

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25年 5月 6日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2008～2012

課題番号：20226019

研究課題名（和文）波長チャンネル制御を用いる半導体マイクロリングプロセッサの研究

研究課題名（英文） Semiconductor microring processor using wavelength channel control

研究代表者

國分 泰雄 (KOKUBUN YASUO)

横浜国立大学・工学研究院・教授

研究者番号：60134839

研究成果の概要（和文）： 高速光信号を別の高速光信号によって波長情報を有効に利用して制御する全光演算制御デバイスとして、半導体量子井戸光増幅器導波路で構成したマイクロリング共振器によって、半導体光増幅器中での相互変調効果を利用した光-光制御演算、およびマイクロリングレーザへの注入同期による双安定動作の実現を目指した。設計製作技術を確立して、マイクロリングレーザによるフリップ・フロップ動作およびインバータ動作を実証した。

研究成果の概要（英文）： We have aimed at realizing an all-optical signal processor named "microring processor", which can control the optical signal by another optical signal utilizing the cross-modulation phenomena in a microring resonator consisting of semiconductor optical amplifier, and the bi-stable operation utilizing the injection locking into a microring laser. We developed the design and fabrication technologies and realized the Flip-Flop operation and the inverter operation using two adjacent lasing wavelengths in a microring laser.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	50,100,000	15,030,000	65,130,000
2009年度	33,900,000	10,170,000	44,070,000
2010年度	24,500,000	7,350,000	31,850,000
2011年度	16,800,000	5,040,000	21,840,000
2012年度	13,400,000	4,020,000	17,420,000
総計	138,700,000	41,610,000	180,310,000

研究分野： 工学

科研費の分科・細目： 応用物理学・工学基礎／応用光学・量子光工学

キーワード： 微小共振器，量子井戸，半導体光増幅器，相互変調効果，光演算，マイクロリング共振器，注入同期

1. 研究開始当初の背景

高速大容量の光信号を自在にパス制御する光クロスコネクタ技術は、長距離伝送や中短距離光ネットワークなどにおける基本技術である。しかし、現在のLSIを用いた電子的ルーティングは処理速度

と膨大な消費電力のために限界に達しつつあり、光信号を光のままルーティングする光-光制御技術が、今後不可欠になると予想される。この問題を解決するには、高速光信号を別の高速光信号によって、しかも波長情報を有効に利用して1

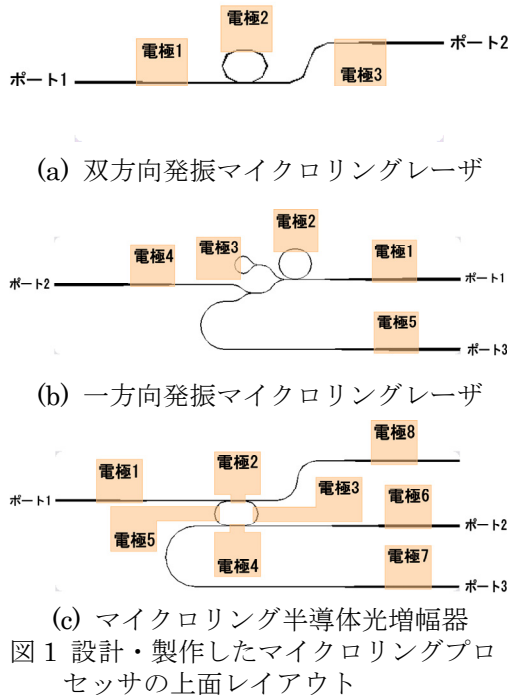
ns 以下の高速で制御する小型集積化全光演算制御デバイスが必要になる。しかしながら、この実現に不可欠な、多波長を自在に用いてルーティング、スイッチング、レベルリミット、ゲート、等の高速演算処理を実現するデバイスとその集積化は未開拓である。

2. 研究の目的

本研究では、半導体量子井戸による光増幅器 (SOA) 導波路によって構成したマイクロリング共振器によって、SOA 中での信号光自身の自己位相変調 (SPM) や入力信号光 (ポンプ光) と制御光間の相互利得変調 (XGM) および相互位相変調 (XPM) を共振器によって増強して高速な光-光変調を実現する。さらにはレーザ発振時の注入同期を利用したフリップフロップ回路を実現して、高速光パルス信号のリミッタなどの波形整形やインバータ動作、および2入力信号の XOR, 光フリップフロップなどの基本演算を、波長チャネルを用いて可能にする半導体マイクロリングプロセッサの実現とその集積化を目的とする。

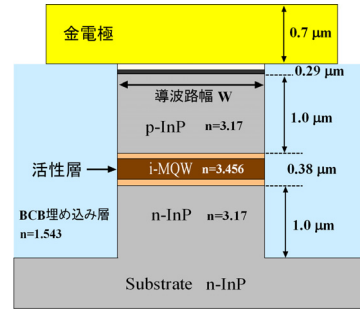
3. 研究の方法

本研究では、光-光制御による信号処理および光演算を可能にする半導体マイクロリングプロセッサの実現を目指して、まず最初に半導体光増幅器導波路を用いたマイクロリング共振器の設計・製作技術を開発した。製作した量子井戸半導体マイクロリングプロセッサの上面レイアウト図を図 1(a)~(c)に、光導波路部分単独の断面構造を図 2(a)に、バスライン導波

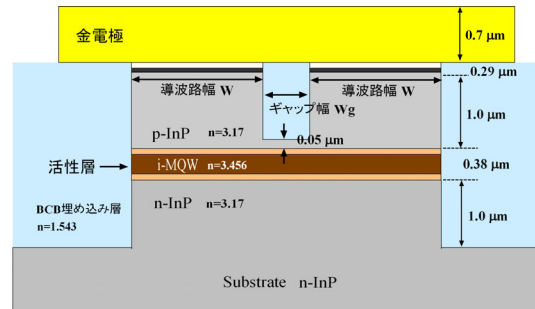


路とマイクロリング共振器の結合部の断面構造を図 2(b)に示す。

図 1(a)は最も単純なマイクロリングレーザ構造で、この構造では光出力は左右の両ポートから得られる。図 1(b)はループミラーを用いて一方向発振を目指した構造で、信号出力はポート 1 から得られ、ポート 2 およびポート 3 は信号入力ポートとして用いる。図 1(c)はマイクロリング光増幅器で、異なる共振波長間で相互変調効果を用いた光-光信号処理を目指したデバイスである。



(a) 導波路部分



(b) 結合器部分

図 2 ハイメサ光導波路の断面構造

導波路構造は図 2(a)に示すようなハイメサ構造と呼ばれる構造を採用したが、この構造では側部埋め込み層 (ベンゾシクロブテン, BCB) と半導体コアとの屈折率差が大きすぎて、バスライン導波路とマイクロリング共振器の間の結合を BCB 層を介した結合構造をした場合には、結合率として最適な 0.1~0.3 程度を得るための結合部長が長くなりすぎてしまい、その結果として共振器周回長が長くなって共振波長間隔が極端に小さくなる問題があった。そこでこの問題の解決のため、結合導波路間の溝のエッチング深さを 2 段階に制御する図 2(b)に示すような強結合構造を採用して、結合率の溝幅と深さ依存性を解析して、現状の加工精度での最適な結合部構造を設計した。

そして、研究期間の前半においては、光導波路が単一モードになる条件として導波路幅 $W=1.2\mu\text{m}$ のマイクロリング光増

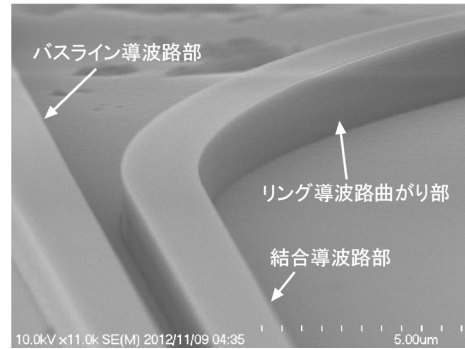
幅器およびマイクロリングレーザを設計し、また結合部長短縮のためにギャップ幅 W_g を $0.3\mu\text{m}$ に設計した。このため、結合部のギャップ部分を電子ビーム描画により、そのほかの導波路部分をフォトリソグラフィによってパターンニングし、誘導結合プラズマエッチング法などを用いて何度か試作して発光特性およびレーザ発振特性を測定したが、十分な発光（利得）およびレーザ発振が得られなかった。そこで、研究期間4年目に計画を見直して、まず十分な利得とレーザ発振が得られる構造条件を探索するため、導波路幅が異なる直線レーザを製作して発振条件を検討した。その結果、導波路幅 $W=2\mu\text{m}$ 以上の発振が得られたので、次にこの構造条件を用いてマイクロリング増幅器およびマイクロリングレーザを設計した。導波路幅 $W=1.2\mu\text{m}$ での利得およびレーザ発振が得られなかった原因は、誘導結合プラズマエッチングによって活性層側面にダメージが加わり、非発光再結合が発生したためと考えられる。

この再設計においては、導波路幅を $W=2\mu\text{m}$ としただけでなく、パターンニングをフォトリソグラフィのみで行うためにギャップ幅 W_g を 0.8 と $1.0\mu\text{m}$ に設計した。そして、誘導結合プラズマエッチングによる活性層側面へのダメージを出来るだけ避けるために、ハイメサ型導波路のみではなく直線部分については InP 上部クラッド層のみをエッチングするリッジ型導波路構造にしたデバイスも設計した。ただし、曲がり部については曲げ損失低減のためにハイメサ型とした。そして、これらの設計したデバイスを製作して、まずマイクロリングレーザの発振を確認してから、そのマイクロリングレーザの異なる発振波長間でのフリップフロップ動作の実証を目指した。

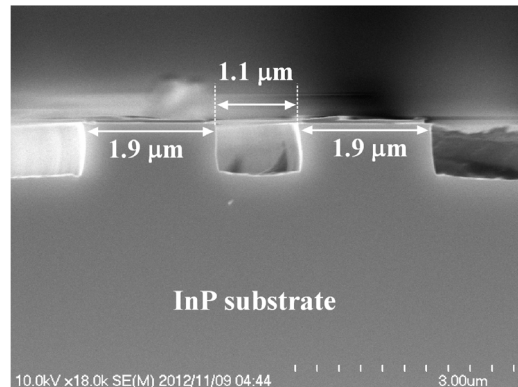
4. 研究成果

(1) デバイス設計・製作技術

リッジ型導波路とハイメサ型導波路の2種類の導波路の製作は、2段階エッチングによって実現した。1段階目のエッチングにおいて結合部を含めてすべてリッジ型導波路になるように、上部 InP クラッド層を活性層の上部 $0.05\mu\text{m}$ までエッチングする。ハイメサ型導波路は2段階目でリッジ型をさらに深くエッチングすることで完成する。誘導結合プラズマエッチング後の導波路の走査電子顕微鏡写真を図3に示す。図3(a)から側壁が綺麗にエッチングされていることが確認できる。また図3(b)から導波路幅は設計値に比べて $0.1\mu\text{m}$ 狭くなっているが、およそ設計値通りにエッチングされた事がわかる。



(a) 結合導波路部付近の鳥瞰図



(b) 結合導波路部の断面

図3 エッチング後の走査電子顕微鏡像

(2) マイクロリングレーザのCW発振

リッジ型導波路のデバイスでは発振に至らなかったが、ハイメサ型導波路のリングレーザで室温連続発振に成功した。発振したデバイスは図1(a)に示すオールパス型のリングレーザである。入出力導波路部もリング部と同じ組成の活性層を持つために発振光が吸収されるのを防ぐため、電極1および電極3に注入する電流を 42mA に固定して僅かに利得を持たせて光吸収を補償し、マイクロリング部の電極2に注入する電流量を変化させた時の、ポート1からの注入電流対光出力(IL)

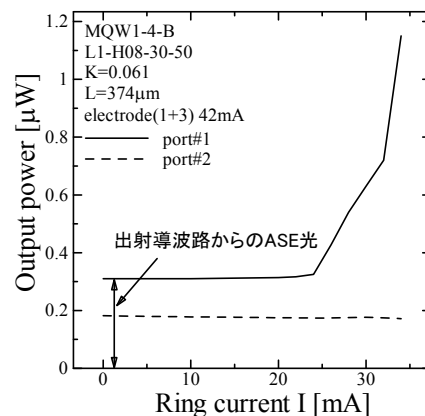


図4 マイクロリングレーザのIL特性

特性を図4に示す. 25mAを超えると光出力が立ち上がり, 室温連続(CW)発振が確認された. 閾値電流密度は $J_{th}=2.48\text{kA/cm}^2$ であった. またポート2ではASE光に埋もれて光出力の立ち上がりが確認されなかった.

(3) フリップフロップ動作とインバータ動作の実証

フリップフロップ特性を, 図5の測定系を用いてポート1からサーキュレータを用いて波長可変レーザからの出力光を注入して, マイクロリングレーザの同じポート1からの出力光の変化を測定した. 光注入前の発振スペクトルを図6(a)に示す. リング部への注入電流 41.59mAで

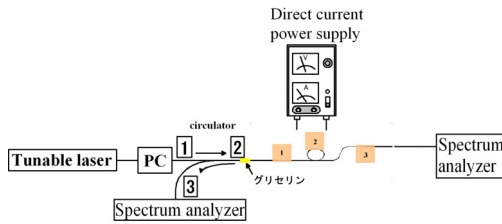
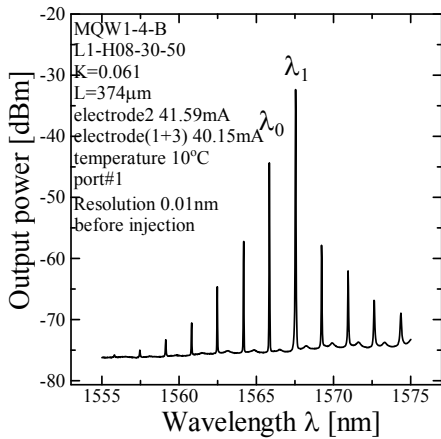
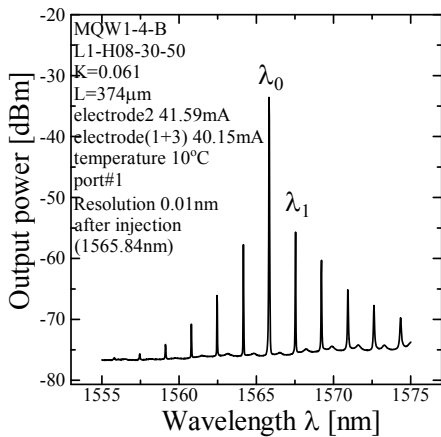


図5 光フリップフロップ動作の測定系



(a) 外部からの光注入前の発振スペクトル



(b) 1565.84nm(λ_0)注入後の発振スペクトル
図6 フリップフロップ動作時の発振スペクトル変化

1567.54nm (λ_1)に発振ピークが見られる. この発振している状態のリングレーザに波長可変レーザから1つ短波長側の1565.84nm(λ_0)のCW光(出力-2.7dBm)を入射させ, 発振スペクトルをスペクトルアナライザで測定した. 入射後のスペクトル特性を図6(b)に示す. 入射前後ではじめに発振していた波長1567.54nm(λ_1)のピーク出力が23.4dB抑制され, 波長1565.84nm(λ_0)が10.8dB増大して発振波長が切り替わった. 続けて波長1565.84nm(λ_0)を注入すると, 図7に示すように1565.84nm(λ_0)の発振が29.6dB抑制され, 1567.54nm(λ_1)が23.8dB増大して発振波長が元に戻った. このように光注入によってフリップフロップのセット, リセット動作が実証された.

なお, このフリップフロップ動作はポ

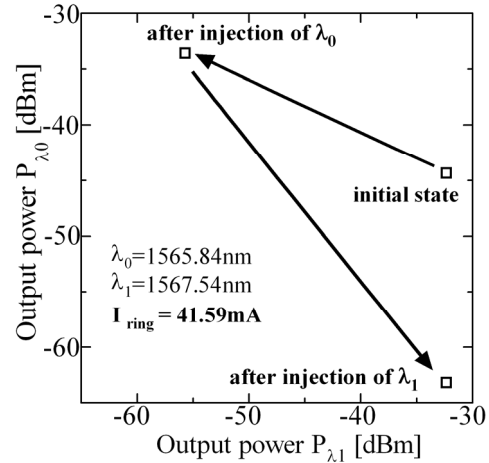
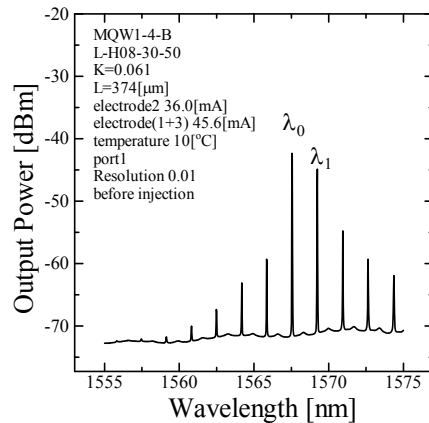


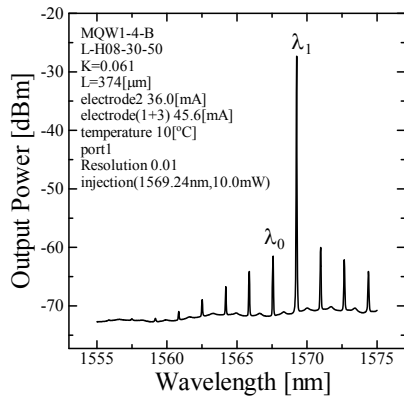
図7 光フリップフロップ動作による2つの発振波長ピークの出力変化

ート2の出力でも確認されたが, 光出力はポート1に比べて30dBも小さかった.

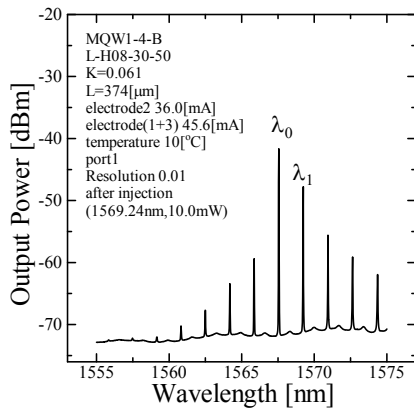
一方, まったく同じデバイスのリング部への注入電流を36.0mAにして同様の測定を行った. 外部光注入前の発振スペクトルを図8(a)に示す. 波長1567.56nm



(a) 外部からの光注入前の発振スペクトル



(b) 1569.24nm (λ_1) 注入中の発振スペクトル



(c) 1569.24nm (λ_1) 注入 OFF 後のスペクトル
図 8 インバータ動作時の発振スペクトルの変化

(λ_1) および 1569.24nm (λ_2) の 2 つの発振ピークがほぼ拮抗している。

この状態のリングレーザに波長可変レーザから長波長側の 1569.24nm (λ_2) の CW 光 10.0mW をポート 1 から入射させ、サーキュレータを介して同じポート 1 からの発振スペクトルを測定した。その測定結果を図 8(b) に示す。ここで、 λ_2 の光は導波路入射端での反射によって波長可変

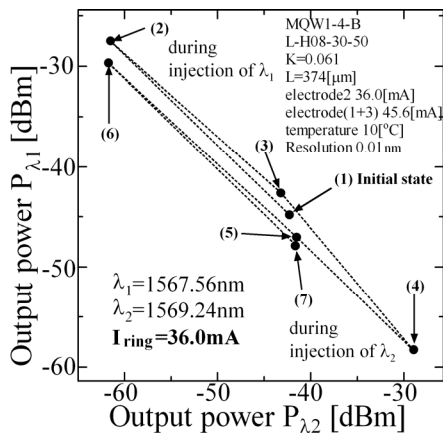


図 9 光インバータ動作による 2 つの発振波長ピークの出力変化

レーザからの注入光が混入しているため、 λ_2 のレーザ発振光強度は外部注入光に埋もれてしまって測定できない。このとき、1567.56nm (λ_1) での発振ピーク強度は入射前と比べて 19.2dB 減少した。次に、1569.24nm (λ_2) の入射光を off にしたところ、図 8(c) のように入射前とほぼ同じスペクトル特性が得られた。よって、このスペクトル変化は波長 λ_1 の光入射によって、波長 λ_1 の光強度を減少させているのでインバータ動作による波長変換が実現できたことになる。インバータ動作の測定結果をまとめると、図 9 のようになり、初期状態から出発して波長 1567.56nm (λ_1) を外部から注入した場合と波長 1569.24nm (λ_2) を注入した場合の両方の方向にインバータ動作を実証した。

(4) まとめ

当初の目的であった光-光演算デバイスとして、マイクロリングレーザへの注入同期を利用したフリップフロップとインバータ動作は実証できた。ただし、マイクロリング光増幅器への相互変調効果によるレベルリミッタや XOR などのロジック回路は、数値シミュレーションによって実現可能性の目処をつけたものの実証には至っていない。本プロジェクトは終了したが、製作した図 1 に示す 3 種類のデバイスの中でマイクロリング光増幅器は未測定のデバイスが残されているため、今後はこれらのデバイスを用いてマイクロリング光増幅器への相互変調効果による光-光演算の実証を目指す。

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 15 件)

- (1) Hiroki Ikehara, Tsuyoshi Goto, Hiroshi Kamiya, Taro Arakawa, and Yasuo Kokubun, "Hitless wavelength -selective switch based on quantum well second-order series-coupled microring resonators," *Optics Express*, vol.21, no.5, pp.6377-6390, 2013, 査読有, DOI: 10.1364/OE.21.006377
- (2) Hiroshi Kamiya, Tomohiro Nagata, Yuta Ueyama, Taro Makino, Taro Arakawa, and Yasuo Kokubun, "Coherent Coupling in High-Mesa Semiconductor Directional Coupler", *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.52, 022502 (6 pages), 2013, 査読有, DOI: 10.7567/JJAP.52.022502
- (3) Hideki Yajima, Taro Arakawa, and Yasuo Kokubun, "Proposal of All-Optical Active Microring Logic Gate for Microring Processor", *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.51,

122201, 2012, 査読有, DOI: 10.1143/JJAP.51.122201

- (4) Hiroki Kaneshige, Yuta Ueyama, Hitoshi Yamada, Hideki Yajima, Taro Arakawa, and Yasuo Kokubun, "InGaAs/InAlAs Quantum Well Mach-Zehnder Modulator with Single Microring Resonator", Jpn. J. Appl. Phys., Special Issue on SSDM, vol.51, no.2, 02BG01 (6 pages), 2012, 査読有, DOI: 10.1143/JJAP.51.02BG01
- (5) Taro Makino, Tsuyoshi Gotoh, Ryo Hasegawa, Taro Arakawa, and Yasuo Kokubun, "Microring resonator wavelength tunable filter using five-layer asymmetric coupled quantum well," IEEE/OSA J. Lightwave Technolgy, vol.29, no.16, pp.2387-2392, 査読有 (2011).

〔学会発表〕 (計 39 件)

- (1) Hiroshi Kamiya, Tuyoshi Goto, Katouf Redouane, Taro Arakawa, and Yasuo Kokubun, "First Demonstration of Hitless Wavelength Selective Switch Based on Quadruple Series Coupled Multiple Quantum Well Microring Resonator," OFC/NFOEC2013, March 20, 2013, Anaheim, USA.
- (2) Hiroshi Kamiya, Tomohiro Nagata, Yuta Ueyama, Taro Makino, Taro Arakawa and Yasuo Kokubun, "Analysis of Coherent Coupling in High-Mesa Directional Coupler," 2012 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2012), Sept.25-27, 2012, Kyoto.
- (3) Hideki Yajima, Masaki Nishimura, Taro Arakawa, and Yasuo Kokubun, "Proposal of All-Optical Active Microring Logic Gate," 2012 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2012), Sept.25-27, 2012, Kyoto.
- (4) Hiroki Ikehara, Tsuyoshi Goto, Hiroshi Kamiya, Taro Arakawa, and Yasuo Kokubun, "Hitless Wavelength- Selective Switch Using Multiple Quantum Well Second-Order Series Coupled Microring Resonators," Photonics in Switching 2012 (PS2012), Sept. 11-14, 2012, Corcica France.
- (5) H. Kaneshige, Y. Ueyama, H. Yamada, T. Arakawa, and Y. Kokubun, "Quantum Well Mach-Zehnder Modulator with Single Microring Resonator and Optimized Arm Length," 17th Microoptics Conference (MOC'11), Nov. 1, 2011, Sendai.
- (6) 小林広樹, カトフ レドワン, 谷口理一, 梅原周, 荒川太郎, 國分泰雄, "全光フリップフロップのための半導体マイクロリングレーザの非対称発振", 第 60 回応用

物理学会春季学術講演会, 神奈川工科大学, 29p-B3-16, 2013 年 3 月 29 日.

- (7) 矢島英樹, 西村真樹, 荒川太郎, 國分泰雄, "アクティブマイクロリング全光論理ゲートの提案", 第 73 回応用物理学会学術講演会, 愛媛大学/松山大学, 13p-C5-4, 2012 年 9 月 13 日.
- (8) 神谷宙, 上山雄太, 荒川太郎, 國分泰雄, "ハイメサ半導体光導波路におけるコア導波モードとクラッド層を伝搬するリーキモードによる干渉の実験的検証", 第 59 回応用物理学関係連合講演会, 早稲田大学, 17p-F4-7, 2012 年 3 月 17 日.
- (9) 矢島英樹, 荒川太郎, 國分泰雄, "マイクロリングプロセッサのためのアクティブマイクロリング全光論理ゲートの提案", 電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会, OPE2011-188 (vol.111, no.413, pp.281-286), 2012 年 1 月 27 日.
- (10) 永田智洋, 榎野太郎, 後藤剛, 荒川太郎, 國分泰雄: "コヒーレント結合による方向性結合器の低損失設計法", 2010 年電子情報通信学会総合大会, 東北大学, C-3-11, 2010 年 3 月 16 日.
- (11) 大澤和弘, 荒川太郎, 國分泰雄, "ループミラーと増幅器による一方向性発振マイクロリングレーザの方向選択特性", 第 70 回応用物理学会学術講演会, 富山大学, 11a-P8-29, 2009 年 9 月 11 日.

〔図書〕 (計 2 件)

- (1) Yasuo Kokubun, "Lightwave Engineering", CRC Press (Optical Science and Engineering Series), 2012, 416 Pages.
- (2) Yasuo Kokubun and Tomoyuki Kato, "Photonic Microresonator Research and Applications," Chapter 3, Edited by Ioannis Chremmos, Otto Schelb, and Nikolaos Uzunoglu, Springer, 2010, pp.87-113. DOI 10.1007/978-1-4419-1744-7

6. 研究組織

(1) 研究代表者

國分 泰雄 (KOKUBUN YASUO)
横浜国立大学・工学研究院・教授
研究者番号: 60134839

(2) 研究分担者

荒川 太郎 (ARAKAWA TARO)
横浜国立大学・工学研究院・准教授
研究者番号: 40293170

(3) 連携研究者

カトフ レドワン (KATOUF REDOUANE)
横浜国立大学・工学研究院・研究教員
研究者番号: 70552587
(平成 22 年度～平成 24 年度連携研究者)