

波長チャ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

Semiconductor microring processor using wavelength channel control

國分 泰雄 (KOKUBUN YASUO)

横浜国立大学・理事・副学長



研究の概要

半導体量子井戸光増幅器 (SOA) マイクロリング共振器における信号光自身の自己位相変調や入力信号光と制御光間の相互利得変調および相互位相変調を増強して、高速光パルス信号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行う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指している。

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

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において、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、光信号を光のままにルーティングする光-光制御技術が今後不可欠になる。

この問題を解決するには、高速・小型な集積化全光演算制御デバイスが必要になる。しかし、この実現に不可欠な、多波長を自在に用いたルーティング、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

半導体量子井戸による光増幅器 (SOA) 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、一方向発振レーザを利用したフリップ-フロップ回路を開発して、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す。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、基本特性の指標となる利得増強特性を実証する。この特性は光 3R 機能の内の Regeneration に相当するが、さらに共振による SPM および XPM 効果の増強を裏付けるものでもあるので、SPM 効果によるゲート動作とレベルリミッタ動作による波形整形効果を実証する。

さらに本研究の後半においては、ポンプ光と制御光を用いた XPM による高速光-光スイッチングや、2波長の制御光による XOR、一方向発振レーザへの注入同期による光フリップ-フロップなどの半導体マイクロリングプロセッサの実現を目指す。

4. これまでの成果

(1) 半導体マイクロリング導波路の設計および製作技術の確立

半導体光増幅器導波路をマイクロリング共振器形状にエッチング加工し、クラッドおよび電極を形成して半導体マイクロリング共振器を製作するための基本的設計・製作技術の開発を行った。まず、本研究の量子井戸半導体導波路によるマイクロリング共振器の設計上の課題は、埋め込みクラッド層に BCB などのポリマーを使うと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結合率 K として十分大きな値 (0.3 程度) が得られない点であった。

この問題の解決のため、結合部に直線導波路部を設けたレーストラック共振器形状の導入と、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。

この設計に基づき、周回長 172 ミクロンの単一のレーストラック型リング共振器構造を製作した。2段階エッチング加工に成功し、共振波長間隔 (FSR)、結合効率 K 、周回損失等をほぼ設計どおり得ることに成功した。

(2) 新しい一方向発振レーザの提案と設計

リングレーザの外部に反射構造を設け、リング内で発生した反時計回り (CCW) 方向発振光を時計回り (CW) 方向に戻し、相対的に CW 方向の強度を増やす構造を考案した。この構造では、リングとバスライン間の結合率 K を変化させることで、CW 方向と CCW 方向の光出力比を変化させることが可能となる。

その基本特性の解析においては、まず伝達関数を解いて CW、CCW 双方の発振条件を求め、続いて発振後における CW 方向に伝搬する光子量と CCW 方向に伝搬する光子量の比を、レート方程式を解いて算出し、反射部利得 20dB、 $K=0.8$ で 18dB の選択比が得られることを明らかにした。さらに、マイクロリング内部に増幅領域と可飽和吸収領域を挿入することにより、一層一方向性発振に近づけ得ることを示した。

さらに、上記設計に基づいて一方向発振レーザの試作を試みたが、電極形成上の問題が生じ、レーザ発振には至らなかった。

(3) コヒーレント結合の発見と結合部設計法の確立

結合部において偶モードと奇モードのほかにリーキーモードが励振されるため、多モード干渉によって結合率および結合損失に周期的変化が重畳されることを計算機シミュレーションによって発見して、これをコヒーレント結合と名付けると共に、結合損失が極小値をとる条件を明らかにして、低損失な結合部設計法を確立した。すなわち、導波路幅を変化させると伝搬定数が増えるため、低損失となる結合長の周期と所望の結合効率を得る結合長が変化する。この結果から最適な導波路幅を計算することで、損失の極めて小さい方向性結合器を設計することが可能となった。

5. 今後の計画

上記で述べた電極形成上の問題を解決し、一方向発振レーザによる光フリップフロップ動作の実現、マイクロリング SOA の利得増強効果の実証、2 波長の信号による波長変換+インバータ動作および波形整形や、XOR、光フリップフロップなどの論理回路の実現を目指す。さらにこれらの光演算回路用基本

要素デバイス一方向発振レーザによる光フリップフロップを集積化し、マイクロリングプロセッサの実現する。

6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む) [主要発表論文]

- (1) T. Yamada, Y. Kokubun, "Hitless wavelength selective switch using vertically coupled microring resonator manipulated by MEMS structure," Appl. Phys. Express, vol.2, 062402 (2009).
- (2) T. Makino, R. Hasegawa, T. Arakawa, and Y. Kokubun, "Fabrication of Microring Resonator Tunable Wavelength Filter Using Five-layer Asymmetric Coupled Quantum Well," 22nd Annual Lasers and Electro Optics Society Meet., WN1 (2009).
- (3) Y. Iseri, T. Arakawa, K. Tada, and N. Haneji, "Influence of Heterointerface Abruptness on Electrorefractive Effect in InGaAs/InAlAs Five-Layer Asymmetric Coupled Quantum Well," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 49, 4DG04 (2010).
- (4) N. Kobayashi, T. Sato, and Y. Kokubun, "UV trimming of Polarization-independent Microring Resonator by Internal Stress and Temperature Control," Optics Express, vol.18, pp.906-916 (2010).
- (5) T. Arakawa, T. Toya, M. Ushigome, K. Yamaguchi, T. Ide and K. Tada, "InGaAs/InAlAs Five-Layer Asymmetric Coupled Quantum Well Exhibiting Giant Electrorefractive Index Change," Jpn. J. Appl. Phys., vol.50, 032204 (2011).

[受賞]

- (1) 第 12 回 (平成 20 年度) 電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ賞, 國分 (2009 年 9 月 16 日)
- (2) MOC Student Paper Award, 第 15 回微小光学国際会議 (15th Microoptics Conference), 國分指導学生 (2009 年 10 月 27 日)
- (3) IEEE Fellow Elevation (米国電気電子学会フェロー称号授与), 國分
- (4) 電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会第 4 回学生優秀研究賞 (2010 年 5 月 21 日), 國分指導学生
- (5) IEEE Photonics Society Japan Chapter Young Scientist Award (2010 年 7 月 6 日), 國分指導学生
- (6) 電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ, ELEX Best Paper Award (2010 年 9 月 15 日), 國分
- (7) MOC Best Paper Award, 第 16 回微小光学国際会議 (2010 年 11 月 2 日), 國分

ホームページ等

<http://www.dnj.ynu.ac.jp/kokubun-lab/>