

平成 30 年 6 月 13 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03578

研究課題名(和文) デジタルフォトニクスの実現を目指す超低閾値光信号2値論理プロセッサの研究

研究課題名(英文) Study on all-optical binary logic processor with ultra-low threshold for digital photonics

研究代表者

國分 泰雄 (Kokubun, Yasuo)

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：60134839

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,100,000円

研究成果の概要(和文)：量子井戸半導体マイクロリングレーザの隣接発振波長間の切り替わりを利用したインバータ動作を基本として、2段縦列接続による全光2値論理デバイスの実現を目指して、一方向選択発振の条件探索を行い、帰還光の位相が大きく関係することを発見して一方向発振マイクロリングレーザを設計した。また、同一のデバイスでフリップフロップ動作とインバータ動作を帰還光の位相によって周期的に切り替えられることを実験的に発見し、この現象がカー効果による振幅の非線形性と帰還光のバスライン導波路内でのファブリペロー共振に起因するバスライン結合部における位相の非線形性によって説明できることを理論的に明らかにした。

研究成果の概要(英文)：To realize all-optical binary logic device suitable for cascade integration based on adjacent lasing wavelengths of multiple-quantum-well (MQW) semiconductor microring lasers (SMRLs), we investigated the unidirectional selective lasing condition and found that the phase of feedback light from a reflection facet affects the power ratio of clockwise to counterclockwise lasing. Using this knowledge, we designed a unidirectional microring laser. Next, we demonstrated that all-optical flip-flop and inverter operations using two adjacent lasing wavelengths can be realized in the identical semiconductor microring laser and the operations are switchable periodically with the phase of feedback light from a reflection facet. Lasing conditions for the switching of operations are investigated experimentally and compared with a theoretical model.

研究分野：工学，光エレクトロニクス

キーワード：マイクロリング共振器 全光インバータ 全光2値論理 全光フリップフロップ 半導体レーザ 注入同期 非対称方向性発振

1. 研究開始当初の背景

光ファイバ通信トラフィックの爆発的増大に対処する全光ルータの実現、および光ファイバネットワークのルート履歴に依存してパルスピーク電力が大きく変動する問題への対処には、入力信号パルスのピーク光強度が大きく変動しても一定出力が得られる光 2 値論理デバイスが不可欠である。しかしながら、その実現に必要な光-光信号処理、あるいは全光演算 (AND, NAND, OR, XOR 等) を光信号のみで実現する完全な光 2 値論理デバイスは未開発であった。

それまでに光フリップフロップや光インバータ、あるいは光双安定レーザなどを用いた光-光信号処理デバイスとして、各種の光-光信号処理デバイスが提案・実証されていたが、set パルスと reset パルスの 2 入力 (2 ポート) を必要とするデバイス、あるいは出力信号の伝達方向が 1 方向でないデバイス (入射端に反射するデバイス等) では縦列接続による集積化と論理和等の回路構成が困難であり、また集積化に適していないなどの問題があった。つまり、低入力光レベルまで動作可能で、ダイナミックレンジが広く安定動作が可能であり、急峻な閾値特性をもち、高速動作可能で集積化可能な光 2 値論理デバイスは、まだ開発されていなかった。

一方、研究代表者らは平成 24 年度までに実施した基盤研究 S において、室温連続発振マイクロリングレーザ (μ リングレーザ) を用いて、フリップフロップ動作とインバータ動作の実証に成功した[1]。このインバータ動作の入力光強度依存性は、マイクロリング部の入射端で -50 dBm から -28 dBm までの広い範囲でインバータ動作を起こし、超低閾値でダイナミックレンジが広いことが確認された。この測定結果を基に、さらに次段に同じインバータを用いれば、入力パルス光強度に対して完全に光 2 値論理が可能であるとの着想に至った。

2. 研究の目的

本研究では、(1) 一方向性発振マイクロリングレーザを実現してそのインバータ動作可能範囲を理論的および実験的に明らかにし、(2) インバータの 2 段縦列接続による光 2 値論理デバイスのパラメータ依存性 (入力光閾値の注入電流依存性、入力光 (注入光) の波長離調量と消光比との関係、応答速度など) を理論的に解明して、2 値論理の動作範囲を明らかにする。そして最終的に、(3) 一方向性発振マイクロリングレーザの 2 段縦列接続による光 2 値論理デバイスを試作し、その動作速度の入力光レベル依存性等を測定して高速動作の実証を目指した。

3. 研究の方法

本研究のデバイスを実現するには、①インバータの 2 段縦列接続に必要な非対称一方向性発振の動作条件のパラメータ依存性の解明、②入出力導波路の損失制御と一方向性発振マイクロリングレーザ、③直列接続したインバータによる 2 値論理動作の理論的および実験的検証、が必要になる。そこで本研究では、①は時計回りと反時計回り発振をモデル化したレート方程式を用いて、および製作したマイクロリングレーザを用いて、ループミラーによる非対称一方向性発振の動作条件を理論的および実験的に解明し、②は量子井戸の無秩序化によって低損失化し、③については、研究の過程でインバータ動作とフリップフロップ動作が同一のデバイスで周期的に切り替わる現象を発見したため、安定したインバータ動作の条件を理論的および実験的に解明した。

4. 研究成果

(1) 非対称一方向性発振の動作条件のパラメータ依存性の解明：

バスライン導波路に単一マイクロリングが結合した all-pass 型 μ リングレーザに、図 1 の挿入図のようにループミラー構造を加えて非対称方向性発振を目指した。活性層に InGaAs/InGaAsP 多重量子井戸 (Multiple Quantum Well: MQW) (7 層) を用い、ハイメサ導波路 (幅 2.0 μm) でリング共振器とバスラインを構成し、リングとバスライン間の結合部は 2 段階エッチングによって活性層上面まで形成したギャップ幅 0.8 μm の方向性結合器 [2] を用いた。 μ リングレーザの周回長は 600 μm (FSR = 1.163 nm) であり、発振閾値電流は約 65 mA である。ループミラー部に電流をそれぞれ 0 mA, 150 mA 流したときの IL 特性を、時計回り (CW) 方向と反時計回り (CCW) 方向の各バスライン導波路の損失値から換算して図 1 に示す。リング部に 119 mA, ループミラー部に 150 mA 電流を注入したとき Port1 (CW) と Port2 (CCW) のリング結合部端での推定される光出力比は 7 dB となった。また帰還光の導波路部に注入する電流量を変化させることで出力比に変化が見られたため、非対称一方向性発振には帰還光の位相制御が必要と判明した。

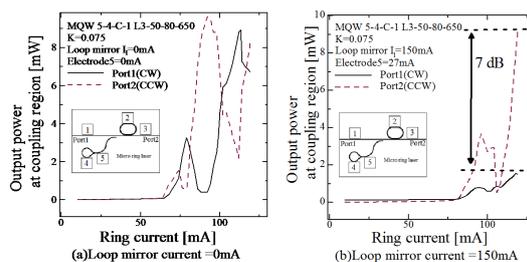


図 1 マイクロリングレーザの Port 1 と Port 2 の IL 特性

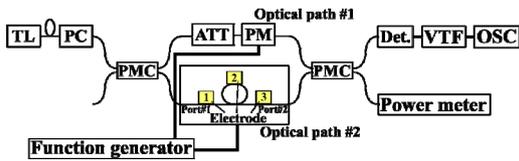


図2 微小位相変化量測定システム

次に、図2に示すマッハ・ツェンダー(MZ)干渉系を利用した位相制御特性の測定法を考案し、測定を行った。測定対象と反対側の光路に挿入した位相変調器に鋸波電圧を印加して、干渉波形より位相変化量を算出する。入出射端面間のファブリペロー(FP)共振のピーク波長シフト量測定による位相変化の測定結果も図3に示す。この結果より非対称方向性発振を得るために位相制御を $0 \sim 2\pi$ [rad]の範囲で行うには、導波路長は $316 \mu\text{m}$ 必要であることが分かり、新たにデバイスを設計した。

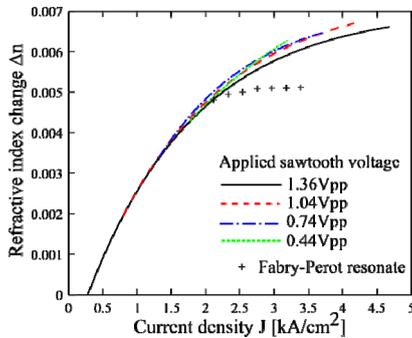


図3 位相変化量の測定結果から計算した屈折率変化量

(2) 入出力導波路の損失制御と一方向性発振マイクロリングレーザ：

マイクロリングレーザの縦列集積化では、非対称一方向性発振の必要性とともに、アクティブ領域とパッシブ領域を構成する材料が同じ量子井戸半導体であるため、アクティブ領域の増幅波長帯とパッシブ領域の吸収波長帯が一致して、デバイス間をつなぐバスライン導波路部で吸収損失が発生してしまうことが課題である。そこで、 SiO_2 でカバーしたパッシブ領域のみ吸収波長帯をブルーシフトさせて、選択的低損失化を行うことができる。急速熱アニール(Rapid Thermal Annealing: RTA)を用いた多重量子井

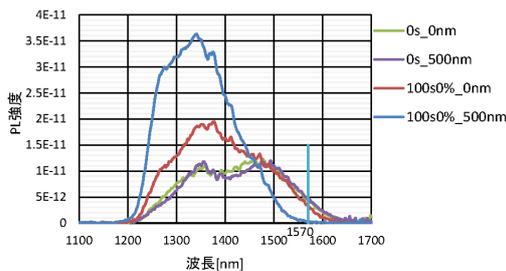


図4 急速熱アニール後(100秒, 873°C相当)とアニール前のMQW基板(SiO_2 膜500nm付きおよび膜無しの部分)のPLスペクトルの変化

戸(Multiple Quantum Well: MQW)構造の選択的無秩序化による低損失化法のプロセス条件確立を目指した。

この方法はアニール条件の装置依存性が大きいという問題があり、その原因の一端は基板面の温度再現性にあると考えられたため、実際の過熱条件に近い状況でカーボンボート内の基板位置に熱電対を設置して過熱時間と基板位置の温度を繰り返し測定して、基板位置における所望の温度を得るための過熱時間の条件をまず把握した。

次に基板温度と吸収波長の関係をフォトルミネッセンス(PL)法による発光スペクトルから推定して、図4に示すようにバスライン導波路部のみをほぼ選択的に低損失化できる条件を明らかにした。

(3) インバータ動作とフリップフロップ動作の切り替わり条件の検討：

全光フリップフロップ動作とインバータ動作が同一のデバイスで実現できることは実証できていたが、その動作原理が未解明であったため、利得と位相の非線形性に基づく動作モデルを構築した。レート方程式で扱うフォトン数の変数を2つに拡張し、かつ下記の二つの非線形モデルをレート方程式に取り入れた。

- a. バスライン導波路端面の反射とカー効果による位相非線形効果
- b. 非線形利得による振幅非線形効果

これらの効果を取り込んだレート方程式を用いて実験に用いたデバイスと同じパラメータ値を用いて計算機シミュレーションを行ったところ、図5(a)と(b)に示すように、レーザ注入電流量の違いによって、同じ強度の光注入時の動作が同一デバイスでインバータ動作およびフリップフロップ動作が起きる現象を説明できることを確認した。

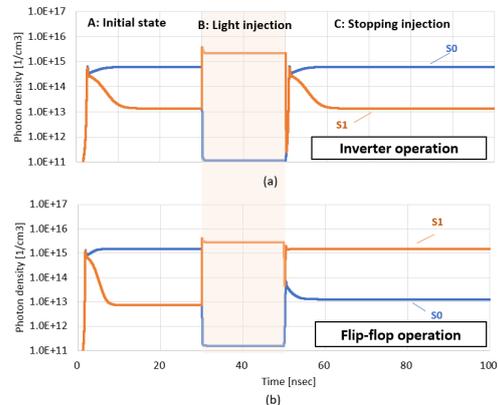


図5 マイクロリングレーザの光注入に対する時間応答のシミュレーション結果((a)は36mA, (b)は41.6mA注入時, 光入力は0dBm)

次に全光フリップフロップ動作とインバータ動作が切り替わる条件を実験的に詳細に求め、構築したモデルとの比較を行っ

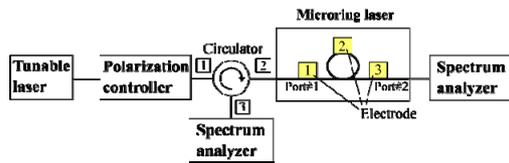


図6 全光フリップフロップおよびインバータ動作の測定系

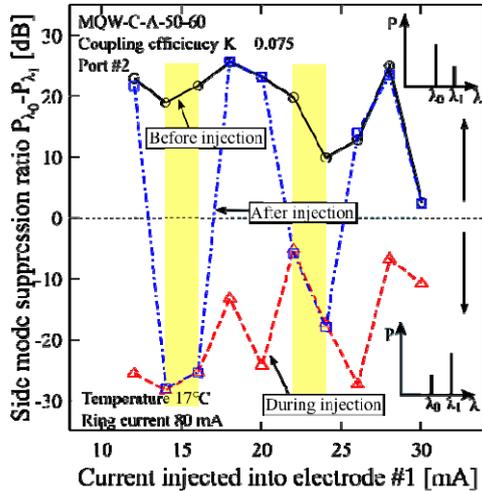


図7 バスライン導波路への注入電流変化に対する各入力光注入状態における副モード抑圧比

た．発振状態にあるマイクロリングレーザの発振ピーク波長を λ_0 ，隣接発振ピーク波長を λ_1 とする．図6に示す測定系を用いて，リング部への注入電流を一定（80 mA, $I_{th} = 38$ mA, $J_{th} = 2.9$ kA/cm²）とし，バスライン導波路への注入電流を変化させながら波長 λ_1 のCW光（-7.7 dBm）をPort#1から入射させた際の，波長 λ_0 の発振ピーク出力 P_{λ_0} と波長 λ_1 の発振ピーク出力 P_{λ_1} の変化を測定した． P_{λ_0} と P_{λ_1} との比（dB単位なので数値の差）を縦軸に，横軸にバスライン導波路の電極#1への注入電流をとり，光注入前を○印と青の実線で，光注入中を△印と赤の破線で，注入光停止後を□印と青の一点鎖線で表すと，図7のようになる．

光注入中（△）と注入光停止後（□）が一致すれば注入光停止後も発振波長が元に戻っていないのでフリップフロップ動作であり（図7の黄色領域），注入光停止後（□）が光注入前（○）に戻っていれば注入後の発振波長が元に戻っているのでインバータ動作（図7の青色領域）である．なお，フリップフロップ動作はさらに波長 λ_1 の注入光を停止後に発振波長が λ_1 にとどまっていることを確認しただけでなく，逆に波長 λ_0 のCW光を注入した場合に発振波長が λ_0 に戻ることも確認した．

図7より，フリップフロップ動作とインバータ動作が，バスライン導波路への注入電流量に対して周期的に切り替わることを発見した．また，温度を変化させて同様の測

定を行い，フリップフロップ動作とインバータ動作が切り替わるバスライン導波路への注入電流値がシフトすることを発見した．以上から，注入キャリアの効果，あるいは温度変化の効果によりバスライン導波路の屈折率が変化することが，フリップフロップおよびインバータ動作が切り替わる条件に関係していることを明らかにした．

<引用文献>

- ① T. Miyamoto, S. Umehara, H. Kobayashi, R. Taniguchi, R. Katouf, T. Arakawa, Y. Kokubun, "All optical Flip-Flop and Inverter Using Adjacent Lasing Wavelengths by Semiconductor Microring Laser," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 53, no. 8S2, 08MB04, 2014.
- ② T. Makino, T. Gotoh, R. Hasegawa, T. Arakawa, Y. Kokubun, "Microring resonator wavelength tunable filter using five-layer asymmetric coupled quantum well," J. Lightwave Tech., 29, no. 16, pp. 2387-2392, 2011.

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 1 件）

- ① N. Kobayashi, Y. Kawamura, R. Aoki, Y. Kokubun, "Nonlinear model analysis of all-optical flip-flop and inverter operation of microring laser," Jpn. J. Appl. Phys., 査読有, vol. 57, no. 3, 032201, Feb. 6, 2018. <https://doi.org/10.7567/JJAP.57.032201>

[学会発表]（計 17 件）

- ① 小林直樹, 青木椋祐, 河村雄作, 國分泰雄, "マイクロリングレーザの非線形モデルに基づく全光フリップフロップおよびインバータ動作の理論的検討", 第65回応用物理学会春季学術講演会, 18p-B203-2, 2018年3月18日発表.
- ② 青木椋祐, 小林直樹, 河村雄作, 荒川太郎, 國分泰雄, "半導体マイクロリングレーザを用いた全光フリップフロップおよびインバータ動作の切り替わり条件の実験的検討" 第65回応用物理学会春季学術講演会, 18p-B203-3, 2018年3月18日発表.
- ③ Y. Kokubun, "Passive waveguide device technologies - building block of functionality and integration," (Tutorial talk) Optical Fiber Conference 2017, Los Angeles Convention Center, Th3E.5, March 23, 2017.
- ④ 高澤弘樹, 本間洋行, 荒川太郎, 國分泰雄, "単一シリコンマイクロリング装荷型

- マッハ・ツェンダー光変調器の高速変調特性”, 第 64 回応用物理学会春季学術講演会, 17p-F204-6, 2017 年 3 月 17 日.
- ⑤ 小松原拓也, 荒川太郎, 國分泰雄, “デジタルフィルタ設計手法を用いた異径直列結合マイクロリング共振器波長フィルタの設計と解析”, 第 64 回応用物理学会春季学術講演会, 16a-316-8, 2017 年 3 月 16 日.
- ⑥ 河村雄作, 青木椋祐, 荒川太郎, 國分泰雄, “非対称方向性発振マイクロリングレーザのための帰還光位相制御特性の測定”, 第 64 回応用物理学会春季学術講演会, 15p-422-15, 2017 年 3 月 15 日.
- ⑦ 小松原拓也, 早坂伸之, 荒川太郎, 國分泰雄, “デジタルフィルタ設計手法を用いた高次直列結合量子井戸マイクロリング波長フィルタの設計”, 電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会, OPE2016-65, 函館ロワジュールホテル, 2016 年 8 月 25 日~26 日.
- ⑧ N. Kawaguchi, K. Hori, T. Arakawa, Y. Kokubun, “Design for High Speed Operation of Double Microring Resonator-Loaded Mach-Zehnder 2×2 Quantum Well Optical Switch,” 21st Optoelectronics and Communications Conference /International Conference on Photonics in Switching 2016 (OECC/PS2016), Niigata, ThD3-4, July 7, 2016.
- ⑨ 川口直輝, 堀健人, 荒川太郎, 國分泰雄, “マイクロリング共振器装荷型マッハ・ツェンダー 2×2 光スイッチの高速化に関する検討”, 第 63 回応用物理学会春季学術講演会, 東京工業大学, 20p-S321-15, 2016 年 3 月 20 日.
- ⑩ 川口直輝, 堀健人, 荒川太郎, 國分泰雄, “ダブル微小リング共振器装荷型マッハ・ツェンダー 2×2 量子井戸光スイッチの高速化の検討”, 電子情報通信学会第 3 回集積光デバイスと応用技術研究会 (IPDA 研究会), 東レ総合研修センター (静岡県三島市), IPDA15-P04, 2016 年 3 月 3 日.
- ⑪ 吉田草一郎, 石原慎太郎, 荒川太郎, 國分泰雄, “シリコンマイクロリング装荷型マッハ・ツェンダー干渉計バイオセンサーのセンシング評価”, 電子情報通信学会信頼性研究会, R2015-31 (電子情報通信学会技術研究報告 ISSN 0913-5685, vol. 115, no. 194, pp. 45-48), 青森, 2015 年 8 月 27 日.
- ⑫ 荒川太郎, 國分泰雄, “半導体微小リング共振器装荷マッハ・ツェンダー干渉計光制御デバイス”, 電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ第 1 回超高速光エレクトロニクス研究会, 東大生研, 2015 年 7 月 22 日.
- ⑬ 本間洋行, ラジディープ・ゴータム, 荒川太郎, 國分泰雄, “インターリーブ型 PN

- 接合を有するシリコンマイクロリング装荷型マッハ・ツェンダー光変調器の評価”, 電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会, P3-8, 熱海, 2015 年 4 月 23 日.
- ⑭ 堀健人, 西村真樹, 荒川太郎, 國分泰雄, “量子井戸マイクロリング装荷型マッハ・ツェンダー 2×2 光スイッチの設計と作製”, 電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会, P1-11, 熱海, 2015 年 4 月 23 日.
- ⑮ K. Hori, M. Nishimura, T. Arakawa, Y. Kokubun, “Design and Fabrication of Double Microring Resonator-Loaded Optical Mach-Zehnder Modulator,” 4th International Symp. Materials Science and Surface Technol. (MSST) 2015, PB18, Aug. 2015.
- ⑯ H. Homma, R. Gautam, T. Arakawa, Y. Kokubun, “Modulation Characteristics of Silicon Microring Resonator-Loaded Mach-Zehnder Optical Modulator with Interleaved PN Junctions,” 4th International Symp. Materials Science and Surface Technol. (MSST) 2015, PB14, Aug. 2015.
- ⑰ H. Homma, R. Gautam, T. Arakawa, Y. Kokubun, “Silicon Microring Resonator-Loaded Mach-Zehnder Modulator with Interleaved pn Junction,” 20th Microoptic Conference (MOC'15), Fukuoka, G2, (Technical Digest pp. 86-87), Oct. 27, 2015.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

國分 泰雄 (KOKUBUN, Yasuo)

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号: 6 0 1 3 4 8 3 9

(2) 研究分担者

荒川 太郎 (ARAKAWA, Taro)

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号: 4 0 2 9 3 1 7 0

(3) 連携研究者

(4) 研究協力者

小林 直樹 (KOBAYASHI, Naoki)

河村 雄作 (KAWAMURA, Yusaku)

青木 椋祐 (AOKI, Ryosuke)
高澤 弘樹 (TAKAZAWA, Hiroki)
本間 洋行 (HOMMA, Hiroyuki)
小松原 拓也 (KOMATSUBARA, Takuya)
早坂 伸之 (HAYASAKA, Nobuyuki)
川口 直輝 (KAWAGUCHI, Naoki)
堀 健人 (HORI, Kento)
吉田 草一郎 (YOSHIDA, Soichiro)
石原 慎太郎 (ISHIHARA, Shintaro)
ラジディーブ ゴータム (GAUTAM,
Rajdeep)
西村 真樹 (NISHIMURA, Masaki)