
修士論文



分布ブラッグ反射鏡を用いた多モード干渉 電 子 1273
双安定半導体レーザーによる全光フリップ・フロップ

東京大学 工学系研究科 電子工学専攻

37-56440 武田 浩司

指導教員 中野 義昭 教授

**Multimode Interference Bistable Laser Diodes for
All-Optical Flip-Flop using Distributed Bragg Reflectors**

Koji Takeda

Department of Electronic Engineering

The University of Tokyo

Supervisor Prof. Yoshiaki Nakano

目次

第 1 章 導入 1

1.1. 背景..... 1

1.2. これまで提案された全光フリップ・フロップ..... 3

1.2.1. 2 つのレーザーの結合によるもの 3

1.2.2. 2 つの MZI の組み合わせによるもの 5

1.2.3. 吸収型の双安定レーザーによるもの 6

1.2.4. VCSEL の偏波によるもの..... 6

1.2.5. MMI-BLD..... 6

1.3. 本研究の目的 6

1.4. 本論文の概要 7

第 2 章 原理・解析手法 9

2.1. 基本構造と動作原理 9

2.2. スラブ導波路 11

2.3. 等価屈折率法..... 14

2.4. 多モード干渉型導波路 18

2.4.1. 高次モードへの展開によるマルチモード導波路の解析 19

2.4.2. 単一像の結像 21

2.4.3. 2 つの像の結像..... 22

2.4.4. 複数の像の結像 23

2.4.5. 特定のモードのみで導波される場合..... 24

2.5. 過飽和吸収体を用いた双安定レーザー.....28

2.6. MMI-BLD の双安定性31

2.6.1. 一般的な 2 モード間の双安定性31

2.6.2. 過飽和吸収体がある状態での双安定性34

2.7. 第 2 章 まとめ36

第 3 章 デバイス作製手法 37

3.1. DBR を用いたデバイスの構造.....37

3.2. 第 1 ステップ:Offset Quantum Well による Active / Passive 集積.....38

3.3. 第 2 ステップ:ウェットエッチングによるリッジレーザーの作製43

3.4. まとめ48

**第 4 章 FP レーザーによる ACTIVE / PASSIVE
集積の検証 49**

4.1. テストパターン49

4.2. 測定系50

4.3. FP レーザーの特性.....52

4.4. 双安定 FP レーザーの特性.....58

4.5. まとめ63

第 5 章 デバイス特性..... 65

5.1. 静特性の測定系	65
5.2. L-I 特性	66
5.3. 発振スペクトル	67
5.4. 静的 SET / RESET 動作	68
5.5. 動特性の測定系	71
5.6. 動的フリップ・フロップ動作	72
5.7. 動作速度に関する考察	74
5.8. まとめ	77

第 6 章 全光パケット・スイッチング..... 79

6.1. 1 波 10 Gb/s における測定系	79
6.2. 1 波 10 Gb/s でのパケット・スイッチング動作	80
6.3. 8 波 40 Gb/s における測定系 (ペイロード=40~320 Gb/s)	82
6.4. 8 波 40 Gb/s でのパケット・スイッチング動作	84
6.5. 様々な数の WDM 信号のスイッチング	88
6.6. まとめ	89

第 7 章 結論	91
APPENDIX A マスクデザイン	93
APPENDIX B 使用プロセス装置一覧	97
APPENDIX C 略語一覧	99
参考文献	101
関連する発表	106
学術雑誌等に発表した論文	106
学会発表論文(海外)	106
学会発表論文(国内)・シンポジウム等	107
謝辞	108

第1章 導入

1.1. 背景

光ファイバを用いた情報通信は、従来の電気信号での通信と比べて低損失で長距離な通信が可能である、高速変調が可能である、波長多重(WDM)を用いることにより、簡単に伝送容量を大きくすることができる、などのメリットから研究開発が進められ、国際・大都市間の情報通信網として実用化されてきた。光ファイバ通信技術については、日本では光産業技術振興協会(OITDA)[1]がロードマップを作成している。これは「情報通信システムロードマップ」と「情報通信光デバイスロードマップ」の2つに分けて作成されている。いくつか内容を列挙すると、システム分野において、2010年から2015年までに国際統合網では

- ファイバの伝送容量 40 Tb/s
- O, E, S, C, L, U 帯での 2000 波 WDM
- 1 Tb/s OTDM

が、また地域バックボーンネットワークでは

- 切り替え時間 ns 以下の光パケット・スイッチング
- 上流ノード容量 400 Tb/s、下流ノード容量 20 Tb/s
- 伝送系は 2.5~40 Gb/s × 1000 波 WDM

といった技術が期待されているのが分かる。同様に、光デバイスの分野ではこういった性能を達成するために

- 全光で 1 Tb/s の処理
- 100 Gb/s 光信号の MUX / DEMUX
- 光 3R (振幅増幅 Reamplification、タイミング再生 Retiming、波形整形 Reshaping)
- 50 波~200 波にも及ぶ波長変換素子
- 光バッファ、光ロジック、光メモリ

といった光デバイス・技術が期待されている。

しかしながら、現状では光ファイバの伝送容量は WDM や OTDM の技術を使って上昇しているのに対し、その経路の切り替え部のルーター容量はなかなか増大していない。現在バックボーンネットワークで用いられているルーターでは、光ファイバで伝送されてきた光信号を一度電気信号に変換し、パケットのラベルを処理して経路を決めた後に、再度光信号へと変換し次段のルーターへ向けて伝送させている。このように、現在の技術では一度全て電気信号へ変換する OEO 変換を繰り返し行いながら伝送を行っている。ところがこの OEO 変換によるルーティングは、

- 光ファイバの伝送容量の増大に対し、スイッチ容量・速度に限界が見えつつある

- 消費電力が大きい
- 大面積になる

などの問題が起こりつつある。OEO 変換を用いたルーターではスイッチ速度 1 ns を切るようなルーターの作成は難しく、100 ps を切るような超高速ルーター作成のためには OEO 変換を行わず、全て光信号のまま処理する全光ルーターが必要となる。

全光ルーターを実現するために必要な技術などについて Fig. 1-1 に示す。光パケットをルーティングするには

- パケットのデータを一時蓄える
- ラベル認識
- 経路の決定

を全て高速に光の状態で行う技術が必要になる。どれも困難な技術ではあるが、ここでは全光ルーター実現へ向けた一歩として、光メモリとなりうる全光フリップ・フロップ(AOFF)に着目した。電気的フリップ・フロップは、電子回路の分野では順序回路を構成するために非常に基本的な素子であり、NAND ゲートや NOR ゲートにフィードバックを加えることによって実現されている。この動作を全て光で行うことを目指す。現在様々な研究チームで開発されている全光フリップ・フロップは、電気的の分野でいえば SR フリップ・フロップに対応しており、デバイスにセットパルスが入射したらその情報を記憶し、次にリセットパルスが入射するまで保持する機能を持つ。その情報は、たとえばレーザーの発振モード、デバイスから出力される波長、あるいは VCSEL の偏波状態などといった状態で取り出している。

我々の研究チームが提案してきた全光ルーターの構成について Fig. 1-2 に示す。まず入射パケットとしては、経路情報を持つヘッダー部と実データのペイロードに分けられる。そのパケットのうち、まずヘッダー部(ラベル)のみを取り出し、直列データをシリアル・パラレル変換 SPC によって並列な光信号へと変換する。そうして並列な光パルスへと変換された経路情報を、全光フリップ・フロ

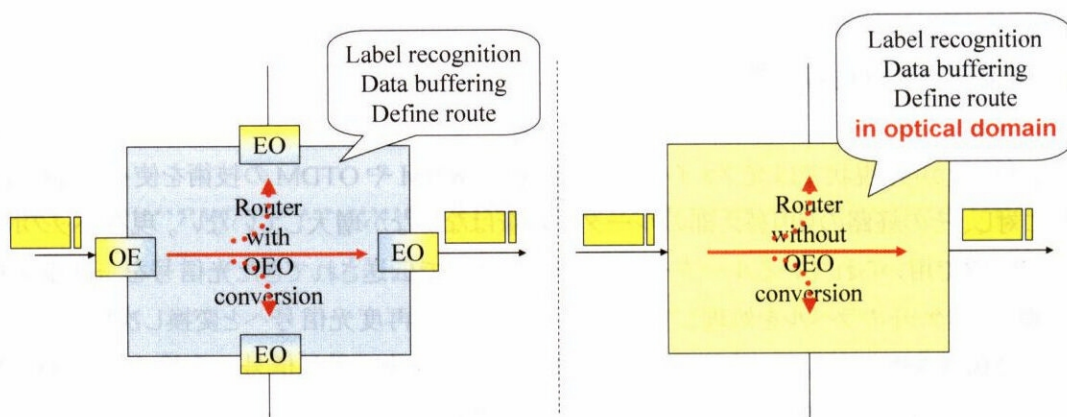


Fig. 1-1: Concept of all-optical router.

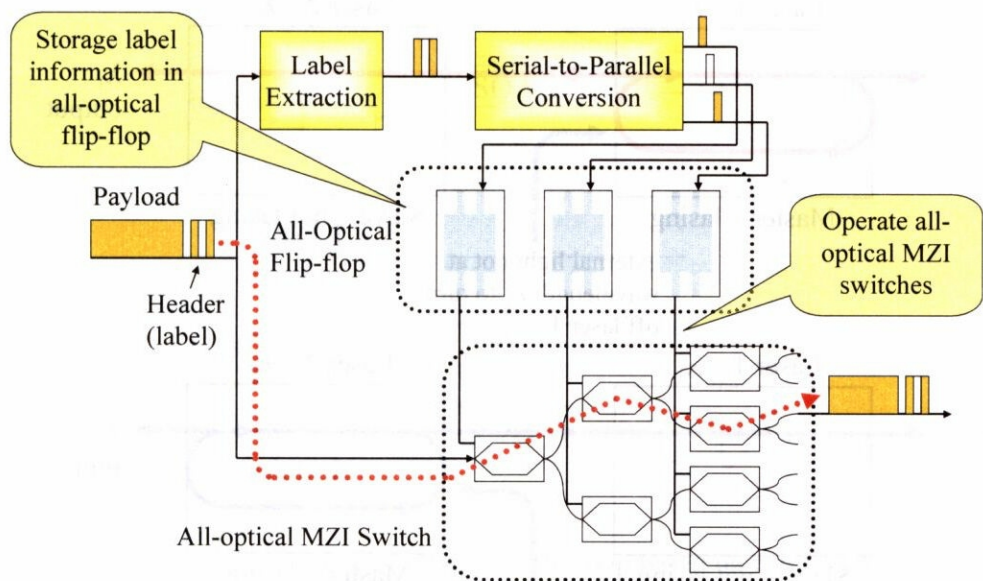


Fig. 1-2: Proposed structure of all-optical router.

ップへと入射し保存する。このフリップ・フロップの出力を用いて MZI 型全光スイッチを駆動する。こうして経路が切り替えられた MZI スイッチを、元の packets が通って次段へと進んでいく。

この方式だと波長変換 + AWG で波長ルーティングをする方式などと違い、元の packets がそのまま通過していくため様々な変調方式に対応できる利点がある。実際に第 6 章では DWDM の波長数を変えながら同様のシステムでスイッチができることを示している。また、光ファイバの伝送においては振幅のみならず、PSK などの位相変調の研究がされているが、この方式であれば位相情報を保持したまま packets を通すことができるため、位相変調にも対応が可能であると考えられる。

このシステムだけではなく、様々な packets・スイッチングの方式が考えられているが、どの手法にせよ経路を切り替える、波長変換をするためにはラベル情報を一定時間保持しないといけない。そのためには先述の通り全光フリップ・フロップが必要となる。次節ではこれまで様々な研究チームで開発されてきた全光フリップ・フロップについてまとめる。

1.2. これまで提案された全光フリップ・フロップ

1.2.1. 2 つのレーザーの結合によるもの

2 つ(以上)の波長の異なるレーザーを組み合わせ、その共振器が結合するようにしておく

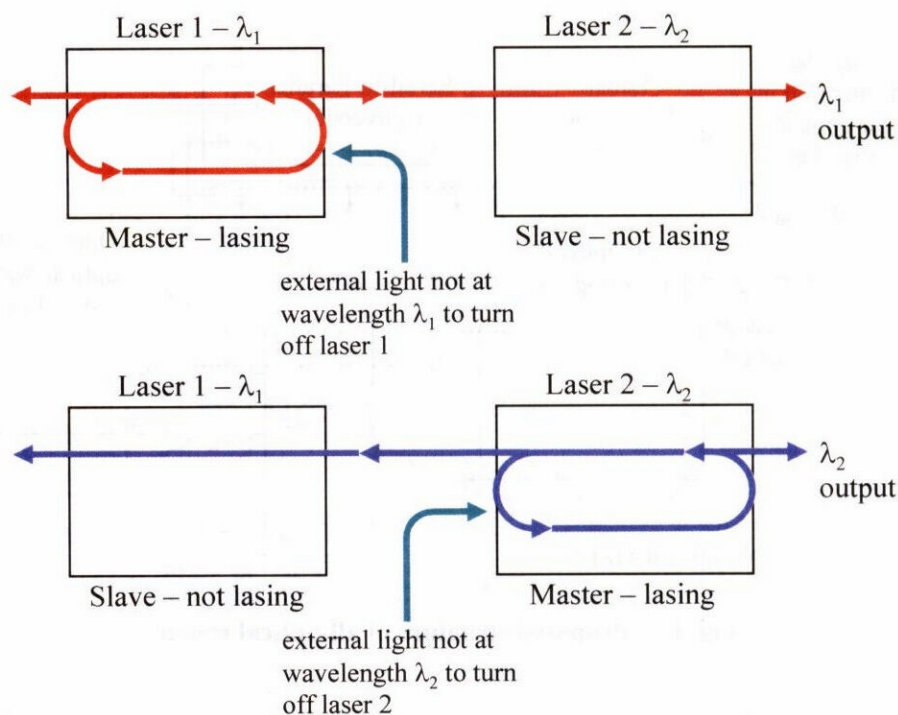


Fig. 1-3: Operation principle of all-optical flip-flop based on coupled LD [3].

光フリップ・フロップとして動作する。これは M.T. Hill ら Eindhoven 工科大学のチームで提案され、空間に光学系を組み可視光のレーザーを用いて 2000 年に動作が実証された[2]。

動作原理について Fig. 1-3 に示す。これは 2 つの発振波長の異なるレーザーを用い、片方の出力の一部がもう一方に互いに結合するように構成されている。まずレーザー 1 が発振している時には、レーザー 2 はその光に利得を奪われて発振することができない (Fig. 1-3 上)。この状態でレーザー 1 に、その発振波長とは異なる波長の強い光を入射すると、レーザー 1 はその入射光に利得を奪われ発振が止まる。そうすると今まで発振が抑えられてきたレーザー 2 が発振を始め、一度発振が始まると今度は逆にレーザー 2 の光がレーザー 1 の発振を抑える。このような Master - Slave の構成により外部からの光で状態を切り替えることができ、ここで異なる波長の光がでてくることでそれを検知することができる。

この原理を用い、光学系ではなくファイバで組んだフリップ・フロップが 2001 年に示されている [3]。これは 2 つの FBG と EDFA で 1 つのレーザーを構成し、それを 2 つ用意しカプラーで出力を互いに結合させているものである。ファブリ・ペロ共振器では 5 つの SOA とファブリ・ペロ共振器を組み合わせた 5 状態フリップ・フロップも示されている [4],[5]。また、BPF を通し波長を固定した 2 つ以上のリングレーザーを組み合わせた方式も示され、3 状態のメモリ [6] なども示されている。また、リングレーザーでも間に変調器を挟みモードロックレーザーとしたものも示されている [7]。

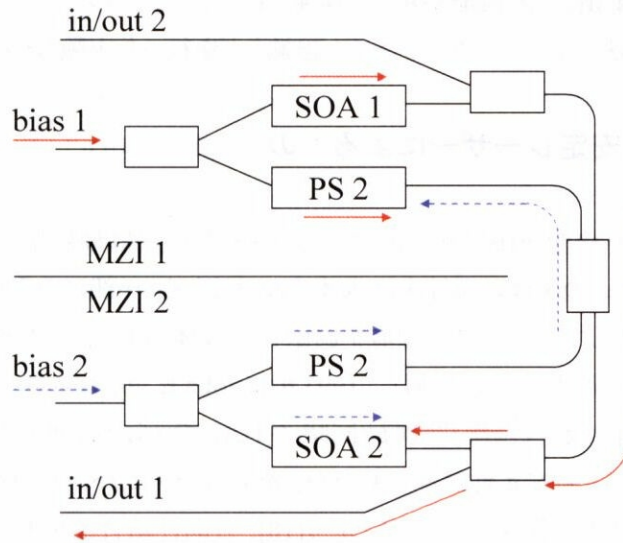


Fig. 1-4: Operation principle of all-optical flip-flop based on coupled MZI [13].

全光フリップ・フロップをメモリとして使うためには、その切り替え時間が重要なパラメータとなってくる。空間で光学系を組んだり、光ファイバを結合させたりしてレーザーを構成している状態では、その光ファイバ中を光が伝搬する速度で主に律速されている。そのため構成を小さくすることによって高速動作が可能となる。極限まで小さくしたと言えるリングレーザーの構成が 2004 年に示された[8]。この程度まで小さくすると、光の伝搬にかかる時間よりも光子の寿命でその動作速度が律速される。

また、原理はリングレーザーと同様であるが、AWG を用い単一モードで非常に鋭い発振スペクトルを得、35 dB 以上という高い ON/OFF 比を得たものがある[9]。これと波長変換機を組み合わせ、80 Gb/s のパケットをスイッチした報告もある[10],[11]。

1.2.2. 2 つの MZI の組み合わせによるもの

2 つの Mach-Zehnder 干渉系(MZI)を用いたフリップ・フロップは 2001 年に M. T. Hill らによって提案された[12]。動作原理は 2 つの構造のうち片方が主となりもう一方を抑える、という Master – Slave の構成は 1.2.1 で示したものと似ているが、レーザーを結合させるのではなく外部から CW バイアス光を入れるところが特徴的である。

これは 2001 年にシミュレーションで動作が予測され[12]、2005 年には InP/InGaAsP 化合物半導体を用いた PIC で動作が示された[13]。またシリカ系導波路と InP の SOA をハイブリッド集積したものも作製され[14]、パッケージのしやすさやコストの面などの利点が主張されている[15]。これは Centre for Integrated Photonics 社[14]で作製されたデバイスであり、近年この InP SOA とシリカ系

導波路のハイブリッド集積による機能が数多く開発されている。フリップ・フロップだけではなく XOR ゲートなども同様な手法によって作製し、ラベル認識などを行った実験もある[16]。

1.2.3. 吸収型の双安定レーザーによるもの

吸収型の双安定レーザー(BLD)を用いたフリップ・フロップは最も古くから研究されてきたものの 1 つである。レーザーの全体に電流を注入するのではなく、一部にのみ注入することによって双安定性が生まれ、注入していない吸収領域を過飽和吸収体と呼ぶ。これを用い、PIC 上でレーザーの共振器を互いに交差するように配置し、1993 年に John E. Johnson らによってフリップ・フロップ動作が実証された[17]。これは過飽和吸収と同時に 1.2.1 で示した原理も用いている。吸収型の双安定レーザーではモードの安定性は高いものの、光信号でリセットするのが難しいという欠点があった。そこで VCSEL に上と横から光を注入したり[18]、方向性結合器を用いて横から光を注入したりする方法が取られてきた[19]。

1.2.4. VCSEL の偏波によるもの

VCSEL の発振偏波状態によって記憶する方法も最も古くから研究されてきたものの 1 つである。発振している VCSEL にある方向の直線偏波の光を入射すると、発振している光の偏波がその向きに固定される現象を用いている[20],[21]。最近ではこの偏波の双安定を用いた VCSEL でフリップ・フロップのみならず RZ-to-NRZ や NRZ-to-RZ のフォーマット変換や DEMUX などが示されている[22]。この VCSEL によるモードの切り替えは、一度レーザー発振を止めることなく切り替えることができ(pitchfork 動作)、7 ps という高速な切り替え時間も報告されている。ただし、これらは GaAs 系の VCSEL を用いており、まだ通信波長帯である 1.55 μm 付近での動作はしていない。

1.2.5. MMI-BLD

多モード干渉型(MMI)双安定レーザー(BLD)は 2003 年に M. Takenaka らによって提案され[23][24]、2005 年にそのフリップ・フロップ動作が実証された[25]。これは双安定レーザーのモード安定性と、VCSEL における pitchfork のような高速切り替えを併せ持つデバイスとして開発された。また、通常のレーザー作製プロセスのみで作製でき、プロセスが単純であることも大きな利点である。本研究のデバイスはこれを元にしており、動作原理については 2.1 で述べる。

1.3. 本研究の目的

これまでの全光フリップ・フロップのなかで最も優れたものの 1 つである MMI-BLD は、へき開

端面をそのまま反射鏡として用いた Fabry-Pérot (FP)型の共振器をしていた。ところが、FP レーザーには作製が単純で容易であるという利点はあるものの、

- 発振の線幅が大きく、WDM 用途に向かない
 - 発振の線幅が大きく、この信号を用いてスイッチなどを駆動すると後から取り除くことが困難である
 - へき開してしまうため、他の導波路型光デバイスとモノリシック集積化が困難である
- などの欠点がある。そこで、やや作製プロセスは複雑になるが、この MMI-BLD の反射鏡をへき開端面ではなく DBR とすることによって、

- 単一モード発振を実現し、狭い線幅を得る
- 発振の線幅が狭いため、後段で信号処理をした後に取り除くことが容易である
- 原理的にへき開端面を必要としないため、他の導波路型光デバイスとモノリシックに集積が可能である
- 発振波長が安定する
- 外部から光を入射する時に、発振波長以外では共振しないため安定した動作が可能
- DBR の屈折率を変化させれば、発振波長を WDM の ITU グリッドへと合わせることが可能である

といった利点が期待できる。本研究の目的は、MMI-BLD の反射鏡を DBR とし、単一モード発振や波長の安定性など、さらに安定した動作を目指すことである。

1.4. 本論文の概要

まず第2章で DBR-MMI-BLD の動作原理を説明し、スラブ導波路の解析、等価屈折率法による導波路の伝搬定数の計算、またこのデバイスの中でも重要な役割を果たしている多モード干渉導波路と2モード間の双安定性について説明する。

第3章では、まず DBR-MMI-BLD の構造について説明した後に、作成手法について述べる。このデバイスはクラッドの再成長を境に大きく2つのプロセスからなっており、前半の Offset Quantum Well による Active / Passive 集積と、後半のリッジ導波路作製プロセスに分けて説明する。

第4章では、DBR-MMI-BLD の予備実験として Offset Quantum Well による Active / Passive 集積の特性を評価した実験について述べる。ここでは MMI や DBR などはいわず、単純な直線導波路の全体もしくは一部にのみ Active 領域があるレーザーを作製し、その内部反射などの特性を評価する。

第5章では DBR-MMI-BLD 単体での評価を行う。まずレーザーとしての静特性について述

べ、その後 CW 光を入射し静的に SET / RESET させた実験について述べる。その後、光パルスデバイスを入射し、動的にフリップ・フロップ動作させた実験について述べ、パルスの波長依存性や動作速度について考察する。

第 6 章では DBR-MMI-BLD の出力光を MZI-SOA 全光スイッチへと入射し、光パケットをスイッチングした実験について述べる。まず 160 ns 周期で分割した 10 Gb/s パケットをスイッチした実験について述べ、その後最大で 8 波 DWDM 信号を 40 Gb/s で変調したペイロードをスイッチした実験について述べる。また、この全光フリップ・フロップと MZI-SOA の組み合わせによる、ペイロードの変調方式に対する透明性について述べる。