

## 科学研究費助成事業（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：若手研究(A)

研究期間：2009～2011

課題番号：21686032

研究課題名(和文) 強磁性金属の磁化による半導体レーザーの発振状態制御と光情報信号処理への応用

研究課題名(英文) Control of lasing states of semiconductor lasers by the magnetization of ferromagnetic metals and their application to optical information processing

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・准教授

研究者番号：50345170

研究成果の概要(和文)：インターネットの幹線でやりとりされている光信号を電気信号に変換することなく一時的に記憶し、低消費電力のルーター(伝送経路制御装置)を実現するための半導体レーザーの発振状態制御と光情報信号処理への応用に関する研究を行った。強磁性金属がもたらす光の一方向伝搬特性を半導体レーザーに応用することによって、一方向で動作する半導体リングレーザーや高いオン・オフ比をもつ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ー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 control of lasing states of semiconductor lasers and their application to optical information processing, in order to realize the core routers where optical signals can be buffered without converting to electric signals. We have realized unidirectional ring lasers and semiconductor optical isolators with high On/Off ratio by applying nonreciprocal propagation characteristics to semiconductor lasers. 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
2009年度	15,900,000	4,770,000	20,670,000
2010年度	2,700,000	810,000	3,510,000
2011年度	2,700,000	810,000	3,510,000
年度			
年度			
総計	21,300,000	6,390,000	27,690,000

研究分野：光エレクトロニクス、スピントロニクス

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：半導体レーザー、光情報信号処理、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

フェルミ粒子である電子はキャパシタ等で蓄えることができ、大規模集積回路に応用されている。ボーズ粒子である光子は高速(光速)で伝搬する一方、光情報信号の一時記憶を行うことは非常に難しい。光情報信号の一時記憶素子は光エレクトロニクス分野において最も実現が困難な素子の一つである。

光信号の一時記憶素子は高速・大容量の光情報信号の送受信とルーターを経由した伝送における光-電気-光信号変換を減らす重要な素子である。一時記憶素子の実現によって光-電気-光信号変換を担う消費電力の大きな多くの大規模集積回路が不要になることが見込まれる。

光-電気-光信号変換の回数を少なくする

光情報信号の処理方法は国内外で研究が推進されている。光情報信号処理の実現には光の一時記憶素子が必須であり、その一実現手段がリング共振器である。リング共振器は光ファイバや石英導波路を用いるもの、半導体を用いた共振器長 1mm 以下のもの等が研究されている。本研究課題では半導体ベースのリング共振器に着目する。半導体ベースのリング共振器レーザは、全光信号処理や光フリップフロップへの応用が報告されている。この報告では二つの結合したリングレーザの時計回り (CW) と反時計周り (CCW) の発振状態を外部からの光信号で制御する光フリップフロップが実現され、光情報信号の一時記憶素子として期待されている [Hill Martin, J. S. Dorren, and Meint K. Smit et al., “A fast low-power optical memory based on coupled micro-ring lasers”, Nature, **432**, 11, pp. 206-209, (2004).]。光エレクトロニクス分野の主要な国際会議の一つである CLEO (Conference on Lasers and Electro-Optics) では、半導体リングレーザに関するセッションが開催され、活発な研究発表がなされている。

本研究課題の特長は光エレクトロニクス素子に磁性体の非相反性 (=光の一方向伝搬特性) と不揮発性を持ち込むことであり、この特長が関連する研究動向の中での獨創性として位置づけることができる。

## 2. 研究の目的

リング共振器型レーザは構造の線対称性によって時計周り (CW) 光と反時計周り (CCW) 光の伝搬モードは縮退し、同時にレーザ発振が起こる。またリング共振器に予測不可能な構造の非対称性が存在すれば、その発振状態は測定してみなければわからない不安定な状態になる。半導体リングレーザを用いて光情報信号の一時記憶素子を実現するには、その発振状態、すなわち CW/CCW 光の伝搬状態の分離・一方向化とそれらの制御が不可欠である。CW/CCW 光の分離には光の伝搬方向の一方向性を実現する「光アイソレータ」「非相反性」の導入が必要である。光アイソレータには従来、希土類鉄ガーネットと呼ばれる透明酸化物磁性体が用いられている。従来の光アイソレータは自由空間型の素子であり、材料も半導体とは異なるため、半導体リング共振器レーザとは構造と材料の両面において整合性がない。

これに対して、研究代表者は 2004 年に世界に先駆けて半導体強磁性金属ハイブリッド構造を用いた半導体導波路光アイソレータを実証した。光エレクトロニクス素子に非相反機能を集積することに成功したのである。以下では「ハイブリッド光アイソレータ」

と呼ぶ。

これまでの研究成果を踏まえ、本研究課題の目的は以下の通りである。

- ・「ハイブリッド光アイソレータ」を半導体リングレーザに導入し、その発振状態の縮退を解いて一方向レーザ発振を実現する。
- ・強磁性金属の磁化状態によって一方向レーザ発振状態を制御する。
- ・強磁性金属が有する不揮発性を利用して、一方向レーザ発振状態を外部磁場なしで維持する。
- ・一方向レーザ発振が実現された半導体リングレーザを用いて、光パケットスイッチングを実証する。

## 3. 研究の方法

研究計画・方法は以下の通りである。

- ・ハイブリッド光アイソレータが導入された半導体リングレーザの形状を設計する。
- ・設計に基づいてリングレーザの作製プロセスを確立する。
- ・作製されたリングレーザを磁場下で評価し、リングレーザの一方向レーザ発振を実現する。
- ・リングレーザのレーザ発振状態を強磁性金属の磁化状態によって制御する。
- ・上記 4 項目のフィードバックによって一方向発振リングレーザの消光比 20dB を目指す。
- ・強磁性金属に外部磁場を加えない残留磁化状態でのリングレーザの一方向発振状態を評価し、低消費電力の光情報信号の一時記憶素子に応用する。

上記の研究を実現するために、交付された科学研究費補助金によって設備と物品を導入した。以下に主な設備と物品、及び、それらの仕様と主な用途を示す。

- ・電子ビーム蒸着装置 株式会社ケーサイエンス社製 (KE604TT-NS1 型) 3 連式で強磁性金属、非磁性の金属、絶縁体などの薄膜の多層膜を製膜可能。基板を傾斜することで、斜め蒸着が可能。主な用途：一方向発振リングレーザを作製するための様々な薄膜の形成に使用。
- ・エピタキシャルウエハ 長江商事株式会社、及び、伯東株式会社 仕様 TM モード半導体光増幅器用 InGaAlAs/InGaAsP/InP エピタキシャルウエハ。主な用途：一方向発振リングレーザの土台となる半導体光増幅器として使用。
- ・フォトマスク 日本フィルコン株式会社製、リング共振器作製用フォトマスク 主な用途：リング共振器導波路をフォトリソグラフィ工程によって形成する際に使用。

#### 4. 研究成果

##### ・一方向発振リングレーザの作製と評価

一方向発振リングレーザを作製する前に予備実験としてファブリペロー共振器型の非相反半導体レーザの閾値電流と消光比を評価した。利得ピーク波長が 1295 nm の InGaAlAs 伸張歪み活性層を有する半導体光増幅器と強磁性金属 Fe を用いることによって、素子長 0.85 mm で発振閾値電流 135 mA、磁化反転に伴う 42% の発光強度の変化を観測した。さらに強磁性金属として FeCo を用いることによって、閾値電流密度の半減と消光比の増大を実現した。これらの予備実験に基づき、半導体光アイソレータを集積した半導体リングレーザを作製した。作製した素子の光学顕微鏡写真を図 1 に示す。リング共振器の半径は 0.5 mm、半導体光アイソレータ部の長さは 0.8 mm とした。

図 1 の素子に  $\pm 0.15$  T の磁場を印加し、左右の端面からの発光強度の変化を評価した。図 2 に測定結果を示す。磁場の反転に伴って、右端面からの発光強度が 2.8 dB 変化した。消光比が小さいのは、リング共振器を形成するための方向性結合器の結合係数が小さく、リング共振器からの発光を外部に取り出することができないためと考えている。

研究期間の終了後も、一方向発振リングレーザの動作電流の低減、小型化、消光比の向上のための研究を継続している。また、光注入同期による非相反半導体レーザの発振状態の制御のためのセットアップと予備実験を行っている。上に記した一方向発振リングレーザの性能向上の後に光注入同期による発振状態制御の実験を行う予定である。

以上の研究成果は、2 件の査読付雑誌論文、5 件の国際会議論文として発表した。

##### ・非相反偏光回転を用いた半導体光アイソレータの研究

上記の半導体光アイソレータの消光比は素子長に比例し、これまでの研究で 14.7 dB/mm の消光比が得られている。高い消光比を得る

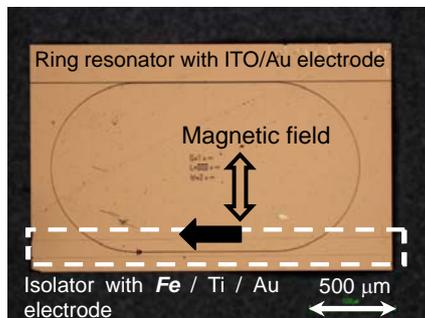


図 1 作製した半導体リングレーザの光学顕微鏡写真。点線で囲まれた領域に強磁性金属の Fe が製膜されており、一方向伝搬特性をもたらす。

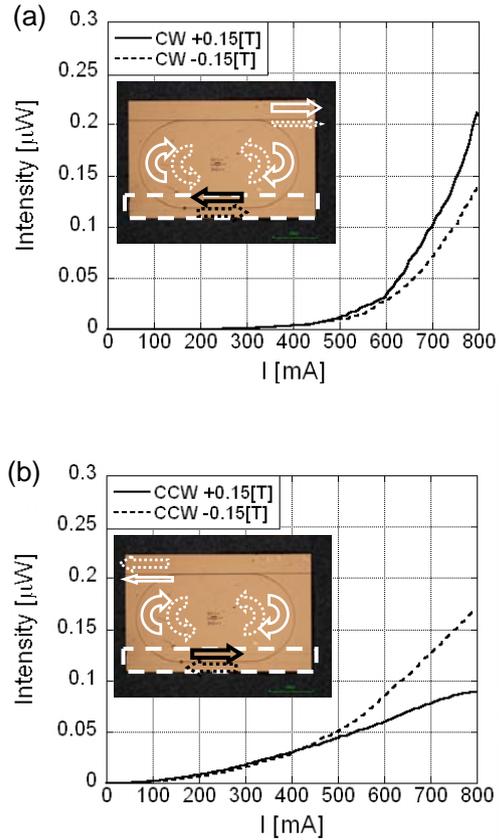


図 2 図 1 の半導体リングレーザに  $\pm 0.15$  T の磁場を印加したときの電流-光出力特性の測定結果。(a) 右端面からの光出力。(b) 左端面からの出力。

には強磁性金属とコア層の距離を近づけて大きな磁気光学効果を得るか、素子長を長くする必要はあるが容易ではない。一方、磁性ガーネットと InP / InGaAsP 導波路、SOI 導波路をウエハボンディングし、磁性ガーネットがもたらす非相反な位相変化を利用した導波路光アイソレータが実証されている。本研究では半導体光アイソレータにおける非相反位相変化に着目し、偏光干渉系によって従を上回る 20 dB の消光比を実現した。

図 3 に示すように、半導体光アイソレータの出射端に 45° の偏光子を設置し、バイアス電流 100 mA、+ 0.15 T の磁場を印加したときに出力光強度が最小になるように入力側の偏波コントローラを調整した。TM モードに対して  $\pi$  の非相反位相変化が得られる時に、入射光の偏光を  $-45^\circ$  にすることによって TE モードと TM モードの干渉による非相反な偏光回転と 20dB 以上の大きな消光比を実現することができる。図 4 に  $\pm 0.15$  T の磁場下における透過光強度と消光比の波長依存性を示す。透過光強度の波長依存性に見られる周期は TE モードと TM モードの複屈折によるものであ

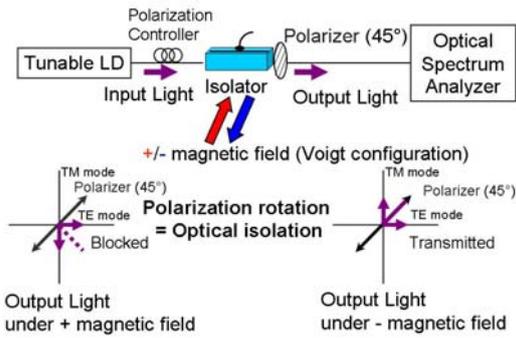


図 3 非相反偏光回転を用いた半導体光アイソレータの原理と測定系

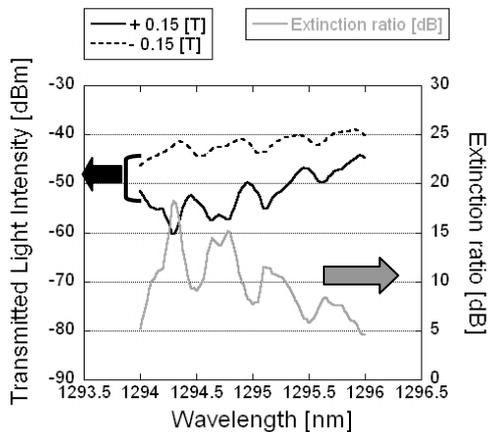


図 4 + / - 0.15 T の磁場下における透過光強度と消光比の入射光波長依存性。バイアス電流は 100mA。

る。図 4 より波長 1294.3 nm で 20 dB の消光比と 0.28  $\pi$ /mm の非相反位相変化が得られることが明らかになった。

以上の研究成果は、1 件の査読付雑誌論文、1 件の国際会議論文として発表した。

以上の 2 件の研究項目を含め、3 年度にわたって、7 件の査読付雑誌論文、10 件の国際会議論文と 12 件の国内会議論文、3 件の招待講演として研究成果を発表した。

#### 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 7 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 岡林潤、近藤剛、千葉大地、野崎隆行、清水大雅、川畑史郎、秋永広幸、「応用物理学分野のアカデミック・ロードマップ 磁性・スピントロニクス」応用物理 **79**, 720-722, (2010). 査読有

⑦ 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

[学会発表] (計 22 件)

①清水大雅、「光情報信号記憶・読み出しに向けた強磁性金属集積半導体レーザ」、日本磁気学会第 182 回研究会「光が拓く新しい磁気の世界」(招待講演、東京 日本化学会館、2012 年 1 月 31 日)

②H. 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

③ 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

④ 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

⑤ 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

⑥ 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

⑦ 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

⑧ 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

⑨ 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

⑩ 清水大雅、電子情報通信学会 2010年総合大会、「半導体光アイソレータの現状と応用」、東北大学 (シンポジウム招待講演) 2010年3月16日

⑪ 清水大雅、森俊秋、河野嘉孝、「半導体光アイソレータにおける軸方向光子密度分布を利用した新しい光制御デバイス」、日本磁気学会 第29回スピントロニクス専門研究会(招待講演)、東京 日本化学会館、2010年3月15日

⑫ 河野嘉孝、森俊秋、清水大雅、「半導体

光アイソレータを用いた一方向発振リングレーザの設計と試作」、電子情報通信学会レーザ量子エレクトロニクス研究会、京都大学 2010年1月29日

⑬ 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

⑭ 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

〔図書〕(計2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 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

〔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](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・准教授

研究者番号: 50345170

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし