

科学研究費補助金研究成果報告書

平成24年 6月 1日現在

機関番号：12605

研究種目：特定領域研究

研究期間：2007 ～ 2010

課題番号：19048017

研究課題名（和文） 光スピントロニクス機能デバイスの研究

研究課題名（英文） Research on Opto-Spintronic Functional Devices

研究代表者 清水 大雅

(SHIMIZU HIROMASA)

東京農工大学・大学院工学研究院・特任准教授

研究者番号：50345170

研究成果の概要（和文）： 半導体光アイソレータをベースとして新しい磁気光学材料、及び、増幅性の光アイソレータの研究を行った。エピタキシャル強磁性金属 MnSb を用いて半導体光アイソレータを作製し、12.3 dB/mm の消光比と 70°C までの高温動作を実現した。また、新規強磁性材料(TiO₂:Co と PrCoB)の磁気光学性能を評価した。さらに、増幅性の半導体光アイソレータを実現した。本研究成果は半導体レーザと集積化が可能な光アイソレータや光情報信号処理への応用に有用である。

研究成果の概要（英文）： We have done research on novel magneto-optic materials and amplifying optical isolators, based on conventional semiconductor optical isolators. We have developed semiconductor optical isolators using epitaxial ferromagnetic metal MnSb and realized an extinction ratio of 12.3 dB/mm and optical isolator operation at 70°C. Magneto-optic figure of merit of novel magneto-optic materials (TiO₂:Co and PrCoB) was investigated. Furthermore, we have realized amplifying semiconductor optical isolators. These research results are useful for optical isolators integrated with semiconductor lasers and their application to optical information signal processing.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	7,600,000	0	7,600,000
2008年度	9,600,000	0	9,600,000
2009年度	9,600,000	0	9,600,000
2010年度	7,600,000	0	7,600,000
年度			
総計	34,400,000	0	34,400,000

研究分野：スピントロニクス、光エレクトロニクス

科研費の分科・細目：電気電子工学 電子デバイス・電子機器

キーワード：強磁性金属、光アイソレータ、磁気光学効果

1. 研究開始当初の背景

半導体、及び、金属をベースにした新しい研究領域である「スピントロニクス」分野において、スピン流という概念の重要性が指摘されるようになった。スピントロニクスは広義では半導体、金属、あるいはそれらの複合

構造において、従来にはない新規の物理現象の研究、デバイス応用の実現を目指す研究分野として国内・国外で認識されるようになっていく。本研究者はこれまで、半導体光増幅器・強磁性金属複合構造において、従来とは動作原理を異にする光アイソレータの実証

に世界で初めて成功した。これまでの研究で、半導体レーザとの一体集積化の初期実証に成功している。本研究は光半導体が発光、光導波・増幅機能と、強磁性金属が有する非相反性・不揮発性を組み合わせた「スピントロニクス」の応用研究の一つとして位置づけられる。

2. 研究の目的

これまでの研究により、光半導体量子ナノヘテロ構造と強磁性金属の一体化について大きな知見を得た。本研究では特定領域研究「スピン流の創出と制御」の研究項目 A05「スピン流と機能・制御」の計画研究課題として「光スピントロニクス機能デバイスの研究」をかかげる。磁気トンネル接合等の磁気抵抗効果を用いた電子デバイスへの応用と比べて、スピントロニクスへの光デバイスへの応用は立ち遅れているのが現状である。本研究課題では、特定領域研究においてスピントロニクス光デバイスの研究を行う。

3. 研究の方法

主に以下の3つの研究を行った。研究手法の詳細を記す。

(1) エピタキシャル強磁性金属 MnSb を用いた半導体光アイソレータ

エピタキシャル強磁性金属 MnSb を用いた半導体光アイソレータを作製した。MnSb の大きな磁気光学効果、一軸磁気異方性と高いキュリー温度を利用して、高い消光比と光アイソレータの動作温度特性を評価した。研究代表者が研究を構想して半導体光アイソレータの素子構造を設計し、同じ特定領域研究の計画研究の東京工業大学の宗片教授のグループで MnSb のエピタキシャル成長を行い、研究分担者の東京大学の中の教授のグループが素子への加工と評価を担当した。

(2) 新規強磁性材料の磁気光学性能の評価

半導体光アイソレータに用いる強磁性金属として、これまでエピタキシャル強磁性金属の MnAs や MnSb、及び、強磁性金属の Fe や Co を用いてきた。特定領域研究内で研究されている新しい強磁性体である $\text{TiO}_2\text{:Co}$ や PrCoB の磁気光学性能を評価した。東北大学の福村講師(当時)と産業技術研究所の秋永研究員に試料を提供いただき、評価を行った。

(3) 増幅性の半導体光アイソレータの研究

半導体光アイソレータは強磁性金属がもたらす一方向伝搬特性と、半導体光増幅器による伝搬損失の補償という原理で動作する。これまでの研究では、半導体光増幅器への電流注入による光利得にも関わらず、伝搬損失

を完全には補償できていなかった。本研究では、半導体光アイソレータの伝搬損失を完全に補償し、増幅性の半導体光アイソレータの実現を目指した。半導体光増幅器の利得ピーク波長や量子井戸構造、クラッド層膜厚などを設計し、増幅性の半導体光アイソレータの実現を目指した。増幅性の半導体光アイソレータによって、一方向発振リングレーザや双安定半導体レーザなど、増幅性の一方向伝搬特性を活かした光情報信号処理素子への応用が期待される。

4. 研究成果

(1) エピタキシャル強磁性金属 MnSb を用いた半導体光アイソレータ

3. 研究の方法(1)に記述した共同研究によって、エピタキシャル強磁性金属 MnSb を用いた半導体光アイソレータを作製した。作製した素子は温度 20 度において 12.3dB/mm の光アイソレーションを示し、従来の MnAs を用いた光アイソレーションを上回る光アイソレーション比を得ることに成功した。また、素子温度を 70 °C まで上げたところ、光アイソレーション比は 11.2 dB/mm と 20 度とほぼ同じ値に保たれ、MnSb の高いキュリー温度によって高温での光アイソレーションの低下を防ぐことに成功した。本研究成果は 1 件の学術論文(5. 主な発表論文等 雑誌論文の⑧)、2 件の国際会議(学会発表の⑫、⑬)、2 件の招待講演(学会発表の⑩、⑮)で発表した。

(2) 新規強磁性材料の磁気光学性能の評価

$\text{Ti}_{1-x}\text{O}_2\text{:Co}_x$ 薄膜の磁気光学効果(ファラデー楕円率)を評価し、吸収係数で割った値を磁気光学性能指数として算出し、Co 薄膜と比較した。Co 濃度 x が高い方が性能指数は大きく、可視光では Co 薄膜を約 10 倍上回った。波長 587 nm における $x = 0.1$ の試料の性能指数は Co 薄膜の近赤外領域の性能指数に匹敵した。一方近赤外領域における $x = 0.1$ の試料の性能指数は Co 薄膜に比べ四分の一程度と小さかった。これらの結果から、可視光領域のハイブリッド光アイソレータを作製する場合、 $\text{Ti}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_{2-\delta}$ 薄膜は強磁性体として有用な物質であると言える。以上の研究成果は 2 件の国内会議において発表した。

(3) 増幅性の半導体光アイソレータの研究

半導体光アイソレータの伝搬損失を低減するには、研究開始当初には念頭に置いていなかった問題が存在することが明らかになった。以下で、その問題を示し、増幅性の半導体光アイソレータを実現するに至った過程と研究成果を示す。半導体光アイソレータの 1 つである TM モード半導体光アイソレータでは、量子井戸活性層に伸張歪量子井戸を

導入し、TMモードを選択的に増幅する必要がある。通常の半導体レーザをTMモードで発振させるにはInGaAsP系やInGaAlAs系量子井戸において0.3%程度の伸張歪があればよいとされている。一方、TMモード半導体光アイソレータでは上部クラッド層の厚さが通常の半導体レーザより薄く、強磁性金属電極がもたらす伝搬損失がTEモードよりTMモードに対して大きく効いてくるため、伸張歪の導入量をより大きくする必要がある。伸張歪量が小さい場合、TEモードで発振し、一方向発振リングレーザや非相反双安定半導体レーザの実現には寄与しない。よって我々は、半導体光アイソレータにおける量子井戸活性層の伸張歪がもたらす電流-光出力特性について評価を行った。

上のような考察を基に、-1.6%の伸張歪をもつ歪み量子井戸活性層をもつ利得ピーク波長1295nmの半導体光増幅器と強磁性金属Fe, FeCoを組み合わせることによって、増幅性の半導体光アイソレータを実現することに成功した。強磁性金属がもたらす伝搬損失を半導体光増幅器の利得が上回ることが、電流注入時の半導体光アイソレータのレーザ発振によって明らかになった。図1に作製した増幅性半導体光アイソレータの断面電子顕微鏡写真を、図2に半導体光アイソレータの一方向増幅特性を示す。レーザ発振後の磁

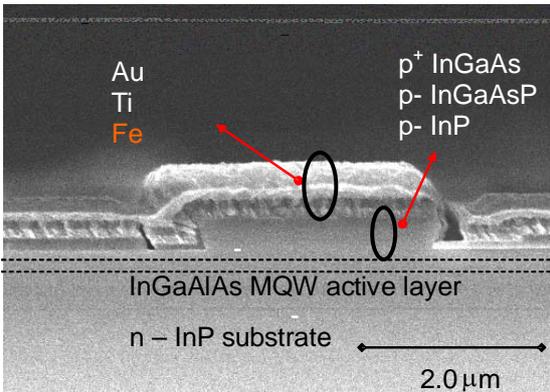


図1 増幅性光アイソレータの断面電子顕微鏡写真

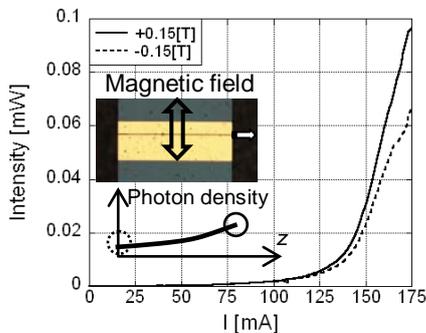


図2 図1の増幅性光アイソレータ(素子長0.85mm)の磁場印加時の電流光出力特性

化反転に伴う強度変化は42%となった。得られた強度変化は一方向発振リングレーザや双安定半導体レーザなど、増幅性の一方向伝搬特性を活かした光情報信号処理素子への応用に十分な値である。

本研究成果は2件の学術論文(5. 主な発表論文等 雑誌論文の①、②)、4件の国際会議(学会発表の①、②、③、⑧)で発表した。

以上の3件の研究項目を含め、4年度にわたって、8件の査読付雑誌論文、13件の国際会議論文と24件の国内会議論文、2件の招待講演として研究成果を発表した。

なお、本研究の成果は日本科学技術振興機構の研究成果展開事業「戦略的イノベーション創出推進(S-イノベ)」のワークショップ「スピン流を用いた新機能デバイスの開発」(2011年8月11日)において、磁気ランダムアクセスメモリ(MRAM)に次ぐ新たなスピントロニクスデバイスの産業応用の候補の1つとして取り上げられ、パネリストとして討論した。

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 H. Shimizu, K. Uehara, K. Tazawa, and S. Sakanishi, "Reduced Threshold Current and Enhanced Extinction Ratio in a Magnetically Controllable $\text{Fe}_{50}\text{Co}_{50}$ - InGaAlAs / InP Nonreciprocal Semiconductor Laser", Japanese Journal of Applied Physics, **51**, 02BG02, (2012). 査読有
- ② H. Shimizu, Y. Kono, S. Goto, and T. Mori, "Demonstration of a Magnetically Controllable Fabry-Perot Laser and an Unidirectional Ring Laser Utilizing a Nonreciprocal Semiconductor Optical Amplifier", Applied Physics Express, **4** (2), 022201, (2011). 査読有
- ③ H. Shimizu, and S. Goto, "Fabrication and Characterization of Evanescent Semiconductor Optical Isolators with Small Gain Saturation Effect", Japanese Journal of Applied Physics, **49** (12), 122201, (2010). 査読有
- ④ H. Shimizu, S. Goto, and T. Mori, "Optical Isolation Using Nonreciprocal Polarization Rotation in Fe - InGaAlAs / InP Semiconductor Active Waveguide

Optical Isolators”, Applied Physics Express, **3** (7), 072201, (2010). 査読有

⑤ H. Shimizu, and S. Goto, “Evanescent Semiconductor Active Optical Isolators for Low Insertion Loss and High Gain Saturation Power”, IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, **28** (9), 1414-1419, (2010). 査読有

⑥ H. Shimizu, and S. Goto, “InGaAsP/InP evanescent mode waveguide optical isolators and their application to InGaAsP/InP/Si hybrid evanescent optical isolators”, Optical and Quantum Electronics, **41** (9), 653-660 (2010). 査読有

⑦ H. Shimizu, S. Yoshida, and S. Goto, “Semiconductor Waveguide Optical Isolators towards Larger Optical Isolation utilizing Nonreciprocal Phase Shift by Ferromagnetic Co”, IEEE Photonics Technology Letters, **20** (18), pp. 1554-1556, (2008). 査読有

⑧ T. Amemiya, Y. Ogawa, H. Shimizu, H. Munekata, and Y. Nakano, “First Semiconductor Waveguide Optical Isolator Incorporating Ferromagnetic Epitaxial MnSb for High Temperature Operation”, Applied Physics Express, **1**, 022002 (2008). 査読有

[学会発表] (計 37 件)

① H. Shimizu, K. Uehara, and K. Tazawa, “Magnetically Controllable Optical Intensity and Mode Redistribution in Semiconductor Active Optical Isolators”, The 2011 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2011), Nagoya, 愛知県産業労働センター, 2011 年 9 月 28 日

② H. Shimizu, Y. Kono, K. Uehara, S. Usuba, K. Tazawa, “Magnetically Controllable Fabry-Perot Lasers and Unidirectional Ring Lasers”, 5th International Workshop on Spin Currents, Sendai, 仙台国際センター, 2011 年 7 月 26 日

③ K. Uehara, Y. Kono, S. Usuba, K. Tazawa, and H. Shimizu, “Magnetically Controllable Semiconductor Lasers For Reconfigurable Optical Buffering Memories”, MORIS (Magnetics and Optics Research International Symposium for New Storage Technology) 2011, Nijmegen, The Netherlands, 2011 年 6 月 22 日

④ H. Shimizu, S. Goto, and T. Mori, The 2010 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2010) “Semiconductor / Ferromagnetic Metal Hybrid Optical Isolators using Nonreciprocal Polarization Rotation”, Tokyo, 東京大学, 2010 年 9 月 24 日

⑤ Y. Kono, S. Ashihara, and H. Shimizu, The 6th International Conference on the Physics and Applications of Spin Related Phenomena in Semiconductors, “Design and fabrication of unidirectional ring lasers using semiconductor/ferromagnetic metal hybrid optical isolators”, Tokyo, 東京大学, 2010 年 8 月 3 日

⑥ H. Shimizu, T. Mori and K. Uehara”, The 6th International Conference on the Physics and Applications of Spin Related Phenomena in Semiconductors, “Optical Intensity Modulation and Bistability in Nonreciprocal Semiconductor Laser Diodes for Reconfigurable Optical Flip-Flop Memories”, Tokyo, 東京大学, 2010 年 8 月 3 日

⑦ S. Goto, and H. Shimizu, 15th Opto-Electronics and Communications Conference (OECC 2010), “Fabrication of Evanescent Semiconductor Optical Isolators for High Saturation Power”, Sapporo, 札幌国際会議場, 2010 年 7 月 9 日

⑧ H. Shimizu, Y. Kono, S. Goto, and T. Mori, CLEO / QELS 10 (Conference on Lasers and Electro-Optics / Quantum Electronics and Laser Science Conference 2010), “Unidirectional Semiconductor Ring Lasers Integrated with Semiconductor Optical Isolators”, San Jose, USA, 2010 年 5 月 20 日

⑨ H. Shimizu, T. Mori, and S. Goto, 9th International Conference on Numerical Simulation of Optoelectronic Devices, “Design of Evanescent Semiconductor Waveguide Optical Isolators”, Gwanju, Korea, 2009 年 9 月 15 日

⑩ T. Mori, S. Goto, K. Okada, Y. Kono, and H. Shimizu, “Nonreciprocal Semiconductor Laser Diodes For Bistable Optical Flip - Flop Memories” Magnetics and Optics Research International Symposium for New Storage Technology 2009, 淡路夢舞台国際会議場, 2009 年 6 月 16 日

⑪ 清水大雅, 新たな光集積回路に向けた半導体能動導波路光アイソレータ (招待講演)

電子情報通信学会 2009 年総合大会 愛媛、
2009 年 3 月 18 日

⑫ T. Amemiya, Y. Ogawa, H. Shimizu, H. Munekata and Y. Nakano 1.5- μ m-band, TM-mode waveguide optical isolator that uses nonreciprocal loss induced by ferromagnetic MnSb The 53rd Magnetism and Magnetic Materials Conference 2008 年 11 月 12 日, Austin, Texas, USA

⑬ T. Amemiya, Y. Ogawa, H. Shimizu, M. Tanaka, H. Munekata, Y. Nakano, Semiconductor Waveguide Optical Isolators Incorporating Ferromagnetic Epitaxial MnX (X=As or Sb), CLEO / QELS 08 (Conference on Lasers and Electro-Optics / Quantum Electronics and Laser Science Conference 2008) 2008 年 5 月 8 日, San Jose, USA

⑭ H. Shimizu, and S. Yoshida “Integrable Semiconductor Optical Isolators Towards Larger Optical Isolation utilizing Nonreciprocal Phase Shift”, CLEO / QELS 08 (Conference on Lasers and Electro-Optics / Quantum Electronics and Laser Science Conference 2008) 2008 年 5 月 8 日, San Jose, USA

⑮ 清水大雅、半導体・強磁性金属ハイブリッド光アイソレータの物理・素子・応用 日本磁気学会第 159 回研究会 第 20 回スピントロニクス専門研究会 招待講演、2008 年 3 月 3 日、東京 化学会館

〔図書〕(計 3 件)

① H. Shimizu, INTECH, Advances in Optical and Photonic Devices, Chapter 4, “Monolithic Integration of Semiconductor Waveguide Optical Isolators with Distributed Feedback Laser Diodes”, pp. 59-66, 2010 年

② T. Amemiya and Y. Nakano, INTECH, Advances in Optical and Photonic Devices, Chapter 7, “Single Mode Operation of 1.5- μ m Waveguide Optical Isolators Based on the Nonreciprocal-loss Phenomenon”, pp. 117-136, 2010 年

③ 清水大雅(共著)シーエムシー出版「スピントロニクスの基礎と材料・応用技術の最前線 第 33 章 光スピントロニクスデバイス～集積光非相反デバイス～」pp. 397-407, 2009 年

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 1 件)

名称：一体集積型光アイソレータ及びその製造方法

発明者：清水大雅

権利者：国立大学法人東京農工大学

種類：特許権

番号：特願 2008-294822

出願年月日：平成 20 年 11 月 18 日

国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ等

研究代表者ホームページ：

<http://kenkyu-web.tuat.ac.jp/Profiles/14/0001357/profile.html>

雑誌論文リスト：

<http://kenkyu-web.tuat.ac.jp/Profiles/14/0001357/theses1.html>

招待講演・学会発表リスト：

http://kenkyu-web.tuat.ac.jp/Profiles/14/0001357/meeting_achievel.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

清水 大雅 (SHIMIZU HIROMASA)

東京農工大学・大学院工学研究院・特任准教授

研究者番号：50345170

(2) 研究分担者

中野 義昭 (NAKANO YOSHIAKI)

東京大学・先端科学技術研究センター・教授

研究者番号：50183885

(3) 連携研究者

なし