

論文の内容の要旨

論文題目 Study on All-Optical Flip-Flop using Bistable Laser Diodes with Nonlinear Couplers

(非線形カプラを有する双安定半導体レーザを用いた
全光フリップ・フロップに関する研究)

氏名 竹中 充

(本文) 近年の通信容量の増大に伴い、波長変換や光スイッチ、合波・分波器などの全光デバイスが盛んに研究されている。しかし、現在の全光デバイスには出力を維持する機能がなく、入力があるときにしか出力が得られないという問題がある。このような全光デバイスに出力をラッチすることができる全光フリップ・フロップを付け加えることにより、光パケット・メモリなどを実現することが出来る。全光フリップ・フロップを実現するデバイスとしては、双安定半導体レーザ (Bistable Laser Diode, BLD) が長い間研究されてきた。最も代表的なものとして、可飽和吸収による双安定性レーザが知られている。この双安定性レーザは、光によるオン動作ができることはよく知られているが、通常の方法だと光によるオフ動作が難しいという問題があった。このために、現在のところ実用的な光フリップ・フロップは実用化されていない。そこで本論文では、非線形効果をもつ結合器 (カプラ) と双安定半導体レーザを組み合わせることで、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方法に関する研究を行った。半導体導波路デバイスにおいては、様々な種類の結合器が利用されている。その代表的なものとしては、方向性結合器 (Directional Coupler, DC)、多モード干渉結合器 (Multi-Mode Interferometer, MMI)、マッハ・ツェンダー干渉結合器 (Mach-Zehnder Interferometer, MZI) などが挙げられる。これらの代表的な結合器を利用することで、全光フリップ・フロップを実現することが出来る。

まず、本論文で提案する新しい全光フリップ・フロップを設計し、その動作を解析するためのシミュレータの開発を行った。半導体光増幅器 (Semiconductor Optical Amplifier, SOA) や LD などの能動素子を含む全光デバイスの計算方法は現在まで様々な形で研究されてきた。この中から、計算の効率と柔軟性という観点から、伝達行列法 (Transfer Matrix Method, TMM) と有限差分ビーム伝搬法 (Finite Difference Beam Propagation Method, FD-BPM) を用いることにした。伝達行列法は主に DFB レーザの解析に用いるために開発されており、単純なストライプ導波路を計算する方法としては高効率な計算手法として知られている。方向性結合器型の全光フリップ・フロップ (DC-BLD) に適用するために、モード結合理論と組み合わせることで、伝達行列法の拡張を行い、DC-BLD の特性解析を

行えるようにした。また、一方でビーム伝搬法を用いたシミュレータの開発も行った。ビーム伝搬法は、伝達行列法とは異なりモードの解析をする必要がなく、より柔軟に様々な導波路の解析を行うことができ、主に受動素子の設計に用いられてきた。これにレート方程式を組み合わせることで、半導体レーザーの特性を解析できるように拡張した。これにより、多モード干渉結合器およびマッハ・ツェンダー干渉結合器型の全光フリップ・フロップ (MMI-BLD および MZI-BLD) の解析が行えるようになった。

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得るために、実際に、一般的な双安定性レーザーを作製して評価を行った。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。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が得られるようになった。また、3 mA 程度のヒステリシス幅が得られる最適な可飽和吸収領域の長さを、各共振器長に対して調べた結果、共振器長の約 10 % 程度の長さにすればよいことが分かった。また、可飽和吸収領域を分割することで、より効率よくヒステリシスが得られる構造の検討も行った。さらに、作製した双安定性レーザーに光を入射する実験を行い、光によるセット動作の基本特性の評価を行った。さらに、高速動作に際に必要となる、可飽和吸収領域に逆バイアスを印加したときのヒステリシス特性の評価も行った。これらの実験より、本論文で提案する全光フリップ・フロップ実現に必要な、可飽和吸収領域の基本的な特性の評価を得ることができた。

本論文において開発したシミュレータを用いて、DC-BLD の解析を行った。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って得られた設計に基づき、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が約 1550 nm にある 0.8 % 圧縮歪み多重量子井戸 (InGaAsP 組成) を含む半導体層構造を、有機金属気相堆積法を用いて InP 基板上に作製した。この成長基板を用いて、通常の半導体レーザー作製プロセスで DC-BLD を作製した。全光フリップ・フロップとして動作させるためには、方向性結合器の 2 つの導波路の電極を分離する必要がある。一般に困難なこの電極分離を、斜め電子ビーム蒸着を用いたプロセス方法を開発することで、自己形成的に実現した。このように作製した DC-BLD の特性を実験的に評価することで、実際に光フリップ・フロップとして動作することを実証した。また、DC-BLD のスイッチング速度の上限の見積もりも行った。DC-BLD においては、動作速度は通常の半導体レーザーの直接変調と同様に緩和振動周波数によって制限されるものと考えられる。シミュレーションによって得られた値から、DC-BLD の緩和振動周波数を計算したところ、1~2 GHz であることが分かった。この結果、DC-BLD の動作速度も約 2 GHz 程度であることが見積もられた。

また、MMI-BLD に関しての特性を FD-BPM 法により解析した。MMI-BLD においては、能動素子によって構成された MMI カプラ内における、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、互いに対角に位置するポートにすべて光が結合するように設計し、なおかつ、出力ポートに可飽和

吸収領域を設けることで、光によるオフ動作を可能にして、全光フリップ・フロップが実現可能であることが分かった。MMI-BLD は MMI カプラ内で 2 つの発振モードが重なりを持つために、オン状態とオフ状態の間で、キャリアの変動が抑制される。このため、スイッチング速度は緩和振動周波数よりも速くなると考えられる。最大の動作速度は可飽和吸収領域のキャリア寿命によって決まるため、MMI-BLD の動作速度は約 10~40 GHz であることが見積もられた。

より高速で動作するデバイスとして、MZI-BLD を用いた全光フリップ・フロップの提案も行った。MMI-BLD と同様に、MZI-BLD の特性も FD-BPM 法により解析を行った。MZI-BLD においては、マッハ・ツェンダーの両アームのみが能動素子によって構成されている。このとき、MMI-BLD と同じように、互いに対角に位置するポート間で発振する 2 つのモードが存在する。この 2 つの発振モードが両アームで重なりを持つために、双安定性が得られる。MZI-BLD の場合、2 つのモードが両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、分岐型の双安定性が得られることがシミュレーションにより分かった。この双安定性を用いることで、MZI-BLD が全光フリップ・フロップとして動作することを数値計算により確かめた。DC-BLD や MZI-BLD と同様に、動作速度の見積もりを行った。MZI-BLD においては、能動素子部分において 2 つの発振モードが完全に重なりを持つために、オン状態とオフ状態でキャリアの変動が全くなくなる。この為、緩和振動周波数により動作速度は制限を受けなくなる。また可飽和吸収領域もないことから、動作速度は共振器の光子寿命により決定され、デバイスを小型化したときの最大値は 100 GHz 程度であることが見積もられた。

以上のように、本論文では方向性結合器、多モード干渉結合器、マッハ・ツェンダー干渉結合器の 3 種類のカプラを用いた新しい全光フリップ・フロップの提案を行った。提案したデバイスの特性評価を行うために、シミュレータの開発を行い、それぞれのデバイスの動作を解析した。シミュレーション結果に基づき、デバイスの作製を行い、方向性結合器型の全光フリップ・フロップの実証を行った。また、より高速に動作すると期待される多モード干渉結合器型およびマッハ・ツェンダー干渉結合器型の半導体レーザが全光フリップ・フロップとして動作することを数値解析によって確かめた。我々は、これらのデバイスが将来の光通信における光ルータなどの全光デバイスにおいて重要な役割を担うものと期待している。