

機関番号：14301

研究種目：基盤研究 (B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20360009

研究課題名 (和文) マグネトフォトン結晶の作製と光制御機能の検証

研究課題名 (英文) Fabrication of magneto-photonic crystals and study of their optical functions

研究代表者

前田 佳均 (MAEDA YOSHIHITO)

京都大学・エネルギー科学研究科・准教授

研究者番号：50275286

研究成果の概要 (和文)：

フォトン結晶の機能発展の形態として、磁気光学効果による光波制御を可能にするマグネトフォトン結晶の作製と機能を検証することを目的として、 Fe_3Si をはじめとするホイスラー合金薄膜の作製と評価、セルフリフトオフ・プロセスによる磁気格子の作製、磁気光学特性の評価を行い、 Fe_3Si マグネトフォトン結晶と半導体鉄シリサイド・フォトン結晶を組み合わせることで、赤外導波光の外部磁場変調を実験的に確認することができた。

研究成果の概要 (英文)：

In order to develop advanced photonic crystals which function can be controlled by an external magnetic field, magneto-photonic crystals based on magneto-optical effects were investigated. This study reported deposition and evaluation of some Heusler alloy films commencing with Fe_3Si , fabrication of submicron magnetic lattices by a self lift-off process, magneto-optical properties, and confirmation of magnetic modulation of infrared light propagating along waveguide of semiconductor iron silicides.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	8,400,000	2,520,000	10,920,000
2009年度	3,800,000	1,140,000	4,940,000
2010年度	2,200,000	660,000	2,860,000
総計	14,400,000	4,320,000	1,8720,000

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：強磁性薄膜，ホイスラー合金，磁気光学特性，イオンチャネリング，フォトン結晶，光変調

1. 研究開始当初の背景

我々はフォトンと LSI との融合を念頭にした基盤研究 (B) 課題「フォトン結晶用シリサイド半導体薄膜の作製と光回路機能の検証 (研究代表者：前田佳均，H17～19 年)」において、フォトン結晶作製に必要な高品質な鉄シリサイド薄膜の作製とそのサブミクロンプロセスの研究を進めてきた。この研究の大きな成果は、LSI など Si プロセスと整合した鉄シリサイド薄膜のド

ライプロセスを開発して、高屈折率 $\beta\text{-FeSi}_2$ を利用したシリサイド半導体フォトン結晶の作製に世界で初めて成功したことがある。半導体上での Fe_3Si エピタキシャル成長技術と Fe-Si 系シリサイド・フォトン結晶および磁気光学回折格子を学術的・技術的に融合すれば、非磁性媒体の誘電率テンソルの対角成分の周期性への電磁波の光学分散・バンド構造のみを利用した従来のフォトン結晶に、磁性媒体の誘電率テンソルの

非対角成分への光学活性として発現する磁気光学効果も併せ持った新しいフォトニック結晶：マグネトフォトニック結晶を創出することが可能になり、あたらしい光波変調素子への発展が期待できる。

2. 研究の目的

一般的なスラブ型フォトニック結晶面内導波路での電磁波の導波モードを主に利用するフォトニック結晶では、縦・横磁気光学カー効果またはファラデー効果が導波光の変調メカニズムとして有望であると考えられる。本研究の目的は、これまで開発した技術を融合して、フォトニック結晶の機能発展の形態として、磁気光学効果による光波制御を可能にするマグネトフォトニック結晶を作製、その原理を検証することである。

3. 研究の方法

(1) 薄膜試料の作製

ホイスラー合金薄膜の作製には分子線エピタキシャル法を用いた。基板は Ge(111)を用いて、基板温度 200~300°C 以下で Fe₃Si など鉄系ホイスラー合金を 50~100nm の膜厚で形成した。

(2) 格子パターン作製

鉄磁性体合金の格子パターン作製のために考案したセルフリフトオフ・プロセスを図 1 に示す。このプロセスは、鉄を高濃度 (50at% 以上) 含む Fe₃Si など鉄系ホイスラー合金では反応性イオンエッチングが難しく、このことが微細パターン形成を阻んでいた。本研究で考案したセルフリフトオフ・プロセスは、SF₆ エッチングガスによる反応性イオンエッチングでは、Fe₃Si など鉄系ホイスラー合金のエッチング速度が Si に比べて桁違いに小さい事実を逆に利用するプロセスである。図 1 に示したように、このプロセスは Si テンプレートパターン形成 (a)~(c)、パターンへの合金薄膜のイオンビームスパッター成膜 (d)、Si 部分の反応性イオンエッチング (e)~(f) に分かれている。(d) ではパターンへの薄膜の埋め込みの程度が重要であり、本研究ではビーム指向性の良好なイオンビームスパッター成膜法と基板回転など駆動系を用いている。

(3) 薄膜の評価

磁性体合金薄膜の結晶性の評価には、X 線回折 (XRD)、X 線ロックアップカーブ (XRC)、電子顕微鏡観察、ラザフォード後方散乱分光による組成分析および高速イオンチャネリング測定によって結晶軸配向性について厳密に測定した。イオン散乱実験は日本原子力機構・高質量量子応用研究所の静電加速器のビームライン (SC1 と MD2) を用いた。

磁気光学特性については磁気光学測定装置 (図 2) を作製し、それによって、鉄系ホ

イスラー合金エピタキシャル膜の面内磁化分布、磁化、磁気光学カー効果を評価した。この磁気光学装置には、光弾性変調器で入射光の偏向状態を変調し、試料表面の反射光の偏向状態を高精度に検出できる。また、試料を走査できるようにしているために、磁気光学効果の面内分布を測定できるようにしている。また、電磁石は横・縦マウントができるようにして、縦および横磁気光学カー効果を測定できる。

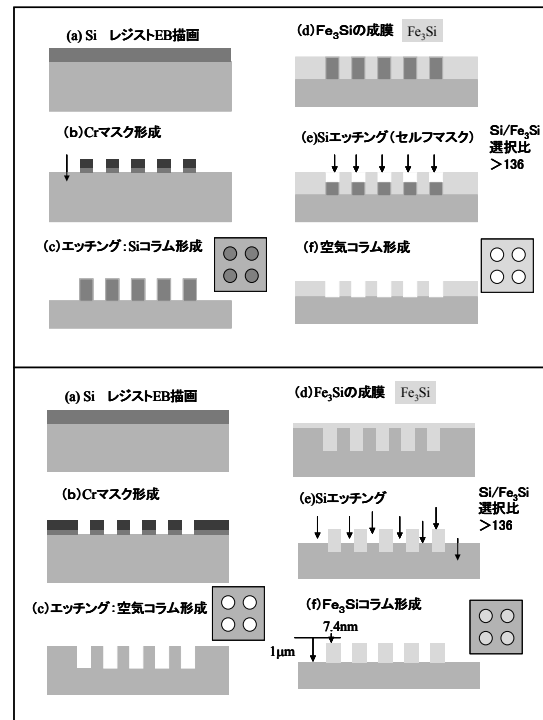


図 1 セルフリフトオフ・プロセスによる磁性体 (Fe₃Si) 中の空気コラム格子 (上)、磁性体コラム (下) の作製プロセスの説明。

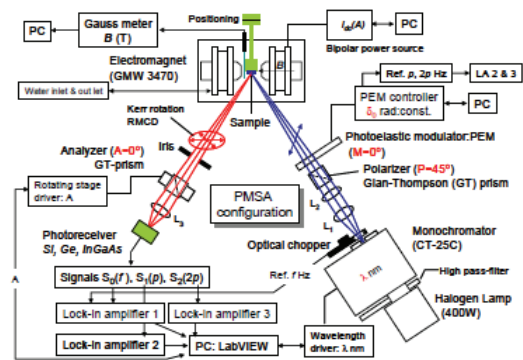


図 2 作製した磁気光学測定装置の縦カー効果測定構成。

4. 研究成果

(1) 格子の設計

フォトニック結晶の設計に時間領域有限差分法 (FDTD) を基盤とした電磁波解析プログラムを拡張して強磁性体周期構造: マグネトフォトニック結晶での磁気光学効果の影響を基本的なアプローチとして誘電率テンソルの非対角項としてMaster方程式に取り入れて計算することを可能にした. 赤外線領域での磁気光学効果の大きさと極大について評価と設計ができるようになり, 格子定数やコラム径などマグネトフォトニック結晶格子の作製に適用した.

(2) ホイスラー合金薄膜の結晶性評価

Ge基板上に成膜した高配向成長したFe₃Si薄膜および最近エピ成膜が可能になったFe₂(MnSi)薄膜の磁気異方性の評価に重要なラザフォード後方散乱によるイオンチャネリング測定を行い, 結晶軸配向性の高精度測定に成功した (図3). 特に三元系ホイスラー合金Fe₂(MnSi)エピ薄膜では, Mn組成によって軸配向性が界面での格子ひずみによって劣化するが, 薄膜内部では緩和され磁気光学特性には影響が少なくなることを見出した. このことから電子構造・スピン偏極度が磁気光学特性発現にはFe₃SiとともにFe₂MnSi薄膜が優位であり, そのためにマグネトフォトニック結晶用薄膜に有望であることが分かった.

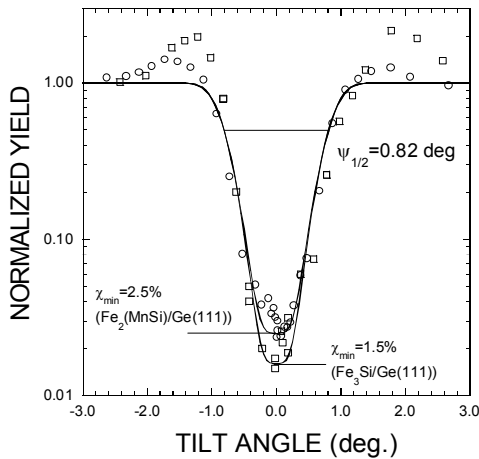


図3 Ge(111)基板上にエピタキシャル成長したFe₂(MnSi)とFe₃Si薄膜の<111>軸のチャネルディップ曲線. いずれの結晶も<111>軸向性は良好 (臨界角 $\Psi_{1/2}$ が大きく) であり, 軸方向の原子の並びに乱れが少ない (χ_{\min} が小さい) ことが分かる.

(3) 誘電率テンソルの測定

マグネトフォトニック結晶での磁気光学効果に重要な物性である誘電率テンソルの非対角成分を決定するために, 強磁性体

Fe₃Si薄膜の横磁気光学カー効果測定 (図4) と対角成分を決定する分光エリプソメータを併用して, Ge上に完全エピ成長したFe₃Si薄膜の誘電率テンソルの対角成分および非対角成分を近赤外から紫外線波長領域で測定した. その結果, 誘電率テンソルは従来の多結晶薄膜の報告値とは大きく異なり, これはエピ薄膜の優れた軸配向性に起因した大きな磁気異方性に関係していると考えられる.

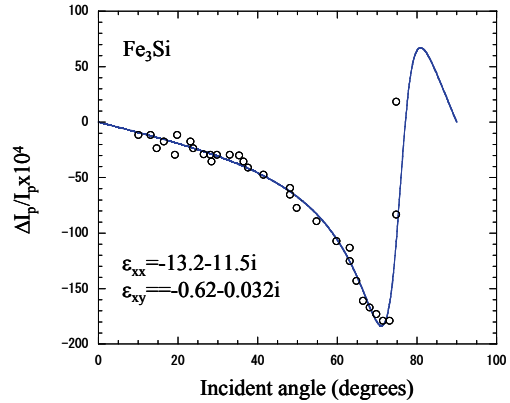


図4 Fe₃Si薄膜の横磁気光学カー効果によるp偏反射強度の変化 ($\Delta I_p / I_p$) の入射角依存性. 実線: 測定点を理論式に回帰した曲線.

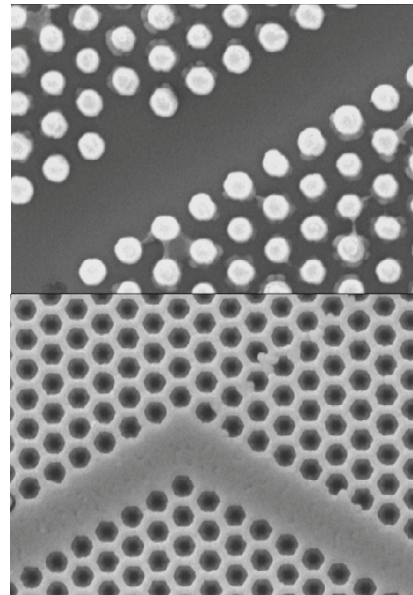


図5 セルフリフトオフ・プロセスで作製した三角格子の磁性体コラム (上) と空気コラム (下) をもつマグネトフォトニック結晶の走査電子顕微鏡像.

(4) マグネトフォトニック結晶の作製

セルフリフトオフ・プロセス(図1)を用いてマグネトフォトニック結晶を作製した。図5にSi(100)基板上に作製した三角格子の強磁性体 Fe_3Si のコラム(上)と強磁性体 Fe_3Si 中の空気コラム(下)をもつマグネトフォトニック結晶の走査電子顕微鏡像を示す。中央の三角格子パターンのないところは光導波路や半導体フォトニック結晶中の光導波路とのエバネッセント結合に使用する部分である。セルフリフトオフ・プロセス(反応性イオンエッチングやイオンビームスパッタリング成膜条件)の最適化によって、導波光などへの磁気光学効果の基礎実験ができる構造欠陥の少ない磁気格子パターンを作製できた。

(5) 磁気格子の磁気光学特性

三角格子の空気コラム(図5下図)をもつ Fe_3Si マグネトフォトニック結晶の縦磁気光学カー回転角のスペクトル(印加磁場: 200G)を図6に示す。比較のためにパターンのない Fe_3Si 薄膜のスペクトルも示している。単なる薄膜では現れないが、1.5eV以下の光に対して顕著な振動的変化が三角格子の空気コラムをもつマグネトフォトニック結晶には特徴的に現れることが分かった。

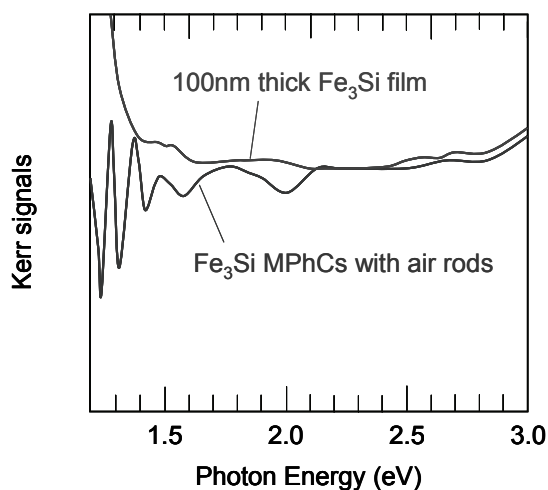


図6 空気コラムをもつ Fe_3Si 三角格子と Fe_3Si 薄膜の縦磁気光学カー回転角(相対値)のスペクトル(印加磁場: 200G)。負の値でグラフでは下方が大きい回転角を示す。

(6) 光変調の基礎実験

図7上に光変調の基礎実験の光学系の概略を示す。InGaAs半導体レーザを光源にして、光ファイバーを通じて $\beta\text{-FeSi}_2$ フォトニック結晶内に形成した光導波路を伝播するTEM擬似モードの伝播特性を測定した。光

検出には検光子と高感度InGaAs半導体検出を用いた。測定試料は、空気コラムをもつ三角格子パターン(図5下)のマグネトフォトニック結晶と SiO_2 /三角格子 $\beta\text{-FeSi}_2$ /Si基板からなるスラブ型フォトニック結晶の導波路をエバネッセント結合させるために対面配置させた構造を持つ。図7下に示すように1.5 μm 波長の連続光伝搬変調の原理実験を行った。10と100mTの交流外部磁場を面内印加して光強度を外部磁場の変化に対応して測定したところ、100mTでは明らかな磁場による偏光状態の変化と光伝搬強度の変調を観察し、スラブ型フォトニック結晶の導波路を伝搬する光変調を確認することができた。対照実験として格子パターンをもたない磁性薄膜を用いた場合は、明らかな光変調は確認できなかった。

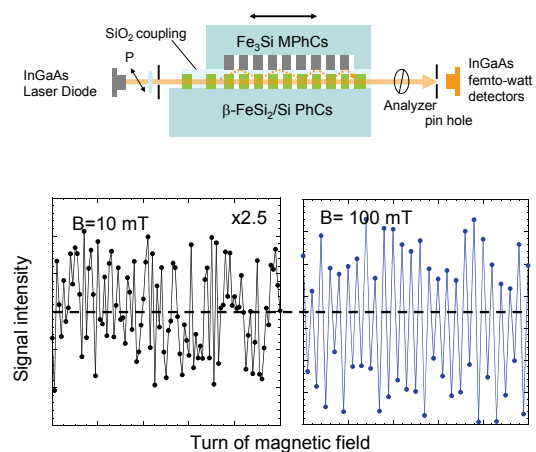


図7 光変調の基礎実験の光学系の概略(上)と外部磁場印加(矢印)による光強度の変調(下)。

【研究の位置づけ】

ホイスラー合金薄膜の微細格子パターンをもつマグネトフォトニック結晶の作製とその特性評価は初めての成果である。さらに、光素子への応用を目指した磁気光学効果に光変調の実験は、面内での光波制御の1つの可能性を拓いた結果としてフォトニック結晶工学にとって大きな意義がある。

【今後の展望】

代表的なホイスラー合金薄膜で光変調機能をもつマグネトフォトニック結晶を行った。この研究成果・方法・考え方は、用途と機能によって広い材料に適用可能である。材料を含め、今後のシリコンベース・フォトニクスの変調素子を目指して、さらに進展させたい。

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 Y. Maeda, K. Narumi, S. Sakai, Y. Terai, K. Hamaya, T. Sadoh, and M. Miyao, Ion channeling study of iron based Heusler alloy epitaxial films on Ge(111), 査読有, Thin Solid Films, Vol. 519, 印刷中, DOI:10.1016/j.tsf.2011.05.024
- ② Y. Maeda, K. Narumi, Y. Terai, T. Sadoh, and M. Miyao, Low temperature ion channeling of Fe₂MnSi film epitaxially grown on Ge(111), 査読有, JAEA-Review, Vol. 2010-065, 2011, p.141.
- ③ Y. Maeda, T. Ikeda, T. Ichikawa, T. Nakajima, B. Matsukura, T. Sadoh, and M. Miyao, Magneto-optical properties of iron based Heusler alloy epitaxial films on Ge(111), 査読有, Physics Procedia, Vol. 11, 2011, pp.200-203.
- ④ Y. Maeda, T. Nakajima, B. Matsukura, T. Ikeda, and Y. Hiraiwa, Phonon properties of β -FeSi₂ and photoluminescence, 査読有, Physics Procedia, Vol. 11, 2011, pp.167-200.
- ⑤ Y. Maeda, T. Ichikawa, T. Jonishi, and M. Narumi, Determination of silicon vacancy in ion-beam synthesized β -FeSi₂, 査読有, Physics Procedia, Vol. 11, 2011, pp.83-86.
- ⑥ Y. Maeda, Iron silicide photonic crystals and light propagation property, 査読有, Physics Procedia, Vol. 11, 2011, pp.79-82.
- ⑦ 中島孝仁, 松倉武偉, 鳴海一雅, 前田佳均, イオンチャネリングによるホイスラー合金 Fe_{3-x}Mn_xSi(111)/Ge(111)ヘテロエピタキシャル界面の軸配向性の評価, 電子情報通信学会技術報告SDM2010-187, 査読無, 110巻, 2010, pp.13-17.
- ⑧ 前田佳均, 鉄シリサイドの光学応用, 査読有, 応用物理, 79巻, 2010, pp.135-139.
- ⑨ Y. Maeda and Y. Terai, Fabrication of iron silicide photonic crystals and properties of light propagation, 査読有, Compound Semiconductor Photonics Materials, Devices, and Integration, Pan World Publishing, 2010, pp.170-172.
- ⑩ Y. Maeda, Y. Hiraiwa, K. Narumi, A. Kawasuso, Y. Terai, Y. Ando, K. Ueda, T. Sadoh, K. Hamaya, M. Miyao, Site preference of atoms in Heusler alloys

Fe₃Si and Fe₂MnSi grown on Ge(111) toward realization of Ge channel spin transistors, Materials Research Society Proceedings, 査読有, 1119E, 2009, pp.1119-L05-02-07.

- ⑪ 平岩佑介, 安藤裕一郎, 鳴海一雅, 上田公二, 佐道泰造, 宮尾正信, 前田佳均, Fe₃Si/Ge(111)ヘテロエピタキシャル界面における相互拡散挙動, 査読なし, 応用物理学会シリサイド系半導体と関連物質研究会・第11回シリサイド系半導体夏の学校テキスト, 2008, pp.41-43.

[学会発表] (計 20 件)

- ① 松倉武偉, 鳴海一雅, 境 誠司, 浜屋宏平, 宮尾正信, 前田佳均, イオンチャネリングによる Fe₂CoSi, Co₂FeSi/Geヘテロ界面の評価, 第58回応用物理学会関係連合講演会, 2011年3月26日, 神奈川工科大学.
- ② 中島孝仁, 市川貴之, 松倉武偉, 前田佳均, β -FeSi₂ナノ結晶の発光特性の解析, 第58回応用物理学会関係連合講演会, 2011年3月26日, 神奈川工科大学.
- ③ 中島孝仁, 松倉武偉, 鳴海一雅, 前田佳均, イオンチャネリングによるホイスラー合金 Fe_{3-x}Mn_xSi(111)/Ge(111)ヘテロエピタキシャル界面の軸配向性の評価, IEICE 電子情報通信学会シリコン材料・デバイス(SDM)研究会, 2010年12月17日, 京都大学・桂キャンパス.
- ④ 松倉武偉, 前田佳均, 鳴海一雅, 寺井慶和, 佐道泰造, 宮尾正信, 低温イオン散乱によるスピン偏極ホイスラー合金/半導体界面の評価, 日本原子力研究開発機構・第5回高崎量子応用研究シンポジウム, 2010年10月14日, 高崎シティーギャラリー.
- ⑤ 松倉武偉, 市川貴之, 中島孝仁, K. P. Homewood, 前田佳均, Coドーピング β -FeSi₂のイオンビーム合成とフォノン特性, 第71回応用物理学会学術講演会, 2010年9月17日, 長崎大学.
- ⑥ 松倉武偉, 前田佳均, 鳴海一雅, 寺井慶和, 佐道泰造, 宮尾正信, 低温イオンチャネリングによる Fe₂MnSi, Fe₂CoSi エピタキシャル薄膜の評価, 第71回応用物理学会学術講演会, 2010年9月17日, 長崎大学.
- ⑦ Y. Maeda, Iron Silicide for Optoelectronics, International W&E Heraeus Summer School on Sustainable Electronic Materials, (招待講演), Aug. 3, 2010, German Physics Center, Bad Honnef, Germany.
- ⑧ Y. Maeda, Iron Silicide Studies towards Photonics, Asia-Pacific Conference on Semiconducting

- Silicides Science and Technology Towards Sustainable Optoelectronics (APAC-SILICIDE 2010) July 25, 2010, EPOCAL TSUKUBA.
- ⑨ Y. Maeda, T. Ikeda, T. Ichikawa, T. Nakajima, B. Matsukura, T. Sadoh, and M. Miyao, Magneto-optical Properties of Epitaxial Film of Iron Based Heusler Alloys, Asia-Pacific Conference on Semiconducting Silicides Science and Technology Towards Sustainable Optoelectronics (APAC-SILICIDE 2010) July 25, 2010, EPOCAL TSUKUBA.
- ⑩ B. Matsukura, T. Ikeda, K. Narumi, Y. Terai, K. Hamaya, T. Sadoh, M. Miyao, and Y. Maeda, Ion Channeling Study of Epitaxy of Iron Based Heusler Alloy Films on Ge(111), Asia-Pacific Conference on Semiconducting Silicides Science and Technology Towards Sustainable Optoelectronics (APAC-SILICIDE 2010) July 25, 2010, EPOCAL TSUKUBA.
- ⑪ T. Nakajima, B. Matsukura, T. Ikeda, Y. Hiraiwa, and Y. Maeda, Phonon Properties of β -FeSi₂ and Their Correlation with Photoluminescence Properties, Asia-Pacific Conference on Semiconducting Silicides Science and Technology Towards Sustainable Optoelectronics (APAC-SILICIDE 2010) July 24, 2010, EPOCAL TSUKUBA.
- ⑫ Y. Maeda, T. Ichikawa, T. Jonishi, and M. Narumi, Determination of Silicon Vacancy in Ion-Beam Synthesized β -FeSi₂, Asia-Pacific Conference on Semiconducting Silicides Science and Technology Towards Sustainable Optoelectronics (APAC-SILICIDE 2010) July 24, 2010, EPOCAL TSUKUBA.
- ⑬ Y. Maeda, Iron Silicide Photonic Crystals and Properties of Light Propagation, Asia-Pacific Conference on Semiconducting Silicides Science and Technology Towards Sustainable Optoelectronics (APAC-SILICIDE 2010) July 24, 2010, EPOCAL TSUKUBA.
- ⑭ 前田佳均, 平岩佑介, 安藤裕一郎, 上田公二, 鳴海一雅, 浜屋宏平, 宮尾正信, 第 69 回応用物理学会学術講演会, 2008 年 9 月 4 日, 中部大学.
- ⑮ 前田佳均, 鉄シリサイドのフォトニックデバイスへの展開, 第 69 回応用物理学会学術講演会・シンポジウム講演 (招待講演), 2008 年 9 月 4 日, 中部大学.
- ⑯ Y. Maeda and Y. Terai, Fabrication of iron silicide photonic crystals and properties of light propagation, International Conference on Materials for Advanced Technologies 2009 (ICMAT 2009), IUMRS-ICA 2009, 28 June-3 July, Singapore.
- ⑰ 前田佳均, 半導体・強磁性体シリサイドの光・スピンデバイス応用の可能性, 第 14 回応用物理学会シリサイド系半導体と関連物質研究会講演会, 招待講演, 2009 年 9 月 12 日, 富山県総合福祉会館 (富山市).
- ⑱ 池田達也, 市川貴之, 前田佳均, 鉄シリサイド・ホイスラー合金エピ薄膜の磁気光学特性, 第 37 回応用物理学関係連合講演会, 2009 年 3 月 19 日, 東海大学.
- ⑲ Y. Maeda, Y. Hiraiwa, K. Narumi, A. Kawasuso, Y. Terai, Y. Ando, K. Ueda, T. Sadoh, K. Hamaya, M. Miyao, Site preference of atoms in Heusler alloys Fe₃Si and Fe₂MnSi grown on Ge(111) toward realization of Ge channel spin transistors, Materials Research Society (MRS) Fall Meeting 2008, December 3, 2008, Boston, USA.
- ⑳ Y. Hiraiwa, Y. Ando, K. Narumi, K. Ueda, T. Sadoh, M. Miyao, Y. Maeda, Ferromagnetic FeGe/FeSi layered structures formed by interdiffusion in Fe₃Si/Ge hybrid structures, The IUMRS International Conference in Asia : IUMRS-ICA 2008, December 9, 2008, Nagoya.

[その他]

ホームページ等

<http://www004.upp.so-net.ne.jp/silicide/index.htm>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

前田 佳均 (MAEDA YOSHIHITO)

京都大学・エネルギー科学研究科・准教授

研究者番号 : 50275286