

審査の結果の要旨

論文提出者 竹中 充

本論文は、将来の光ネットワークでデジタル全光処理を担う光フリップフロップを如何に実現するかについて研究した成果を英文でまとめたもので、7章より構成されている。

第1章は序論であって、研究の背景、動機、目的と、論文の構成が述べられている。現在の全光デバイスには出力を維持する機能(ラッチ機能)が欠如している。ラッチ機能を有する全光フリップ・フロップが実現できれば、従来の全光デバイスと併せて高度なデジタル全光処理が可能となる。全光フリップ・フロップの出発点となり得るデバイスとして、双安定半導体レーザ(bistable laser diode, BLD)がある。この双安定レーザでは、制御光によるオン動作が可能なのは知られていたが、光によるオフ動作が困難という問題があった。本論文の目的は、非線形結合器と双安定半導体レーザを組み合わせて光リセットを可能にし、全光フリップ・フロップを実現することにある。

第2章は「Simulation method」と題し、本論文で提案する新しい全光フリップ・フロップの動作を解析するシミュレータについて述べている。現在までに研究されてきた能動素子を含む全光デバイスのシミュレーション技法の中から、計算の効率と柔軟性という観点で、伝達行列法と有限差分ビーム伝搬法を用いることとしている。まず方向性結合器型の双安定レーザ(DC-BLD)に適用するため、モード結合理論を組み入れた伝達行列法の拡張を行い、DC-BLDの特性解析を可能とした。一方ビーム伝搬法は、伝達行列法とは異なりモード解析を予め行う必要がなく、より柔軟に様々な導波路の解析を行うことができ、これまで主に受動素子の設計に用いられてきたが、ここではそれをレート方程式と組み合わせることで、半導体レーザの特性解析に適用できるよう拡張した。その結果、多モード干渉結合器(MMI)型およびマッハ・ツェンダー結合器(MZI)型の全光フリップ・フロップ解析が可能となっている。

第3章は「Absorptive bistable laser diode」と題し、双安定性を得るために使用される可飽和吸収領域の基本的な特性を知るため、実際に双安定半導体レーザを作製し評価を行った結果について述べている。BLDにおいて明瞭なヒステリシス特性を得るためには、可飽和吸収領域と利得領域の分離抵抗が重要になるが、プロセスの改善によりヒステリシスを得るのに十分な大きさの分離抵抗を得ている。また、可飽和吸収領域長を共振器長の約10%程度にすればよいことを実験的に明らかにした。さらに可飽和吸収領域を分割することで、より効率よく大きなヒステリシスの得られることがわかった。作製した双安定レーザに光を入射し、全光セット動作が可能であることを検証した後、高速動作に必要な可飽和吸収領域に逆バイアスを印加する実験も行っている。これらより、本論文で提案する全光フリップ・フリップに必要な、可飽和吸収領域の基本特性が明らかになった。

第4章は「DC bistable laser diode」と題し、まず2章で開発したシミュレータを用いて、DC-BLDの解析を行っている。その結果、方向性結合器の2つの導波路に注入する電流を調整することで、全光フリップ・フロップとして動作することが分かった。シミュレーションによる設計に基づき、実際にデバイスの作製を行った。活性層としてバンドギャップ波長が約1550nmの0.8%圧縮歪InGaAsP多重量子井戸を含む半導体多層構造を、有機金属気相エピタキシャル成長法を用いてInP基板上に作製した。この基板上に半導体レーザ作製プロセスを適用してDC-BLDを試作した。全光フリップ・フロップとして動作させるために重要なことは、方向性結合器の並行2導波路の電極分離である。本論文では、斜め電子ビーム蒸着により、自己整合的に電極分離を実現している。このように作製したDC-BLDにおいて、セット光、リセット光を入射し、実際に全光フリップ・フロップとして動作することを確認した。また、DC-BLDのスウィッチング速度を議論し、本研究の構造では約2GHz程度であることを見積もっている。

第5章は「MMI bistable laser diode」と題し、多モード干渉結合器型全光フリップ・フロップの特性をFD-BPM法で解析した結果について述べている。MMI-BLDにおいては、2つの発振モード間の重なりが双安定性に影響を与える。シミュレーションの結果、2入力2出力のMMIカプラを対角結合するように設計し、出力ポートに可飽和吸収領域を設けることで、光によるオフ動作が可能となり、全光フリップ・フロップが実現されることが明らかになった。MMI-BLDはオン状態とオフ状態の間でキャリアの変動が小さいため、スイッチング速度は緩和振動周波数よりも速くなり、約10~40GHzとなることが予測されている。

第6章は「MZI bistable laser diode」と題し、より高速で動作する全光フリップ・フロップとして、マッハツェンダー干渉計型双安定レーザ(MZI-BLD)の提案を行っている。MZI-BLDの特性解析をFD-BPM法により行った。MZI-BLDにおいてはMMI-BLDと同様、対角ポート間で発振する2つのモードが存在する。MZI-BLDの場合、2つのモードが干渉計アームで完全に重なるために、可飽和吸収領域を用いずにピッチフォーク型光双安定の得られることがシミュレーションにより分かった。この双安定性により、MZI-BLDが全光フリップ・フロップとして動作することが数値計算により確かめられた。MZI-BLDにおいては、オン状態とオフ状態でキャリアの変動が全くないため、動作速度は共振器の光子寿命にのみ依存し、デバイスを小型化したときの最大値は100 GHz程度であることが予測されている。

第7章は結論であって、本研究で得られた成果を総括している。

以上のように本論文は、双安定半導体レーザと非線形結合器に基づく新しい3種類の全光フリップ・フロップの提案を行い、その特性解析を可能とするシミュレータの作成、試作プロセス技術の開発、1.55 μm 帯方向性結合器型デバイスの試作と動作実証を行うとともに、多モード干渉結合器型およびマッハ・ツェンダー干渉計型デバイスについて数値解析を行って、より高速な全光フリップ・フロップ動作が可能であることを明らかにしたもので、全光処理情報通信ネットワークに向けて貢献するところ多大である。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。