3 直接遷移エネルギーの成長温度依存性

【成果 3】SiGe(111)上への β -FeSi₂ エピタキシャル成長の実現

図 4 に β -FeSi₂/Si(111)ヘテロ界面での格子配列と格子不整合 (δ_1) を示す。下地の Si を SiGe にすると、Ge 濃度の増加に伴い δ_1 も増加する。この δ_1 の増加により上部 β -FeSi₂ の格子がひずむが、その際、 b, c 軸よりヤング率の小さい a 軸方向に異方性ひずみが導入されると期待される。これまで β -FeSi₂/Si(111) では、 a 軸の格子定数をバルクより 0.87% 伸張させることに成功している。そのバンド構造変化からの見積もりから、 β -FeSi₂/SiGe(111)

に変更し、a 軸を約 1.13%まで伸張させることで、バンド構造が直接遷移に変化すると見積もられる。また、a 軸を約 1.13%伸張するための SiGe の Ge 濃度は約 10%と算出される。よって、本研究では Ge 濃度 10%を目安として、分子線エピタキシー(MBE)法により SiGe(111)上の β -FeSi₂ エピタキシャル成長を試みた。研究の第 1 段階として、Si(111)上のひずみ緩和 SiGe(111)エピタキシャル膜を作製し、Ge 濃度と格子定数との相関を得た。結果、Ge 濃度は 5-18%でひずみ緩和 SiGe の成長に成功した。その SiGe 上への β -FeSi₂ エピタキシャル成長を行った。図 5 に SiGe 上へエピタキシャル成長させた β -FeSi₂ 表面の RHEED パターンを示す。この結果より、 β -FeSi₂(110)(101)//SiGe(111)のエピタキシャル関係が確認され、格子不整合系の β -FeSi₂/SiGe 成長が可能であることが明らかとなった。

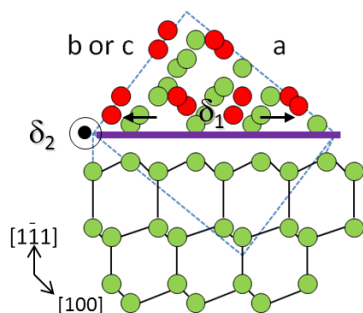


図 4 β -FeSi₂/Si(111)ヘテロ界面での格子配列と格子不整合 (δ_2)

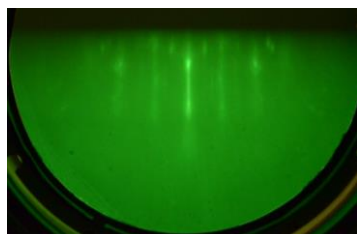


図 5 SiGe 上へエピタキシャル成長させた β -FeSi₂ 表面の RHEED パターン

【成果 4】 Ge 濃度に依存した異方性ひずみ導入量とバンド構造変化の検証

成果 3 より、異方性ひずみの評価では Fe の Ag モードに着目した。 β -FeSi₂/SiGe のラマンスペクトルでは、Ag モードの周波数がわずかに β -FeSi₂/Si よりも低波数側にシフトすることが確認された。これは、Si から SiGe に変更することで、a 軸方向へのひずみが増大した結果と解釈される。次に、バンド構造変化を調査するため β -FeSi₂/SiGe 試料において PR スペクトルを測定した。その結果を図 6 に示す。ここでは詳細な解釈は記載しないが、結論としては Ge 濃度に依存したバンド構造変化がわずかに確認されるものの、Ge 濃度から推定される大きな変化は生じていなかった。そこで、期待したひずみが導入できていない原因について検討した。成果 2 で、 β -FeSi₂ 中の Si 点欠陥や過剰な Si が存在する場合、原子配列の乱れが生じ、導入したひず

みが緩和されてしまうことを明らかにした。そのため、 β -FeSi₂ 成長時の Fe/Si 組成比の精密制御が必要不可欠となる。しかし、 β -FeSi₂/SiGe 試料では、組成比制御が不十分であるためひずみが緩和してしまったと考えられる。

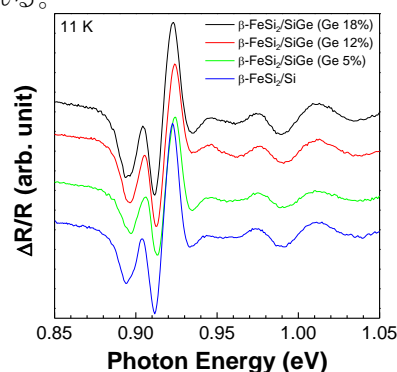


図 6 β -FeSi₂/SiGe の PR スペクトル

【成果 5】 不純物制御した高品質 β -FeSi₂ 多結晶薄膜の作製と、ひずみ量、電気・発光特性、バンド構造の評価

本研究では、スパッタリング法による低残留キャリア濃度 β -FeSi₂ 多結晶薄膜の作製を試みた。エピタキシャル膜の残留キャリア濃度と同程度の多結晶薄膜を作製することで、不純物や欠陥の影響がない状態で、ひずみ効果が検証できると考えられる。 β -FeSi₂ 多結晶薄膜における移動度とキャリア濃度の熱処理時間依存性を図 7 に示す。残留電子濃度が $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 、移動度が $700\text{-}800 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 以上の値を示した。これら多結晶薄膜の電気特性値はエピタキシャル膜とほぼ同じであり、高品質多結晶薄膜の作製に成功した。次に β -FeSi₂ への B 添加により伝導型制御を試みた結果、p 型伝導を発現し、ホール濃度 10^{17} cm^{-3} を得ることに成功した。次に、多結晶薄膜のバンド構造評価を目的に PR 測定を行っ

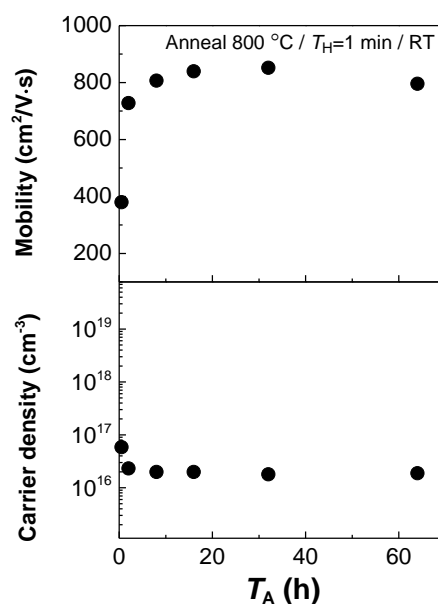


図 7 β -FeSi₂ 多結晶薄膜における移動度とキャリア濃度の熱処理時間依存性

た。PR スペクトルでは周期的な振動成分が観測されており、明らかにバンド構造を反映する低電界領域のスペクトルでないことがわかった。解析の結果、そのスペクトルは中電界領域の Franz-Keldysh oscillations (FKO) であることが判明した。エピタキシャル膜の場合と異なり多結晶薄膜表面では強い電界勾配が存在することが明らかとなった。

最後に β -FeSi₂ 多結晶薄膜の発光特性について調査した。図8にその PL スペクトルを示す。図より B 添加により 1.5 μ m 発光が増大することが明らかとなった。これは、B がアクセプター準位を形成し、その結果ホール補角が生じ、束縛励起子発光が形成されたためと解釈される。このように、多結晶薄膜においても β -FeSi₂ のバンド間遷移による発光が観測可能であることから、作製した高品質多結晶薄膜を用いた光電変換素子開発の可能性が示された。

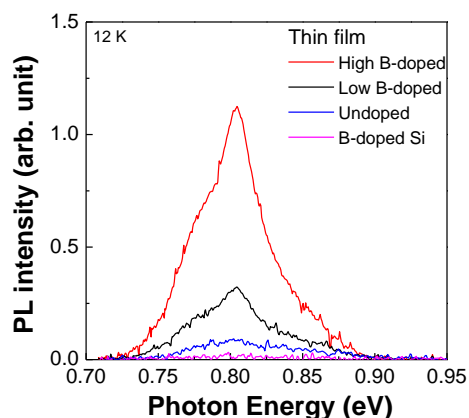


図8 β -FeSi₂ 多結晶薄膜の PL スペクトル

【成果6】Si/ β -FeSi₂/Si ダブルヘテロ構造の作製と、1.5 μ m 発光特性の評価

β -FeSi₂ を用いた発光素子を開発するにあたり、バンド間遷移による真性発光寿命値は必要不可欠である。しかし、これまで報告されている β -FeSi₂ の 1.5 μ m 発光には Si 欠陥由来の発光が混在しており、測定される発光寿命値が β -FeSi₂ のバンド間遷移による真性発光寿命値であるか判断が困難であった。そこで本研究では、 β -FeSi₂ のバンド間遷移発光のみを示す試料を作製し、真性発光寿命を求めた。測定試料にはスパッタリング法により作製した Si(100 nm)/B-doped β -FeSi₂ (20 nm)/Si 基板積層構造を用いた。発光特性を詳細に調べた結果、この積層構造で観測される 1.5 μ m 発光は、 β -FeSi₂ のバンド間遷移発光(A-band, 0.807eV)のみ由来し、Si 欠陥発光である D1-line(約 0.81 eV)は含まれないことが明らかとなった。この積層構造の発光スペクトルを図9の内挿図に示す。その A-band (0.807 eV)発光強度の減衰曲線を図9に示す。指数関数を用いたフィッティングの結果(図中の実線), $\tau_1 = 10$ ns, $\tau_2 = 150$ ns の短い発光寿命のみ存在することが明らかとなった。イオンビーム合成法(IBS)で作製した β -FeSi₂ では、 τ_1

= 70 ns, $\tau_2 = 670$ ns, $\tau_3 = 4.5$ μ s の発光寿命が得られており、長い寿命の τ_3 は D1-line に起因すると報告してきた。図ではこの長い寿命は観測されず、多結晶積層構造が A-band 発光のみを示すという従来報告を支持する結果となった。よって、 β -FeSi₂ の A-band の発光寿命は、従来報告値より若干短い $\tau_1 = 10$ ns, $\tau_2 = 150$ ns が真性値であると考えられる。

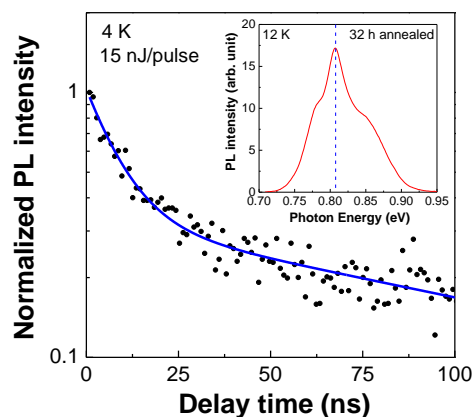


図9 多結晶積層構造における発光強度の減衰曲線(内挿図は発光スペクトル)

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8件)

1. "Dependence of direct transition energy on growth temperature in β -FeSi₂ epitaxial films", Motoki Inuma, Hiroaki Tsukamoto, Naoki Murakoso, Haruki Yamaguchi and Yoshikazu Terai, Japanese Journal of Applied Physics : Conference Proceedings, 5 (2017) pp.011106/1-5. (査読あり)
(<https://doi.org/10.7567/JJAPCP.5.011106>)
2. "Growth of p-type β -FeSi₂ polycrystalline films by RF magnetron sputtering", Shuya Ikeda, Kazuya Ogi, Tetsu Hattori, Takahiko Higashi, and Yoshikazu Terai, Japanese Journal of Applied Physics : Conference Proceedings, 5 (2017) pp.011204/1-4. (査読あり)
(<https://doi.org/10.7567/JJAPCP.5.011204>)
3. "Ion Channeling Measurements of β -FeSi₂ Films Epitaxially Grown on Si(111) and Their Analysis by Multiple Scattering Theory", Masaya Fuchi, Mikihiro Arima, Kazumasa Narumi, Yoshikazu Terai, and Yoshihito Maeda, Japanese Journal of Applied Physics : Conference Proceedings, 5 (2017) pp.011104/1-4. (査読あり)
(<https://doi.org/10.7567/JJAPCP.5.011104>)
4. "A room-temperature-operated Si LED with β -FeSi₂ nanocrystals in the active layer: μ W emission power at 1.5 μ m", A. V. Shevlyagin, D. L. Goroshko, E. A. Chusovitin, S. A. Balagan, S. A. Dotcenko, K. N. Galkin, N. G. Galkin, T. S. Shamirzaev, A. K. Gutakovskii, A. V. Latyshev, M. Inuma, and Y. Terai, Journal of Applied Physics, 121, (2017) pp. 113101/1-9. (査読あり)
(<http://dx.doi.org/10.1063/1.4978372>)

5. “Structural and electrical properties of β -FeSi₂ polycrystalline films with low electron density”, [Yoshikazu Terai](#), Takahiko Higashi, Tetsu Hattori, Kazuya Ogi, and Shuya Ikeda, Japanese Journal of Applied Physics, 56 (2017) pp.05DD03/1-5. (査読あり)
(<https://doi.org/10.7567/JJAP.56.05DD03>)
6. “Polarized Raman spectra of BaSi₂ epitaxial film grown by molecular beam epitaxy”, [Yoshikazu Terai](#), Haruki Yamaguchi, Hiroaki Tsukamoto, Naoki Murakoso, Motoki Inuma, and Takashi Suemasu, Japanese Journal of Applied Physics, 56 (2017) pp.05DD02/1-4. (査読あり)
(<https://doi.org/10.7567/JJAP.56.05DD02>)
7. “Effects of lattice deformations on Raman spectra in β -FeSi₂ epitaxial films”, [Yoshikazu Terai](#), Haruki Yamaguchi, Hiroaki Tsukamoto, Tetsu Hattori, and Takahiko Higashi, Japanese Journal of Applied Physics : Conference Proceedings, 3 (2015) pp.011109/1-5. (査読あり)
(<https://doi.org/10.7567/JJAPCP.3.011109>)
8. “Time-resolved photoluminescence properties of ion-beam-synthesized β -FeSi₂ and Si-implanted Si”, [Yoshikazu TERAJ](#) and Yoshihito MAEDA, Japanese Journal of Applied Physics, 54 (2015) pp.07JB05/1-5. (査読あり)
(<http://dx.doi.org/10.7567/JJAP.54.07JB05>)

[学会発表] (計 4 5 件)

1. “Si/ β -FeSi₂/Si 多結晶積層構造における 1.5 μ m 発光の寿命評価”, 池田 修哉, 瀬戸島 健太, 扇 和也, 岡 直大, [寺井 慶和](#), 2017 年 第 64 回応用物理学会春季学術講演会、パシフィコ横浜 (神奈川県横浜市)、2017 年 3 月 16 日
2. “Sb ドーピングによる β -FeSi₂ エピタキシャル膜の電子密度制御”, 飯沼元輝, 江口 元, 村社尚紀, 星田裕文, [寺井慶和](#), 2017 年 第 64 回応用物理学会春季学術講演会、パシフィコ横浜 (神奈川県横浜市)、2017 年 3 月 16 日
3. “表面損傷を与えた Si 基板における Si 欠陥発光の寿命評価”, 扇 和也, 岡 直大, 池田修哉, 瀬戸島健太, [寺井慶和](#), 2017 年 第 64 回応用物理学会春季学術講演会、パシフィコ横浜 (神奈川県横浜市)、2017 年 3 月 16 日
4. “BaSi₂ エピタキシャル膜における近赤外欠陥発光の評価”, 村社尚紀, 星田裕文, 飯沼元輝, 江口 元, 末益 崇, [寺井慶和](#), 2017 年 第 64 回応用物理学会春季学術講演会、パシフィコ横浜 (神奈川県横浜市)、2017 年 3 月 16 日
5. “Si/ β -FeSi₂/Si 多結晶積層構造における発光スペクトル評価”, 池田 修哉, 扇 和也, 飯沼 元輝, 村社 尚紀, [寺井 慶和](#), 2016 年応用物理学会九州支部学術講演会、対馬交流センター (長崎県対馬市)、2016 年 12 月 3 日
6. “ β -FeSi₂ エピタキシャル膜での直接遷移エネルギーと電気特性の相関”, 飯沼元輝, 村社尚紀, 池田修哉, 扇 和也, [寺井慶和](#), 2016 年 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会、朱鷺メッセ (新潟県新潟市)、2016 年 9 月 15 日
7. “低残留電子密度 β -FeSi₂/Si 多結晶薄膜における光変調反射率スペクトル”, 扇 和也, 池田修哉, 飯沼元輝, 村社尚紀, [寺井](#)

[慶和](#), 2016 年 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会、朱鷺メッセ (新潟県新潟市)、2016 年 9 月 15 日

8. “スパッタリング法により作製した β -FeSi₂ 多結晶薄膜の PL スペクトル”, 池田修哉, 扇 和也, 飯沼元輝, 村社尚紀, [寺井慶和](#), 2016 年 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会、朱鷺メッセ (新潟県新潟市)、2016 年 9 月 15 日
9. “イオン多重散乱による MBE- β -FeSi₂/Si ヘテロエピタキシーの評価”, 淵 雅也, 有馬 幹尋, [寺井 慶和](#), 鳴海 一雅, 前田 佳均, 2016 年 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会、朱鷺メッセ (新潟県新潟市)、2016 年 9 月 15 日
10. “偏光ラマンスペクトル測定による BaSi₂ の分子振動モード解析 (II)”, 村社尚紀, 飯沼元輝, 末益 崇, [寺井慶和](#), 2016 年 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会、朱鷺メッセ (新潟県新潟市)、2016 年 9 月 15 日
11. “Dependence of Direct Transition Energies on Growth Temperature in β -FeSi₂ Epitaxial Films”, Motoki Inuma, Hiroaki Tsukamoto, Naoki Murakoso, Haruki Yamaguchi and [Yoshikazu Terai](#), Asia-Pacific Conference on Green Technology with Silicides and Related Materials (APAC-SILICIDE 2016), July 16, 2016, Fukuoka (Japan).
12. “Structural and electrical properties of β -FeSi₂ polycrystalline films with low electron density”, Kazuya Ogi, Takahiko Higashi, Shuya Ikeda, Tetsu Hattori and [Yoshikazu Terai](#), Asia-Pacific Conference on Green Technology with Silicides and Related Materials (APAC-SILICIDE 2016), July 16, 2016, Fukuoka (Japan).
13. “Growth of p-type β -FeSi₂ Polycrystalline Films by RF Magnetron Sputtering”, Shuya Ikeda, Kazuya Ogi, Tetsu Hattori, Takahiko Higashi and [Yoshikazu Terai](#), Asia-Pacific Conference on Green Technology with Silicides and Related Materials (APAC-SILICIDE 2016), July 16, 2016, Fukuoka (Japan).
14. “Ion Channeling Measurements of β -FeSi₂ Films Epitaxially Grown on Si(111) and Their Analysis by Multiple Scattering Theory”, Masaya Fuchi, Mikihiro Arima, Kazumasa Narumi, [Yoshikazu Terai](#), and Yoshihito Maeda, Asia-Pacific Conference on Green Technology with Silicides and Related Materials (APAC-SILICIDE 2016), July 16, 2016, Fukuoka (Japan).

(他、31 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

[寺井 慶和](#) (TERAI Yoshikazu)

九州工業大学・大学院情報工学研究院・教授
研究者番号：90360049