

平成 21 年 6 月 12 日現在

研究種目：若手研究(A)  
 研究期間：2006 ~ 2008  
 課題番号：18686030  
 研究課題名（和文） 導波路光アイソレータモノリシック集積半導体レーザの研究  
 研究課題名（英文） Research on Monolithic Integrations of Waveguide Optical Isolators with Semiconductor Laser Diodes

## 研究代表者

清水 大雅 (SHIMIZU HIROMASA)

東京農工大学・大学院共生科学技術研究院・特任准教授

研究者番号：50345170

研究成果の概要：光ファイバ通信等の高速大容量通信に用いられる半導体レーザの安定動作に不可欠である光アイソレータを半導体ベースの一体集積可能な形で実現した。また、エピタキシャル強磁性金属のもつ特徴的な磁気、結晶学的な特性を集積化型の光アイソレータに応用し、集積光アイソレータ特性を実現した。これらの研究成果は半導体ベースの集積光アイソレータという新たな研究分野を切り拓いたものである。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	10,700,000	3,210,000	13,910,000
2007 年度	10,800,000	3,240,000	14,040,000
2008 年度	1,700,000	510,000	2,210,000
年度			
年度			
総計	23,200,000	6,960,000	30,160,000

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：結晶成長、高性能レーザー、磁性、先端機能デバイス、光物性、磁気光学

## 1. 研究開始当初の背景

ブロードバンド通信の普及により、インターネットの通信量は増加し続けている。高速・大容量という特長を有する光ファイバ通信を普及させるためには、用いられる半導体レーザや光変調器等の光制御素子、光導波路等の光デバイスのコスト削減が重要な課題の一つである。光デバイスのコストを下げるには、個別の素子を別々に作製して組み込むのではなく、モノリシック集積化技術が有効である。通信用の半導体レーザ、いわゆる単

一波長で動作する分布帰還型半導体レーザ(Distributed Feedback Laser diodes; DFB LDs)や分布ブラッグ反射型半導体レーザ(Distributed Bragg Reflector Laser diodes; DBR LDs)は、特に長距離伝送する場合、及び、高速変調する場合、外部からの予期しない反射戻り光によって光出力が不安定化するという欠点を有する。この欠点を防ぐためには光アイソレータが必須である。これまでDFBレーザと光変調器等の様々なモノリシック集積化素子が実現されているが、光アイソレータ

をモノリシック集積化する試みは例が少なく、既存の光アイソレータを凌駕するにはいたっていない。従来の「バルク型」の光アイソレータは、透明酸化フェリ磁性体である希土類鉄ガーネット等の光非相反性を用いるが、材料の不整合性、偏光子を用いなければならない、等の理由によって、半導体レーザとのモノリシック集積化が最も困難な素子であるからである。このため、光アイソレータは必要不可欠な素子であるにもかかわらず、モノリシック光集積回路から完全に取り残されている。従来の光アイソレータは、ファラデー回転子と呼ばれる光の偏光面を非相反に回転させる素子と、偏光子からなるが、これらをInP基板に集積化するのは、事実上不可能である。また、半導体レーザからの出射光を自由空間に取り出すと、位置合わせコストが余分に生ずる。これに対して半導体レーザとモノリシックに集積化した半導体導波路光アイソレータが実現されれば、上に述べたような光送信モジュールの組み立て工程におけるコストの低減や、モノリシック集積化によるモジュールそのものの価格の低減が可能になる。

## 2. 研究の目的

本研究者は平成17年度までの研究により、半導体ベースでは非常に困難とされていた、簡易な素子構造に基づく半導体導波路光アイソレータのプロトタイプの実証に成功している。本半導体導波路光アイソレータは、強磁性金属が積層された半導体光増幅器導波路における「非相反損失」現象を利用している。従来の光アイソレータとは異なり、偏光子が不要、かつ半導体光増幅器を基にしており端面出射型半導体レーザとほぼ同じ構造をしているため、半導体レーザとのモノリシック集積化に適している。上記の問題点とこれまでの研究成果に基づき、半導体レーザと導波路光アイソレータのモノリシック集積素子の作製・評価を行い、高機能な光集積回路の実現に資することを研究目的とする。

## 3. 研究の方法

DFBレーザとTEモード導波路光アイソレータのモノリシック集積素子の作製プロセスを確立する。この際、エッチングによって形成されるDFBレーザ導波路、及び、光アイソレータ部の導波路の加工精度が重要である。我々のTEモード導波路光アイソレータは、導波路の幅が広い場合、強磁性金属から受ける吸収損失が少なくレーザ発振を起こし、半導体レーザ部として動作させることが

でき、導波路の幅が狭い場合、強磁性金属から磁気光学効果を受け、非相反損失変化を有する導波路光アイソレータとして動作する。この特長を活かし、DFBレーザ部と導波路光アイソレータ部を導波路幅によって、簡易なプロセスで分離し、集積化デバイスの実現を目指す。光導波路側面の平滑さ、及び、低損傷性が導波路光アイソレータの伝搬損失、及び、半導体レーザの閾値電流・出力を左右する。そのため、エッチングプロセスの向上とリソグラフィーの高精度化が鍵である。

また半導体導波路光アイソレータの偏波無依存動作のためにエピタキシャル強磁性金属薄膜を用いたTMモード型の半導体導波路光アイソレータの作製を行う。

## 4. 研究成果

### (1) 半導体導波路光アイソレータとDFBレーザのモノリシック集積

TEモード半導体能動導波路光アイソレータとDistributed Feedback Lasers, DFBレーザのモノリシック集積化素子を作製した。集積化素子の作製法は以下の通りである。TEモード半導体導波路光アイソレータは導波路の幅が $1.5\mu\text{m}$ 程度と細い場合は導波路側壁に蒸着された強磁性金属Fe層への光の染み出しが大きく、 $5\text{-}10\text{dB/mm}$ 程度の非相反伝搬効果をもたらす。一方、導波路の幅が $2.5\mu\text{m}$ 以上の場合、導波路コア層への光の閉じ込めが強くなり、相対的に強磁性金属Fe層への光の染み出しが小さくなる。半導体導波路光アイソレータ部分は幅 $1.5\mu\text{m}$ の導波路を、半導体レーザ部分は幅 $3\mu\text{m}$ の導波路を形成した。半導体光アイソレータ/半導体レーザ部の活性層は共通のInGaAsP多重量子井戸構造である。回折格子を形成した後、2回目の結晶成長により回折格子を埋め込み、上部クラッド層、電極コンタクト層の形成を行った。2回目の結晶成長の後、半導体光アイソレータ/半導体レーザ部で導波路の幅を変えた導波路線状パターンを形成した。ドライエッチング法により導波路構造を形成した。さらに電子ビーム蒸着法により、強磁性金属Fe層、上部電極のTi/Au層、電流絶縁層 $\text{AlO}_x$ 層を形成した。強磁性金属Fe層は半導体導波路光アイソレータ部、半導体レーザ部の両方の片側の側壁に蒸着されている。このようにして光アイソレータと半導体レーザの「位置合わせ」の必要がないモノリシック集積化素子の作製に成功した。ここで半導体導波路光アイソレータ側のへき開端面を「前端面」、半導体レーザ側のへき開端面を「後端面」と呼ぶことにする。前端面から出射される光は半導

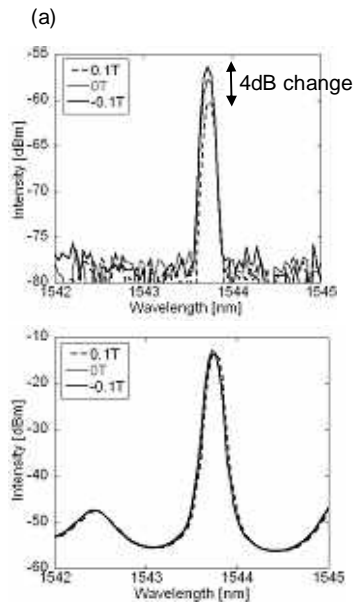


図 1 半導体導波路光アイソレータモノリシック DFB レーザの(a)前端面, (b)後端面からの出射光の磁場印加下でのスペクトル

体導波路光アイソレータを通った半導体レーザー光であり、後端面から出射される光は半導体導波路光アイソレータを通らない半導体レーザー光である。集積化素子の評価では、前端面・後端面双方からの出射光を永久磁石による $\pm 1$ kGの磁場の印加下で光強度・スペクトルを測定した。半導体レーザー部へのバイアス電流は 90mA、半導体導波路光アイソレータ部へのバイアス電流は 150mA、測定温度は 15 である。

図 1(a), (b)に前端面・後端面からの出射光の磁場の印加下でのスペクトルを示す。図 1(b)の後端面からのスペクトル(=半導体導波路光アイソレータを通らない半導体レーザーの光)により、作製した半導体レーザーが発振波長 1543.8nm の単一波長の DFB レーザとして動作していることがわかる。一方、前端面からのスペクトル(=DFB レーザ光を半導体導波路光アイソレータへ伝搬させた光)では、 $\pm 1$ kG の磁場の印加に対して出射光強度が 4dB 変化するのが観測された。同時に測定した後端面からの出射光強度の $\pm 1$ kG の磁場の印加に対する変化は 0.4dB であった。これは DFB レーザのレーザー光が半導体導波路光アイソレータ部を伝搬したときにだけ、非相反な伝搬特性を示したことを示している。以上の実験により、光アイソレータモノリシック集積 DFB レーザの実証に成功した。

(2) エピタキシャル強磁性金属を用いた TM モード半導体導波路光アイソレータ

半導体導波路光アイソレータの偏波無依存動作のために、エピタキシャル強磁性金属 MnAs と InGaAlAs 量子井戸半導体光増幅器導波路を組み合わせた TM モード半導体導波路光アイソレータを実現した。エピタキシャル強磁性金属の MnAs を磁気光学電極に用いると多結晶強磁性金属電極に比べ、電気的・熱力学的・磁気光学的特性が改善される。MnAs の分子線エピタキシャル成長時の第一層目の原子の選択・制御により、MnAs 薄膜の保磁力を制御し、外部磁石を外した状態でも動作可能な導波路光アイソレータを実現した。永久磁石によって外部磁場を印加した時に 9.3dB/mm であった光アイソレーションが、磁石を外した状態でも 8.7dB/mm まで保持されることを観測した。

エピタキシャル強磁性金属 MnAs は、光エレクトロニクス素子としての光導波路形状への加工法は確立されていなかった。そのため光・バイアス電流共に閉じ込め効果が弱い利得導波構造を採用せざるを得ず、結果として挿入損失が大きいという問題を抱えていた。そこで屈折率導波型の導波路構造への加工法を確立し、光閉じ込め効果がより大きな屈折率導波構造を有する TM モード半導体導波路光アイソレータを作製し、挿入損失を 7dB まで低減することに成功した。上部電極である MnAs エピタキシャル強磁性金属層はドライエッチングによって加工し作製した。縦横のアスペクト比が導波路の光伝搬方向に大きい形状にも関わらず、エピタキシャル単結晶強磁性金属が示す強い結晶磁気異方性により短軸方向に磁化されやすく、非相反損失に基づく半導体導波路光アイソレータの動作に適しているという特長を示した。この素子の光アイソレーションは 7.2dB/mm、挿入損失は 6.9dB であり、近視野像の評価と自然放光スペクトルの形状から横単一モード光伝搬であることを明らかにした。

さらに導波路光アイソレータの高光アイソレーション化、高温動作のために、エピタキシャル強磁性金属薄膜である MnSb を用いた TM モード半導体導波路光アイソレータを実現した。エピタキシャル強磁性金属薄膜の MnSb は上記の研究で用いてきた MnAs に比べて、大きなスピン軌道相互作用による大きな磁気光学効果によって光アイソレーション比の向上が見込まれた。また、MnSb のキュリー温度は 587K と MnAs のキュリー温度 (313K) と比較して高く、バイアス電流を必要とする本研究の集積化導波路光アイソレータへの応用に適している。しかし、MnSb 薄膜の InP 基板上への結晶成長は研究例がなく、まず

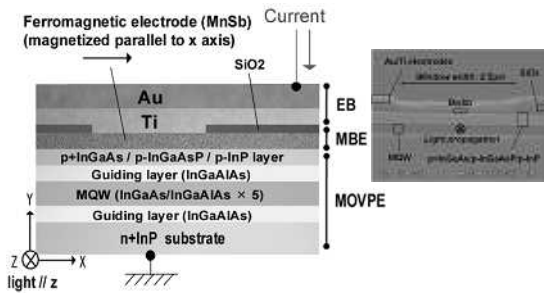


図2 エピタキシャル強磁性金属薄膜 MnSb を用いたTMモード半導体導波路光アイソレータの素子構造と断面電子顕微鏡写真

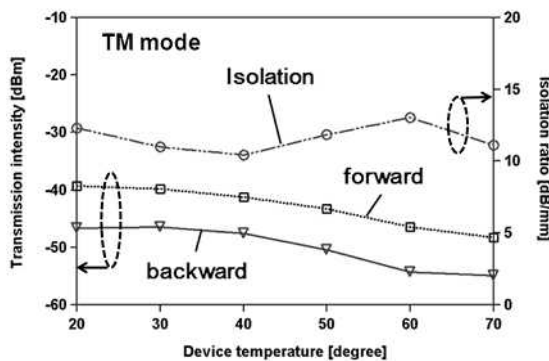


図3 エピタキシャル強磁性金属薄膜 MnSb を用いた半導体導波路光アイソレータの伝搬損失と光アイソレーションの素子温度依存性

InGaAs/InP基板上への結晶成長を確立する必要があった。InGaAs/InP基板上への分子線エピタキシー法による結晶成長法を確立した後、InGaAlAs/InP半導体光増幅器導波路構造上へMnSb薄膜を結晶成長し、利得導波型導波路素子構造に加工した。図2に素子構造と断面電子顕微鏡写真を示す。作製された素子は温度20度において12.3dB/mmの光アイソレーションを示し、期待した通り、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度まで上げたところ、図3に示すように光アイソレーション比は11.2dB/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。なお、本研究成果の一部は東京大学中野義昭教授、田中雅明教授の研究室、東京工業大学宗片比呂夫教授の研究室との共同研究による成果である。

以上の(1)、(2)の研究成果は半導体ベースの集積光アイソレータと半導体レーザとのモノリシック集積化の実現という新たな研究分野を切り拓いたものである。全く新しい半導体

光エレクトロニクス素子の研究成果であり、国内・海外の学会において多数の招待講演の機会を得ることができた。

研究成果には伝搬損失の低減などの課題も含まれており、本研究課題の科学研究費補助金の成果を基に今後も研究を進展させる予定である。

## 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)

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

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

H. Shimizu and Y. Nakano, "Monolithic Integration of a Waveguide Optical Isolator With a Distributed Feedback Laser Diode in the 1.5- $\mu$ m Wavelength Range", IEEE Photonics Technology Letters, **19** (24), pp. 1973-1975, (2007). 査読有

T. Amemiya, H. Shimizu, M. Yokoyama, P. N. Hai, M. Tanaka, and Y. Nakano, "1.54- $\mu$ m TM-mode waveguide optical isolator based on the nonreciprocal loss phenomenon: device design to reduce insertion loss", Applied Optics **46** (23), pp. 5784-5791, (2007). 査読有

T. Amemiya, H. Shimizu, P. N. Hai, M. Tanaka, and Y. Nakano, "Nonreciprocal propagation of light without external magnetic fields in a semiconductor waveguide isolator with a MnAs layer", Journal of Magnetism and Magnetic Materials **310**, pp. 2161-2163, (2007). 査読有

T. Amemiya, H. Shimizu, Y. Nakano, P. N. Hai, M. Yokoyama, and M. Tanaka, "Semiconductor waveguide optical isolator based on the nonreciprocal loss induced by ferromagnetic MnAs", Applied Physics Letters, **89**, 021104, (2006). 査読有

H. Shimizu, T. Amemiya, M. Tanaka, and Y. Nakano, "Monolithically Integrable Semiconductor Active Waveguide Optical Isolators", Journal of the Magnetics Society of Japan, **30** (6-2), pp. 624-629, (2006). 査読有

〔学会発表〕(計 19 件)

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

T. Amemiya, Y. Ogawa, H. Shimizu, H. Munekata and Y. Nakano 1.5- $\mu$ 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 USA

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 USA

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 USA

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 回スピンエレクトロニクス専門研究会 招待講演

2008 年 3 月 3 日 東京

T. Amemiya, Y. Ogawa, H. Shimizu, H. Munekata, and Y. Nakano, High Temperature Operation of TM-mode Nonreciprocal-Loss Waveguide Optical Isolator with Ferromagnetic MnSb 20th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society 2007 年 10 月 18 日 USA

雨宮智宏, 小川悠介, 清水大雅, 宗片比呂夫, 中野義昭 強磁性 MnSb を用いた非相反損失による導波路型光アイソレータの高温特性 2007 年秋季 第 68 回応用物理学会学術講演会 2007 年 9 月 4 日 北海道

清水大雅, Wouter Van Parys, Roel Baets, 中野義昭 半導体能動導波路光アイソレータの非線形な非相反伝搬特性の評価 2007 年秋季 第 68 回応用物理学会学術講演会 2007 年 9 月 4 日 北海道

T. Amemiya, H. Shimizu, M. Yokoyama, P. N. Hai, M. Tanaka, Y. Nakano, Single Mode Operation of 1.5 $\mu$ m TM Mode Waveguide Optical Isolators Based on the Nonreciprocal-Loss Phenomenon, Conference on Lasers and Electro-Optics, Quantum Electronics and Laser Science Conference 2008 2007 年 5 月 8 日 USA

雨宮智宏, 清水大雅, 横山正史, P.N.Hai, 田中雅明, 中野義昭 非相反損失半導体導波路

光アイソレータの低損失化および単一モード伝搬の確認 2007 年春季 第 54 回応用物理学関係連合講演会 2007 年 3 月 30 日 神奈川

清水大雅 モノリシック集積化可能な半導体能動導波路光アイソレータ 電子情報通信学会 2007 年総合大会 招待講演 2007 年 3 月 22 日 愛知

H. Shimizu and Y. Nakano First Monolithic Integration of a Waveguide Optical Isolator with a Distributed Feedback Laser Diode 2006 IEEE 20th International Semiconductor Laser Conference 2006 年 9 月 19 日 USA

H. Shimizu, Design and demonstration of semiconductor active waveguide optical isolators 6th International Conference on Numerical Simulation of Optoelectronic Devices, invited presentation 2006 年 9 月 12 日 Singapore

雨宮智宏, 清水大雅, P.N.Hai, 田中雅明, 中野義昭 エピタキシャル強磁性電極 MnAs を用いた非相反損失型半導体導波路光アイソレータのゼロ磁場動作 2006 年秋季 第 67 回応用物理学会学術講演会 2006 年 9 月 1 日 滋賀

T. Amemiya, H. Shimizu, P. N. Hai, M. Yokoyama, M. Tanaka, and Y. Nakano Optical Waveguide Isolator Based on Nonreciprocal Loss Shift Induced by Ferromagnetic MnAs The 17th International Conference on Magnetism 2006 年 8 月 21 日 京都

H. Shimizu, T. Amemiya, M. Tanaka, and Y. Nakano Demonstration of Semiconductor Waveguide Optical Isolator Monolithically Integrated Distributed Feedback Laser Diodes 4th International Conference on Physics and Applications of Spin Related Phenomena in Semiconductors 2006 年 8 月 18 日 仙台

H. Shimizu, T. Amemiya, M. Tanaka, and Y. Nakano Monolithically Integrable Semiconductor Waveguide Optical Isolators using III-V Semiconductor / Ferromagnet Hybrid Structures Device Research Conference (DRC 2006) 2006 年 6 月 28 日 USA

H. Shimizu, A nonreciprocal optical device using ferromagnetic metal / semiconductor optical amplifier hybrid structures The Workshop on Thermal & Optical Magnetic Materials And Devices (MORIS 2006 WORKSHOP), invited presentation 2006 年 6 月 8 日 千葉

H. Shimizu, Integrable Semiconductor Active Optical Isolators Integrated Photonics Research and Applications Topical Meeting and Nanophotonics Topical Meeting (IPRA / NPIS 2006), invited presentation 2006 年 4 月 25 日 USA

〔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\\_achieve1.html](http://kenkyu-web.tuat.ac.jp/Profiles/14/0001357/meeting_achieve1.html)

## 6．研究組織

### (1) 研究代表者

清水 大雅 (SHIMIZU HIROMASA)

東京農工大学・大学院共生科学技術研究院・特任准教授

研究者番号：50345170

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし

