

マイクロリングレーザにおける高出力狭線幅化の設計製作技術の確立と

全光情報処理機能の理論的解明

Design and fabrication technologies for high output power and narrow linewidth
microring laser and its theoretical investigation on optical signal processing operation

横浜国立大学大学院

工学府

小林 直樹

2018年 3月

要約

近年の光通信は光の強度信号と光の位相信号を組み合わせた光多値信号が用いられている。更なる多値化の進展に向けて、高光出力かつ狭線幅な波長可変レーザが渴望されるようになった。また、光通信の途中経路で用いられる電気/光変換処理デバイスの代替として、電気/光変換を必要としない全光情報処理機能を有する全光プロセッサの実現が強く求められるようになった。本研究ではこれら 2 つの要求を満たすために、マイクロリングレーザを基本として課題の解決方法の確立を目指した。

課題の 1 つ目は、高出力かつ狭線幅の波長可変レーザの実現に向けて、設計製作技術を確立することである。高出力かつ狭線幅なレーザを実現するためには、レーザ内部の損失を極限まで減らした上でレーザキャビティを長尺化(>1cm)する必要がある。長尺なキャビティをコンパクトに実現するために、高屈折率材料でかつ近年ファンダリの利用によってデバイス作製が容易になったシリコン(Si)導波路を用いた。Si 導波路によってマイクロリング共振器を形成し、これを外部共振器として光半導体アンプ(semiconductor optical amplifier, SOA)と結合させることで、波長可変マイクロリングレーザを構成した。Si 導波路の損失低減や SOA-Si 外部共振器間の高効率結合実装など、これまでにない様々なハイブリッド集積化技術を開発してマイクロリングレーザの設計製作技術を確立した。本技術を用いて試作したマイクロリングレーザは、光出力 100mW、線幅約 100kHz、SMSR(side-mode suppression ratio) >40dB を実現し、実使用に耐える性能を持つことを実証した。100mW の光出力は光通信用単一モードレーザとして筆者が知る限り世界最高出力である。

課題の 2 つ目は、全光情報処理機能を有する光プロセッサの実現に向けて、光プロセッサの基本動作であるインバータ動作およびフリップフロップ動作について、それらの動作を理論的に説明する数式モデルを構築することである。インバータ動作とは、レーザの発振波長が外部からの光注入によって変化し、光注入停止後に初期の波長に戻る動作を指す。ただし、レーザの初期発振波長と外部注入光の波長は異なるものとする。フリップフロップ動作とは、レーザの発振波長が外部からの光注入によって変化し、光注入を停止してもレーザの波長が初期状態の波長に戻らず保持される動作を指す。レーザの動作は設計段階で一意に決まるため、一つのレーザで両方の動作を実現することは困難であった。マイクロリングレーザを用いた本研究室の先行研究では、同一のレーザで両動作を実現できることを実験的に示した例があるが、理論的な裏付けが不十分であった。そこで、本研究ではレーザ発振の挙動について理論的な説明を与えるモデルの構築を行った。レーザキャビティ内の光の位相および振幅について、それぞれに非線形なモデルを導入し、そのモデルをレーザ発振の挙動を記述するレート方程式に追加することで、実験結果を理論的に説明するモデルを構築した。これによってインバータ動作およびフリップフロップ動作が実験的にも理論的にも同一のデバイスで実現できることを示すに至った。

以上、本研究は、マイクロリングレーザにおける高出力狭線幅化の設計製作技術を確立し、また全光情報処理機能における基本動作を理論的に説明する数式モデルを示した。

目次

第1章	序論	7
1.1	光通信の歴史	7
1.2	デジタルコヒーレント光通信	9
1.3	要素技術	11
1.4	Si フォトニクス	12
1.5	光導波路デバイス	20
1.6	マイクロリング共振器	21
1.7	本研究の背景と目的	22
1.8	本論文の内容と構成	24
第2章	原理	26
2.1	マイクロリング共振器	26
2.1.1	伝達関数	26
2.1.2	リング周回損失	28
2.1.3	クロストーク	29
2.1.4	FSR	29
2.1.5	バーニア効果による FSR 拡大	31
2.1.6	モード利得差	33
2.1.7	マイクロヒータによる λ_r チューニング	35
2.2	光半導体アンプ	37
2.2.1	光増幅の原理	37
2.2.2	バンドギャップエネルギーと発振波長	38
2.2.3	半導体レーザ	38
2.2.4	レーザパラメータの算出方法	41
2.2.5	ファブリペローリップルからのゲイン算出	42
第3章	外部共振型マイクロリングレーザ	43
3.1	アプローチ	43
3.2	マイクロリングレーザのデバイス構造	44
3.3	レーザ発振の安定化	46
3.4	設計	46
3.4.1	導波損失	47
3.4.2	線幅設計	48
3.4.3	発振安定性設計	50
3.4.4	発振範囲設計	53
3.4.5	ヒータ消費電力設計	53
3.5	実装	54

3.5.1 実装のコンセプト	55
3.5.2 実装する素子の順番	55
3.5.3 半田材料の設定	56
3.5.4 実装温度	57
3.5.5 半田サイズの最適化	57
3.5.6 素子の浮きの抑制	58
3.5.7 実装オフセット	58
3.5.8 結合損失	58
3.6 評価結果	60
3.6.1 波長可変範囲	60
3.6.2 高出力狭線幅動作	61
3.6.2 コンチュールマップ	62
3.6.3 発振スペクトル	63
3.6.4 レーザ線幅	64
3.6.5 制御安定性	66
3.6.6 長期信頼性	68
3.7 3章のまとめ	70
第4章 内部共振型マイクロリングレーザ	71
4.1 アプローチ	71
4.2 マイクロリングプロセッサ	72
4.3.1 SOA 中の相互変調効果	73
4.3.2 マイクロリング共振器による共振増強効果	74
4.3.3 SOA 相互変調効果によるリング共振器の共振波長変化	75
4.3.4 マイクロリングプロセッサの機能	77
4.3 マイクロリングレーザの構造	79
4.4 製作プロセス	82
4.5 実験結果	83
4.6 非線形モデルに基づくフリップフロップ/インバータ動作の理論的検討	87
4.6.1 位相の非線形性	88
4.6.2 振幅の非線形性	93
4.6.3 非線形性を取り入れたマルチレート	95
4.6.4 レーザ発振の遷移	96
4.6.5 計算結果の検討	97
4.6.6 支配的モデルの検討	99
4.7 4章のまとめ	100
第5章 他機関との成果比較と今後の課題	102
5.1. 波長可変光源としての比較	102

5.1.1 Distributed Feedback (DFB) レーザ	102
5.1.2 Distributed Brag Reflector (DBR) レーザ	103
5.1.3 Chirped Sampled-Grating (CSG) レーザ	103
5.1.4 空間結合外部共振型レーザ	104
5.1.5 導波路外部共振型レーザ	105
5.1.6 波長可変光源としての比較まとめ	106
5.1.7 本研究の残存課題	106
5.2 光プロセッサとしての比較	111
5.2.1 Distributed Feedback (DFB) タイプ	111
5.2.2 Vertical Cavity Surface Emitting LASER (VCEL) タイプ	112
5.2.3 Multi-mode Interferometer (MMI) タイプ	112
5.2.4 マイクロリングレーザ	113
5.2.5 光プロセッサのまとめ	114
5.2.6 光プロセッサとしての残存課題	114
第6章 結論	116
Appendix	118
A.1 反射がある場合のマイクロリングの結合効率の導出	118
A.2 シミュレーションパラメータ	120
参考文献	122
図表目次	131
発表論文リスト	135
謝辞	137

第1章 序論

本章では、研究の背景および目的を述べる。また本章の最後に本論文の構成について述べる。

1.1 光通信の歴史

最も古い光通信は紀元前 7 世紀ごろの狼煙による通信と言われている。狼煙に色をつけることで、複数種類の信号を遠方に伝達した。煙の色を変化させるために燃やすものを変えたと言われている。緊急度が高い場合は遠方でも明確に見える様により黒く濃い煙を上げた。色に加えて、焚き上げる狼煙の数で外敵の数を遠方に伝達したと言われている¹。これはある種のオンオフキーイング通信と考えることができる。狼煙がない状態が “0” を示し、狼煙が上がった状態を “1” と考えることができる。また、狼煙の色を変えることで(光通信で波長を変えることに相当)、“1” の持つ情報を適切に変えることが可能であった。狼煙の数を増やし、狼煙の色を複雑に組みあわせることで、多様な情報を伝えることが可能であったと考えられている。

しばらく時が経過して 1960 年代にレーザが実現されるようになってから、レーザを使った光通信が盛んに研究され、商用的に用いられるようになってきた。そこから 1995 年くらいまでは、レーザの変調速度の向上によって、また TDM(time domain multiplexing、時分割多重)技術によって、光通信の通信容量はおよそ 100Gbit/s まで大容量化した。その後、それまでにあった技術に加えて、WDM(wavelength division multiplexing、波長分割多重)技術が立ち上がり、通信容量の増大をけん引した。これによって、通信容量は 1Tbit/s に到達した。更に、2000 年から 2010 年頃にかけては、DWDM(dense wavelength division multiplexing、高密度波長分割多重)技術が、通信容量の増大を担い、通信容量が 10Tbit/s に到達した。DWDM 技術による通信容量の増大が鈍化してきたタイミングで、2011 年頃からデジタルコヒーレント技術が商用的に利用されるようになり、現在 2018 年には 100Tbit/s に到達しようとしている(図 1-1)。デジタルコヒーレント技術については後述する。

これらは幹線系(バックボーン)における光ファイバ 1 本当たりの通信容量の遷移を述べたものである。光の波長が 1550nm 近辺の波長帯域(C 帯)が用いられる。一方、一般家庭等に用いられるアクセス系通信 FTTH (fiber to the home)においては、波長 1310nm の O 帯および波長 1490nm の S 帯が用いられることが多い。日本においては 2010 年頃に光ファイバが用いられるようになり、2018 年現在においては、一般家庭に 10Gbit/s の光ファイバが引かれている²ことも珍しくはない。また近年、データセンタ間で用いられる光通信では、25Gbit/s を 4 つ束ねた CWDM (coarse wavelength division multiplexing、低密度波長分割多重)技術が用いられるようになった。

この様に光通信は年々発展を遂げ、留まることを見せていない。更なる通信容量の増大化に向けて、光ファイバ内に複数のコアを持つマルチコアファイバや、光ファイバ内に複数の伝搬モードを持つマルチモード通信が盛んに研究されている。マルチモード通信は、多モード伝搬するファイ

¹ 例えば、狼煙 1 つなら敵が 100 人、2 つなら 500 人、4 つなら 5000 人といった具合である。

² 能力的に 10Gbit/s の通信速度があっても、TDM で分割するため、1 家庭あたりは数 Gbit/s になる。

バを用いることで、電波の分野におけるMIMO技術と同じ通信ができるため、光MIMOとも呼ばれている。また、空間に光を放射して、対抗する光アンテナ間で通信を行う空間光通信も研究がされている。見通しのよい空間においては良好な通信速度が得られている。空間光通信は宇宙空間などにおける通信においても有望視されている。

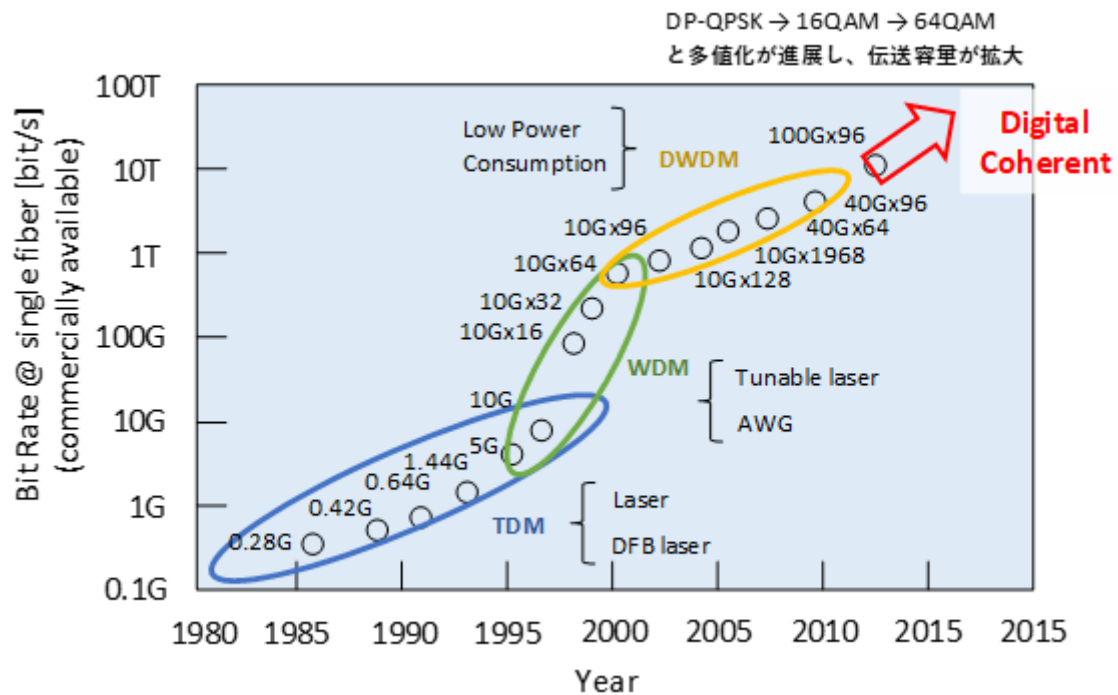


図 1-1 光通信における通信容量増大の歴史

表 1-1 光通信帯域の波長範囲の概要³

波長帯域	波長範囲	利用例
O 帯	1260 - 1360 nm	アクセス系通信(近距離)
E 帯	1360 - 1460 nm	
S 帯	1460 - 1530 nm	
C 帯	1530 - 1565 nm	幹線系通信(遠距離)
L 帯	1565 - 1625 nm	
U 帯	1625 - 1675 nm	

³ 近年では数 nm 程度波長範囲を広げた帯域が用いられることが多いため、表 1-1 は必ずしも厳密なものではない。

1.2 デジタルコヒーレント光通信

現在商用的な光通信の主流であるデジタルコヒーレント光通信について概要を記述する。デジタルコヒーレント光通信は、高速大容量のため幹線系光通信で用いられる。ここで、幹線系/メトロ系/アクセス系の区分について述べる。幹線系光通信とは、数百 km 離れた大都市間を結ぶ光通信網であり、バックボーンとも呼ばれる。大都市間が幹線系とよばれる通信網で結ばれる一方で、都市内部の地域間網はメトロ系と呼ばれ、また、メトロ系よりもさらに短距離の通信はアクセス系と呼ばれる。図 1-2 は、各区分の概要が分かりやすい様に抜き出して示したものである。一例として、横浜の家庭でインターネット回線を使って、スカイプや LINE などのインターネット電話を大阪の家庭にかけた場合を考える。横浜の家庭からかけたインターネット電話は FTTH 網(E 帯:1260-1360nm)を使って電話局⁴まで到達し、メトロ網(C 帯:1530-1565nm)を経て都市の中央電話局に到達する。その後、幹線系網(C 帯:1530-1565nm)を通過して、大阪の中央電話局通り、地域の電話局を経て、更に FTTH 網を通過して、目的地である大阪の家庭に電話が届く。

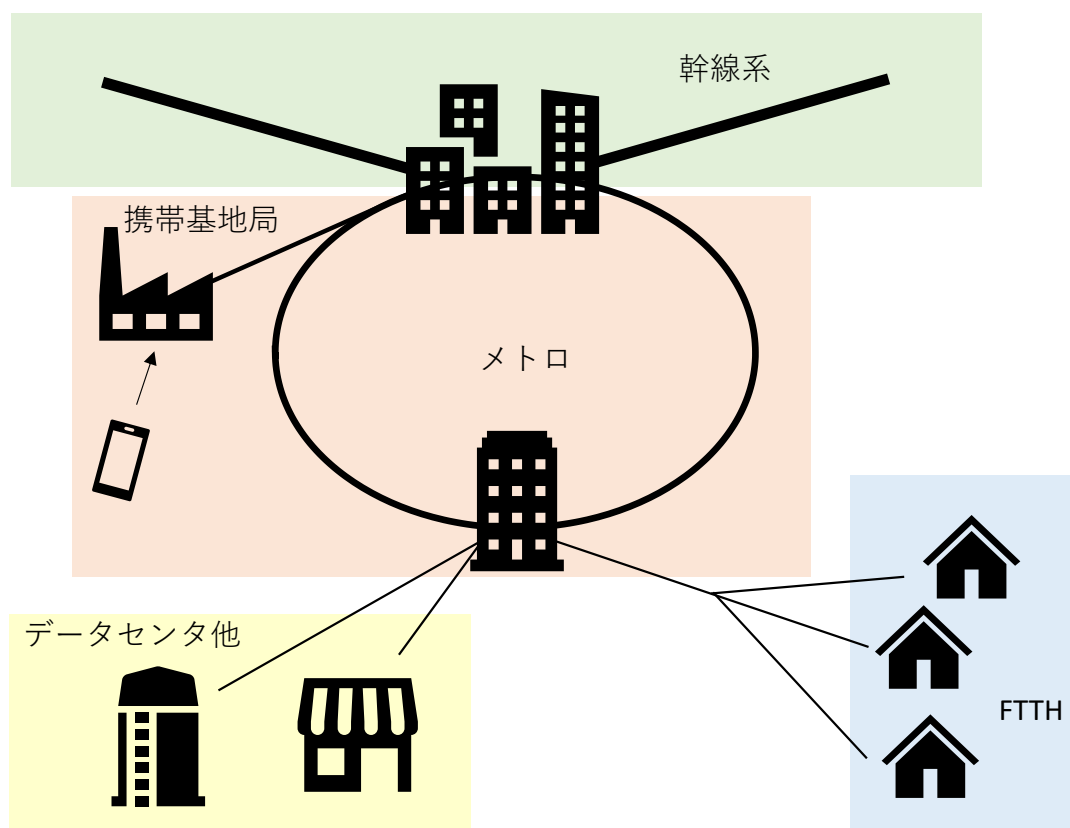


図 1-2 幹線系/メトロ系/アクセス系の概要

⁴ インターネット回線を所有する代表的なものが電話局である。具体的には NTT 東西、また NTT コミュニケーションズである。

これらの例において、デジタルコヒーレント光通信が用いられるのは、主に幹線系とメトロ系である。デジタルコヒーレント光通信においては、図 1-3 の様に、レーザ光源の光が変調器に入射され多値位相信号に変換される。その後、光ファイバを長距離伝搬し、受信側光回路に光が入射され、そこで多値位相信号が復調される。送信側においては、TE(transverse electrical)偏光および、TM(transverse magnetic)偏光の二つの偏光に対して、それぞれ光の位相に信号を乗せて信号の多値化を行う。例えば、位相 0 は”00”を、位相 $\pi/2$ は”10”を、位相 π は”01”を、位相 $3\pi/2$ は”11”を表すといった具合である。光ファイバを長距離伝搬した後は、偏光の情報が保存されないため直接 PD(photo detector)で受信しても信号が復元できないが、光導波路で構成してミキサー回路を通し、かつ DSP(digital signal processor)で演算処理を施すことで信号を復元する。ここで、ミキサー回路では光の干渉を使って位相信号を取り出すことを補足する。ミキサー回路に干渉用の光源を高強度で入射することで、受光信号が弱い場合でも、十分な干渉波形を観測するに至り、受信信号を復調できる。以上説明してきたように、デジタルコヒーレント光通信ではレーザ光源が送信側と受信側でそれぞれ必要である。デジタルコヒーレント光通信が現代の光通信の代表的な通信方式であり、そのデジタルコヒーレント光通信にとって光源が重要であることから、レーザ光源は現代の光通信における最重要デバイスの一つとって過言ではない。本用途に適用できる高出力狭線幅光源は年々その実現が強く望まれるようになった。従って、本研究では高出力狭線幅レーザ光源の実現に向けて、設計技術および製作プロセスの確立を研究テーマの一つにした。詳細を 3 章で述べる。

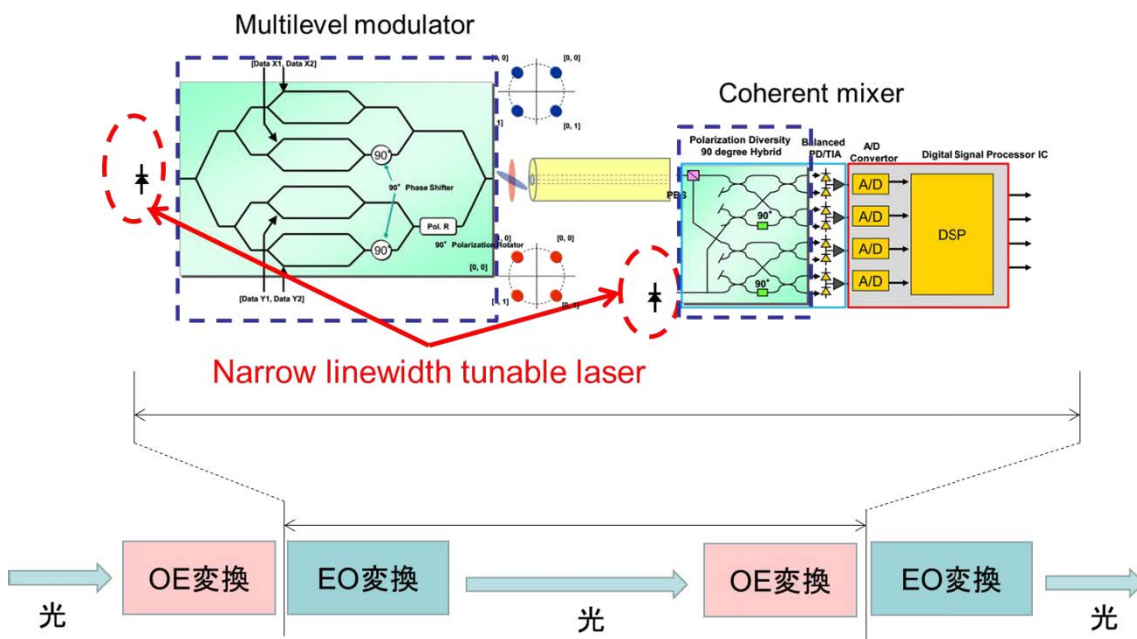


図 1-3 光通信のブロック概要

少し俯瞰的に光通信のブロックを考える。送信側はいわゆる EO(electro-optical)変換を行い、受信側は OE(opto-electrical)変換を行っている。送信側の EO 変換の前には、別の幹線系やメトロ系を通ってきた光の受信側ブロックがあり、ここでは OE 変換が行われている。現在の光通信では経路変換を行う度に OE 変換および EO 変換が必要である。仮に光を光のまま経路変換が可能で、加えて信号補正を行うことができれば、現行の OE/EO 変換が不要になり、高速化で大容量かつ、低消費電力な通信が実現できる。この様に、光を光のまま処理するデバイスを全光プロセッサという。全光プロセッサは次世代の光通信網を実現するために盛んに研究が行われている。本研究においても、全光プロセッサに関して、その機能の一部における重要動作(インバート動作およびフリップフロップ動作)の理論的検討を研究のテーマとした。詳細を 4 章で述べる。

1.3 要素技術

現在のデジタルコヒーレント技術を支える要素技術として、光導波路デバイスが重要な位置を占めている。光導波路デバイスとは、光導波路で構成された光集積回路である。光導波路とは、屈折率の高い材料(コア)を屈折率の低い材料(クラッド)で覆ったものである。光を閉じ込めることで、光を導波することができる。これまでは、クラッド材料として SiO₂ (Silicon oxide、シリカ、屈折率 1.45)を用いて、コア材料に SiO₂ に Ge(germanium、ゲルマニウム)や P(phosphorus、リン)、B(boron、ボロン)をドーピングして、屈折率をクラッドより 1-2%程度高くしたものが用いられてきた⁵。ただ、コアとクラッドの屈折率から求められる比屈折率差が小さいために、デバイスサイズ⁶を小さくできないという問題があった。これは、導波路を小さな半径で曲げる際に、光の閉じ込めが弱いと過剰な損失が発生してしまうためである。比屈折率差が大きいほど光の閉じ込めが強くなり、結果として曲げ半径を小さくすることができる⁷。ここで、比屈折率 Δ は次の式で定義される。

$$\Delta = \frac{n_{co}^2 - n_{cl}^2}{2n_{co}^2} \quad (1.1)$$

ここで、 n_{co} はコアの屈折率、 n_{cl} はクラッドの屈折率である。コアの屈折率が大きく、クラッドの屈折率が小さいほど、 Δ が大きくなることを表している。つまり、光を強く閉じ込められるようになり、急峻に曲げることが出来るようになる。360° (1 周)曲げた際の過剰損失として、0.1dB を許容するとした場合の比屈折率 Δ と最小曲げ半径の関係 [1]を図 1-4 に示す。 Δ 1.5%のシリカ導波路では、最小曲げ半径が 2mm 程度であるため、デバイスサイズは cm オーダになる。一方、 Δ 30~40%程度の Si 導波路においては、曲げ半径が数 μ m でよいため、デバイスサイズがサブ mm オーダになる。光の回路が同規模である場合、Si 導波路の方がフットプリントを小さくすることができる。また、フットプリント

⁵ ボロンは融点を下げるために用いられることもある。

⁶ フットプリント(foot print)と同義である。フットプリントと呼ばれることの方が多い。

⁷ 曲げ損失の許容値(例えば 0.1dB/turn)を満たす曲げ半径を最小曲げ半径と言う。

が同じ場合は、Si 導波路の方がより高機能なデバイスを実現することができることを意味している。

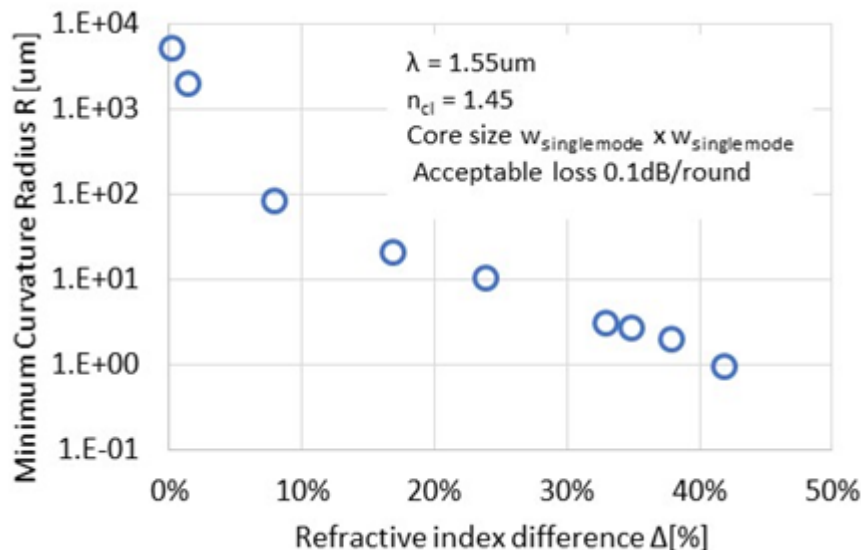


図 1-4 比屈折率と最小曲げ半径

これまでの導波路型デバイスにはシリカ導波路が用いられることが多かったが、近年では Si 導波路が用いられるようになってきた。これは CMOS 技術を光デバイスの製造に応用した S フォトニクス技術が商用的に利用できるようになってきたことが大きい。Si フォトニクスについては次々節で詳細を述べる。現在世界には Si フォトニクス技術で光デバイスを作製できるファウンドリ⁸がいくつかある。メジャーなところでは、GLOBALFOUNDRIES (アメリカ)、Interuniversity Microelectronics Centre (IMEC、ベルギー)、Institute of Microelectronics (IME、シンガポール)などがある。

1.4 Si フォトニクス

Si は第 14 族元素に分類 (図 1-5)され、クラーク数⁹で見ると酸素(49.5%)に次いで豊富に存在する(25.6%)。豊富に存在することと、物理的な振る舞いが有用であることから Si は半導体材料として電子デバイスに広く使われてきた。現在の電子デバイスの半導体製作技術は、微細化技術の進展によるところが大きい。微細化技術の一番の要素技術は半導体リソグラフィ技術である。リソグラフィ技術とは、写真の活版に使われていた技術を半導体形成に転用した技術である。半導体の加工対象について、部分的に紫外線が照射される場所とマスクで遮光して照射されない場所を設け、紫外線があたるところのみを微細に加工(除去、エッチング)する技術である。リソグラフィ技術に加

⁸ ファウンドリをファブとも言う。

⁹ クラーク数とは地球上の地表付近に存在する元素の割合を重量比で表したものである。

えて、高純度 Si の生成、Si の酸化技術、アニールをはじめとした熱処理技術、不純物のドーピング技術などが高度に発展して、今日の電子デバイス、特に COMS(complementary metal oxide semiconductor)デバイスを支えている。

これら CMOS 技術を光デバイスの作製に応用した技術を総称して Si フォトニクスという。Si フォトニクスによって、Si 導波路による光デバイスを作製することができるようになった。これまでは、シリカ導波路の作製技術で Si 導波路を作製すると、製作精度が不十分なため様々な問題が生じた。製作トレランスが小さいが故に、過剰な光学損失が発生しやすかった。また、Si 導波路の側壁のラフネスによって過剰な導波路損失が発生し、デバイスとしての必要性能を満たすことができなかった。しかし、近年台頭してきた Si フォトニクス技術を用いると、これらの課題がだいぶ改善されるようになった。ただ、必要十分な領域に達成しているとは言えず、まだまだ改善の余地が多く残されている。しかしながら Si フォトニクス技術を用いると、Si に適切なドーピングを行うことで、受光素子や、変調器を集積できることが大きなメリットである。導波路、受光素子、変調器が集積できれば、光デバイスとしてほぼすべての機能をワンチップで実現することができる。光デバイスの製造に加えて、同時にアンプや演算 IC などの電子デバイスを同時に Si 基板上に製作することで、光電子融合デバイスの作製も行えるようになってきた。これは応用物理技術の歴史のなかで大きなブレイクスルーであると筆者は考えている。今後 Si による発光素子の実現できれば、Si で高機能かつ高密度な電子/光回路がワンチップで実現できるようになると期待している。ただ、Si による発光素子はまだ十分な性能をもったものが報告されておらず、実現にはまだしばらく、10~20 年の時間がかかるように思われる。

現在の技術フェーズでの検討に立ち返って考える。現在は Si 発光素子を除けば、Si フォトニクスで全ての機能が実現できる。前述の通り Si フォトニクス技術を提供しているファウンドリは複数ある。所望の機能やウェハ枚数によって、また選択するファウンドリによって金額は大きく変わるが、およそ一千万円から数億円あれば光デバイスが作製できる。この金額は低コストな Si によるところが大きく、仮に高価な InP であったらかなりの金額になることであろう。Si フォトニクスは技術的なブレイクスルーだけではなく、金額的にはある種のブレイクスルーであると考えられる。

以上、CMOS 技術を転用した Si フォトニクス技術によって、低コストで高速かつ高機能な光デバイスが超小型で実現されるようになった。本研究においてもこの技術を利用しない手はなく、この技術の上に、本研究で開発する技術を積み上げこれまでにない高機能を実現することを根本的な目標とした。

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
1															2			
H															He			
3	4												5	6	7	8	9	10
Li	Be												B	C	N	O	F	Ne
11	12												13	14	15	16	17	18
Na	Mg												Al	Si	P	S	Cl	Ar
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
55	56	57-71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
87	88	89-103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	
Fr	Ra	Ac	Fr	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Nh	Fl	Mc	Lv	Ts	Og	

図 1-5 周期律表

Si 導波路の一例として、図 1-6 に Rib 導波路の概要を示す。また図 1-7 にチャンネル導波路¹⁰の概要を示す。それぞれ例として直線導波路を取り上げた。ここで、Rib 導波路およびチャンネル導波路は Si 導波路としてよく用いられる断面構造であることを補足する。Rib 導波路は Si 層の一部に凸形状を持ち、この凸形状周辺が光を適切に閉じ込める機能を持つ。つまり凸形状部が光を導波する機能を持つ。凸形状部以外の平板 Si 部では光を適切に導波することができない¹¹。一方、チャンネル導波路は矩形の断面構造を持つ。Si コアは四方がクラッド(主にシリカ)に囲まれている。コアの四方がクラッドに囲まれているため、比屈折率差を高くとることができる。従って急峻に曲げることができる。そのため、チャンネル導波路は微細なデバイスを作製することに向いている。本研究においては、導波路の断面構造としてチャンネル導波路を採用した。

¹⁰ Si で形成したチャンネル導波路は Si 細線導波路または Si 細線とも呼ばれる。

¹¹ 直線的に光を導波することができるが、曲線的な導波は出来ない。

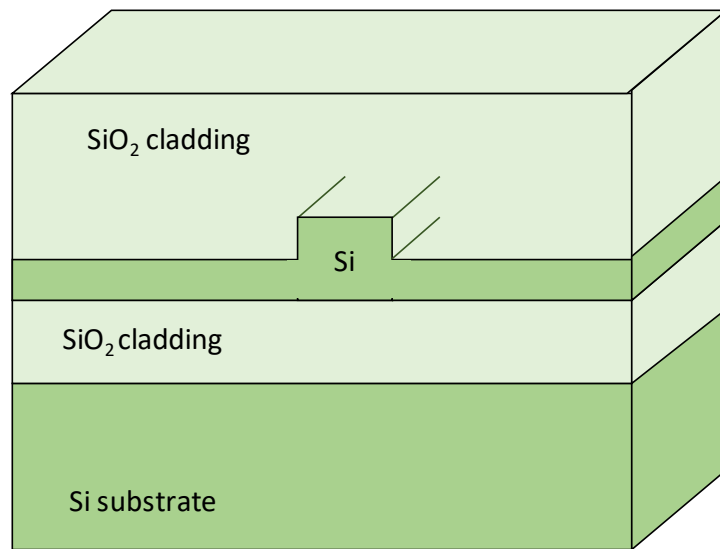


図 1-6 Si-Rib 導波路

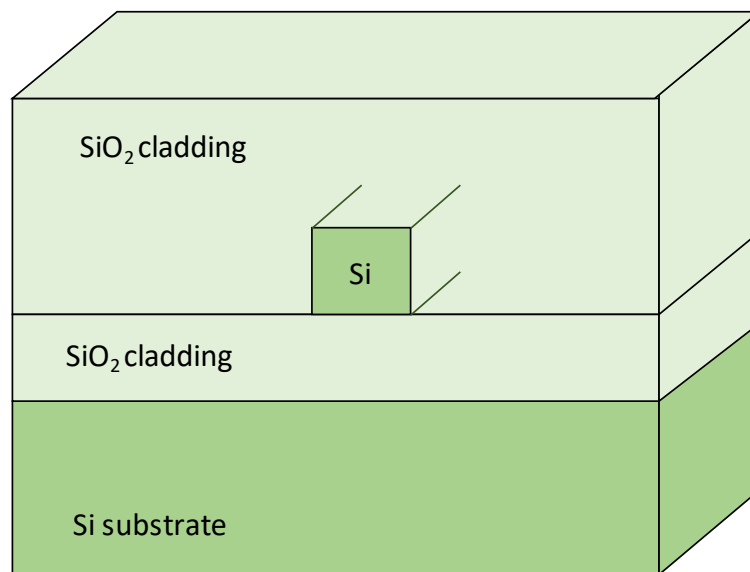


図 1-7 Si 細線導波路

図 1-8 は Rib 導波路およびチャンネル導波路のサイズを概念的に分かるように図示したものである。標準的な石英ファイバの断面、Rib 導波路の断面、チャンネル導波路の断面をそれぞれ示している。石英ファイバと比較して、Rib 導波路は十分に小さいことが分かる。そのサイズは石英ファイバの $1/10 \sim 1/100$ 程度である。一方、チャンネル導波路は更に小さいことが分かる。そのサイズは石英ファイバのおよそ $1/1000 \sim 1/10000$ である。ちなみに、人間の髪の毛の太さは一般的に $100\mu\text{m}$ 程度であり、これは石英ファイバ(直径 $\phi 125\mu\text{m}$)とほぼ同じサイズであることを補足する。髪の毛の断面程度の面積があれば、チャンネル Si 導波路による高機能光デバイスを作製できることが直感的に

理解できる。なお、図 1-8 において、石英ファイバ(直径 ϕ 125 μm)の全景を図示すると紙面に収まりきらないので、代わりに石英ファイバのコア(直径 ϕ 10 μm)を図示した。

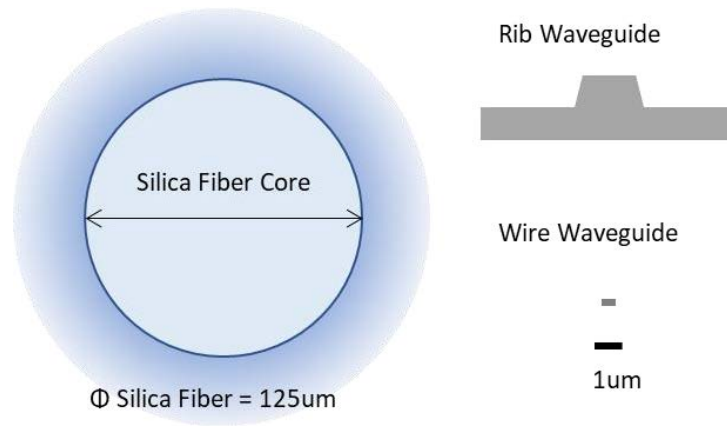


図 1-8 Rib 導波路とチャンネル導波路のサイズイメージ

Si フォトニクスによって Si 基板上¹²に光デバイスを作製する。Si 基板は 8 インチ(20cm)または 12 インチ(30cm)のものが用いられる。Si フォトニクス技術によって、Si 基板上に、AWG やミキサー、変調器、波長可変レーザー用の外部共振器が形成できる(図 1-9)。1 枚の Si 基板から数多くのデバイスが作製できるため、低コスト生産を実現しやすい。ただ、デバイス製作の歩留まりについては、ビジネスに直結する重要情報であるため具体的な数値がファウンドリから情報公開されることはないが、一般的にあまり高くないようである。

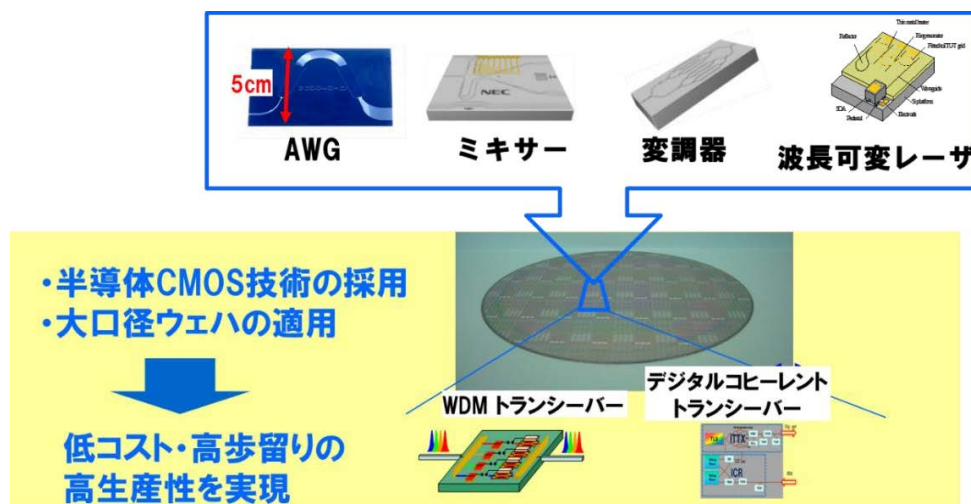


図 1-9 COMS 技術の転用による光デバイス製作

¹² 正確には SOI 基板上に作成する。SOI(silicon on insulator)基板とは、Si 基板の上に厚み数 μm の熱酸化 SiO₂ 膜、さらにその上に厚み数百 nm の Si を形成した基板である。

前述の通り、Si が持つ高い屈折率により、Si 導波路は同じ機能をシリカ導波路で実現した場合と比較してコンパクトに実現することができる。図 1-10 にマイクロリング共振器を例にとって概要を示した。図中の SiON 導波路とは SiON (Silicon oxide nitride、窒化酸化シリコン)で形成した導波路である。SiON の屈折率は酸素と窒素の量を制御することで 1.6~2.2¹³の間で制御することができる。シリカと Si の中間の屈折率を持つ材料としてそれぞれのメリット・デメリットを半々に持つ材料である。SiON 導波路の研究も盛んに行われている。また、SiON と同程度の屈折率を持つ他の材料 [2]での研究も行われている。

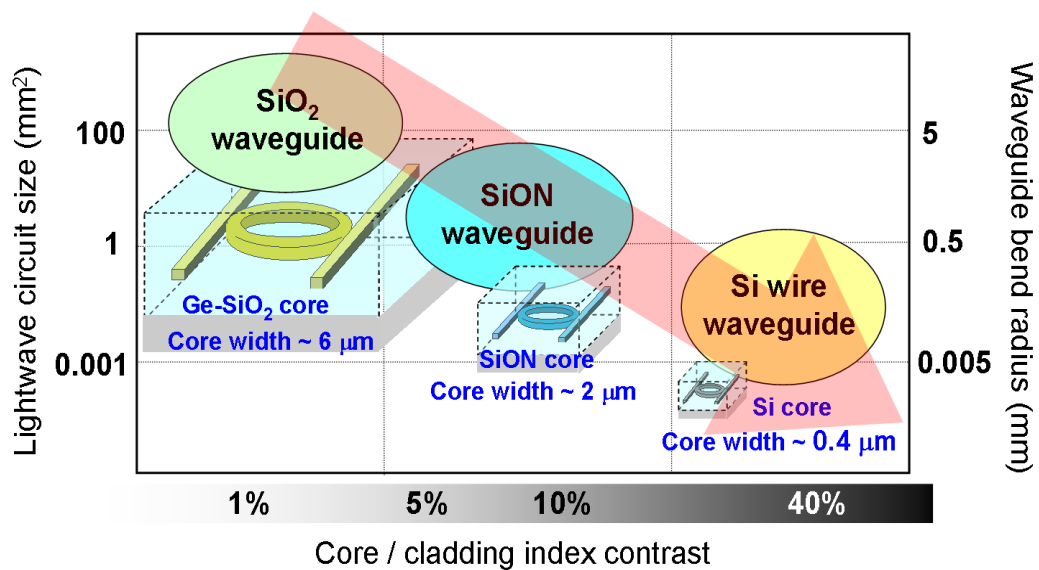


図 1-10 比屈折率差とデバイスサイズ

ここまででは Si の高い屈折率によるデバイスの小型化について述べてきたが、Si にはもう一つ有用な利点がある。それは熱光学(thermos-optic、TO)係数が高いということである。TO 係数とは、屈折率の温度依存性を示す係数¹⁴である。シリカ導波路の TO 係数はおおよそ $10 \times 10^{-6} [1/^\circ\text{C}]$ であり、Si 導波路の TO 係数はおおよそ $200 \times 10^{-6} [1/^\circ\text{C}]$ である。TO 係数が 20 倍高い。TO 係数が高いと、温度変化に対して屈折率の変化が大きいことを意味する。導波路型波長フィルタでは、フィルタ波長を制御するために、導波路の上にマイクロヒータを搭載することが多い。マイクロヒータで導波路を暖めることで、フィルタ波長を制御する。この際に、TO 係数が高いほど、小さい温度変化で屈折率変化を起こし、結果としてフィルタ波長を制御することができる。小さい温度変化で済むということは投入する消費電力が小さくて済むことを意味する(図 1-11)。つまり、TO 係数が高いほど、消費電力観点において有利であると言える。加えて、温度変化が小さくて済むということは、マイクロヒー

¹³ N に対して酸素の割合が多いと屈折率は低くなり、酸素の割合が多いと屈折率が高くなる。

¹⁴ 温度が高くなると線形的に屈折率が変化する。シリカや Si では温度の上昇に伴って屈折率が増加し、逆に樹脂材料では一般家機に屈折率が減少する。

タを高温にする必要がなくなるということである。マイクロヒータは温度が高いほど、グレインの形成やマイグレーションが発生しやすく、抵抗値の変動や断線を起こし寿命を短くしてしまう。従って、マイクロヒータを高温にする必要がないということは、マイクロヒータの寿命を長寿命化できるということを意味している。

Siにおける大きなTO係数による位相シフト省電力動作

	シリカ導波路	シリコン導波路
TO係数	$9.8 \times 10^{-6} (/K)$	$186 \times 10^{-6} (/K)$

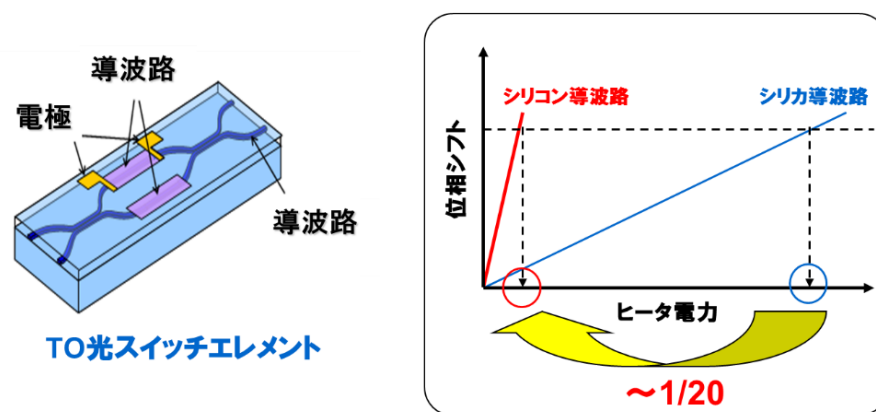


図 1-11 Si 導波路のヒータ省電力動作

最後に外部共振器用の Si フォト導波路について、製作プロセスの一例(図 1-12)を示す。

- ① SOI 基板上にフォトレジストを塗布する
- ② ステップパを使って高精度に露光し、レジストをパターニングする
- ③ パターニングしたレジストをマスクとして Si にエッチングを施す
- ④ クラッドとなる SiO₂ を成膜する
- ⑤ ヒータとなる金属材料を成膜し、パターニングする

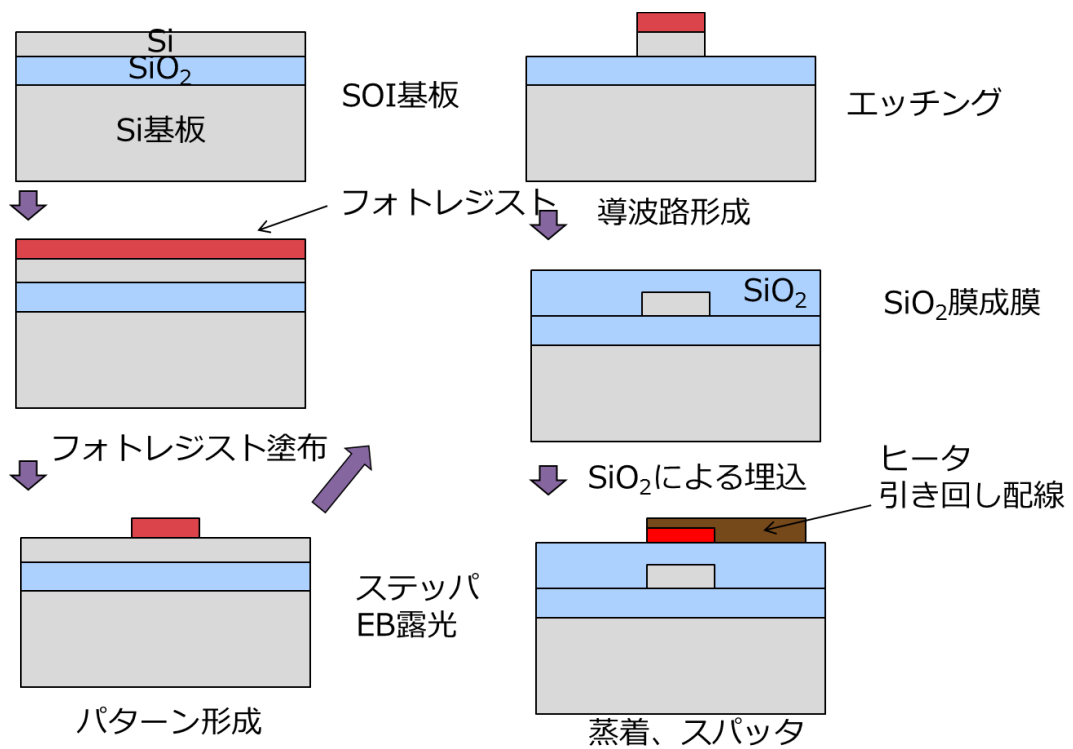


図 1-12 Si 導波路の製作プロセス

1.5 光導波路デバイス

Si フォトニクスで作製できる導波路として次のものが挙げられる。それぞれ光デバイスを構成する基本パーツである。光回路または光デバイスとして所望の特性を得るために、それぞれを組み合わせることでデバイスを構成する。本研究で重要な位置をしめるマイクロリング共振器については、次節で詳細を述べる。

表 1-2 導波路型光デバイスの分類

	機能	目的	備考
1	直線導波路	直線に光を導波する	最も基本的な導波路。
2	曲げ導波路	方向変換	曲げ半径が小さいと光学損失が発生する。どれだけ小さく曲げられるかでデバイスサイズが決まる。
3	スポットサイズ変換器	スポットサイズの変換	デバイスの箇所に用いられる。
4	Y 分岐	分岐	形状が Y 形状であることから Y 分岐と呼ばれる。
5	1x2MMI [3] (Multi-mode interferometers)	分岐および合波	製造トレランスが高いため比較的製作しやすい。
6	2x2MMI [3] (Multi-mode interferometers)	分岐および合波	製造トレランスが高いため比較的製作しやすい。
7	方向性結合器 [3]	分岐および合波	導波路間ギャップで結合率を制御する。
8	MZI (Mach-Zehnder interferometers)	波長フィルタ	Y 分岐、方向性結合器または MMI を二つ以上組み合わせて作製する。
9	ミキサ	位相情報の抽出	MMI または MZI を組み合わせて作製することが多い。
10	変調器	CW 光 ¹⁵ に対して強度変調および位相変調を施す	MZI の型アームに位相制御部を設けたもの。
11	AWG (Arrayed waveguide grating)	波長フィルタ	高性能な波長フィルタとして良く用いられる。
12	マイクロリング共振器	波長フィルタ	次節で詳細を述べる。

¹⁵ CW とは continues wave の略である。CW 光で光の連続波を表す。

これらのデバイスは一般的に左右、上下ともに対称なデバイスであるが、非対称なデバイスも議論されている。その中で非対称方向性結合器の提案が豊富 [4] [5]である。

1.6 マイクロリング共振器

マイクロリング共振器は導波路で形成された波長フィルタである。図 1-13 にデバイスの概要を示す。光学特性の詳細は 2 章で述べるため、ここでは概要の記述に留める。マイクロリング共振器に隣接したバスライン導波路に入射された光のうち、マイクロリング共振器内部で共振できる波長の光のみを別のバスライン導波路に出力する。つまり特定の波長をフィルタリングすることができる。マイクロリング共振器内部の波長フィルタの透過帯域が狭帯域であることから、DWDM システムへの適用に向いている。マイクロリング共振器のフィルタ波長(共振波長)やFSR(free spectral range、共振波長間隔)はマイクロリングの周回長を変えることで容易に変更できる。また複数のマイクロリング共振器を並列または縦列に接続すれば、フィルタ関数の合成も可能である。これまでは、シリカ導波路で形成されたマイクロリング共振器のデバイスサイズが mm オーダであった。近年は Si フォトニクス技術によって Si をコアに使用することが出来るようになってきたため、 μm オーダのマイクロリング共振器が製作できるようになった。これは前述の通り Si の高い比屈折率 Δ ($=30\sim 40\%$)によるものである。

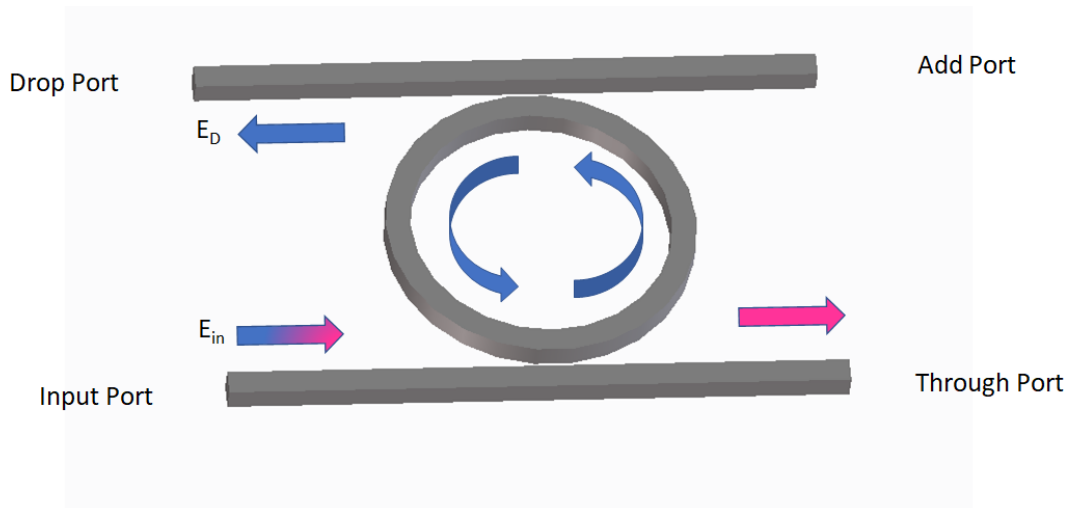


図 1-13 マイクロリング共振器

これまでにマイクロリング共振器は次の用途で研究報告がある。

- ① オールパスフィルタ [6] [7] [8] [9]
- ② インターリーバ [10]
- ③ フィルタ合成 [11] [12] [13] [14] [15]

- ④ 波長リフレクター [16] [17]
- ⑤ 分散補償器 [18]
- ⑥ 光バッファ [19]
- ⑦ 光スイッチ [20] [21]
- ⑧ 光ゲートアレイ [22]
- ⑨ 光論理回路 [23] [24] [25] [26]
- ⑩ マイクロリングレーザ [27] [28]
- ⑪ 波長変換デバイス [29]
- ⑫ 結合効率制御デバイス [30]
- ⑬ 温度無依存デバイス [31] [32]
- ⑭ 偏光無依存デバイス [32] [33] [34]

更に、下記の手法を用いたマイクロリング共振器の特性改善も提案されている。

- ⑮ バーニア効果を用いたフィルタ特性の改善 [35] [36]
- ⑯ 共振波長の UV トリミング [33] [37] [38]
- ⑰ フィルタ特性からのマイクロリング内部損失の解析 [39]

本研究ではマイクロリング共振器を、④波長リフレクター(レーザの外部共振器、詳細は 3 章) および、⑩マイクロリングレーザ(詳細は 4 章)として適用することを検討した。

1.7 本研究の背景と目的

これまで述べてきたように、光通信はデジタルコヒーレント光通信を一例として様々な技術革新を起こして、通信容量の増大を続けて来た。いつでもどこでもスマートフォンを使ってインターネットにアクセスすることを可能とし、動画配信サービスなどの大容量通信が身近なものになった。光通信の大容量化が望まれる傾向はしばらく続くと考えられるため、筆者を含む光通信に携わる技術者は、更なら光通信の大容量化に向けて取り組んで行く必要がある。現在はデジタルコヒーレント光通信における強度/位相信号の多値化が盛んに研究されている。多値化の進展に向けて、今後は送信側におけるレーザ光源として、高出力かつ狭線幅な波長可変光源が求められるようになるだろう。図 1-14 に通信フォーマットと要求線幅の関係を示す。また受信側においても、ローカル光源として同様の光源が必要になるだろうと考えられる。ここで光源と言えば、波長可変機構をもった波長可変光源を指すことを補足する。以降、特に断りがなければ、レーザまたは光源とは、波長可変光源を指す。

現在商用で利用できる波長可変光源の一例として、DFB(Distributed Feedback)レーザアレイや DBR(Distributed Bragg Reflector)レーザがある。これら光源の特徴は 5 章で述べるが、一般的にはその光出力は数十 mW と低く、また線幅は数百 kHz～数 MHz と広い。光出力が低い原因は、内部の構造に起因する損失や発振の不安定性のためである。線幅については、レーザキャビティ長

(共振器長)が 1mm 程度でそれ以上の長尺化が困難なためである。100kHz 以下の線幅を実現するためには、cm オーダのキャビティ長が必要である。従って、これら光源は、100mW 級の出力で数十 kHz の狭線幅を要求するような、今後の多値フォーマットには適用困難であろう。高出力狭線幅特性の実現に向けて、レーザ内部の損失が十分に小さく、また長尺なキャビティ(>数 mm)が必要である。長尺のキャビティをコンパクトに実現するためには、Si 導波路が有望である。これまで述べてきたように、Si フォトニクス技術を用いた Si 導波路によってリング共振器型の外部反射鏡を形成し、これと光半導体アンプを結合させることで、波長可変光源を構成する。ただ、Si 導波路はシリカ導波路と比較して、導波路の側壁ラフネスによる導波損失が大きい(Si 導波路損失 3.0dB/cm、シリカ系導波路なら 0.3dB/cm)とい問題があるが、3 章で述べる様々な工夫を施すことによって、損失を必要十分なまでに低減する見通しを立てた。その低損失 Si 導波路によって、外部共振器を構成し、SOA およびブースタ SOA と組み合わせることで、100mW 級出力で、かつ数十 kHz の狭線幅波長可変光源の実現を目指した。このマイクロリング共振器を用いた外部共振器型レーザを以降では外部共振型マイクロリングレーザと呼ぶ。

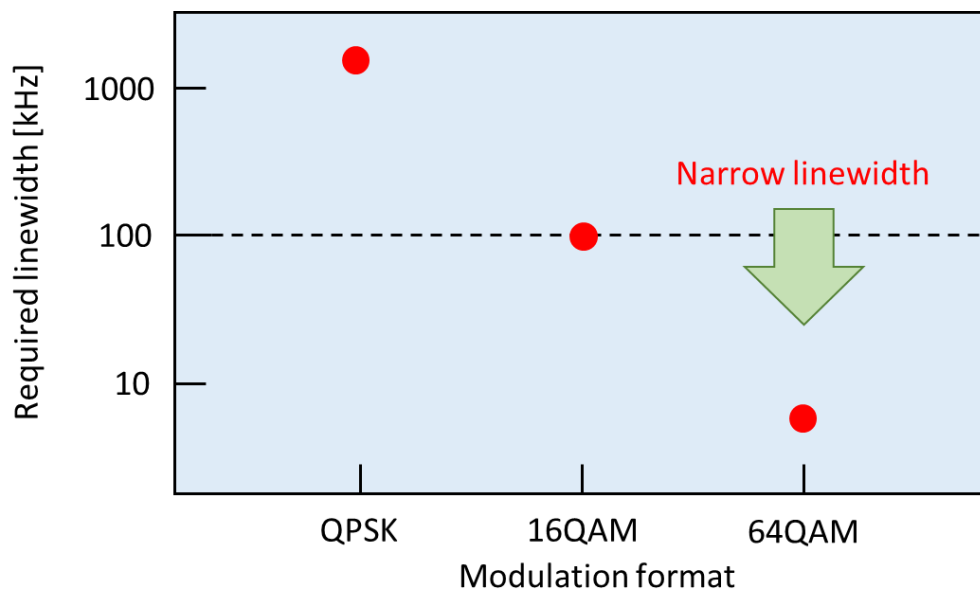


図 1-14 通信フォーマットと要求線幅

一方、本研究にはもう一つの目的がある。1.2 節で述べた様に、現在の光通信は、光信号を電気信号に変換(OE 変換)し、電気上での信号処理を行ってから再度光信号に変換(EO 変換)する電気ルータが使用されている。電気ルータは消費電力の観点から現在以上の大規模化が困難な状況にある。この課題を解決するために、光信号を電気に変換することなく、光信号のまま処理する光プロセッサの研究がおこなわれている。これらは低消費電力、高密度集積、高速動作が求められて

いる。これまでに本研究室は、マイクロリング共振器と量子井戸半導体光増幅器を用いたマイクロリングレーザを提案してきた。基本的な光信号処理であるインバータ動作およびフリップフロップ動作を同一のデバイスで実現できることを実証した。インバータ動作とは、レーザの発振波長が外部からの光注入によって波長が変化し、光注入停止後に初期の波長で発振することである。またフリップフロップ動作とは、光注入停止後も発振波長が保持されることである。これらは実験的に実証できたものの、理論的な裏付けが不十分であった。そこで、本研究では、これらの動作を理論的に説明する体系だったモデルの構築を行い、その応用を検討する。なお、半導体 MQW 導波路にて形成したマイクロリング共振器を内部共振型マイクロリングレーザと呼ぶ。また、単にマイクロリングレーザと言え、内部共振型マイクロリングレーザを指すものとする。

1.8 本論文の内容と構成

本論文の構成は以下の通りである。本章で研究の背景を述べる。第 2 章で波長可変光源のキーパーツとなる導波路型リング共振器および半導体光アンプ SOA の原理について述べる。第 3 章にて導波路型リング共振器と半導体光アンプを組み合わせた波長可変光源(外部共振型マイクロリングレーザ)の設計および評価結果を述べる。第 4 章にて、半導体光アンプ導波路で形成したマイクロリングレーザ(内部共振型マイクロリングレーザ)の原理および、本研究で構築したモデルについて述べる。加えて、これまでの先行研究の評価結果と、本研究におけるシミュレーション結果の比較について述べる。第 5 章にて、得られた結果についてと他機関との比較を行い、外部共振型マイクロリングレーザとして、また内部共振型マイクロリングレーザとしてあるべき姿をそれぞれ論じる。第 6 章にて結論を述べる。図 1-15 に本論文の構成の概要図を示す。

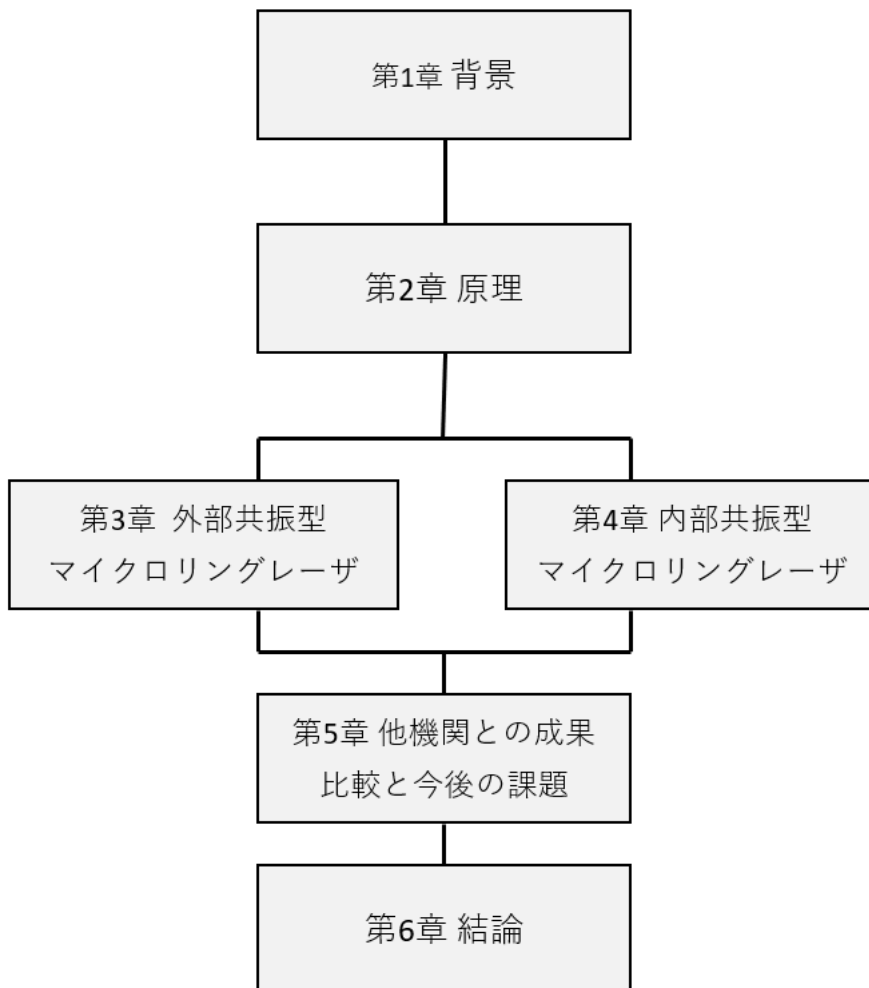


図 1-15 本論文の構成

第2章 原理

マイクロリングレーザを構成する基本パーツはマイクロリング共振器と SOA である。本章では、リング共振器および SOA についてその原理を述べる。2.1 節では、マイクロリング共振器について述べる。2.2 節では、半導体光アンプについて述べる。

2.1 マイクロリング共振器

マイクロリング共振器は光導波路で形成された波長フィルタである [40]。Input ポートに入射された光のうち、マイクロリング共振器内で共振可能な波長のみがマイクロリング共振器を通り Drop ポートに出力される。共振しない波長はマイクロリング共振器を通らず Thru ポートに出力される。レイアウトを図 2.1.に示す。

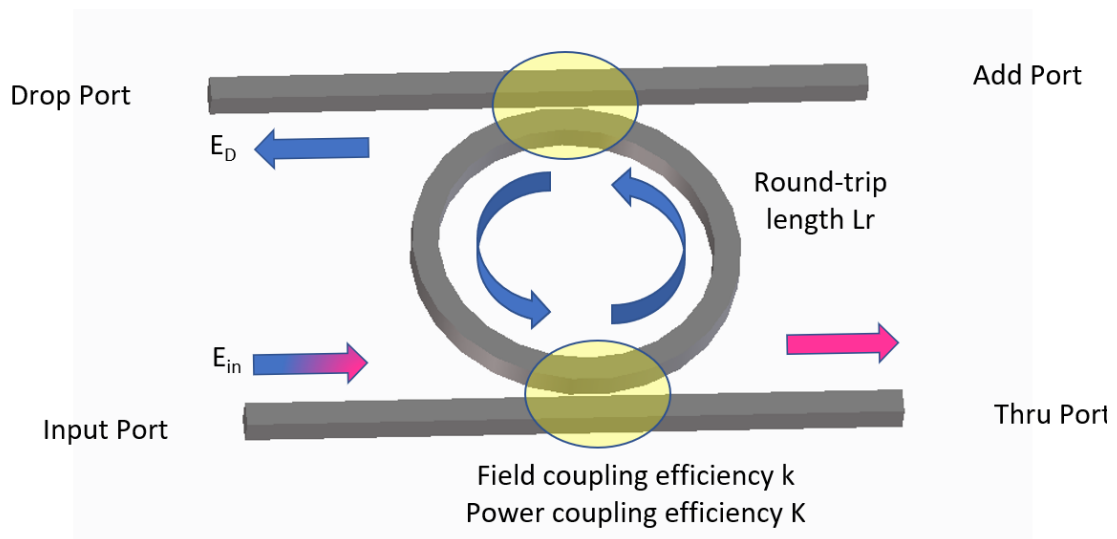


図 2-1 マイクロリング共振器

2.1.1 伝達関数

マイクロリング共振器の伝達関数 $D(\lambda)$ を次の様に求める。マイクロリングに入射する光の電界強度を E_{in} 、マイクロリングを通して Drop ポートに出力される光を E_D とする。マイクロリングとバスラインの電界結合効率を k 、マイクロリングの周回長 L_r を $2L$ 、マイクロリング 1 周当たりの透過率を a とすると、 E_D は次の様に表せる。

$$\begin{aligned}
E_D = & \left\{ k^2 a^{1/2} e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} n_r L} + k^2 t^2 a^{3/2} e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} n_r 3L} + k^2 t^4 a^{5/2} e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} n_r 5L} \right. \\
& + k^2 t^6 a^{7/2} e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} n_r 7L} + k^2 t^8 a^{3/2} e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} n_r 9L} \\
& \left. + \dots \right\}
\end{aligned} \tag{2.1}$$

上記の式は等比級数の無限和であるため、伝達関数 $|E_D/E_{in}|^2$ を次の様に簡潔に表すことが出来る。

$$\left| \frac{E_D}{E_{in}} \right|^2 = \left| \frac{k^2 a^{1/2} e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} n_r L}}{1 - t^2 a e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} n_r 2L}} \right|^2 \tag{2.2}$$

ここで、伝達関数を $D(\lambda)$ とし、またマイクロリング-バスライン間の光のパワー結合効率を $K(=k^2)$ 、透過率を $T(=t^2)$ 、また $K=1-T$ より、次の式を得る。

$$D(\lambda) = \frac{1}{\frac{(1 - (1 - K)a)^2}{K^2} + \frac{4(1 - K)}{K^2} \sin^2\left(\frac{2\pi}{\lambda} n_r \frac{L_r}{2}\right)} \tag{2.3}$$

ここで L はリングの周回長 L_r に対して、 $L_r=2L$ の関係があることを上記式に代入した。リング透過率を 0.99(-0.04dB)、パワー結合効率 K を 0.1/0.2/0.3 とした際の波長と伝達関数の関係を図 2-2 に示す。

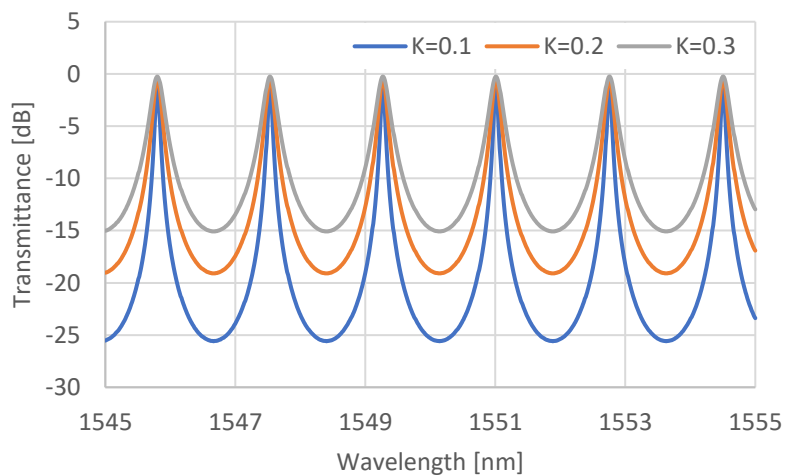


図 2-2 マイクロリングの Drop ポートの透過強度

更にマイクロリングの1周当たりの透過率 a を1(光学損失無しで100%透過)とすると、上式は次の様になる。

$$D(\lambda) = \frac{I}{1 + \frac{4(1-K)^2}{K^2} \sin^2\left(\frac{2\pi}{\lambda} n_r \frac{L_r}{2}\right)} \quad (2.4)$$

この式は、エタロンを透過する光の伝達関数と同じ形¹⁶であることを補足する。

2.1.2 リング周回損失

結合効率が低いほどクロストークが得られるが、リング内を導波する光の周回数が増えるため損失が増加する。共振波長での周回損失 $Loss(K)$ は次の様に表すことができる。

$$Loss(K) = 10\log\left(\frac{K^2 a}{1 - (1 - K)a}\right) \quad (2.5)$$

この関係を図 2-3 に示す。結合効率が低いほど周回損失が大きいことが分かる。また、マイクロリングの1周当たりの透過率が小さいほど損失が大きいことが分かる。

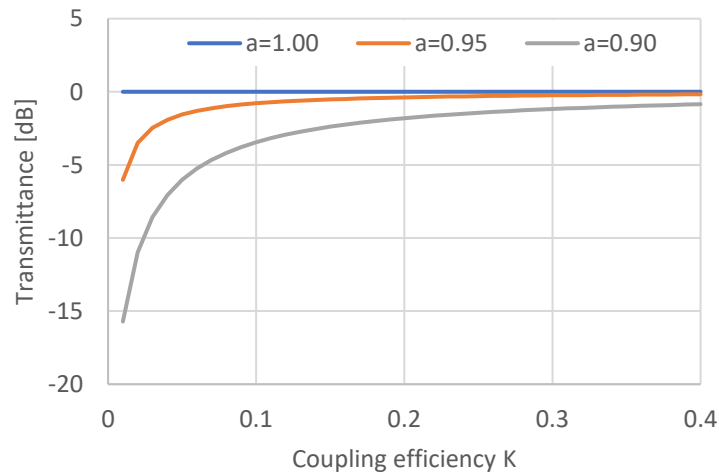


図 2-3 マイクロリング共振器の周回損失

¹⁶ 内部に光学損失がない時、マイクロリングの Drop ポートの伝達関数とエタロンの透過側の伝達関数は同じになる。ただし $K = 1 - R$ (R はエタロンのパワー反射率) の違いがある。

2.1.3 クロストーク

マイクロリングのクロストークとは、共振波長における最大透過率と、非共振波長における最小透過率との差のことである。慣例的に dB(デシベル)で表記する。式(2.3)を基に、クロストーク CT は次の様に記述される。

$$CT = 10\log\left(\frac{K^2 a}{(1 - (1 - K)a)^2} - \frac{K^2 a}{(1 - (1 - K)a)^2 + 4(1 - K)}\right) \quad (2.6)$$

リング周回透過率 a を 1.0 (0dB)、0.95 (-0.22dB)、0.90(-0.46)dB とした場合の結合効率 K に対するクロストーク CT の関係を図 2-4 に示す。結合効率が小さくなるほどクロストークを得ることができ。なお補足として、本定義ではクロストークを正の値で表記しており、クロストークの値が大きいほどフィルタ特性が急峻であることを付け加える。

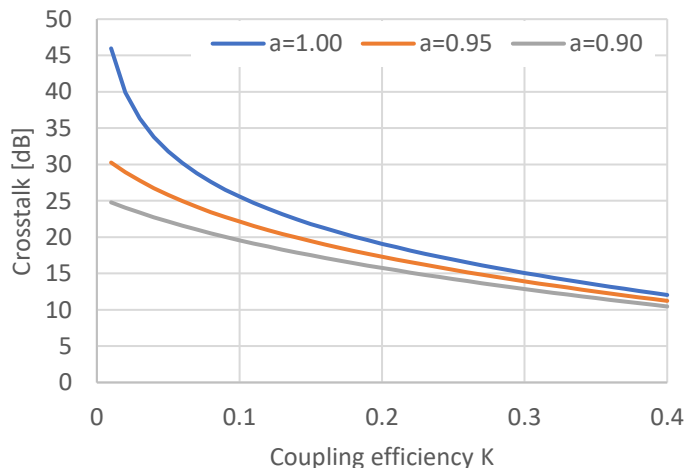


図 2-4 マイクロリング共振器のクロストーク

2.1.4 FSR

式(2.3)の \sin 関数の内部が π の整数倍になる条件の時、伝達関数 $D(\lambda)$ が極大になる。また、 \sin 関数の内部が $\pi/2, 3\pi/2$ の時、伝達関数 $D(\lambda)$ が極小になる。周期的に極大-極小を繰り返す。極大と次の極大の波長間隔を FSR (free spectral range) と呼ぶ。FSR は共振次数が 1 異なる条件での波長間隔である。共振次数は次の式で表せる。

$$M\lambda = n_r L_r \quad (2.7)$$

共振波長の波長間隔 FSR は次の様に表せる。

$$\begin{aligned}
 FSR &= \lambda_1 - \lambda_0 \\
 &= \frac{n_r L_r}{M} - \frac{n_r L_r}{(M+1)} \\
 &= \frac{n_r L_r}{M(M+1)}
 \end{aligned}
 \tag{2.8}$$

ここで、共振次数 M が十分に大きい (>100) とすると、次の様に近似できる。

$$FSR = \frac{n_r L_r}{M^2}
 \tag{2.9}$$

式(2.7)を式(2.9)に代入することで、次の式を得る。

$$FSR = \frac{\lambda^2}{n_r L_r}
 \tag{2.10}$$

この式より、マイクロリングの周回長 L_r を小さくすると FSR が大きくなることが分かる。また、マイクロリングの等価屈折率 n_r を小さくすると FSR が大きくなることがわかる。なお、 λ が大きいほど FSR は大きくなるが、本研究では光通信用途のため、 $1.55\mu\text{m}$ で固定である。図 2-5 にマイクロリングの周回長 L_r と FSR の関係を示す。 λ を $1.55\mu\text{m}$ として n_r を 1.5(シリカ導波路相当)、2.5(中間値)、3.5(Si フォト導波路相当) と仮定した。用途に合わせて FSR を設計することが重要である。

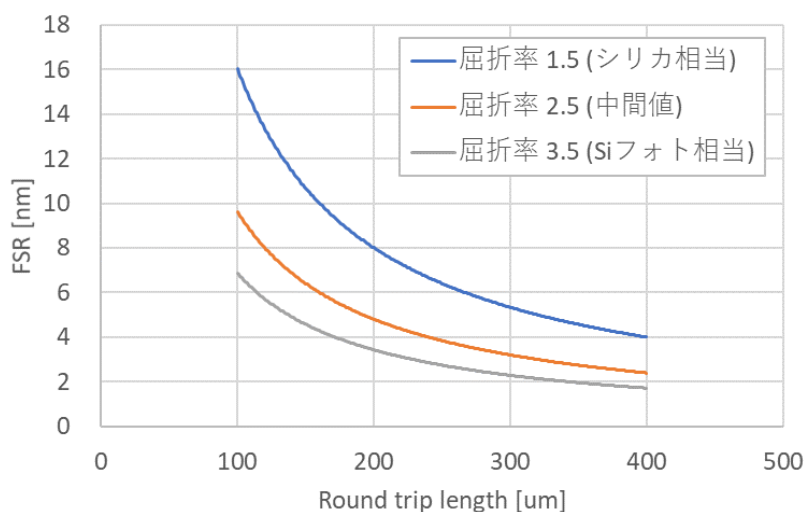


図 2-5 マイクロリングの周回長と FSR の関係

2.1.5 パーニア効果による FSR 拡大

マイクロリングの FSR はリングの周回長によって決まる。通常、FSR は数 nm 程度である。数 nm では光通信波長帯(C 帯:1528-1568nm)を満たすことができない。通信波長帯を満たす様に FSR を拡大するためには、リング周回長を短くする必要がある。リング周回長を短くするためには、リング半径を小さくすることが有効であるが、リング半径を小さくすると過剰な曲げ損失が発生してしまうため、リング半径を小さくすることには限界がある。多くの場合において、「」所望の半径にすることは困難である。そこで、FSR の異なる 2 つのマイクロリングを図 2-6 の様に縦列的に組み合わせることでパーニア効果¹⁷を用いて FSR を拡大する。FSR が互いに素となる条件の時に FSR を拡大することができる。パーニア効果を用いて拡大した FSR は次の(2.11)式の様に記述される。

$$\begin{aligned} FSR_{total} &= FSR_1 * M \\ &= FSR_2 * N \end{aligned} \tag{2.11}$$

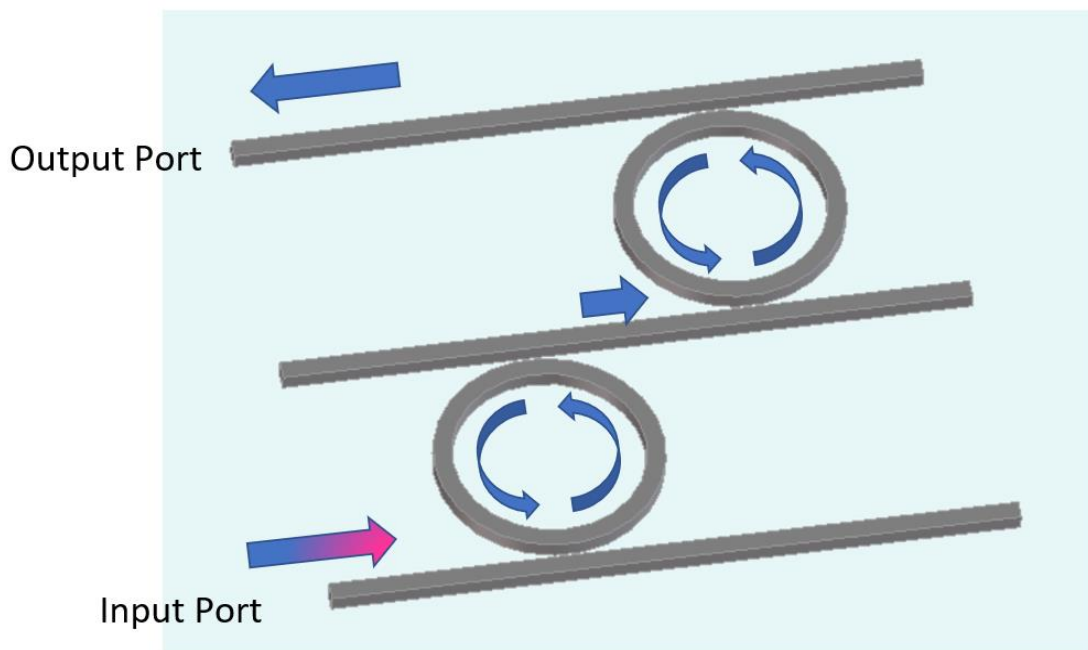


図 2-6 縦続接続マイクロリング共振器

ここで、M と N は互いに素の関係にあること。一般的には 1 違いに設計することが多い。図 2-7 および図 2-8 に M:N=19:20 の時の $D(\lambda)$ およびトータルの伝達関数を示す。リング共振器一つの場合の FSR は 1.7nm 程度のものが、35nm 程度に拡大されたことが分かる。

¹⁷ 日本語では副尺効果ともいわれる。身近な例はノギスである。目盛りの読み取り精度を向上するために用いられる。

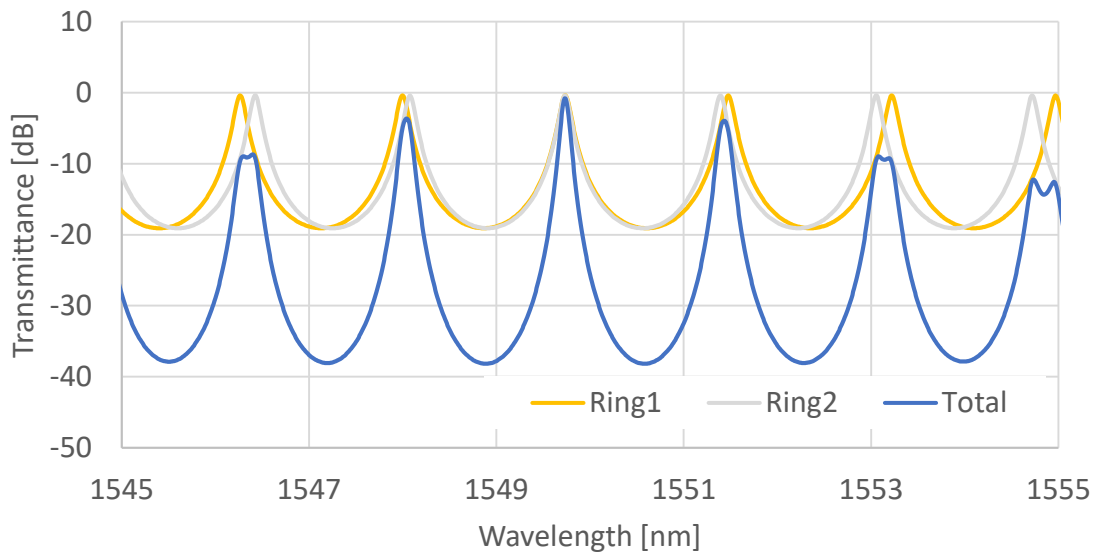


図 2-7 バーニア効果による FSR 拡大(波長 1545-1555nm)

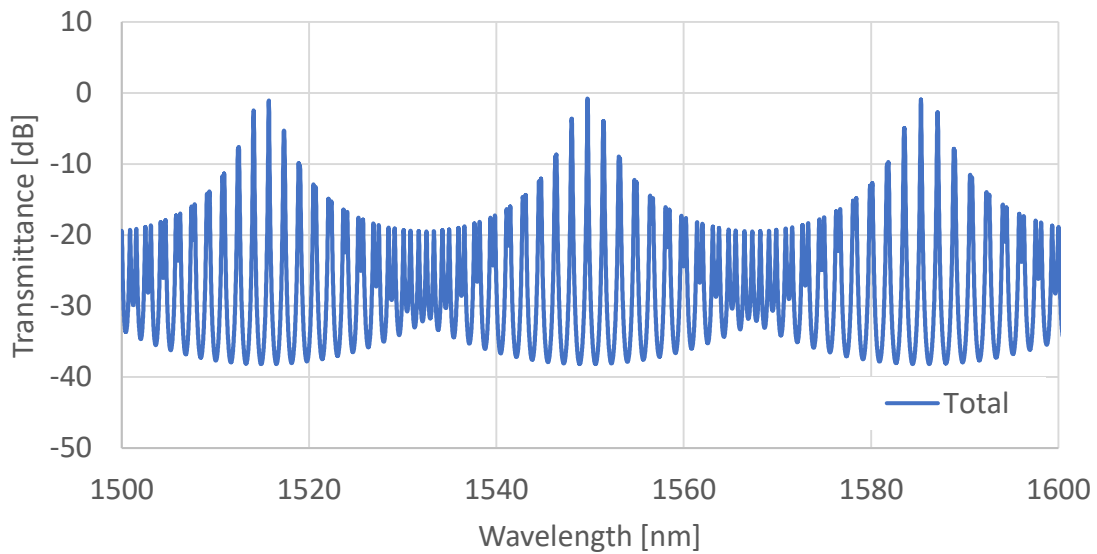


図 2-8 バーニア効果による FSR 拡大(波長 1500-1600nm)

図 2-9 に、 $M:N=M(M-1)$ とした場合の FSR を示す。M を大きくするほど FSR を拡大することができる。ただし、M を大きくすると、次に述べるモード利得差が低下してしまうため、バランスを考慮した設計が必要である。

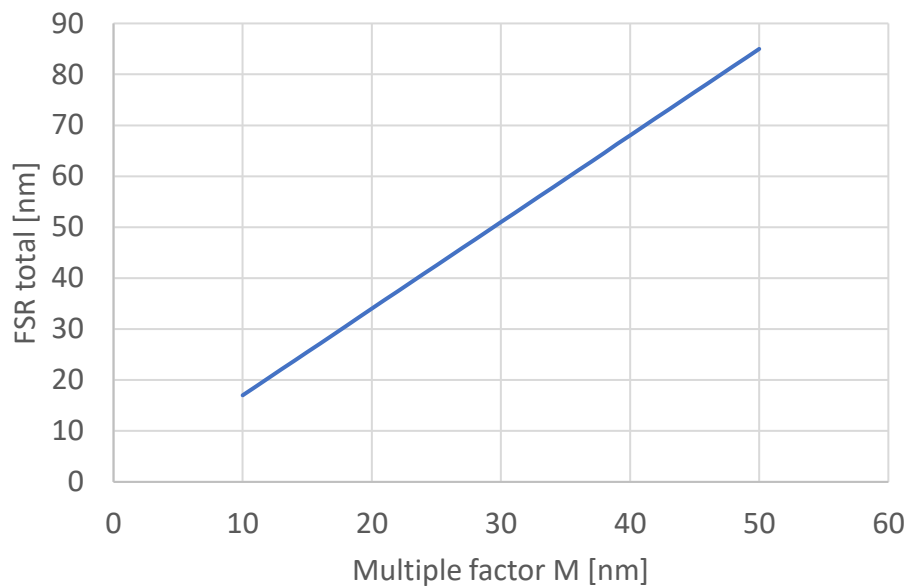


図 2-9 周回長比率 M と FSR の関係

2.1.6 モード利得差

2つのマイクロリングの FSR を互いに素にすることで、トータルの FSR の拡大が可能になるが、FSR の拡大に伴ってモード利得差が減少するというデメリットがある。モード利得差とは、最も透過率が高い波長と、2番目に透過率が高い波長の透過率の差である。通常 dB で表示する。一般的に安定的にレーザ発振するためにはモード利得差が 2dB 以上必要とされている。モード利得差と SMSR(sub-mode suppression ratio または side-mode suppression ratio)の関係は文献 [41]にて詳細に議論されているのでここで述べない。図 2-10 に結合効率とモード利得差の関係を示す。マイクロリングレーザのモード利得差を議論する場合、2つのマイクロリング共振器を通ったあと、反射構造で折り返されて、再び 2つのマイクロリング共振器を通るため、フィルタ関数が二乗されることに注意が必要である。ただ、本章は原理説明を目的としているため、折り返しがない場合、つまり2つのマイクロリング共振器を一回通るだけの場合について説明していることを補足する。

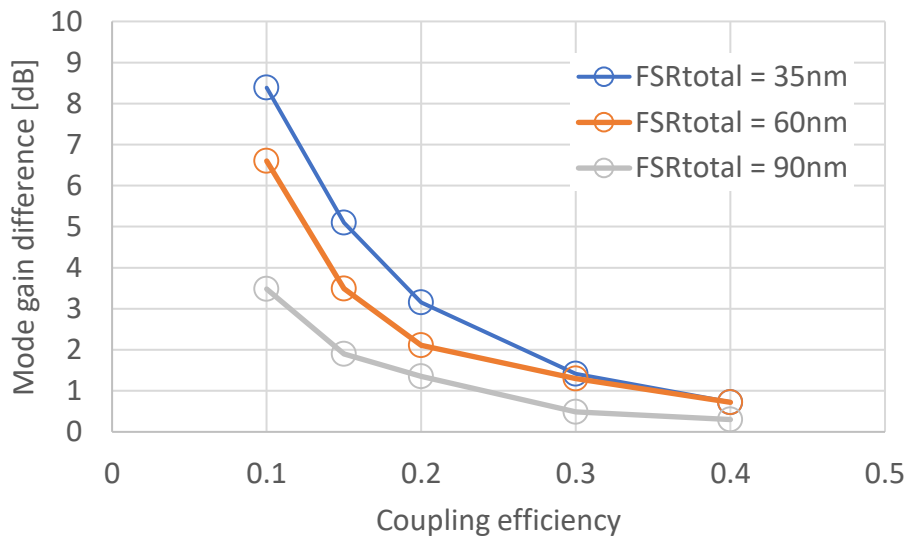


図 2-10 モード利得差(a=0.99)

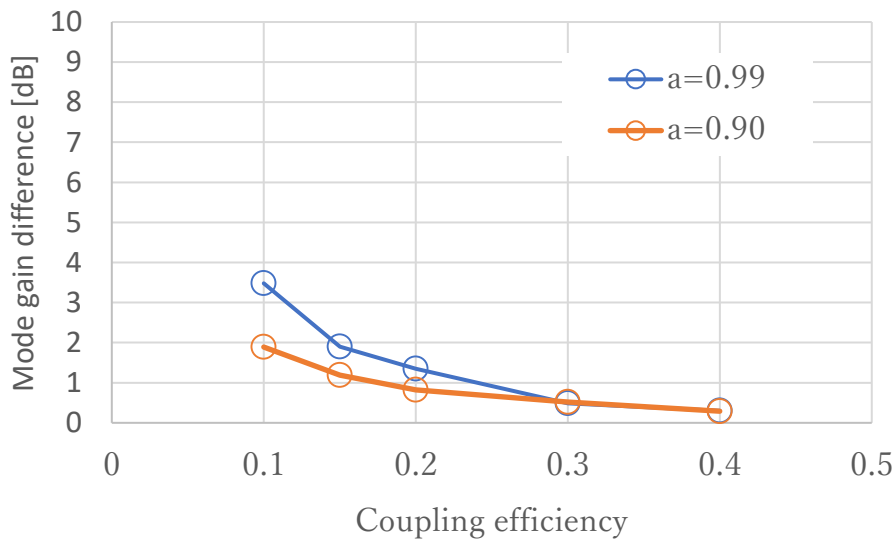


図 2-11 モード利得差 (FSRtotal = 90nm)

図 2-10 より、FSR を拡大するにつれて、モード利得差が低下し、また図 2-11 よりリング周回透過率が減少することによりモード利得差が低下することが分かる。従って、所望のモード利得差を満たす様に FSR の上限値を決定し、また所望のモード利得差を満たす様にリング周回透過率の下限値を決定することになる。設計の詳細は次章で述べる。

2.1.7 マイクロヒータによる λ_r チューニング

マイクロリング共振器の上に金属薄膜によるヒータを形成し、そのヒータへの電力投入によってマイクロリングの温度を制御することで、マイクロリングの等価屈折率 n_r が上昇し、マイクロリングの共振波長 λ_r を制御することができる。共振波長の変化はヒータへの投入電力に比例して、長波長側にシフトする。ヒータの室温(25°C)抵抗値を $R_{initial}$ 、抵抗値の温度依存性を TCR (Thermal coefficient resistance)とした場合、ヒータの抵抗値を次の式で表せる。

$$R_{heater}(\Delta T) = R_{initial} * (1 + \Delta T * TCR) \quad (2.12)$$

ここで、次の通り ΔT を室温 25°Cとの温度差とする。

$$\Delta T = T_{heater} - 25 \quad (2.13)$$

ヒータに投入した電力とヒータの温度上昇の比を C_h とすると、投入電力とヒータ抵抗値を次の様に表現することができる。

$$W = \frac{I^2 R_{initial}}{1 - I^2 R_{initial} C_h TCR} \quad (2.14)$$

ここで、ヒータの室温(25°C)抵抗値 $R_{initial}$ を 200 Ω 、抵抗値の温度依存性 TCR (Thermal coefficient resistance) を 2.5×10^{-6} 1/°C¹⁸、ヒータへの投入電力と温度上昇の比を 3 °C/W とした場合の投入電流とヒータ消費電力の関係を図 2-12 に示す。

¹⁸ TCR は材料によって決まる。ヒータ材料に Pt を使用することを前提として、TCR= 2.5×10^{-6} [1/°C]とした。Pt は長期的な抵抗値変動が小さい材料であることによる。

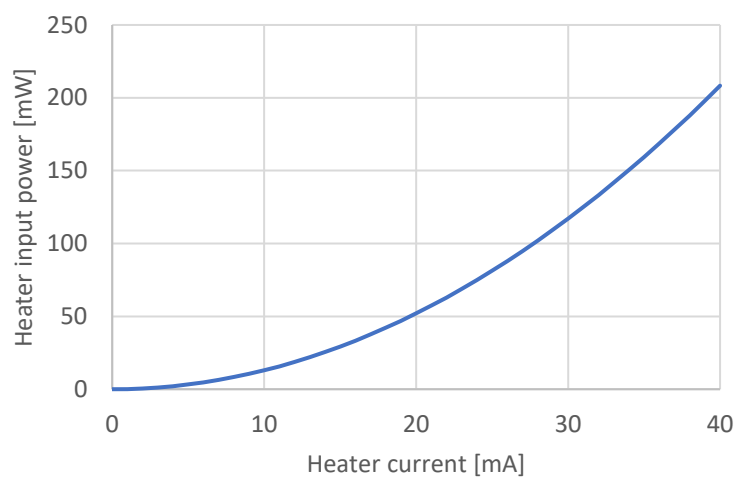


図 2-12 ヒータ電流と電力の関係

更に、共振波長の温度依存性を $0.2 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ とした場合の、ヒータ電力とマイクロリング共振器の共振波長シフト量の関係を図 2-13 に示す。

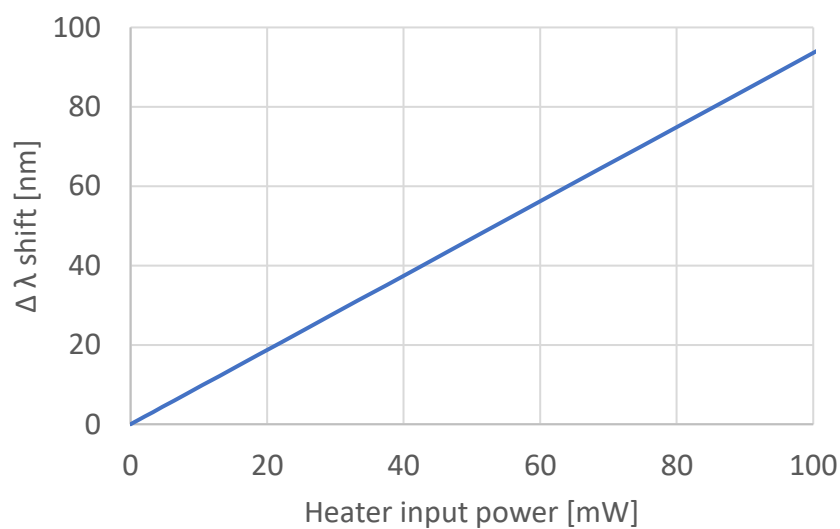


図 2-13 ヒータ投入電力と共振波長シフト量の関係

図 2-13 より、ヒータへ 100mW の電力を投入すれば、波長が 90nm シフトと予測できる。

2.2 光半導体アンプ

半導体光アンプ(Semiconductor Optical Amplifier: SOA) とは、化合物半導体で形成された光増幅素子である。電流注入を行うことで光の増幅が制御できるため、光学損失の補償を目的として利用される。また、特定の波長のみを SOA に帰還させることで、特定の波長でレーザ発振させることができる。半導体光アンプは光学分野におけるアクティブ素子の代表格である。

2.2.1 光増幅の原理

図 2-14 のように伝導帯に多数の電子があり、また価電子帯に多くの正孔があると仮定する。電子が持つエネルギーがバンドギャップエネルギーより大きい場合(励起状態)に電子の遷移と光子の放出が起こる。プランク定数を h 、光速を c 、光の波長を λ として、光が持つエネルギー E は次の様に表すことができる。

$$E = h \frac{c}{\lambda} \quad (2.15)$$

半導体中の電子はエネルギーの異なる順位を構成する。エネルギーの高い順位(伝導帯)が電子によって占有され、エネルギーの低い順位(価電子帯)が占有されていないとき、この状態を反転分布と呼ぶ。半導体においては PN 接合(pn junction)に順方向電流を流すことで、反転分布が容易に実現される。ここで周波数 ν の光が半導体に入射されたと仮定すると、入射光のエネルギーがバンドギャップエネルギーより大きい場合に電子の遷移と光子の放出が生じる。これを誘導放出¹⁹と呼ぶ。一方、電子が価電子帯を占有していて伝導帯が占有されていないとき、光の入射によって、誘導放出とは逆方向の電子の遷移が生じ、光の吸収が行われる。以上が半導体光増幅器の増幅および吸収に関する基本的な原理である。

¹⁹ 誘導放出と対をなす言葉として自然放出がある。自然放出とは、光源となる物質が励起状態からよりエネルギーの低い基底状態へ移り、その際に光子を放出する過程のことである。一般的に半導体レーザへの注入電流が少ないときは自然放出のみが観測され、電流注入の増加に伴って、ある注入強度から自然放出が少なくなり誘導放出が支配的になる。この状況を一般的にレーザ発振と呼ぶ。

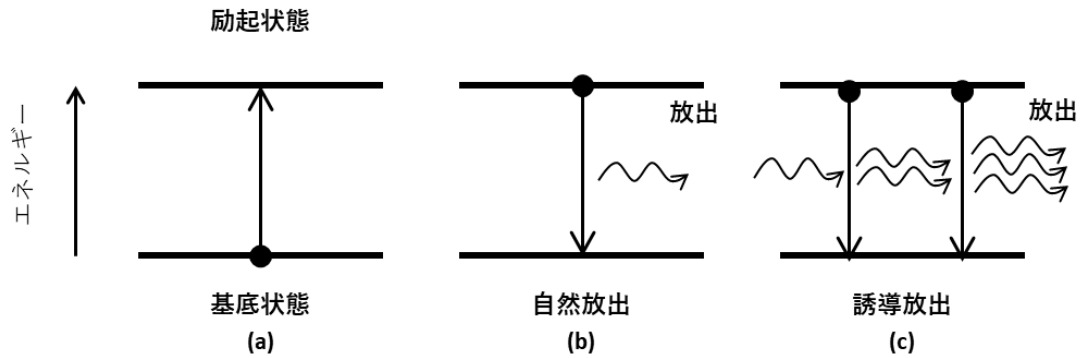


図 2-14 半導体中の電子のエネルギー順位と光の放出過程

2.2.2 バンドギャップエネルギーと発振波長

式(2.15)で記述された様に、半導体の発光波長はバンドギャップエネルギーによって決定される。バンドギャップエネルギーは格子乗数によって決定されるため、結局は格子乗数が発光波長を決定する。一般的に、AlGaAs/GaAs 系材料は $0.8\sim 0.9\mu\text{m}$ で発光し、GaInAsP/InP 系の材料は $1.3\sim 1.6\mu\text{m}$ で発光する。光通信で利用される $1.55\mu\text{m}$ の波長帯では、InP 基板に GaInAsP や AlGaInAs を成長させた半導体を利用されることがほとんどである。このような半導体は、バンドギャップの異なる2つの結晶の薄層²⁰を交互に積み上げる(接合する)ことで実現される。ここで、異なる結晶同士の接合はヘテロ接合と呼ばれ、ヘテロ接合では格子定数の近い2種類の結晶が選択されることを補足する。加えて、格子定数が近い結晶を用いることまたは一致している結晶を用いることは格子整合と呼ばれることを補足する。バンドギャップの小さい層に電子が閉じ込められた場合、層厚みが数 10nm になると、電子が持つエネルギーが量子的な準位を形成するようになる。この様にエネルギーが量子化された構造は量子井戸 (Quantum Well: QW) 構造と呼ばれる。多層化された量子井戸は多重量子井戸 (Multiple QW: MQW) 構造と呼ばれる。MQW 構造では、バルク材料や一層の量子井戸構造では得られない物性が発現する。これを半導体レーザに応用することで、閾値の低下や、高温特性の改善、変調の高速化などデバイス性能の大幅な向上を実現した。近年の半導体レーザの構造はほぼ全てが MQW であるといっても過言ではない。

2.2.3 半導体レーザ

レーザとは、誘導放出による光の増幅 (light amplification by stimulated emission of radiation: LASER) を指す造語であり、コヒーレントなビーム(可干渉性を持ったビーム)を発生させるデバイスである。コヒーレントなビームは自然界に存在する現象では発生し得ない極めて人工的なデバイスである。レーザの基本原理は、2.2.1 で記述した様に、電流注入によって反転分布状態を実現し、誘導放出を利用して光をコヒーレントに増幅することである。レーザの構造は図 2-15 に示すダブル

²⁰ 一般的には数 nm ～数十 nm の厚みの薄膜を積層構造にする。

ヘテロ構造が一般的である。同構造においては、クラッド層のバンドギャップエネルギーが比較的大きいため、活性層近傍の光を吸収しない。加えて、クラッド層の屈折率が活性層に比べて小さいため、活性層がコアとして働き、その結果として光が活性層に沿って導波されることになる。更に、基板をへき開して活性層面に垂直な端面を形成することで、光の反射による光の負帰還が生じ、半導体レーザが形成される。半導体と空気による反射端面では約 30 %の反射率が得られる²¹。このような構造をファブリ・ペロー (Fabry Perot: FP) レーザと呼ばれ、レーザとして代表的な構造である。以降でファブリペローレーザを含む代表的な構造について、レーザ発振の原理を述べる。

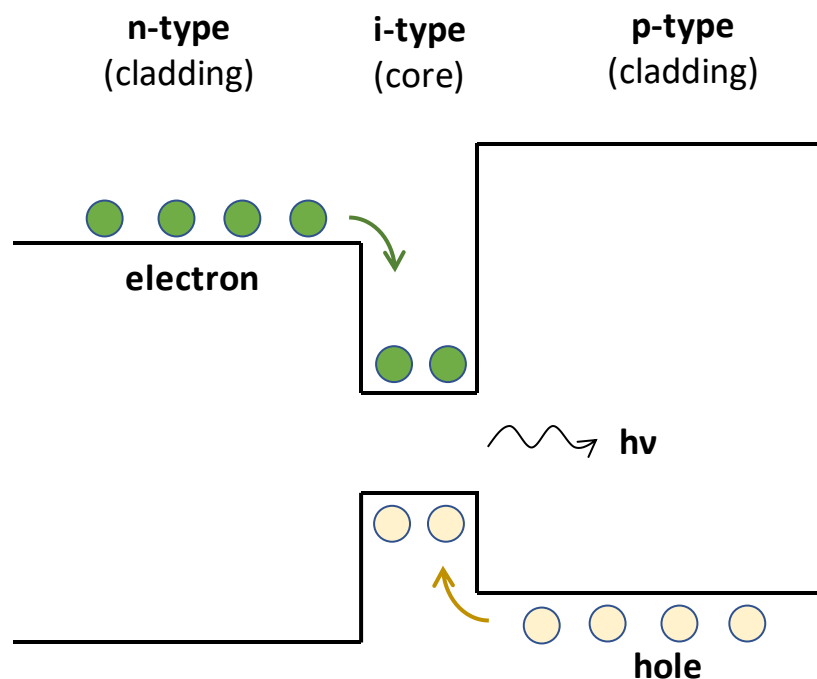


図 2-15 ダブルヘテロ接合

(1) ファブリペローレーザ (Fabry-Pérot:FP)

レーザ内の光が増幅されながら端面で反射してレーザ内を往復する構造である。レーザとして最も単純な構造として知られている。レーザ内を導波する光について光の振幅がレーザ内を 1 周した後に等倍となる振幅条件を次の式(2.16)の様に表すことができる。

$$R_1 R_2 e^{[(g-\alpha i)2L]} \geq 1 \quad (2.16)$$

²¹ 実使用状況においては、へき開端面に保護膜として $\lambda/2$ の厚みの SiO_2 を成膜することが多い。

ここで、 g は単位長さあたりの利得、 α_i はレーザ内部の導波損失、 L は FP レーザのキャビティ、 R_1 及び R_2 は電力反射率である。ここで、光がレーザ内を一周して戻ってきて際に、元の光と同じ位相で重なるための位相条件は次の式(2.17)になる。

$$\beta 2L = 2n\pi \quad (2.17)$$

ここで、 n は任意の整数で縦モード次数と呼ばれる。振幅条件(2.16)と位相条件(2.17)を満たせば、共振器内で光のパワーが増幅されレーザ発振を起こし、その光がレーザ端面を透過して外部に出力される。FP 内部の導波路損失 α_i 、レーザ長を L 、端面の反射率を R_1, R_2 としたとき、FP レーザの発振しきい値利得 g_{th} は次の様になる。

$$g_{th} = \alpha_i + \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{R_1 R_2} \quad (2.18)$$

(2) マイクロリングレーザ

マイクロリングレーザとはマイクロリング共振器を SOA で構成したレーザである。図 2-16 に概要を示す。マイクロリングレーザの重要なパラメータは結合効率である。結合効率は、SOA を内部に持たないパッシブのマイクロリング共振器と同様に、マイクロリング共振器とバスライン導波路が近接する部分の長さで決まる。4 章で述べる非線形効果について、その効果を強く得るためには、マ結合効率が重要なパラメータになる。それは、結合効率が小さいほどマイクロリング内部の光の周回数が増えて光強度が増強され、結果として非線形効果が発現しやすくなるからである。

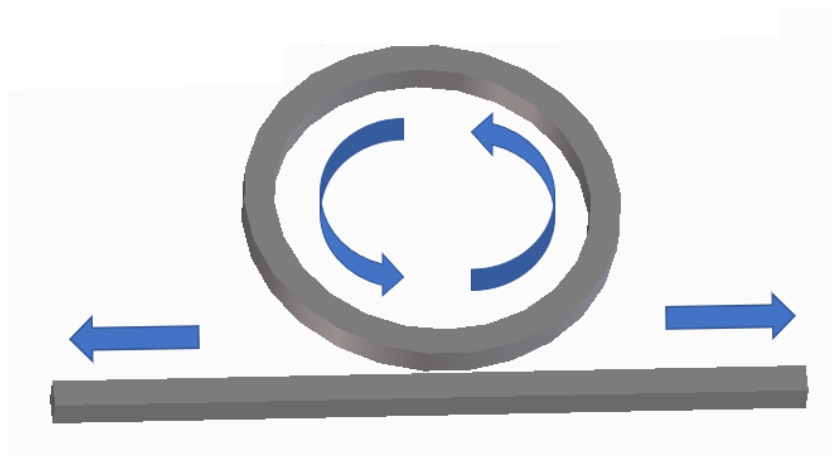


図 2-16 マイクロリングレーザ

半導体マイクロリングレーザのしきい値利得 g_{th} は次の式(2.19)に記述できる。

$$g_{th} = \alpha_i + \frac{1}{L_r} \ln \frac{1}{1-K} \quad (2.19)$$

ここで L_r はマイクロリングの周回長である。FP レーザは両端面の反射率の積 R_1R_2 が \ln の分母であったことに対して、マイクロリングレーザでは \ln の分母は $1-K$ である。マイクロリングレーザから外に出るパワー強度が K であるため、レーザ内部に戻る光は $1-K$ であることに起因している。加えて、マイクロリングレーザには光が出力される箇所が一つしかないため、分母が $1-K$ となる。

2.2.4 レーザパラメータの算出方法

一般的にレーザ内部のゲイン g は、利得係数 g_0 、透明電流 I_{tr} ²²、注入電流 I を用いて次の様に表せられる。

$$g = g_0 \ln \frac{I}{I_{tr}} \quad (2.20)$$

さらに、レーザのキャビティ長 L 、内部導波損失 α_i 、内部量子効率 η_i 、とすると、スロープ効率 S は次の様に表せられる。

$$\frac{1}{S} = \frac{q}{hv} \frac{1}{\eta_i} \left(1 + \frac{\alpha_i}{\ln \frac{1}{R_0}} L \right) \quad (2.21)$$

ここで、へき開端面を想定し、両端ともにパワー反射率 R_0 とした。キャビティ長 L の異なるサンプルでスロープ効率 S を測定すれば、 α_i および η_i を逆算することができる。さらに、しきい電流密度 j_{th} は、透明電流密度 j_{tr} を用いて次の様に表せられる。

$$\ln j_{th} = \ln j_{tr} + \frac{\alpha_i}{g_0} + \frac{\alpha_{mir}}{g_0} \quad (2.22)$$

ここで、 α_{mir} は次式である。

$$\alpha_{mir} = -\frac{1}{L} \ln R_0 \quad (2.23)$$

²² SOA に電流を流していないとき、SOA は光を吸収する。SOA に電流を流すことで、吸収がへりやがて増幅を始めるが、吸収と増幅が釣り合ったときの電流値が透明電流 I_{tr} である。透明電流 I_{tr} はレーザの構造にもよるが数 mA～数 mA であることが多い。

2.2.5 ファブリペローリップルからのゲイン算出

レーザ内部の利得は前節で記述した以外に、ハッキパウリ法 [42]によっても求めることができる。ハッキパウリ法はファブリペローリップルにおけるリップル振幅値から利得または損失を計算する方法である。レーザ発振しきい電流 I_{th} の 90%~95%程度の電流におけるスペクトルで計算されることが多い。レーザ発振状態では、発振している波長がキャリアを消費しリップルを抑制するため、どの波長でも等しく利得が与えられるレーザ発振前の状態で本計算に適しているためである。ハッキパウリ法はファブリペローリップルが生じる媒質中に利得がある場合だけではなく、損失がある場合でも同様の方法で算出が可能である。一例として、導波路損失の測定が挙げられる。通常、導波路の導波損失を測定する場合、長さの異なる導波路を複数用意し、導波路長と挿入損失の関係から導波路損失を算出する。または長さの異なる導波路を複数用意しなくても、既知の長さの導波路にて挿入損失を測定し、その後導波路短く切断し再度挿入損失を測定し、導波路長と挿入損失の関係から算出する方法(カットバック)がある。長さの異なる導波路を複数用意することが困難な場合がある。また導波路を切断することが困難な場合もある。しかしながら、ハッキパウリ法は導波路が一つあれば算出できるため、ハッキパウリ法のみが有効な場合もあるだろう。有効なツールとして働く可能性が高いことを補足する。

第3章 外部共振型マイクロリングレーザ

本章では、マイクロリング共振器と SOA を組み合わせた外部共振型レーザ²³について述べる。外部共振器はマイクロリング共振器で構成され、マイクロリング共振器は Si フォトニクス技術を用いた Si 導波路で形成されている [43]。Si 導波路は高屈折率であるが故に、シリカ材料で形成した導波路に比べて、同機能のデバイスを約 1/10~1/100 のサイズで実現できる(図 1-11 参照)。以降で、本研究のアプローチから設計および試作結果を説明する。

3.1 アプローチ

狭線幅で高出力の外部共振型マイクロリングレーザの実現に向けて、そのアプローチを検討する。まず、100kHz 以下の狭線幅を実現するためには、以降で述べる cm オーダのレーザキャビティ長が必要である。また、マイクロリング共振器内部の損失が極力低いことが必要である。マイクロリング共振器内部に損失があると、マイクロリング共振器内部の光の周回数が減り、等価的なレーザキャビティ長が短尺化されてしまうためである。マイクロリング共振器内部の損失を減らすためには、マイクロリング共振器を構成する Si 導波路の導波路損失を低減することが肝要になる。

次に、18dBm(60mW)を超える高出力を実現するために、レーザ光出力を増幅するブースタ SOA を集積することを検討した。レーザ出力を高出力化するためにはマイクロリングレーザの内部損失(外部共振器、SOA 含めて)を極限まで低減する必要がある。これは課題の一つ目である狭線幅化と同じで、可能な限り行う着手するが、更なる高出力化を実現するために、ブースタ SOA の集積化を検討した。SOA からブースタ SOA への出力を 10dBm(10mW) 程度とし、ブースタ SOA で 18dBm(60mW)以上にブーストする方式を採る。高出力化以外にもブースタ SOA を適用する理由があるが、その理由については後述する。ブースタ SOA を集積化するためには、集積化方法および光学素子の高精度実装技術を立ち上げる必要がある。こちらも詳細は後述する。これらのアプローチを図 3-1 にまとめる。

²³ 外部共振型レーザを外部鏡レーザとも呼ぶ。

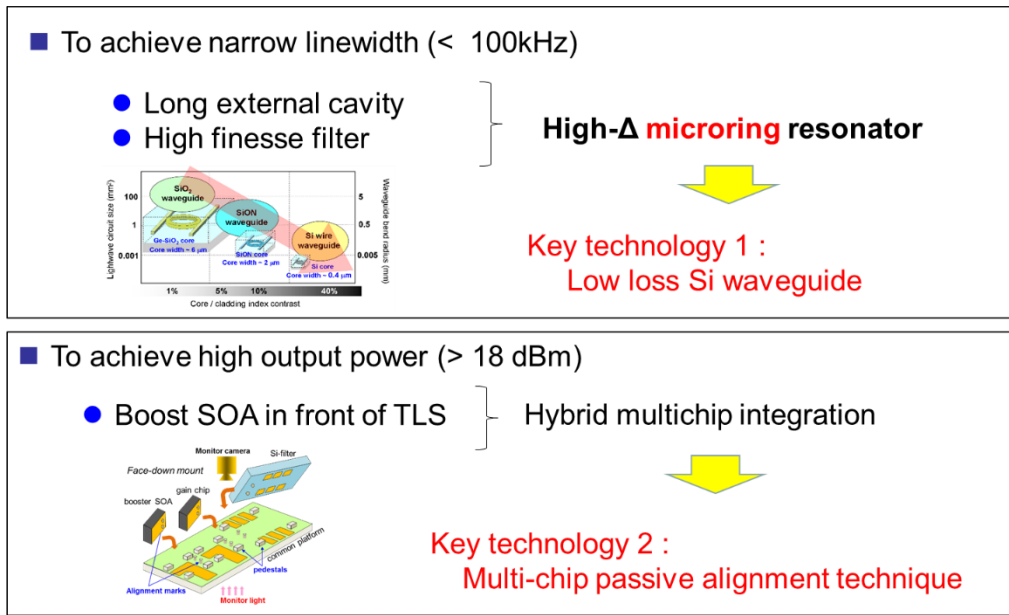


図 3-1 3章におけるアプローチ

3.2 マイクロリングレーザのデバイス構造

前節で述べたアプローチを実現するために、マイクロリングレーザの構造として図 3-2 に示す構造を考えた [43]。共通のプラットフォーム上に 3 つの光学素子を集積する。3 つの光学素子とは、Si フォトニクス技術で形成した外部共振器、外部共振器と組み合わせてレーザとして動作する SOA、SOA からの光出力を増幅する BOA (booster optical amplifier) である。Si フォトニクスで形成した外部共振器素子の内部に SOA へ帰還する波長を決定するためのマイクロリング共振器が 2 つあり、それぞれのマイクロ共振器には金属によるマイクロヒータを形成している。それぞれのマイクロヒータを暖めることで、リング共振器の共振波長を個別に制御する。二つのリング共振器の共振波長のみが、2 つのリング共振器を通過し、ループミラーにて折り返し、再度 2 つのリング共振器をとって、SOA に光が戻る。SOA の 2 つの端面には反射率を制御するためのコーティングが施されている。外部鏡との端面には AR (anti reflect) コートが施されており、BOA との端面には LR (low reflect) コートが施されている。外部共振器のループミラーと SOA の LR コートでレーザを構成する。SOA とブースタ SOA は端面に成膜した反射率が異なるのみで、それ以外の特性は同じ²⁴とする。

²⁴ SOA として最適な設計、またブースタ SOA として最適な設計にそれぞれ調整できれば良いが、時間的またコスト的な制約を踏まえて、同じ特性のものを使用した。

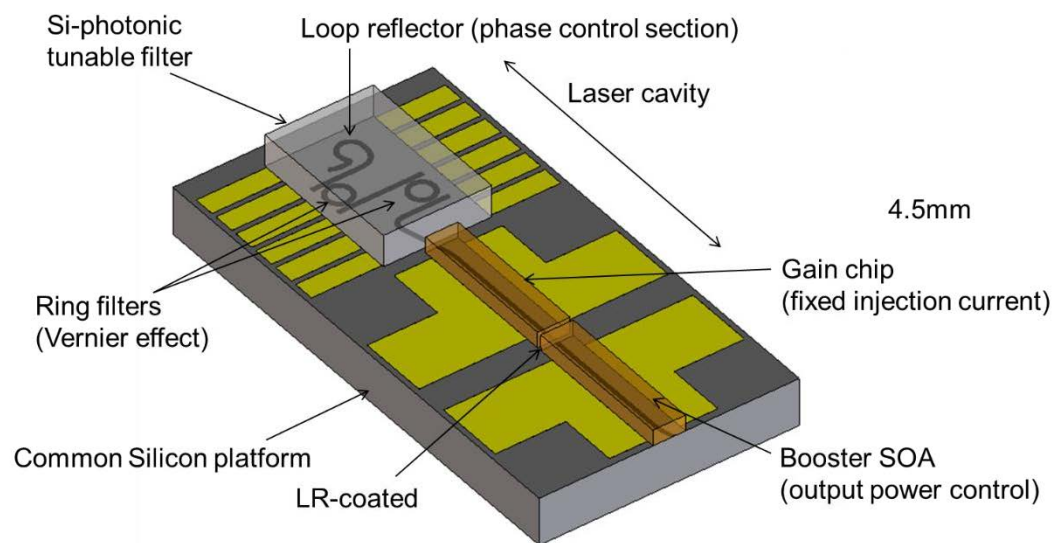


図 3-2 外部鏡レーザのレイアウト

図 3-3 に実際に作製したマイクロリングレーザを示す。素子サイズは横 4.5mm、縦 2.5mm である。大部分は電極が占めている。ハンドリングのしやすさを含めてサイズを決定したが、極限的には縦方向を 1.5mm 程度にシュリンク(短尺化)することが可能である。

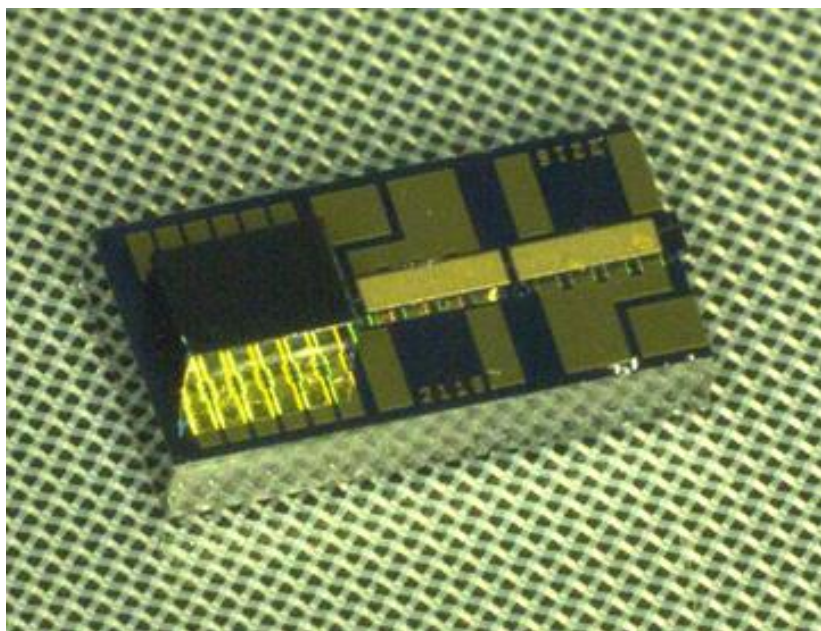


図 3-3 試作したマイクロリングレーザの外観

3.3 レーザ発振の安定化

レーザ発振の安定性について検討する。ブースタ SOA がない、SOA のみのレーザに関して、レーザ出力を高出力にすると、レーザ発振が極度に不安定になる。これは、高出力時にレーザ内部の共振器部分において、光学非線形効果²⁵によって屈折率がゆらぎ、屈折率がゆらいだ結果として波長がゆらぐためである。この揺らぎを起こす原因として、カー効果や二光子吸収などの光学非線形効果が挙げられるが、一度非線形効果が発生すると、レーザ発振を止めるか、またはレーザへの注入電流を大幅に下げないと、不安定発振状態²⁶が解除されない。本研究では、マイクロリングレーザが高出力時であっても安定的にレーザ発振するために、SOA のみで高出力化を実現することをやめて、図 3-4 に示すようにブースタ SOA によって高出力化を行う構造とした。SOA の出力を 10dBm 程度に抑えることで、SOA 内部および外部共振器内部の光強度を低く保つことができ、その結果として非線形効果の発現を抑えることができる。高出力のために SOA の出力をブースト SOA でブーストすることで安定的に高出力なレーザ発振を実現する。ブースト SOA の両端面は AR コートが設けられているため、ブースト SOA 内部に不要な反射や共振はなく、SOA からの入射された光をシンプルに(シングルパスで)ブーストするのみである。このため SOA のレーザ発振を不安定にすることなく、光出力をブーストできる。

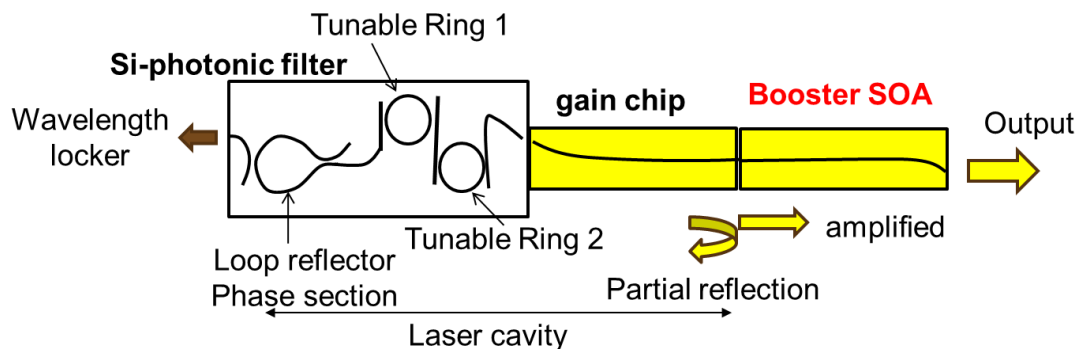


図 3-4 マイクロリングレーザの構成

3.4 設計

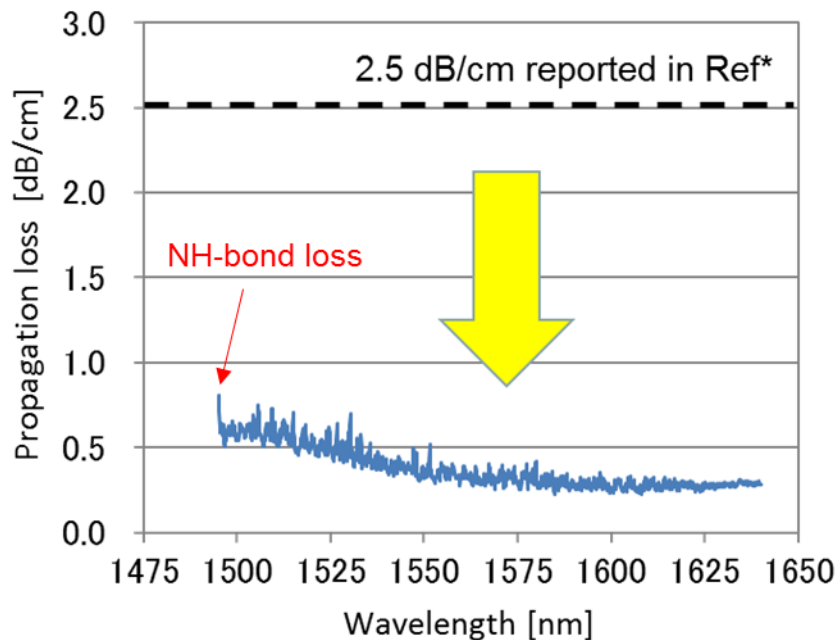
本節ではマイクロリングレーザの設計について詳細を述べる。なお、実装については、本来設計の一つではあるが、記述する分量が多いため別節で述べる。

²⁵ 外部共振型マイクロリングレーザでは発振の安定性のために非線形効果をできる限り抑制する設計とするが、次章の内部共振型マイクロリングレーザでは機能実現のために非線形効果を積極的に利用する。

²⁶ 発振不安定な状態として、スペクトルに複数のピークを持つマルチモード発振や、GHz オーダで発光/非発光を繰り返す自励発振がある。自励発振は外部共振型レーザにおいて、内部に不要な反射がある場合に発生しやすい [97] [98] [99]。

3.4.1 導波損失

光デバイスの設計の中で最も重要な項目の一つが導波損失である。導波路損失が大きいと、マイクロリング共振器のフィルタ特性が劣化するため、安定的なレーザ発振が困難になる。加えて、マイクロリング共振器内部での光の周回数が減るため、等価的なキャビティ長が短くなり、線幅が所望の特性を満たさなくなる。加えて、内部に光学損失があるとレーザの光出力が低下してしまう。従って導波損失は低ければ低いほど望ましい。一般的なチャンネル型のSi導波路の導波路損失は2.5～3.0dB/cm程度とされている [44]。マイクロリングレーザでは次に述べる線幅実現からSi導波路の長さが1cm程度になることを踏まえると、3.0dB/cmでは光の損失が大きい。そこで、本章ではSi導波路の導波損失を1.0dB/cm以下を実現することを目的とした。



Ref: W. Bogaerts et al., J. Lightwave Technol., vol. 23, Jan. (2005).

図 3-5 試作した Si 導波路の導波損失

導波路損失が発生する原因は大きく二つある。一つは導波路側壁のラフネスによる損失、もう一つは導波路内部および周辺に存在する化学結合基による吸収損失である。側壁ラフネスはプロセスで発生するものであり、プロセス装置およびそれに付随するツールに依存するところが大きい。今回は導波路のパターニングプロセスで使用する露光マスクを最も高精度なものを用いることで、側壁ラフネスを抑えた(図 3-5)。導波路は露光マスクに沿ってパターニングされるため、露光マスクにラフネスがあると、それが導波路に転写されるためである。露光マスクに加えて更なる改善として、

導波路近傍に存在する化学結合基(図 3-6 参照)、特に NH 基²⁷は波長 1490nm に急峻な吸収損失ピークを持ち、それ以外の波長にもなだらかな損失カーブを持つ。本研究では N-H 基の熱分解を目的として、600°Cの N₂ アニールを行った。これらの施策を行うことで、目標とした導波路損失 1.0dB/cm を下回る 0.5dB/cm を実現した。

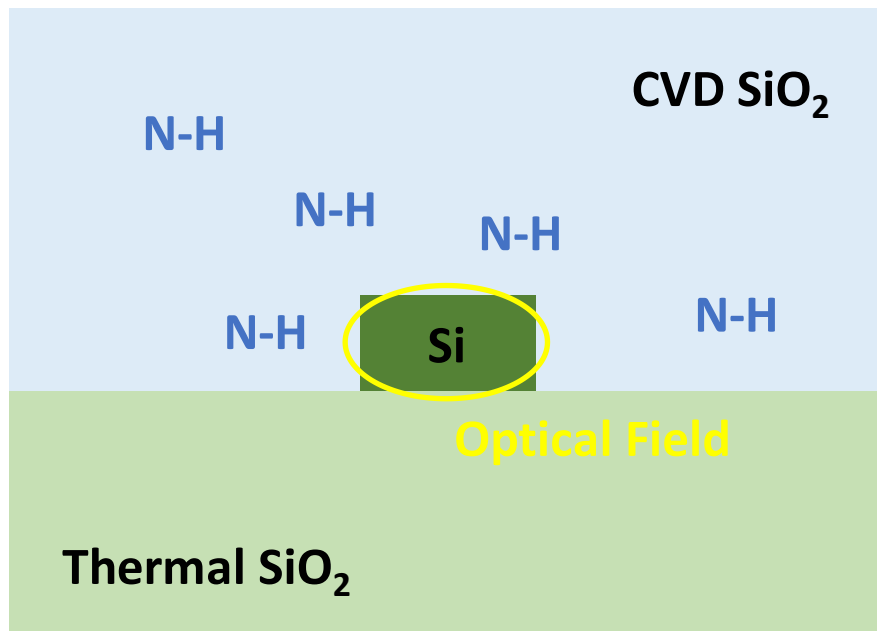


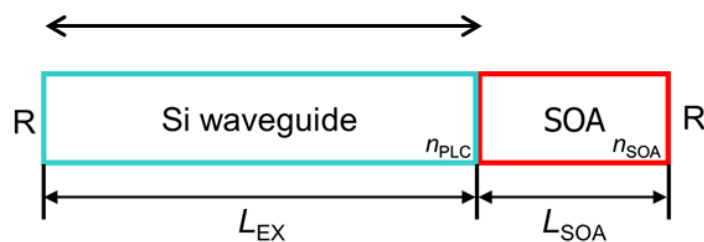
図 3-6 Si 導波路近傍に存在する光の吸収源

3.4.2 線幅設計

目標とする 100kHz 以下の線幅を実現するために、図 3-7 のモデルについて、ヘンリーの式 [45]を基にレーザのキャビティ長としてどれだけの長さが必要か見積もった。

²⁷ NH 基が損失に及ぼす影響については文献 [100]に詳しい記述がある。

External waveguide length



$$\Delta\nu_{\frac{1}{2}} = \frac{1}{2\pi} \frac{1+\alpha^2}{b_0^2} K \cdot n_{sp} \quad \text{Henry Linewidth}$$

$$K = \frac{c}{2n_{EX}L_{EX} + 2n_{SOA}L_{SOA}} \left\{ \alpha_g L_{SOA} + \ln\left(\frac{1}{R}\right) \right\} \quad \text{Photon Decay Constant}$$

C. H. Henry, IEEE J. Quantum Electron. vol. QE-23, no. 6, pp. 259-264, 1982

図 3-7 線幅とレーザキャビティ長

見積もった結果を図 3-8 に示す。100kHz の線幅を実現するためには、およそ 10mm(=1cm)のキャビティ長が必要なことが分かる。より狭線幅の特性を実現するためには、キャビティ長は長ければ長いほど良いが、キャビティ長が長いとその分だけ導波損失が発生し、光出力の低下を始めとした様々なデメリットが発生する。そこで、線幅 100kHz が実現できて、かつ導波損失が過剰に発生しない 1cm をキャビティ長とした。

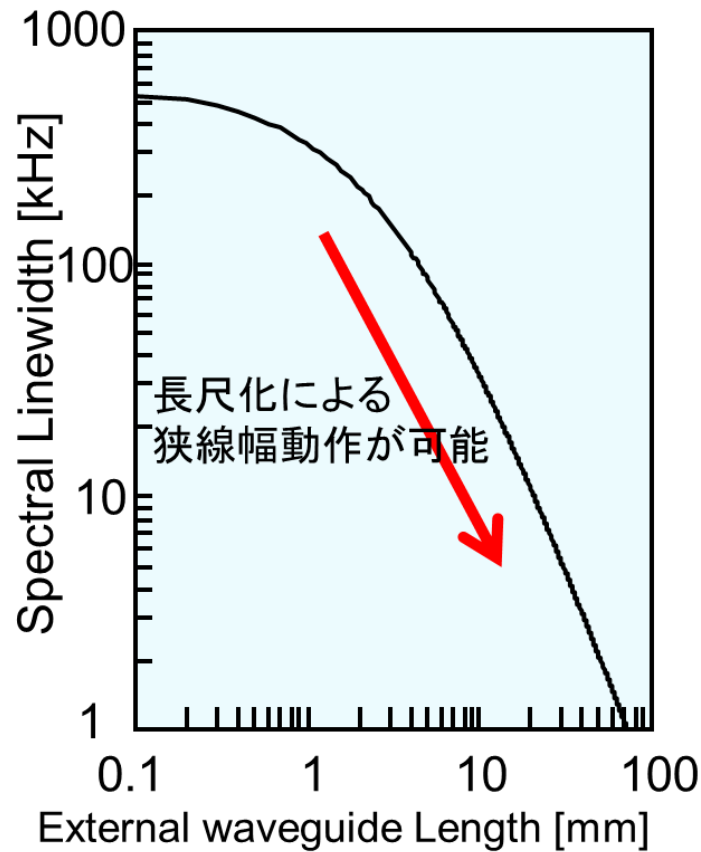


図 3-8 キャビティ長と線幅の関係

3.4.3 発振安定性設計

マイクロリングレーザの外部共振器の概要を図 3-9 に、またマイクロリングレーザの波長チューニングの原理を図 3-10 に示す。SOA からの広帯域な自然放出光が FSR の異なるマイクロリング共振器を通してループミラーで折り返され、再度マイクロリング共振器 2 つを通して SOA に光が帰還する。この時、FSR が異なる 2 つのマイクロリング共振器で共振する波長の光のみが SOA に帰還する。SOA に帰還した自然放出光が誘導放出光を誘発し、その波長でレーザ発振を起こす。レーザ発振の安定性は、主に、共振して帰還量が最も多い波長と、完全な共振ではないながらも、帰還量が二番目に多い波長²⁸との差として表せられる。これをモード利得差という。これを図 3-11 に示す。モード利得差がいくらの時にどれだけの SMSR が確保できるかは文献 [41]にて詳細が議論されているためここでの説明は割愛する。安定的にレーザ発振するためにはモード利得差が 2dB 以上必要であると一般的に言われている。3dB 以上のモード利得差があるとなお良いと言われている。従ってなるべく大きなモード利得差となるマイクロリング共振器を設計することが望ましい。そのためには結合効率を小さくすることが有効である。結合効率を小さくすればマイクロリング共振器

²⁸ 多くの場合においては、共振波長の隣接波長が該当する。

のフィルタ関数が急峻になるからである。ただ、結合効率を小さくすればモード利得差は高くなるが、マイクロリング内部の光の周回数が増加するため、マイクロリング共振器の周回損失が増加する。従って、適切な範囲が存在する。この関係を図 3-12 に示す。マイクロリング内部での過剰な損失を 1dB に抑えつつ、かつ、2dB 以上のモード利得差を実現するために、マイクロリング共振器とバスライン導波路との結合効率の狙い値を 0.25 とした。

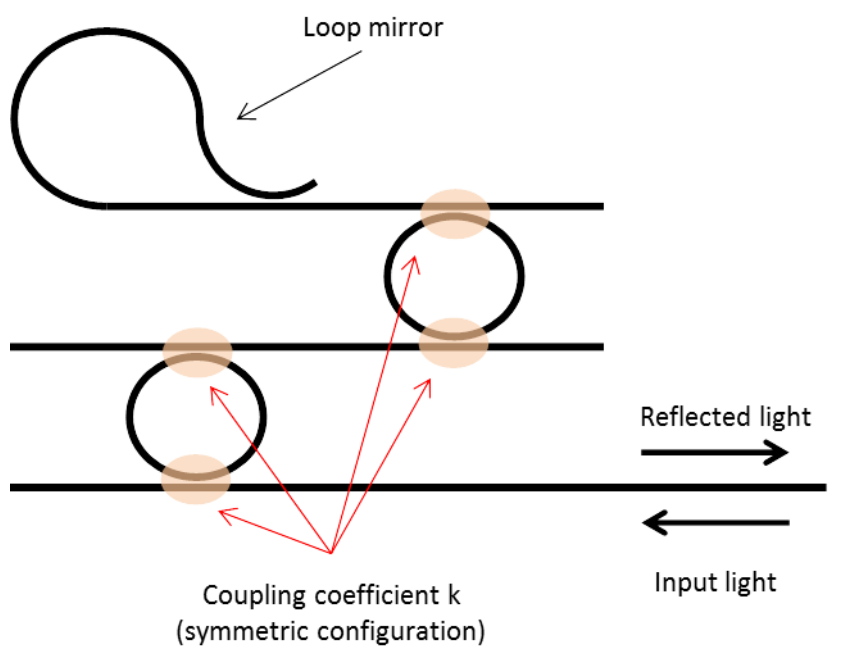


図 3-9 モード利得差を計算するための結合効率の定義

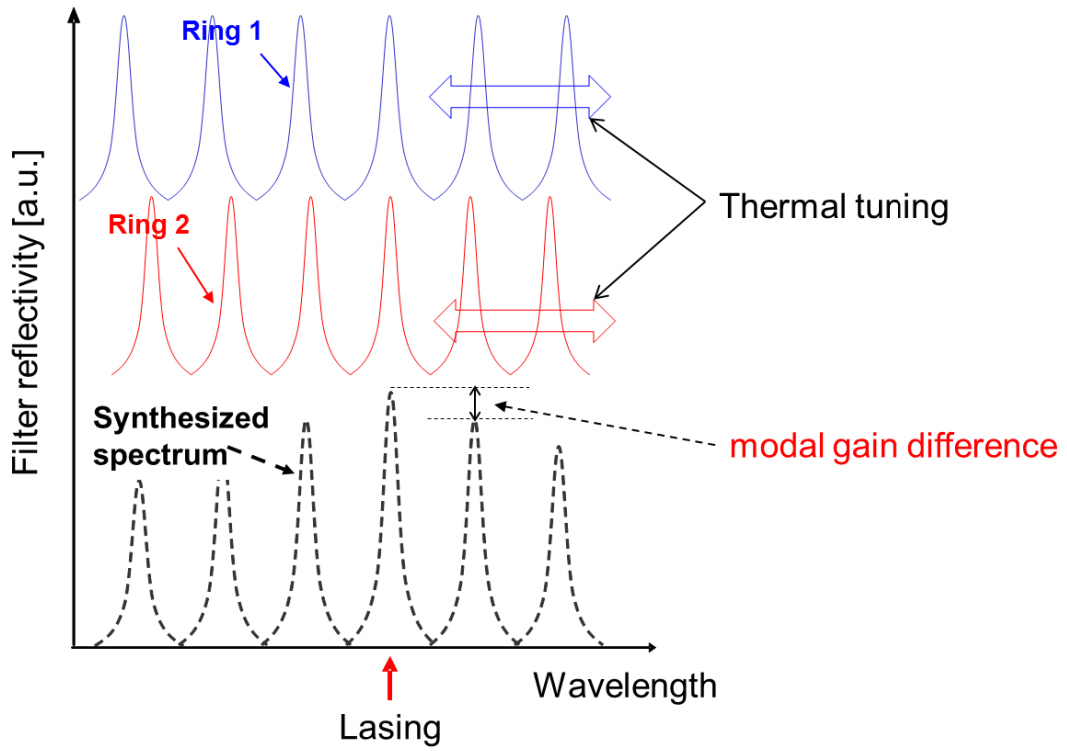


図 3-10 レーザの波長チューニングの原理

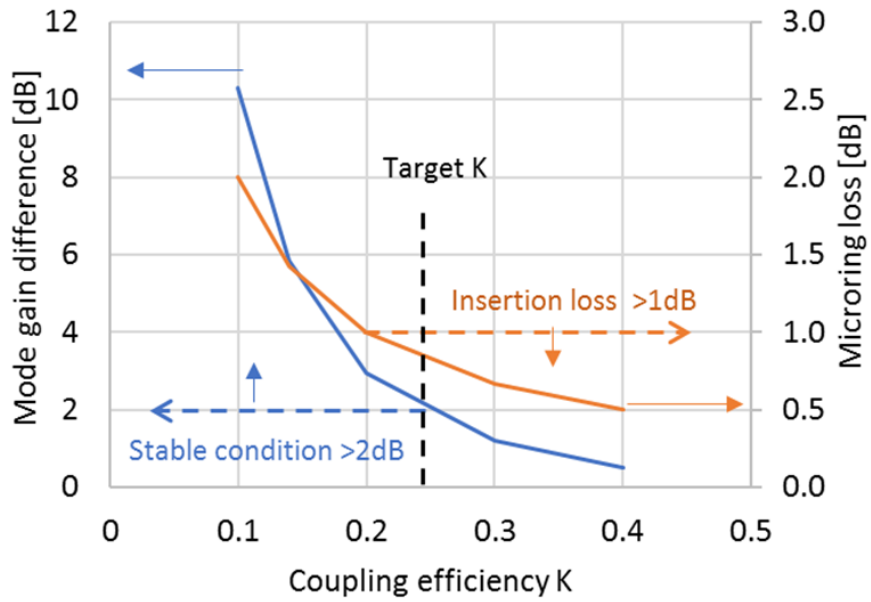


図 3-11 結合効率とモード利得差およびリング損失の関係

3.4.4 発振範囲設計

C 帯(1530-1565nm、35nm)全域でレーザ発振するためには、マイクロリングレーザの FSR はマージンを含めて 60~80nm 程度で設計する必要がある。2 章においてバーニア効果で FSR が拡大できることを述べた。今回、FSR の狙い値を 80nm とし、80nm の FSR を実現するためには M 値は 30 程度とすれば良いことが図 3-12 から分かる。従って M 値の狙いを 30 とした。

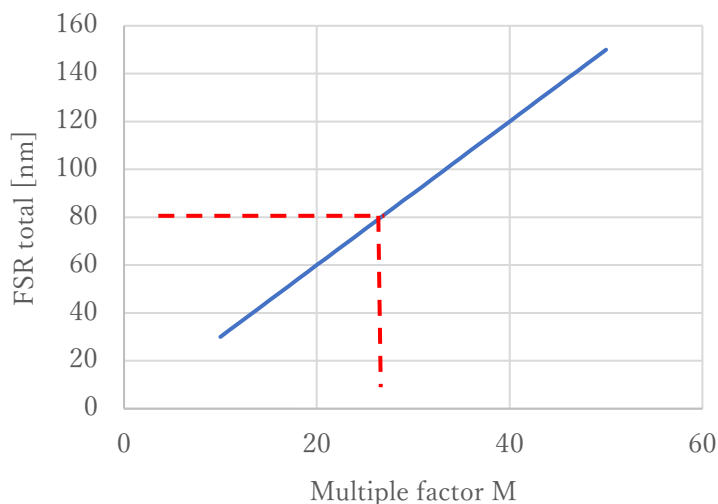


図 3-12 FSR の設計値

3.4.5 ヒータ消費電力設計

電力投入によるヒータ温度の関係は 2.1.7 で示した通りである。基本的に電力投入による上昇温度は材料によってきまるが、前述の通りヒータ材料が Pt に固定されてほぼ選べない状態なので、設計で改善する余地があまりない。しかしながら、ヒータの温度上昇分を余分な放熱なくマイクロリング共振器に伝えることに関しては設計で改善できる余地が多少ある。端的に言えば、ヒータとマイクロリング共振器の距離をなるべく近くすればよい。ただ、近くしすぎると、マイクロリング共振器を導波する光がヒータにかかり、光学的な損失が発生してしまう。この損失をさけるためには、光の染み出しがヒータにかからない程度に、ヒータとマイクロリング共振器間の距離を空ける必要がある。マイクロリング共振器とヒータの間のクラッド層を適切に決める必要がある。本研究では、クラッド層の厚みが製作誤差でぶれたとしても問題がない様に、3um の厚みを設計値とした。仮に製作誤差で 1.0um 薄くなったとしても、光学損失が発生しない厚みである。ただし、厚みが製作誤差で厚い方向に 1.0um ぶれてしまうと、消費電力が大きくなってしまうため、厚くなりすぎないように成膜状況を確認する必要がある。これはプロセスの精度としては特別に厳しいものではない。どこのファブでも十分に実現できる精度であろう。

ヒータそのものの幅については、幅が狭いほどクラッドを不要に暖めることがなくなるため、電力的には有利となるが、製作プロセスの観点から細くすることに限界がある。製作プロセスの能力以

上に補足すると、ヒータの抵抗値のバラつきが大きくなる上に、ヒータに断線を生じてしまう可能性がある。そこでヒータ幅をプロセス限界である $2\mu\text{m}$ とした。また、ヒータの厚みについて、幅と同様にプロセス上の制約から限界がある。厚くすると抵抗値を小さくすることができるが、プロセスの限界を超えて厚くするとクラックや膜剥がれの原因となる。そこで厚みについてもプロセスの限界である $0.6\mu\text{m}$ とした。

3.5 実装

3つの素子を共通のプラットフォームに乗せて、それらが光学的に機能するためには、非常に高精度な実装が要求される。通常のレーザ素子のスポットサイズがおおよそ $3\mu\text{m}$ 程度であることを考えると、実装の位置ずれによる過剰損失の許容値を 0.3dB とし必要実装精度はその $1/10$ 、おおよそ $0.3\mu\text{m}$ と見積もれる。実装位置精度 $0.3\mu\text{m}$ を実現することは非常に困難な課題である。半田溶融に向けて素子全体を加熱する際に熱膨張を起こし位置ずれが発生する。また半田が溶融することで表面張力による位置ずれが発生するからである。本研究ではこれらのずれを最小にする施策を検討した。前提として、それぞれの素子には実装用の金属膜(Ti/Pt/Au)が形成されており、金属膜に AuSn 半田を供給し、熱融着によって素子を固着するものとする。実装の概要を図 3-13 に示す。

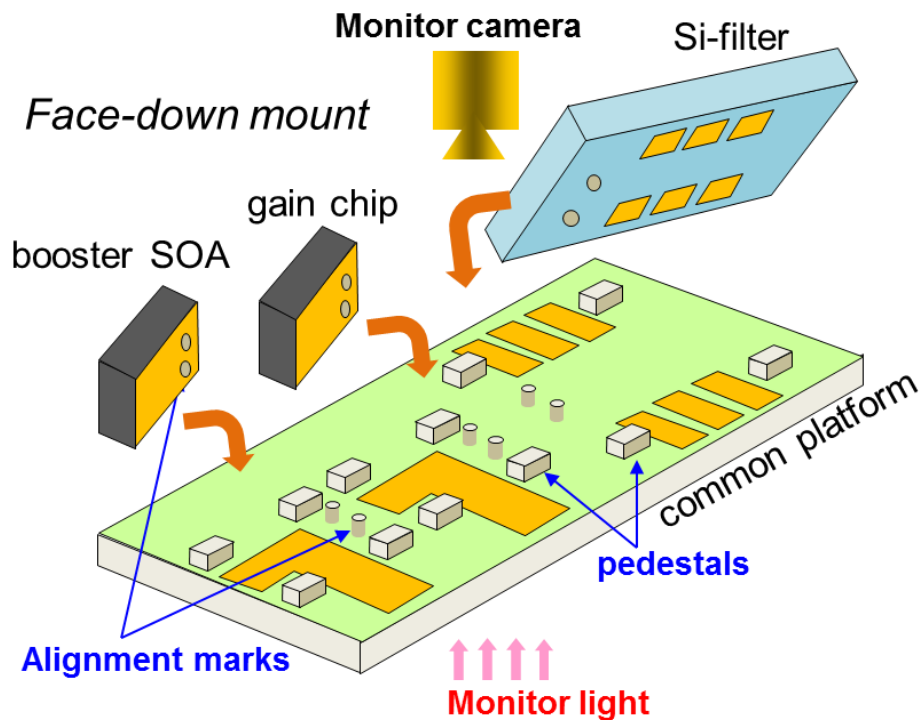


図 3-13 素子実装の概要

3.5.1 実装のコンセプト

共通プラットフォーム上に光学 3 素子を実装する。共通プラットフォームには素子の光軸高さを揃えるための台座が形成されている。各光学素子は導波路面を下にして²⁹実装する。素子の位置を高精度に決定するために、パッシブアライメント技術を採用した。パッシブアライメント技術とは、プラットフォーム上に設けたマーカと実装する素子上に設けたマーカとの位置関係から、最適な位置を割り出して実装する手法である。共通プラットフォーム上には円柱形上の構造体を設けてあり、また各光学素子には、円形状のマーカを設けている。共通プラットフォーム設けた円柱形の円形状より、各光学素子に設けた円形状マーカの方が大きい設計とした。二つの円形マーカの中心が一致するとき、導波路同士の光結合が最適となる位置にそれぞれのマーカが形成されている。共通プラットフォームの下方から赤外線ライトを照射することで、プラットフォームおよび各光学素子を赤外線が透過し³⁰、上方に設けたカメラで、各マーカの輪郭を認識できるというスキームである。狙い通りに素子の位置を決めて、半田の加熱溶解を行ったとしても、加熱に伴う熱膨張および半田溶解時のずれによって、光学素子の位置ずれが発生することを先に述べた。位置ずれの抑制方法については後述する。

3.5.2 実装する素子の順番

実装する素子の順番について検討を行った。3 種類の素子を実装するにあたり、素子の順番は 6 通りの組み合わせが存在する。その中で、SOA を最後に実装する組み合わせが 2 通りあるが、その 2 通りは実際にはあり得ない。先に両端(Si フォト素子、ブースト SOA)を実装すると、狙い位置が最適であっても、半田溶解時に位置ずれが発生するため、両端の素子は必ずしも最適な位置に実装されているとは限らない。その状況にあって、SOA を実装すると、両端の素子が最適な位置にはないため、必ず大きな結合損失が発生する。そのため最後に SOA を実装することはあり得ない。先に端の素子(Si フォト素子またはブースト SOA)を実装する場合は、SOA、ブースト SOA と実装することになるが、SOA を実装する際には、Si フォト素子の実装ずれを補正するように実装する必要があり、またブースト SOA は更に SOA の実装ずれを補正するように実装する必要があるため、補正量が積算されていく。従って、台座上のアライメントマーカがブースト SOA のアライメントマーカの外に位置する関係が生じる。結果として、アライメントマーカが確認できなくなってしまう可能性がある。そこで、実装誤差の累積を抑えるべく、SOA を先に実装することとした。SOA を実装した後に、SOA の実装ずれを補正するようにブースト SOA を実装し、また、SOA の実装ずれを補正するように Si フォト素子を実装すること(表 3-1)した。

²⁹ 導波路面を下にして実装することをフェイスダウン実装と言う。SOA の場合は活性層面が下になるため、ジャンクションダウンとも言う。

³⁰ Si 基板や InP 基板は赤外線が透過するため、今回のような下方から光を照射して透過光を上方のカメラで確認することができる。

表 3-1 素子の実装順序

素子の順番	目的	備考
① SOA	累積誤差低減のため	真ん中に位置する
② ブースタ SOA	SOA の実装ずれを補正	出力端に位置する
③ Si フォト素子	同上	出力端とは逆端に位置する

3.5.3 半田材料の設定

一般的に用いられる半田材料として、AuSn、SbSn、Pb、BiSn などがある(表 3-2)。Pb や BiSn は 200 度以下の低温で半田溶融できるため、実装時の熱膨張が小さいことが魅力的である。しかしながら光学素子の実装に使用された実績が乏しい。実装直後は半田の接合がとれても、長期的にみて接合面のクラック発生による位置ずれを避けるために、Pb や BiSn の採用を見送った。光学素子の実装に採用された実績が高い、AuSn [46] [47] [48]と SbSn のどちらかを選択することにした。AuSn は材料として比較的高価ではあるが、長期的に見ても、半田接合面にクラックが入りにくいというメリットがある。一方 SnSb は AnSn と比較すると若干安価ではあるが、長期的にみると接合面にクラックが入る可能性が高い³¹。また、SnSb の半田溶融を確認したところ、AnSn に対して溶融ずれが大きい傾向が見られたため、SnSb の採用を断念し、AnSn³²を採用することにした。ちなみに、SnSb 半田を用いた場合、溶融前後の素子の位置ずれはミクロンオーダーであり、AnSn 半田の場合はサブミクロンオーダーであった。ずれ量はともに目標とする 0.3um には及ばない結果であったが、後述する補正技術でカバーする。

表 3-2 半田材料の種類

素子の順番	融点	特徴
AuSn	280℃ (共晶 ³³)	信頼性が高い
SuSb	220℃ 程度	クラックを起こす可能性
Pb(Sn 配合)	183℃ (共晶)	人体に有毒
BiSn	140℃	他プロセスで使用される

³¹ Sn が入っていると接合面にクラックが生じやすいと言われている。クラックが生じる際に音が生じる。これが俗にいうスズ鳴きである。

³² AuSn は半田材料として最も信頼性が高いとされるが、表面改質が重要 [95] [96]といわれている。また AnSn は An と Sn の配合比率や実装温度によって内部拡散が進み、ポイドが出来る場合がある [102]。ポイドを抑えるのはノウハウの一つとされる。

³³ 共融混合物、共融晶とも。ある種の混合液体を冷却したとき、同時に析出する2種以上の結晶の一定組成の混合物。融解は各成分とも同じ温度で起こり、見かけ上純粋な成分または化合物のようにふるまう。

3.5.4 実装温度

AnSn 半田の熔融温度は 280 度³⁴である。20 度の温度マージンを見込んで実装時のステージ温度を 300 度とした。ここで、後続の素子を実装する際の半田熔融加熱で、実装済みの素子の半田が再熔融して実装位置ずれを起こすことをさけるために、実装の温度の最適化を行った。具体的には最初に実装する SOA の実装温度を 300 度よりも高い 330 度とした。これは光学素子の表面に設けた An 薄膜と AnSn 半田がゼータ層 [49] [50]を形成する温度である。AnSn 半田は熔融時の温度および An の分量によって、半田の特性が変わる。今回は 330 度で熔融実装することでゼータ層を形成し、そのゼータ層は次に実装するブースタ SOA の熔融時に 330 度にしても、SOA の半田は熔融しない様に工夫を行った。ブースト SOA も SOA と同様に 330 度で実装し、半田をゼータ層化し、再熔融に伴う素子の位置ずれを原理的に抑制した。最後に実装する Si フォト素子については、実装温度を高くする必要がないため、300 度とした。これらを表 3-3 に示す。

表 3-3 素子の実装温度

素子の順番	温度	備考
① SOA	330°C	ゼータ層形成のため
② ブースタ SOA	330°C	ゼータ層形成のため
③ Si フォト素子	300°C	共晶 AnSn 半田熔融温度

実装後に半田の応力解放を目的として、低温アニールや熱サイクル [51]を施すことがあるが、本件では特にこれらの熱処理を施さなかった。特段に強い応力が観測されなかったためである。

3.5.5 半田サイズの最適化

半田のサイズは素子の位置ずれを実装における最も重要なパラメータの一つである。半田のサイズが小さすぎると接合面積が小さく接合強度が確保できない。接合強度が弱いと振動やハンドリング時に素子がとれてしまう可能性がある。また、半田のサイズが小さいと接合面積が小さいが故に、SOA などの光学素子で発生した熱がプラットフォーム上に適切に逃げず、熱がこもってしまう。その結果、素子の温度が不要に上がり特性が悪化する。よって、半田のサイズが小さいと放熱特性が悪くなり、結果として光学特性、主に光出力が低下する。一方で、半田のサイズが大きすぎると、半田の熔融時に素子の位置ずれが発生しやすい。位置ずれは過剰な結合損失が発生することを意味し、結果としてマイクロリングレーザの光出力が低下する。従って最適な半田のサイズが存在する。本研究では半田サイズ(表 3-4)として、厚み 20um で、Φ60um、120、でそれぞれ評価した

³⁴ An が 80%、Sn が 20%の AnSn は一般的には共晶状態にある。この時の熔融温度は 280 度である。一般的に特性が最も安定していると考えられている。共晶半田に対して様々な特性評価が行われている [96] [101]。

ところ、接合強度および放熱特性、位置ずれともに最もバランスのよいΦ120umを採用した。

表 3-4 半田のサイズ検討

素子の順番	評価結果	備考
Φ60um (厚み 20um)	NG	接合強度、放熱不良
Φ120um (厚み 20um)	良好	

3.5.6 素子の浮きの抑制

半田熔融時において、液化した半田に表面張力が発生し、素子を台座から持ち上げて半田が融着してしまうことが散見された。これは半田熔融時の表面張力が無視できないほどに大きいことを意味している。光学素子が半田から浮いて実装されると、素子間の結合損失が過剰に発生してしまう。よって、素子の浮きを抑制する工夫が必要である。そこで、本研究では素子の浮きを押さるために、台座に対して水平に荷重をかけながら素子を実装する機構を設けた。半田の熔融前後で光学素子に適切な荷重が適切な方向にかかるため、素子の浮きを抑制することに成功した。浮きの抑制を抑える本工夫をそれぞれの3素子に適用して実装を行った。

3.5.7 実装オフセット

半田熔融時のずれによる素子の結合損失の発生を可能な限り抑制するためにさらなる工夫を施した。半田熔融時に位置ずれが発生することは原理的に避けられないが、ただ、その位置ずれには一定の傾向があることを見出した。これは実装する素子のサイズや半田の材料およびサイズに起因すると考えている。それぞれ、素子や半田が種々のばらつきを持つため、必ずしも毎回同じ位置ずれにはならないが、あらかじめ、位置がずれることを見越して、半田熔融前に素子の位置にオフセットをかけることにした。そのオフセット量は0.3-0.5um程度であり、使用する素子によって若干のバラつきがある³⁵。バラツキを評価することで実装時にフィードバックをかける方法とした。

3.5.8 結合損失

これまでに述べてきた数々の工夫を取り入れて素子の実装を行った。57個のSiフォト素子とSOAの実装を行って、アライメントマーカにて割り出した素子の実装位置ずれはおよそ0.1umであった[43]。実験に使用したSOAの詳細は文献[52]にある。図3-14に実装位置ずれのヒストグラムを示す。95%確率の2σで見ても位置ずれ量は0.3umであり、0.3umの位置ずれ量であれば過剰に発生する結合損失は0.2-0.3dB程度で、ほぼ無視することができる。位置ずれと結合損失の

³⁵ 素子の実装前にオフセット用条件確認用の素子にて確認した上で実装するスキームとした。これによって高精度実装が可能になった。

関係を図 3-15 に示す。当初目標とした実装位置ずれ量 $0.3\mu\text{m}$ を十分に達成することができた。これによって、光学 3 素子の実装技術が立ち上がったものと判断した。

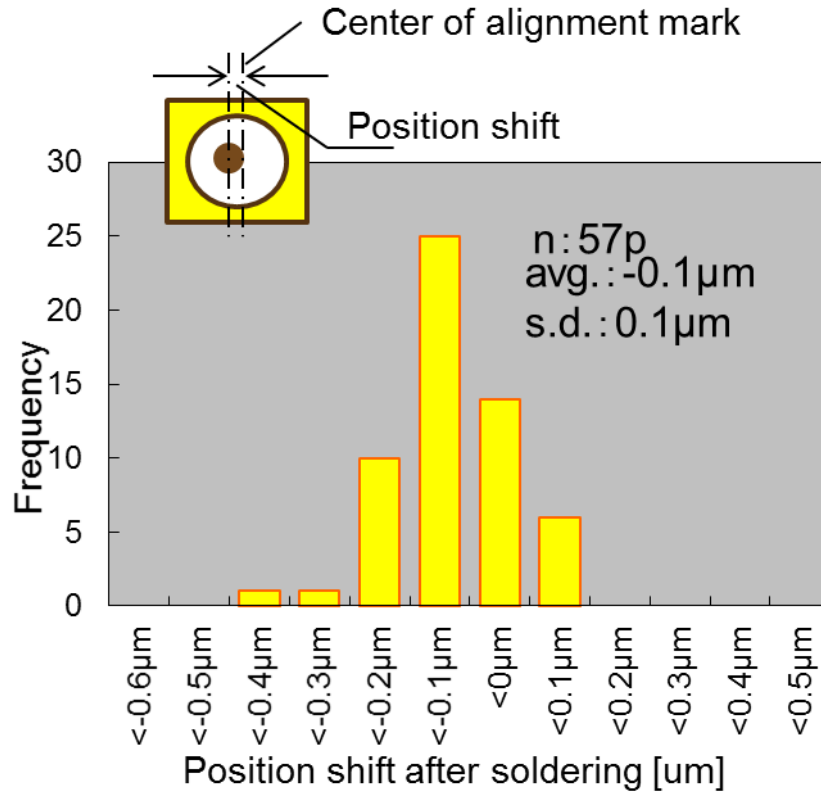


図 3-14 実装位置ずれのヒストグラム

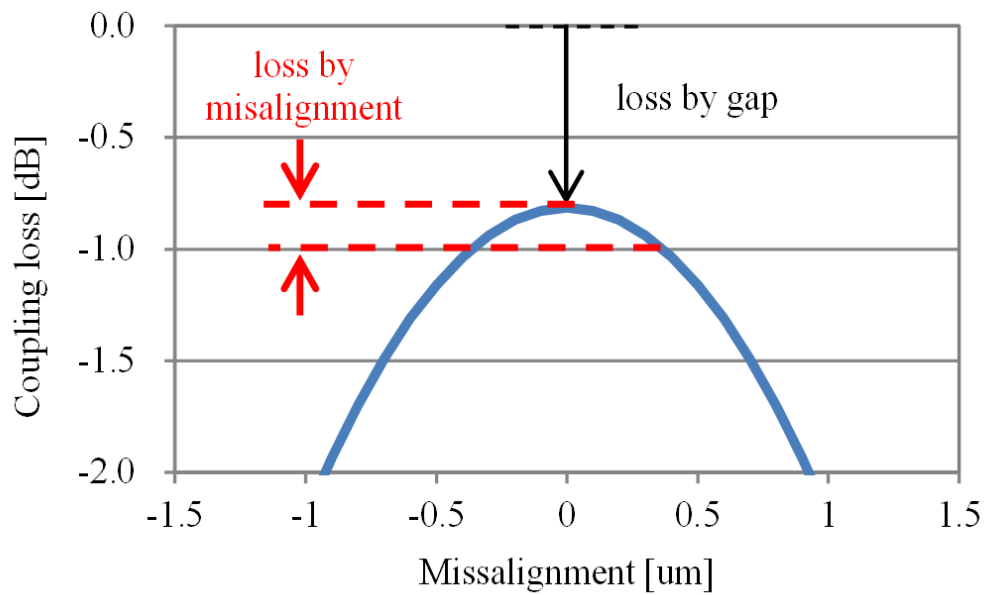


図 3-15 実装位置ずれと結合損失

3.6 評価結果

前節までに述べた設計を基に作製したマイクロリングレーザ(図 3-3)について、その評価結果を本節で述べる。光通信用の波長可変光源としてのマイクロリングレーザにおいて評価すべき重要な特性は次の表 3-5 の通りである。

表 3-5 評価項目

特性	評価内容	備考
① 波長可変範囲	C 帯全域で発振可能か	
② 光出力	>18dBm の出力か	
③ 線幅	<100kHz の線幅か	
④ SMSR	35dB 以上か	最低限必要な SMSR 値

マイクロリングレーザに温度制御素子と反射戻り光抑制のためのアイソレータを取り付けた金属パッケージ内に収めたマイクロリングレーザモジュールの外観を図 3-16 に示す。モジュール形状にしてもファイバブーツ程度のサイズであり、非常に小さいことが分かる。



図 3-16 試作したマイクロリングレーザモジュール

3.6.1 波長可変範囲

試作したマイクロリングレーザについて、波長可変範囲の評価を行った。これは、マイクロリングレーザの外部共振器に形成した 2 つのマイクロリングのうち、1 つのマイクロリングのヒータに電力を投入することで、発振波長の移り変わりを評価したものである。およそヒータに電力を 3mW 投入するとマイクロリングレーザの発振波長が 2nm 切り替わることを確認し、110m の電力投入で波長が 1505~1585nm で切り替わることを確認した(図 3-17)。これは光通信波長帯の C 帯(1530-1560nm)をカバーする発振波長範囲である。これによって目標の一つである、C 帯全域でのレーザ発振を確認することが出来た。

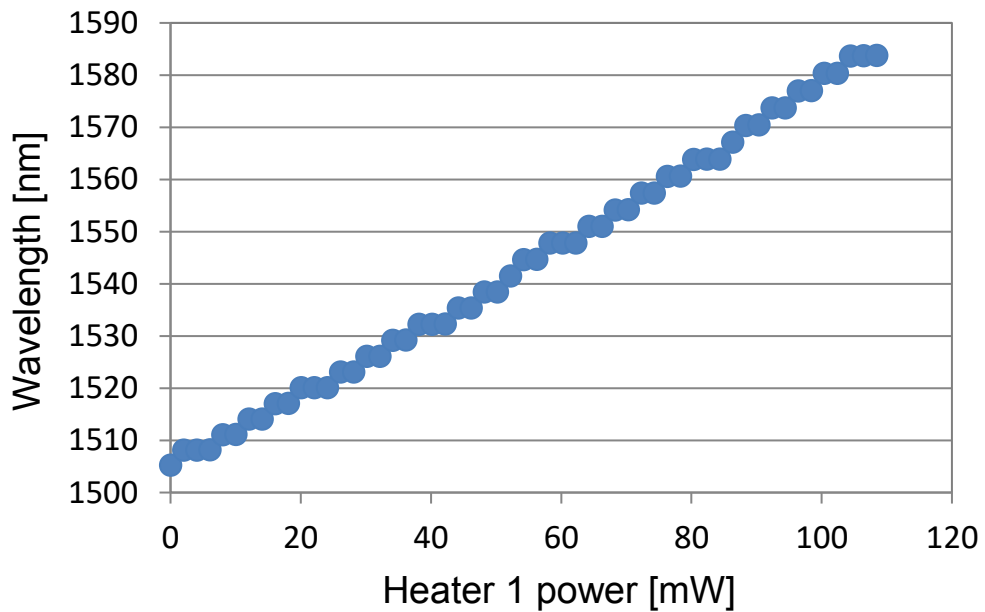


図 3-17 ヒータ投入電力とレーザー発振波長の関係

3.6.2 高出力狭線幅動作

試作したマイクロリングレーザーモジュールについて光出力の評価を行った。図 3-18 に評価結果を示す。C 帯の短波側波長である 1530nm と長波側波長 1560nm にて、ブースタ SOA の注入電流 600mA でそれぞれ 20dBm(100mW)の光出力を確認した。この光出力は筆者が知る限り、光通信用レーザーとして世界最高出力である。2015 年時点で本結果を公表した時点においても、また 2018 年 1 月現在においても、この記録は更新されていない。マイクロリングレーザーおよびマイクロリングレーザーモジュールの放熱特性を改善すれば、更なる高出力化は十分に可能であると考えている。

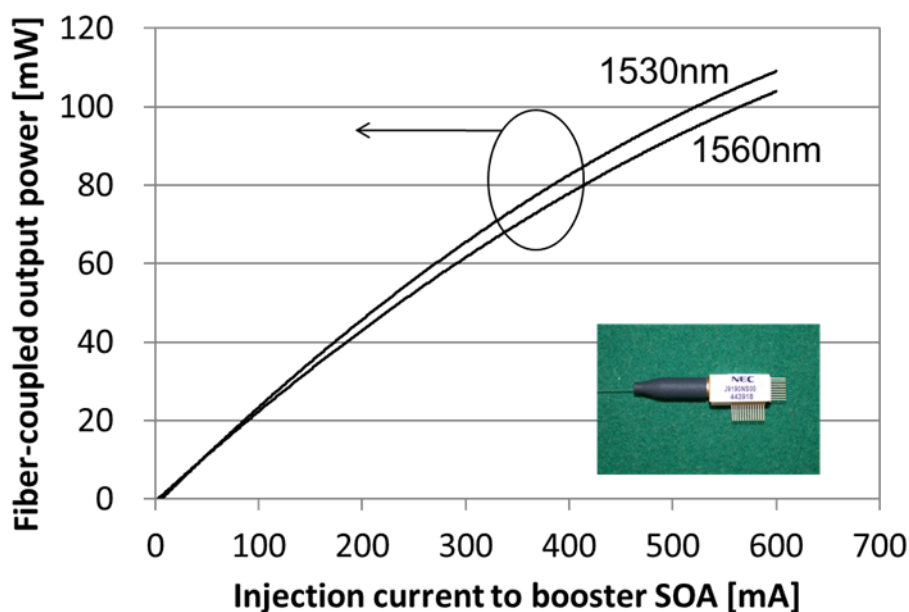


図 3-18 ブースタ SOA への注入電流と光出力

3.6.2 コンチュールマップ

ここまでにマイクロリングレーザモジュールについて、発振波長範囲および光出力特性が十分に目的を達成していることが確認できたので、このモジュールに電子制御回路を取り付けて、uITLA(micro integrated tunable laser assembly)を試作した。試作した uITLA を図 3-19 に示す。uITLA は制御 PC との通信に RS232C 端子を備え、レーザ発振の ON/OFF、光出力強度、レーザ発振波長が制御できる。これらは MSA³⁶(multi source agreement)によって規格が標準化されている。この uITLA にて、評価した二つのヒータにおける波長マップ(コンチュールマップ)を図 3-20 に示す。図に見られる格子状の様子は、同じ色であれば同一の波長で発振することを示している。一つの格子が大きいほどヒータ調整のトレランスが高いことを意味する。トレランスが高いほど、ヒータ電力の制御が粗いものでよく、その結果制御回路を簡素化することができる。また、長期的にヒータの投入電力ずれによる発振波長変化や導波路の等価屈折率の変化に対してトレラントにある。今回は十分にトレラントなコンチュールマップであることが確認できた。

³⁶ 各メーカーがばらばらの仕様で光製品を製造すると、光製品を使用する立場メーカーの利益を著しく損なう。そこで、光製品のメーカーが一堂に会して、業界標準となるスペックを策定する。このスペックを MSA と言う。

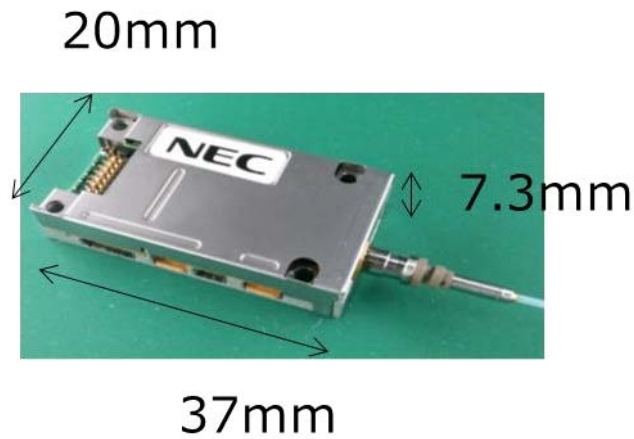


図 3-19 試作した uITLA

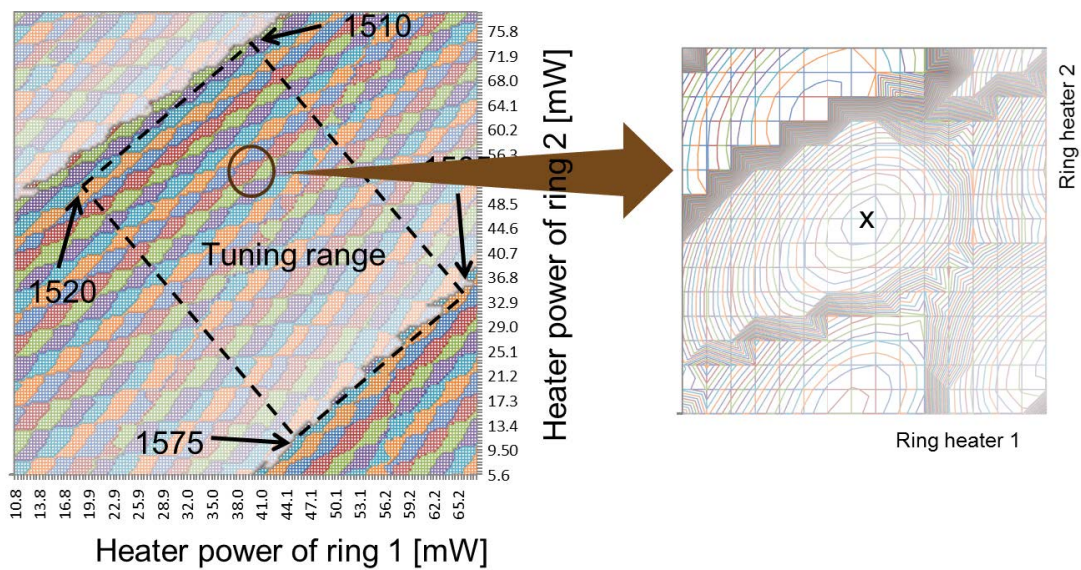


図 3-20 ヒータ投入電力による波長マップ

3.6.3 発振スペクトル

次に、試作した uITLA の C 帯におけるスペクトルを図 3-21 に示す。0.4nm(50GHz)間隔で 100ch³⁷分のスペクトルを重ねて表示したものである。前述のコンチュールマップを基にヒータ 1 および 2 への投入電力値を決めた。また SOA の出力が 10dBm になるように設定した。SOA の出力を

³⁷ Ch(チャンネル)間隔の詳細は ITU-T 勧告 G.671 に詳細がある。

ブースタ SOA で 18dBm にブーストして SMSR の評価を行った。最も SMSR が低いものでも 41dB 以上の SMSR を確認した。これによって C 帯全域で安定的でレーザ発振を確認した。本章の目的の一つが達成した。

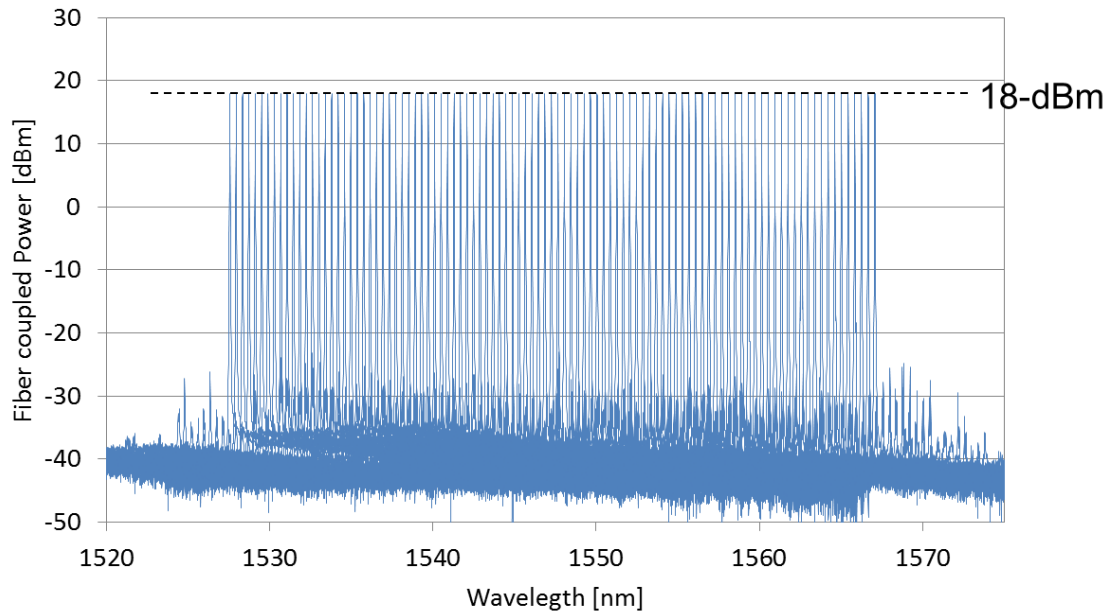


図 3-21 発振スペクトル(100 波長を重ねて表示)

3.6.4 レーザ線幅

次に試作した uITLA の線幅を測定した。線幅の測定は自己遅延ヘテロダイン干渉計を用いて測定した。ヘテロダイン干渉は次の原理である。入射した光を二つに分岐し、片方の光の周波数を 80MHz~100MHz 程度シフトさせたあと、もう片方の光と合波する。光の周波数がわずかに異なる 2 つの波を重ね合わせられることで、その周波数に比例したビートが発生する。このビートを観測すれば、既知の周波数シフト情報と合わせて、入射したレーザ光の線幅が測定できる。図 3-22 に概要を示す。自己遅延ヘテロダイン干渉計を用いて線幅を測定した結果、線幅は C 帯に渡っておよそ 120kHz であった(図 3-23)。線幅に関する本研究の目的は 100kHz 以下の実現であったので、目的を完全に達成するには至らなかったが、ほぼ達成できたものと考えられる。

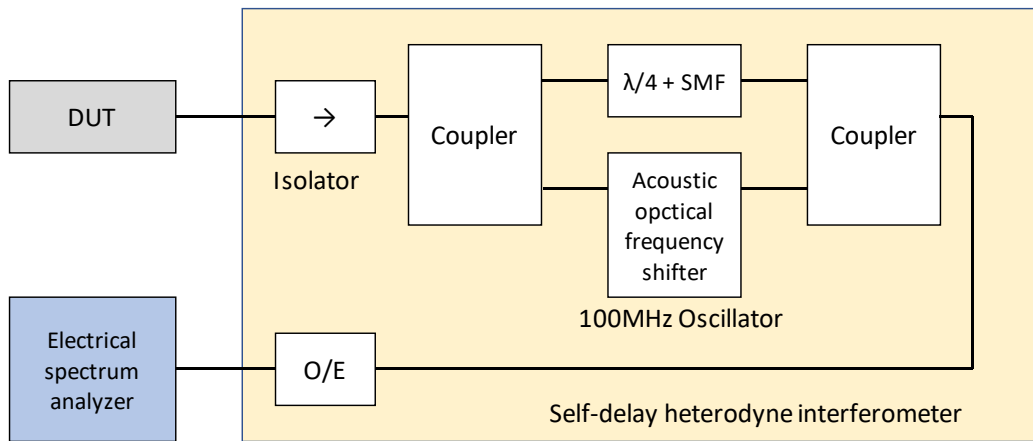


図 3-22 自己遅延ヘテロダイン干渉計の構成

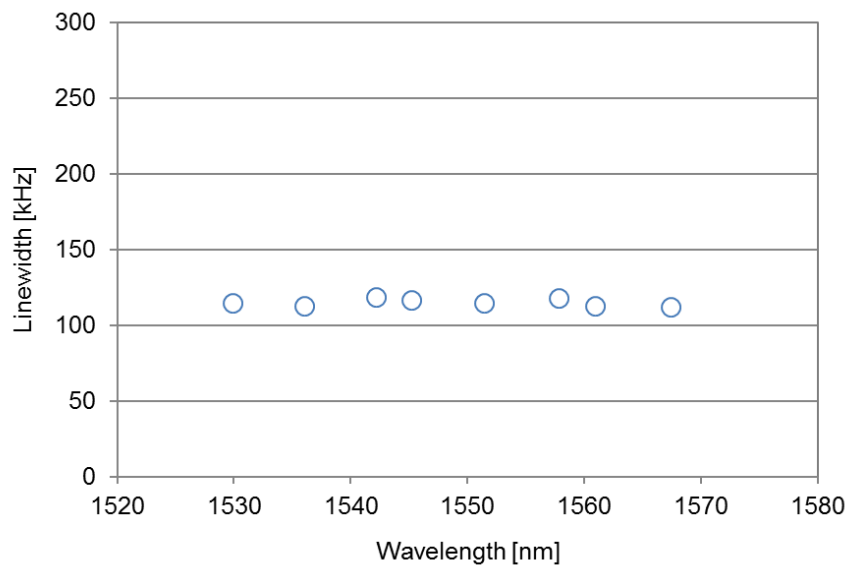


図 3-23 線幅の評価結果

3.6.5 制御安定性

試作した uITLA の制御安定性の評価結果を次に示す。制御安定性はマイクロリングレーザだけでなく、制御回路によって決まるところが大きい。本論文はマイクロリングレーザに関する論文であるため、制御回路に関しては詳細に記述することを避けて、結果をのみを簡潔に述べる。

図 3-24 は各 ch の周波数ずれを示している。各 ch の周波数(=波長)を出力するレーザ駆動時に、本来規定されている ch の周波数に対して、どれだけずれているかを示したものである。ずれに関する規格は $\pm 1.5\text{GHz}$ (波長にすると 0.012nm)であり、どのチャンネルも十分に規格内に収まっていることを確認した。

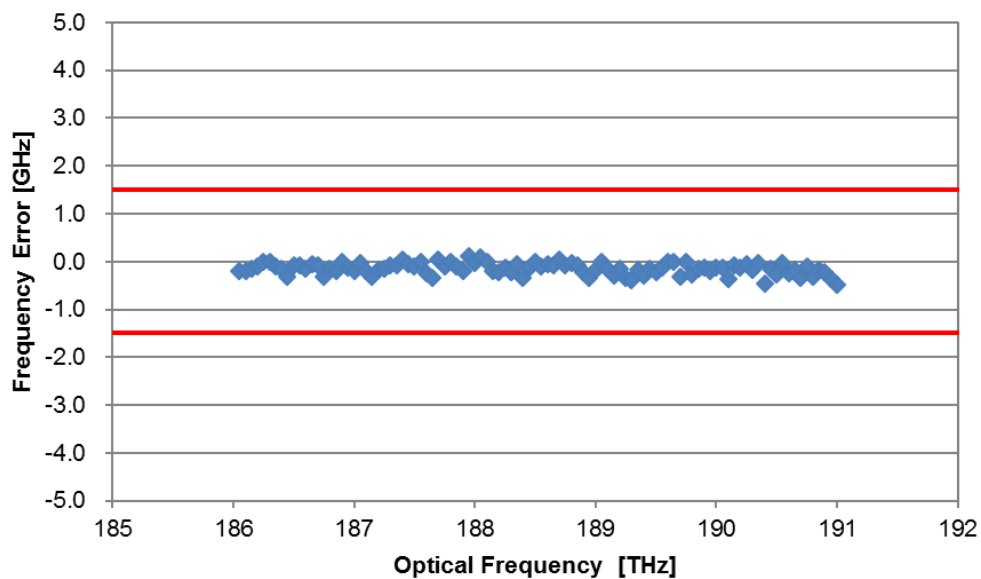


図 3-24 各 ch の周波数ずれ

図 3-25 は各 ch の光出力を 18dBm に設定した際の、出力の 18dBm との乖離量を示している。こちらの規格は $\pm 0.5\text{dB}$ で、どの ch も規格を満足していることが分かる。

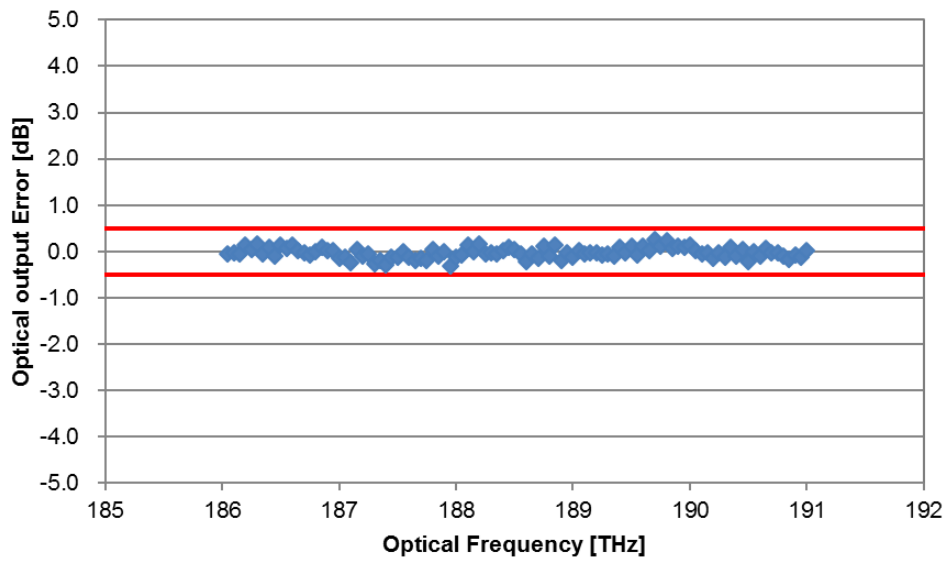


図 3-25 各 ch の光出力ずれ

次に、レーザ発振状態の切り替え中にレーザ発振波長が変わらない³⁸ことを確認した。図 3-26 は光出力を OFF の状態から 18dBm 出力までの遷移状態において、レーザ発振波長をモニタリングしたものである。波長とびはなく、波長のずれは±2pm、遷移時間は 7 秒で良好な結果であった。

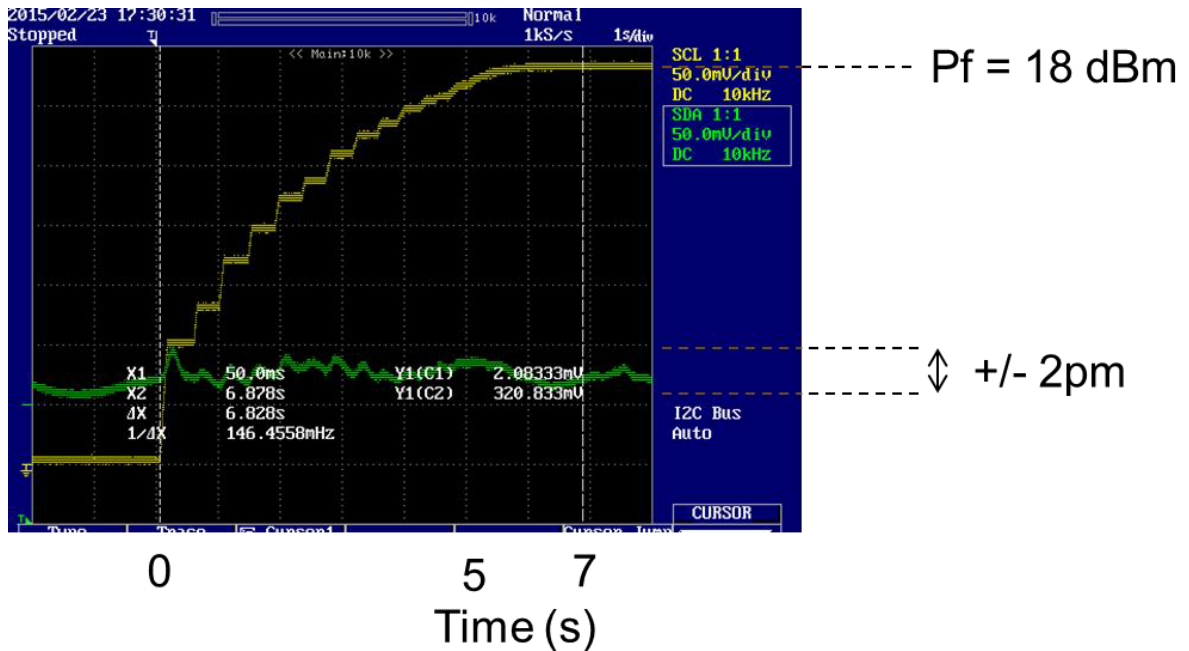


図 3-26 状態遷移時の光出力と波長

³⁸レーザ発振の制御切り替え時に発振波長が切り替わってしまうことをモードホップと言う。たいていは意図しない動作であり、光通信の商用レーザでは起こってはならないこととされている。

3.6.6 長期信頼性

最後に、Si 導波路単体について、導波路屈折率の長期信頼性の評価を行った。幹線系光通信 n における商用利用を想定した場合、製品寿命として 20 年が求められる。この 20 年の間、レーザの発振波長が制御外の波長に飛んでしまうことは許されない。波長が飛んでしまうと別の ch にて信号の混線が生じてしまう。大変厳しい規格ではあるが、高信頼な光通信システムを実現するために絶対に必要な規格である。長期的な時間経過において、レーザ発振波長が意図せずに切り替わる原因として、導波路の長期的な屈折率変化が挙げられる。そこで、長期的な導波路の屈折率変化を評価する必要がある。20 年の動作保証が求められるので、十分なマージンを取って、100 年を目標とした。

導波路屈折率の長期的な変動評価として次の方法を採用した。マイクロリング共振器単体の透過スペクトルを評価し、そのスペクトルのピーク波長からマイクロリング共振器の共振波長を測定した。次に、マイクロリング共振器を 30 時間の高温(600°C)保管を行った。高温保管後のマイクロリング共振器の共振波長を評価し、初期状態からの共振波長のシフト量を評価する。これで、600°C30 時間における波長のシフト量が分かる。次に、別のマイクロリング共振器での初期状態における共振波長を評価し、500°Cで 30 時間放置し、放置後の共振波長を評価し、初期状態からのシフト量を評価した。最後に、300°Cでも同様の評価を行って、波長シフト量を評価した。この評価手順を下記にまとめる。なお、これらのサンプルは全て、600°C30 時間の N2 アニールを施してから評価を行った。クラッドに残留する応力があるため、この応力が変化することで屈折率変動を起こすため、残留応力を開放するためである。この応力解放を目的としてのアニールは一般的に広く行われている。

- ① 初期状態のマイクロリング共振器の共振波長を評価する
- ② 30 時間の高温保管を行う。
- ③ 高温保管後のマイクロリング共振器の共振波長を評価し、①からのシフト量を評価する。
- ④ 別のマイクロリング共振器にて、①から③を実施する。ただし②の温度を変える。

※温度：600°C、500°C、300°C

評価の一例を図 3-27 に示す。図中のスペクトルはマイクロリング共振器に光を入射して、Drop ポートの等価特性である。初期状態から高温保管を行うことで、共振波長が長波長側にシフトしたことが分かる。そのシフト量はおよそ 2nm である。これを各保管温度で評価する。

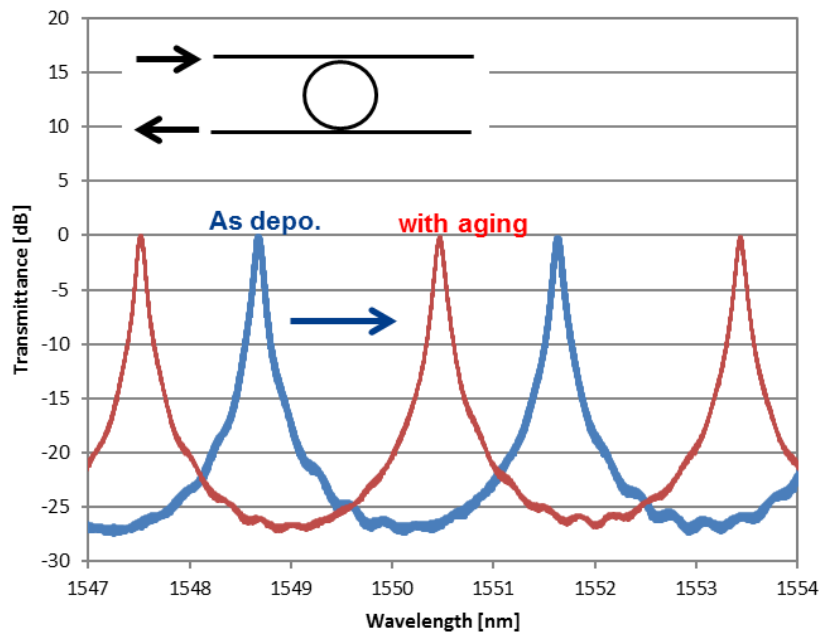


図 3-27 マイクロリング共振器の高温保管前後の共振波長シフト

各温度、計 3 点のシフト量をプロットしたのが図 3-28 である。横軸に高温保管温度の絶対温度の逆数を、縦軸に 0.125GHz (1pm) の変動を迎える時間をプロットしたものである。これはアレニウスプロットと呼ばれ、元々は分子の反応速度を説明するモデルであるが、近年では主に半導体材料の寿命を推定するために用いられる [52] ことが多い。3 温度におけるプロットから、デバイス動作温度における寿命を最小二乗近似から求めた。マイクロリング共振器はヒータによって暖められるが、この時の最高温度 85°C が長期信頼性の観点から一番厳しい駆動条件となるため、 85°C で寿命を見積もった。結果、3 万年という寿命を得た。ここで、3 万年という結果そのものが大事ではないことを補足する。これは評価のばらつきや、そもそものマイクロリング共振器の製造ばらつきによって、寿命が 10 倍や $1/10$ の開きがあると推定されるためである。しかしながら、目標とした 100 年は十分に達成できたことを確認した。これだけの寿命が確認できれば、Si 導波路は光通信の商業的な使用に耐えられるものと考えられる。ちなみに、Si 導波路の寿命を評価したのは、筆者が知る限り初めての報告例である。

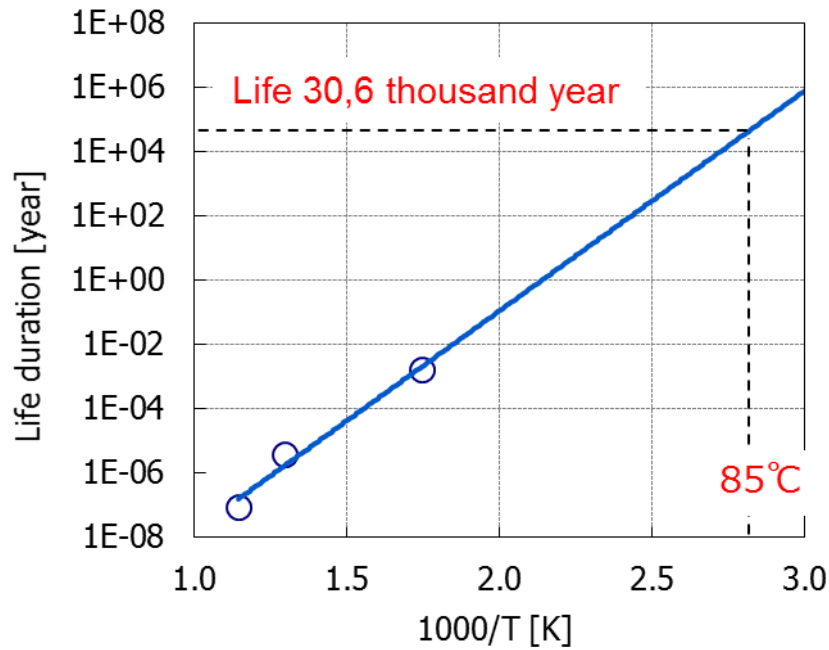


図 3-28 マイクロリング共振器の屈折率の推定寿命

3.7 3章のまとめ

高出力かつ狭線幅の波長可変マイクロリングレーザの実現に向けて設計製作技術を確立した。高出力かつ狭線幅であるレーザを実現するために、レーザ内部の損失を極限まで小さくする方策を示し、またレーザキャビティを 1cm 以上の長尺にする必要があることを述べた。長尺のキャビティをコンパクトに実現するために、近年ファンダリの利用によってデバイス作製が容易になった Si が有効であることを述べた。Si 導波路によるリング共振器にて外部反射鏡を構成し、これと SOA を結合させることでマイクロリングレーザを構成した。Si 導波路の損失低減や SOA と Si 外部反射鏡の光結合を実現する新しい実装方法、またその結合損失の低減方法など、多種多様な工夫を織り込み、波長可変レーザの設計製作技術を確立した。本技術を用いて試作した波長可変レーザは、光出力 100mW、線幅 100kHz、SMSR >40dB を示し、実使用に耐えうる性能を持つことを確認した。また 100mW の光出力は光通信用単一モードレーザとして筆者の知る限りでは世界最高出力である。本研究で目標とした特性を実現することができたと考えている。

第4章 内部共振型マイクロリングレーザ

前章が Si フォトニクス技術と半導体光アンプを組み合わせた外部鏡型マイクロリングレーザであったことに対して、本章では全て InP 導波路で形成した内部鏡型マイクロリングレーザについて述べる。前章のマイクロリングレーザが共通プラットフォーム上への複数素子の実装を必要としたのに対して、本章のマイクロリングレーザは一回のフォトリソグラフィで形成される。InP 導波路で形成されたマイクロリングは波長フィルタ機能と光増幅機能の 2 つを同時に持つ。マイクロリングレーザからバスラインに結合した光を、バスラインに電流を流すことで増幅することができる。マイクロリングレーザは光通信で要求される波長範囲(C 帯: 1530nm-1565nm)で安定的に高出力発振させることは大変困難³⁹であるが、低出力であればレーザの発振状態を制御することで光プロセッサとして動作することが可能である。前述の外部共振型マイクロリングレーザは波長可変光源として動作することを得意としたが、光プロセッサとして動作させることが大変困難であることと対照的である(表 4-1)。

表 4-1 マイクロリングレーザの比較

構造	作製方法	得意とする分野
外部共振型 (3 章)	プラットフォーム上に実装	波長可変光源
内部共振型 (4 章)	プロセスで一括作製	光プロセッサ

4.1 アプローチ

本章の内部共振型マイクロリングレーザも前章の外部共振マイクロリングレーザと同様に、原理的には波長可変光源を形成することが可能である。周回長が異なる 2 つ以上のリング共振器を備え、それぞれのリング共振器の波長がマイクロヒータ等の構造で制御すれば良い。ただ、本章の内部共振型マイクロリングレーザは、導波路内部に大きな損失を持つため、10mW 以上の高出力化 g が大変困難である。しかしながら、マイクロリング自身が光るという特徴は、様々な非線形効果と相まって、波長可変光源にはない魅力的な機能を実現することができる。その一つが光プロセッサである。近年の光通信では伝送量の飛躍的増大に伴い、ルータの性能向上が求められている。現在は光信号を電気信号に変換し演算処理を遂行してから再度光信号に変換する電気ルータが使用されている。電気ルータは消費電力の観点から現在以上の大規模化が困難である。この課題を解決するために、光信号を電気に変換することなく、光信号を光信号のまま処理する光ルータ/光プロセッサが研究されている。これによって低消費電力、高密度集積、高速動作が実現できると考え

³⁹ 通信で使用するためには SMSR が最低でも 35dB 以上必要とされている。マイクロリングレーザは原理的にはファブリペローレーザのため、十分な SMSR を実現することが出来ない。十分な SMSR を実現するためには何かと組み合わせる必要がある。一例としてグレーティングと組み合わせた報告 [94]がある。

られている。これらを実現するためのデバイスとして、DFB タイプ [53] [54]、DBR タイプ [55]、VCSEL タイプ [56]、MMI タイプ [57] [58] [59] [60] [61] [62]、MZI タイプ [63]、マイクロリングタイプ [64] [65] [66] [67]が提案されている⁴⁰。本研究室ではこれまでに、マイクロリング共振器と量子井戸半導体光増幅器を用いたマイクロリングレーザを提案してきた。マイクロリングレーザは他のデバイスでは実現困難な縦続接続を可能にし、光出力を後段につなげることができる。また、基本的な光信号処理であるインバータ動作およびフリップフロップ動作を同一のデバイスで実現できることを実証してきた。インバータ動作とは、レーザの発振波長が外部からの光注入によって外部注入光の波長に変化し、光注入停止後に初期のレーザ発振波長に戻る動作を指す。またフリップフロップ動作とは、外部注入光の注入停止後においても発振波長が保持される動作を指す。実験的にこれらの動作を実証できたものの、理論的な裏付けが不十分であった。そこで、本章ではこれらの動作を理論的に説明する体系だったモデルの構築を行いその妥当性を検証する。また、構築したモデルの応用を検討する。

4.2 マイクロリングプロセッサ

光プロセッサに要求され重要な機能として、信号の波形整形および演算処理が挙げられる。例として、光プロセッサへの光の入射によって、光プロセッサのレーザ発振波長を保持する動作(インバータ動作)、光プロセッサへの光の入射後も光プロセッサのレーザ発振波長を光の入射波長で保持する動作(フリップフロップ動作)が挙げられる。これらの動作を実現するデバイスとして、本研究室ではマイクロリングレーザについて提案および実証を行ってきた。マイクロリングレーザとは、InP 導波路で形成されたマイクロリング共振器に電流注入することによってレーザ発振する光プロセッサである。マイクロリングレーザで実現できる機能の概要を図 4-1 に示す。この節ではマイクロリングレーザの基本的な原理と、マイクロリングレーザによって可能となる全光フリップフロップ機能について重点的に述べる。

⁴⁰ 詳細を 5.2 節で述べる。

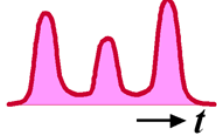
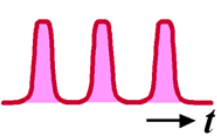
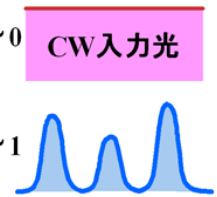
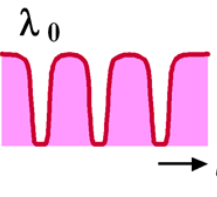
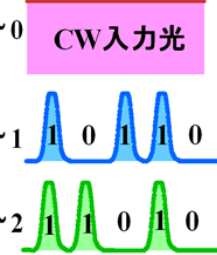
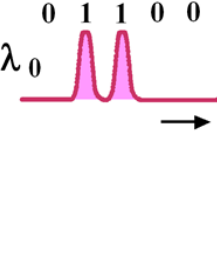
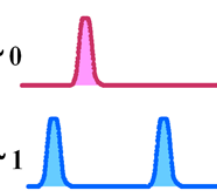
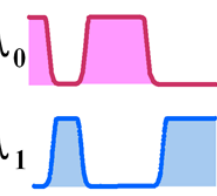
機能	入力信号	出力信号
低レベルゲート レベルリミッタ 波形整形 (自己位相変調, SPM)	λ_0 	λ_0 
インバータ動作 (相互利得変調, XGM)	λ_0 CW入力光 λ_1 	λ_0 
XOR+波長変換 (2共振波長の 入力) (相互位相変調, XPM)	λ_0 CW入力光 λ_1 1 0 1 1 0 λ_2 1 1 0 1 0 	λ_0 0 1 1 0 0 
フリップ-フロップ =波長変換+ バッファ (一方向発振 リングレーザへ の注入同期)	λ_0 λ_1 	λ_0 λ_1 

図 4-1 マイクロリングレーザで実現可能な機能 [68]

4.3.1 SOA 中の相互変調効果

SOA に光パルスを入射すると、入射した光パルスの強度に応じて SOA に屈折率変化が生じる。その変化は、光パルスに含まれる波長のうち強度が強い波長ほど大きくなる。これを相互変調効果と呼ぶ。相互変調効果は、入射する光の強度に応じて SOA 中のキャリア密度が下がることに起因⁴¹する。相互変調効果のうち、光パルスが自己の光強度で位相変調を受ける効果を自己位相変調(self-phase modulation : SPM)、光パルスの入射による屈折率変化が SOA 中の他の波長の光に及ぼす位相変調を相互位相変調 (cross phase modulation : XPM) と呼ぶ。相互変調効果はマイクロリングレーザが光プロセッサとして機能するための重要な効果である。

⁴¹ キャリア密度が上がると屈折率が下がる。これをキャリアプラズマ効果と呼ぶ。レーザに電流注入を行うと、発振のしきい値電流まではキャリア密度が増加し屈折率が下がるが、しきい値電流以降ではキャリアが光に代わるためキャリア密度が変わらず、むしろ電流注入によるジュール熱が発生して屈折率が増加する。

4.3.2 マイクロリング共振器による共振増強効果

以降では SOA で形成したマイクロリング共振器、マイクロリングレーザについて考える。マイクロリングレーザはレーザとしての特性とマイクロリング共振器としての特性の 2 つを備えている。以降の説明では、レーザとしての特性を強調する場合はマイクロリングレーザと記述し、マイクロリング共振器としての特性を強調する場合は、マイクロリング共振器と記述する。マイクロリングレーザの発振波長とマイクロリング共振器の透過波長は同じ波長であることを補足する。

2 章および 3 章で述べてきたように、マイクロリング共振器内部の光の周回数は、マイクロリング共振器とバスラインの結合効率によって決定される。透過率が >1 (増幅)の場合、増幅率に周回数分をかけた増幅が行われる。結合効率を 0.1 と仮定した場合の透過率を図 4-2 に示す。

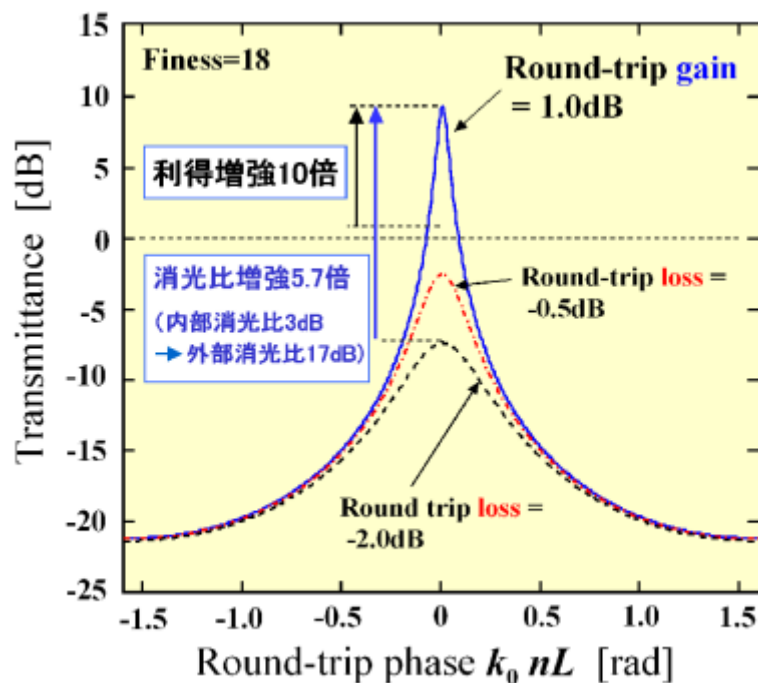


図 4-2 マイクロリングによる光増強 [69]

図 4-2 よりマイクロリング共振器に 1dB の利得があるだけで、共振波長の透過率 10dB になることが分かる。つまり 10 倍の利得が得られる。この増強効果は相互変調効果にも同様に働く。光相互位相変調効果は、SOA に非常に高強度の光短パルスが SOA 中に入射されることで生じるが、マイクロリングレーザにおいては、入力光強度が微弱であってもマイクロリング共振器の周回効果によって発現させることが可能である。

4.3.3 SOA 相互変調効果によるリング共振器の共振波長変化

自己位相変調がマイクロリングレーザ内部で起こると、共振器中の等価屈折率(n_{eq})が変化し、その結果としてマイクロリングレーザの内部透過波長 λ_0 ⁴² が変化する。透過波長が変化すると、自己位相変調効果が生じる直前までマイクロリングレーザを透過していた波長の光が、マイクロリング共振器のフィルタ機能によって減衰される。つまり、光パルスに強度変調がかかることになる。この働きを用いると、波形整形や光信号に対する信号処理などを行うことが可能になる。下記に詳細を述べる。

(1) 自己位相変調とマイクロリング共振器による強度変調

図 4-3 の波長特性を持つマイクロリング共振器(共振波長 λ_0)に波長 λ_0 の光パルスを入射した場合、自己位相変調によって共振波長がシフトし、図 4-4 に示すように、入射した波長 λ_0 の光パルスを自身が強度変調する。ここで k_0 を波数、 n をマイクロリング共振器の透過屈折率、 L をマイクロリング共振器の周回長とする。

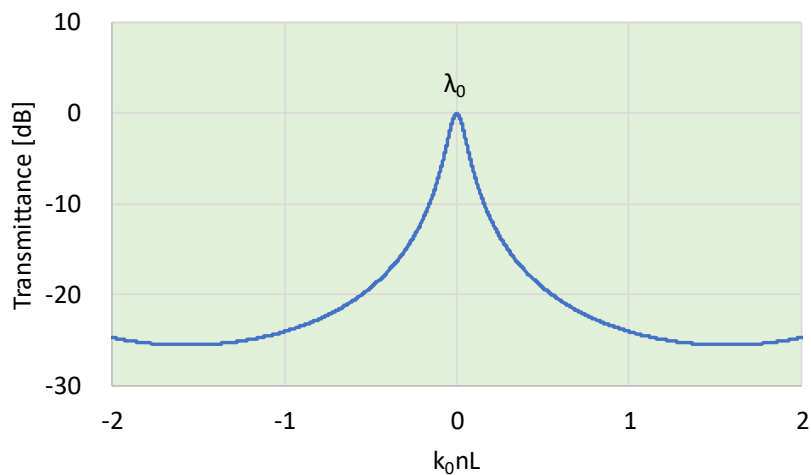


図 4-3 光パルス入射前のマイクロリング共振器の透過特性

⁴² マイクロリングレーザはマイクロリング共振器としての特性も持つため、内部で共振可能な波長が内部透過波長である。

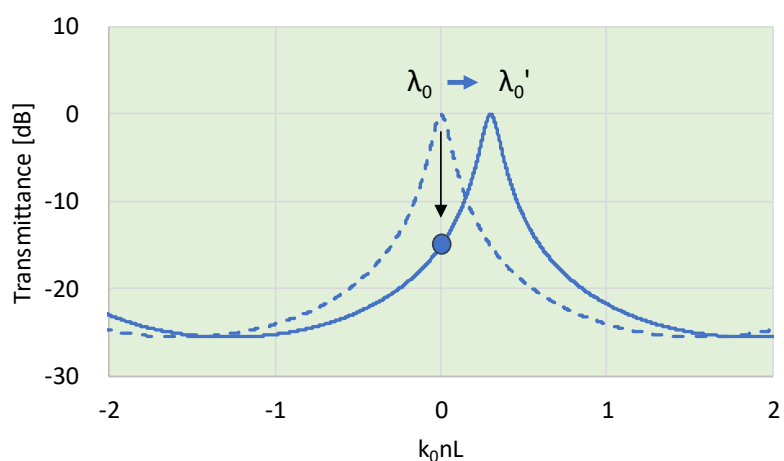


図 4-4 光パルス入射前後のマイクロリング共振器の透過特性(自己位相変調)

(2) 相互位相変調とマイクロリング共振器による強度変調

図 4-5 の波長特性を持つマイクロリング共振器(共振波長 λ_0)に波長 λ_0 の光パルスを入射したと仮定する。マイクロリング共振器の隣接共振波長⁴³ λ_1 の信号光を入射すると、 λ_1 の入射によりマイクロリング共振器の共振波長が図 4-6 のように移動し、波長 λ_1 の光パルスを変調する。 λ_1 をクロックとして、 λ_0 に強度変調をかけることが可能になる。これは全光制御が可能であることを意味している。

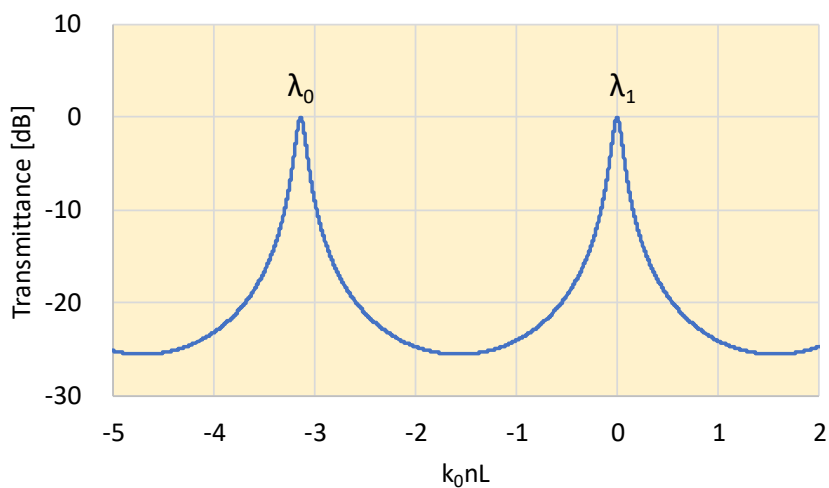


図 4-5 光パルス入射前のマイクロリング共振器の透過特性

⁴³ 隣接波長とは、レーザ発振強度が最も高い(または透過率が最も高い)波長から FSR 一つ離れた波長を指す。通常は、レーザ発振強度が 2 番目に高い(または透過率が 2 番目に高い)。

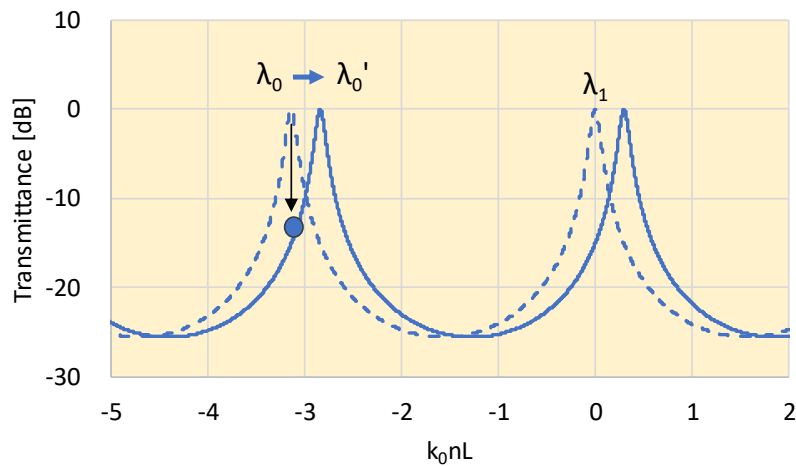


図 4-6 光パルス入射後のマイクロリングの等価特性(相互位相変調)

4.3.4 マイクロリングプロセッサの機能

自己位相変調および相互位相変調を用いて、マイクロリングプロセッサで行う波形整形、論理演算の機能(インバータおよびフリップフロップ動作)の原理を以下に説明する。

(1) 自己位相変調効果による波形整形

SOA に光パルスを入射すると、自己位相変調によるマイクロリング共振器内の屈折率変化が発生して、光パルスが位相変調を受ける。光パルスの中心部は光強度が強いため屈折率変化が大きく、結果として波長が長くなる⁴⁴($\lambda_0 + \delta$)。これに対して、光パルス強度の弱い部分(光電界分布の立ち上げりや立下りの領域)では逆に波長が短くなる⁴⁵($\lambda_0 - \delta$)。マイクロリング共振器の共振波長を λ_0 とすると、 λ_0 よりも短波長ではマイクロリング共振器の波長フィルタによって減衰され光が出力されない。同様に長波長も出力されない。これによって光パルスの波形整形が可能となる。図 4-7 に概要を示す。

⁴⁴ 短波長シフトすることをブルーシフトと呼ぶ。これは可視光の短波長成分が青色であることによる。

⁴⁵ 長波長シフトすることをレッドシフトと呼ぶ。ブルーシフトと対比するときに用いられる。

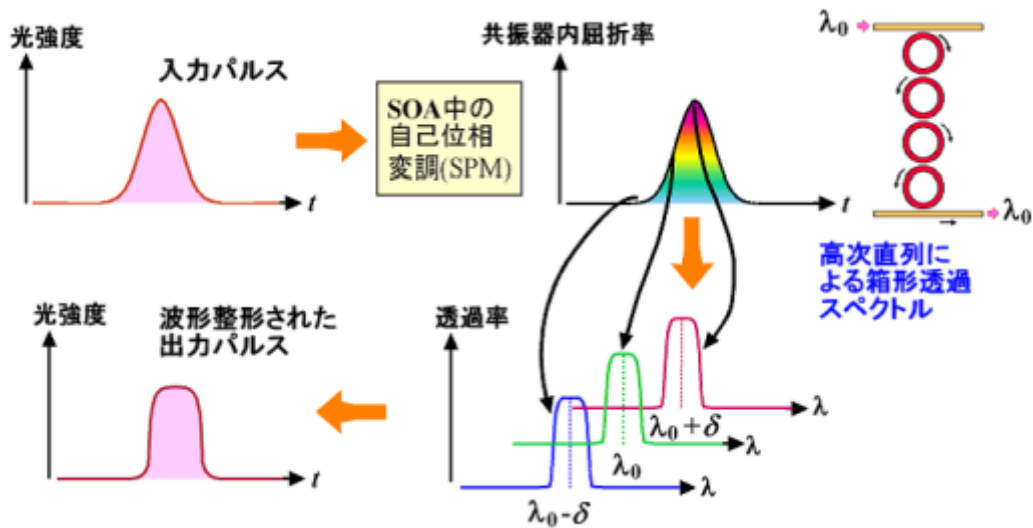


図 4-7 自己位相変調を用いた信号の波形整形 [69]

(2) 相互位相変調効果によるインバータ動作

共振波長が λ_0 および λ_1 のマイクロリングレーザに信号光 λ_1 を入力すると、マイクロリングレーザ内部のキャリア密度が低下し、マイクロリングレーザの屈折率が変化する。マイクロリングレーザの屈折率変化によりマイクロリング共振器の共振波長が変化し、信号光 λ_1 の入射以前は透過していた CW 光 λ_0 を減衰させる。つまり信号光による相互位相変調によって、図 4-8 に示すようなインバータ動作が可能になる。

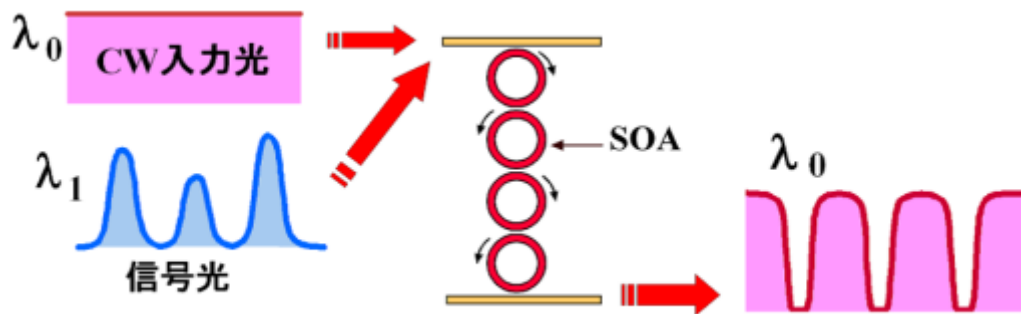


図 4-8 相互位相変調効果を用いたインバータ動作 [69]

(3) 相互位相変調効果を用いた論理演算

マイクロリングレーザの発振波長 λ_1 および隣接波長 λ_2 について、外部から λ_1 または λ_2 の信号光がマイクロリングレーザに入射されると、これまで述べてきたようにマイクロリングレーザの屈

折率が変化し共振波長が変化する。あらかじめマイクロリング共振器の共振波長の位相を、CW 入力光 λ_0 の位相から π だけシフトさせておく。また信号光 λ_1 、信号光 λ_2 がマイクロリング共振器に入ったときにそれぞれ π シフトするように設定する。信号光 λ_1 または信号光 λ_2 のどちらかがマイクロリング共振器に入ったときは位相シフトが π だけ生じ、元の位相シフト量 π と合わせて合計で 2π ずれる。その結果、マイクロリング共振器の共振波長と CW 光の位相が合致し、CW 光が出力される。信号光がない場合は、共振波長から π だけずれるように設定しているため、CW 光は出力されない。また信号光 λ_1 および信号光 λ_2 の両方をマイクロリング共振器に入射した場合は、元の位相ずれと合わせて合計 3π ずれるため、こちらも CW 光は出力されない。これらの思考実験はマイクロリングレーザが光信号をダイレクトに演算(XOR) 処理できることを示している。初期位相のシフト量を 0 にすれば NOR 回路としても機能する。これらの概要を図 4-9 に示す。

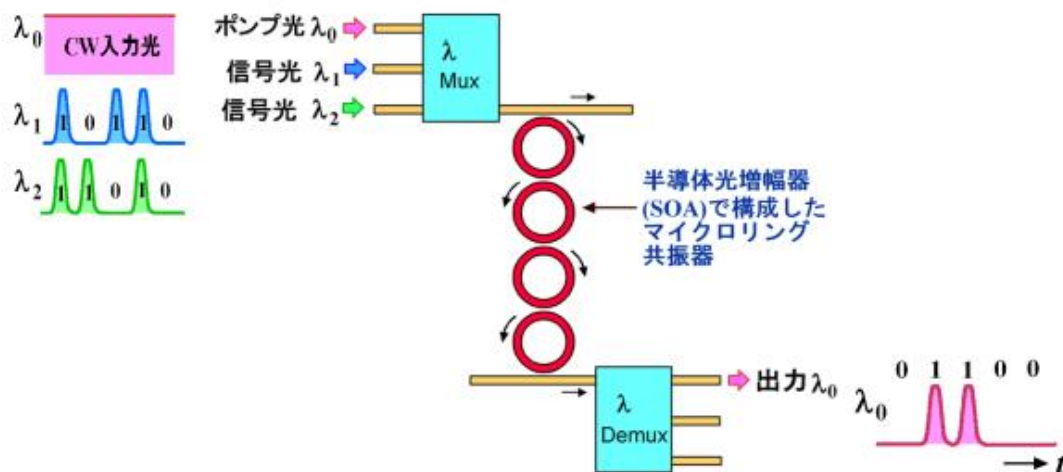


図 4-9 相互位相変調効果を用いた XOR 演算 [69]

4.3 マイクロリングレーザの構造

半導体 MQW で形成されたマイクロリングレーザの模式図を図 4-10 に示す。マイクロリングレーザはマイクロリングとマイクロリングに光結合するバスライン導波路(以降、バスライン)から構成される。マイクロリングレーザに電流を注入することで、マイクロリング内部に自然放出光の強度が強くなり、あるしきい値を超えたときに、レーザ発振を起こす。それぞれの導波路は InGaAsP 量子井戸で構成された 7 層構造のハイメサ導波路である。ハイメサ導波路の断面図を図 4-11 に示す。

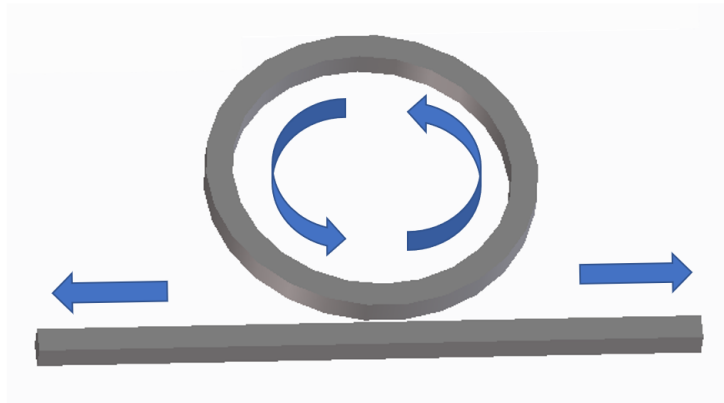


図 4-10 マイクロリングレーザの概要

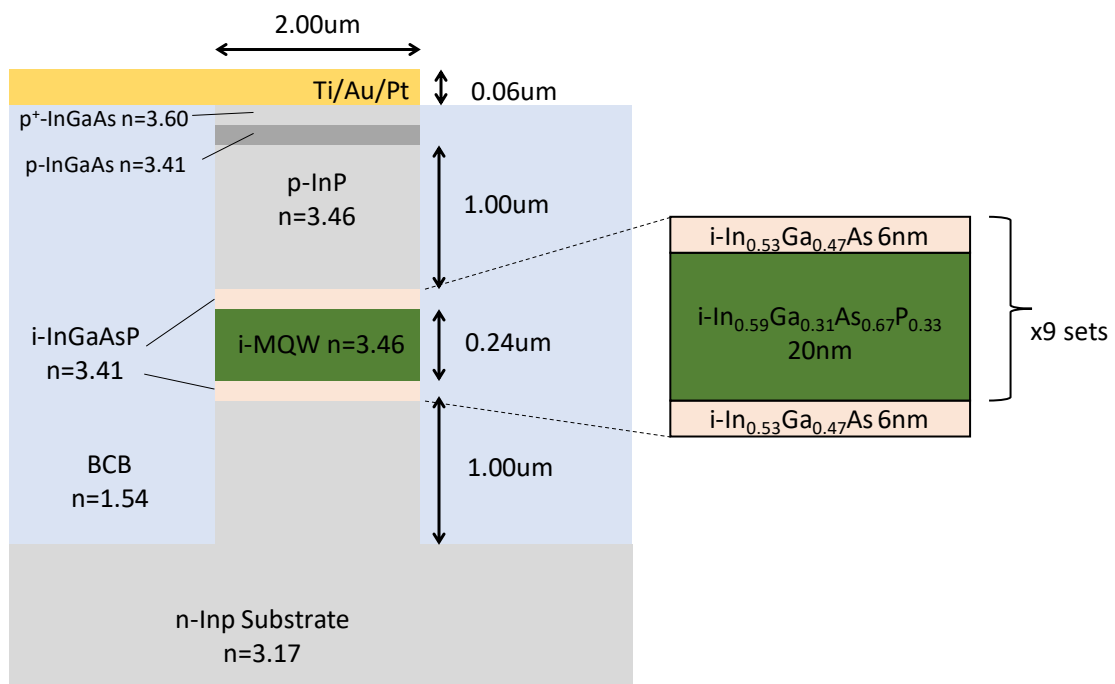


図 4-11 マイクロリングレーザの内部構成

マイクロリングレーザとバスラインの光結合部はMQW(multi quantum well)導波路を共有しているリッジ型導波路である。MQW は空気に対して屈折率が高いため光閉じ込めが強い。従って、マイクロリングレーザとバスライン間のMQW導波路をエッチングで完全に除去してしまうと、マイクロリングレーザとバスライン導波路の間に生じた空気層が光をMQWに閉じこもってしまい、結果として光の結合を制御することが困難になる。そこで、図 4-12 に示すように、エッチングで除去するのをクラッドである p-InP のみに留め MQW 導波路を残すことで、適切な光の閉じ込めを実現し、所望のマイクロリングレーザ-バスライン導波路間の光結合を得る。

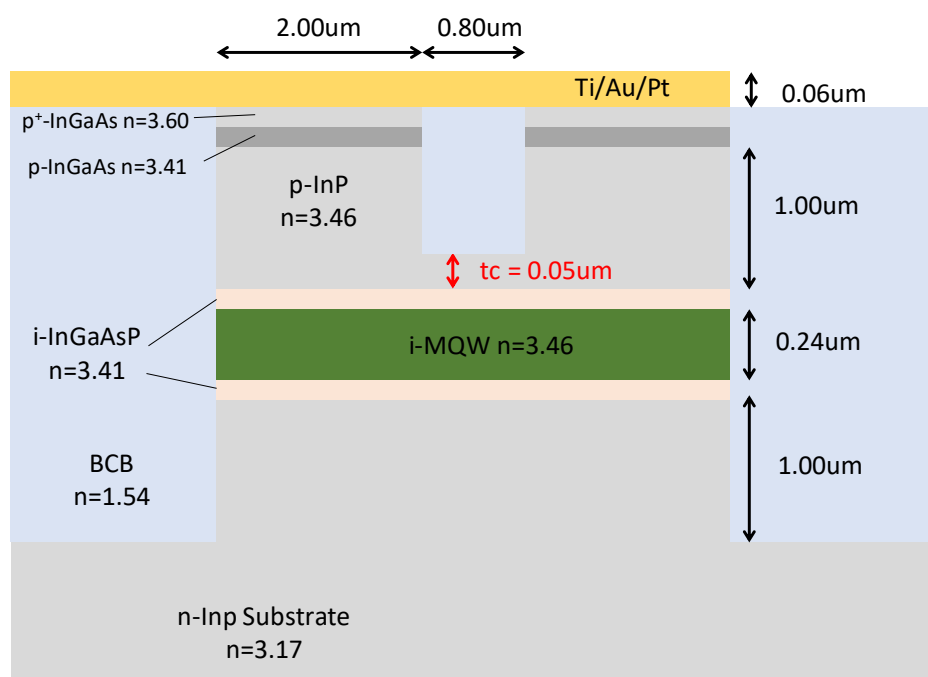


図 4-12 マイクロリングとバスラインの結合部分

ただ、図 4-12 におけるエッチング残し厚み t_c は結合効率に対して強い感度を持つため、精密に制御することが必要である。厳密な制御ができない場合であっても、実際に作製したデバイスにて観察⁴⁶(図 4-13)を行い、 t_c の厚みを確認し、結合効率を詳細に推定することが必要である。なぜならば、結合効率によって、光がマイクロリングを周回する際の周回数が変化し、非線形効果の発現が大きく変わってしまうからである。

⁴⁶ 観察手法としては SEM 観察 (Scanning Electron Microscope、走査型電子顕微鏡) が有効である。

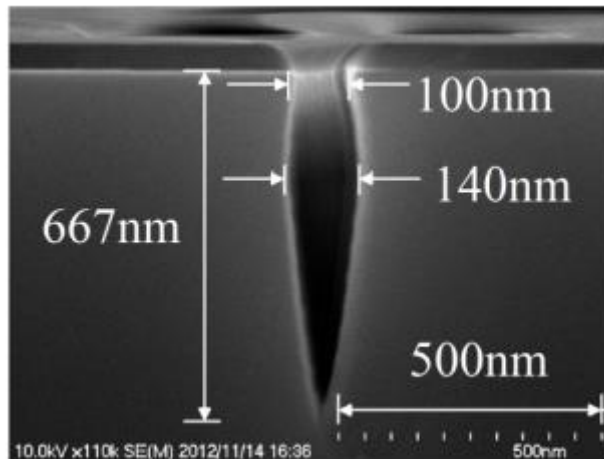


図 4-13 結合部の SEM 画像 [70]

4.4 製作プロセス

マイクロリングレーザを製作するためのプロセスフローを詳細に述べる。外部鏡マイクロリングレーザにおけるマイクロリング共振器が Si フォトニクス技術で作製されたことに対して、本章の内部鏡マイクロリングレーザは InP 基板に通常の導波路作製技術を用いて形成される。プロセスの一部は NICT (National Institute of Information and Communications Technology、情報通信研究機構) の協力の基に実施された。プロセスの詳細については文献 [68]に記載されている。

プロセスのフロー(図 4-14)は次の通りである。

- ① InP 基板の上にエッチング保護膜となる SiO₂ を TEOS-CVD にて成膜する
- ② レジストをコートし縮小投影露光によってパターニングする
- ③ ECR-RIE にて SiO₂ をパターニングする
- ④ レジストを除去する
- ⑤ ICP-RIE にて InP をパターニングする
- ⑥ マイクロリング-バスラインの間をエッチングするためにレジストをパターニングする
- ⑦ ICP-RIE にて InP をパターニング、SiO₂ を除去する
- ⑧ クラッドとなる BCB をスピコートし、ベーキングする
- ⑨ InP 基板の裏面にオーミック電極を蒸着する
- ⑩ BCB を導波路が露出するところまでエッチングする
- ⑪ 上記で露出した SiO₂ を除去する
- ⑫ 導波路に対してオーミック電極を蒸着する。

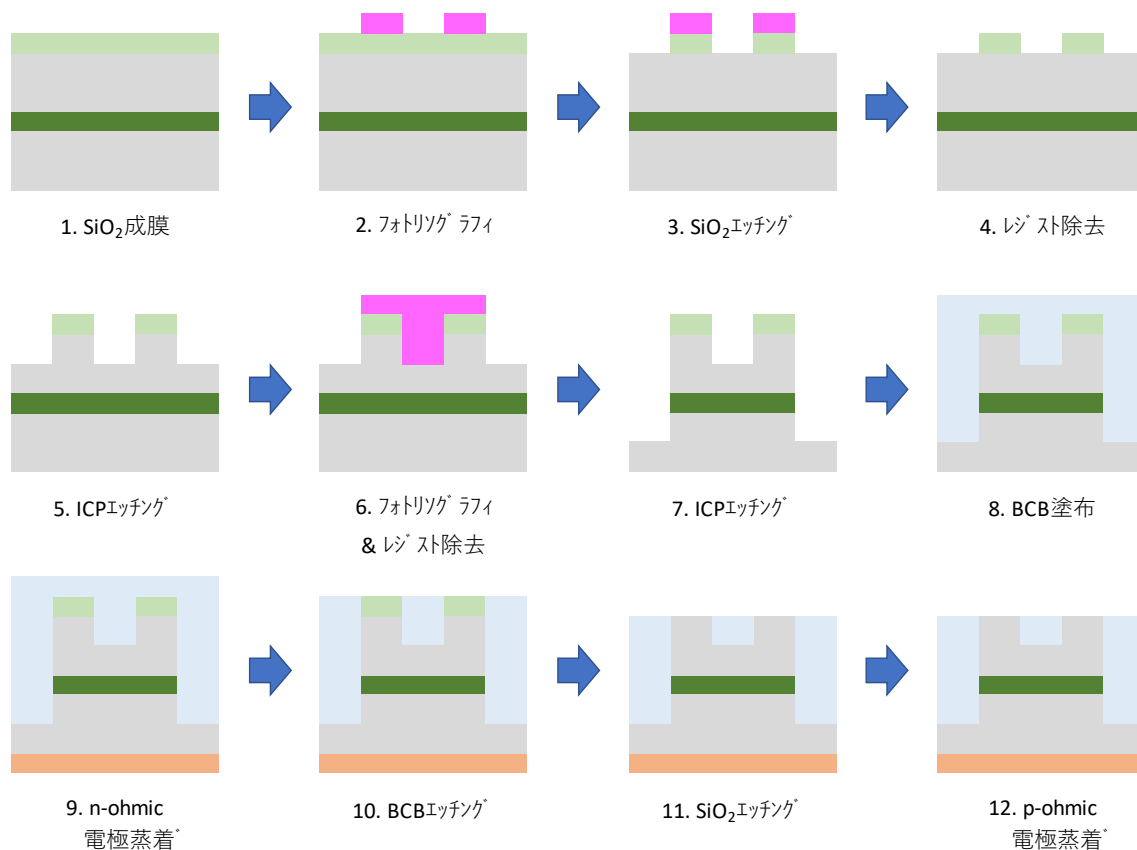


図 4-14 マイクロリングレーザの製作プロセス

上記のプロセスは歩留まりが低いことが課題の一つである。特に⑩BCB エッチングにおいて、適切なエッチング量の実現に難があることが低歩留まりの原因の一つである。加えて、最後までプロセス遂行できても、InP 導波路の両サイドがエッチングでダメージを受けて、発光に寄与せず、損失になる領域 [71]があつて、光出力の低下をもたらしている。この問題の解決が課題である。具体的には、内部に光学損失があると、レーザの発振しきい値が高くなり、内部の光子密度が上昇せずに非線形効果が発現しにくくなってしまふためである。

4.5 実験結果

これまでに先行研究にてインバータ動作およびフリップフロップ動作を同一のマイクロリングレーザで実現できることが確認されたが、その詳細について、本研究室修士修了生梅原周氏の修士論文 [69]および小林広樹氏の修士論文 [72]を引用する形で評価結果を述べる。マイクロリングレーザのデバイスレイアウトを図 4-15、測定系のレイアウトを図 4-16 に示す。マイクロリングレーザとバスライン導波路から構成されるデバイスで、入力側バスライン導波路に電極 1 が、マイクロリングレーザに電極 2 が、また出力側バスライン導波路に電極 3 が形成されている。バスライン導波路に形

成された電極 1 または 3 に電流を流すことで、光を増幅することが可能である。ただし、電流を流しすぎると光の増幅が必要以上に強くなりすぎて、意図しないレーザ発振を起こしてしまうため、事前に評価した上で最適な制御を行った。

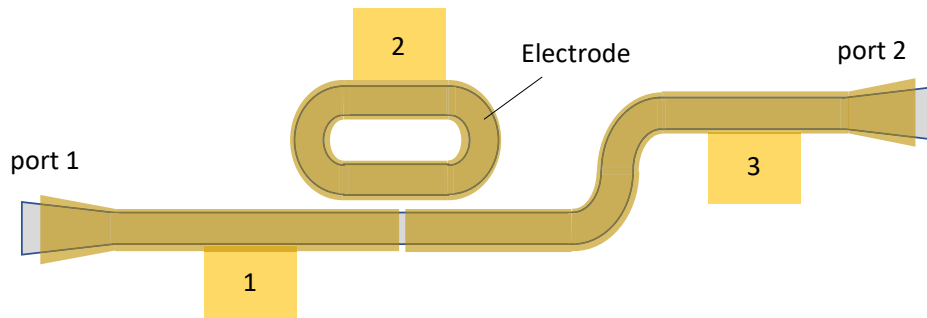


図 4-15 マイクロリングレーザのデバイスレイアウト

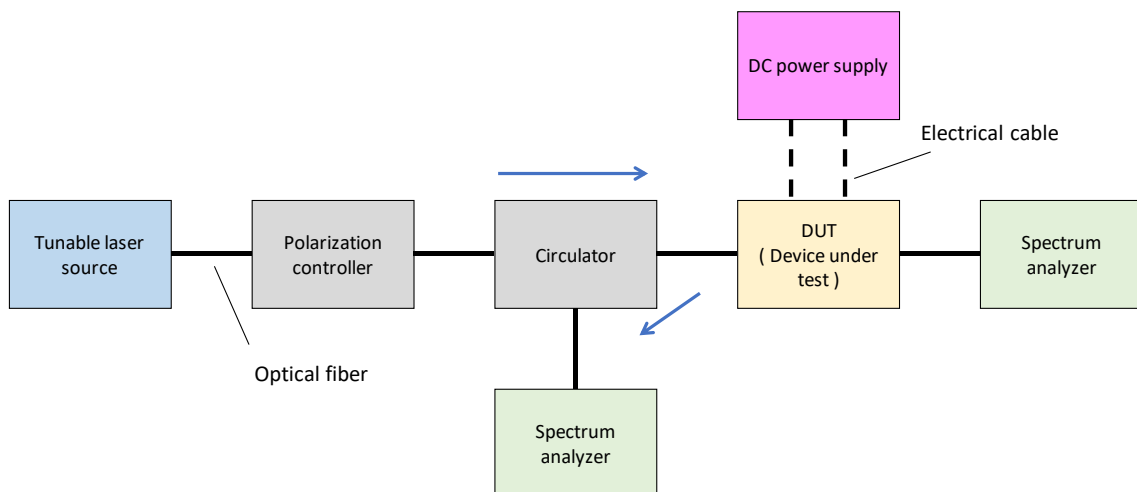


図 4-16 マイクロリングレーザの測定系

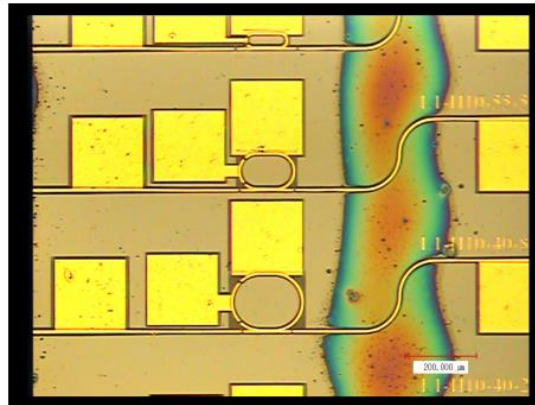


図 4-17 デバイスの外観写真 [72]

実験結果について詳細を説明する。まずインバータ動作について、先行研究における評価結果 [69]を述べる。マイクロリングレーザへの注入電流が 36.0mA のとき⁴⁷の、CW 光入射前の、つまり初期状態の時のマイクロリングレーザのスペクトルを図 4-18(a)に示す。このスペクトルでは、波長 1567.56nm にメインピークを、また 波長 1569.24nm にサブピークが見られる。この発振状態のマイクロリングレーザに、波長 1569.24nm の CW 光 10.0mW をバスライン導波路に入射し、サーキュレータを介して入射したバスライン導波路からの発振スペクトルが図 4-18(b)である。ここで、波長 1569.24nm の光は導波路入射端での反射によって波長可変レーザからの注入光が混入しているため、波長 1569.24nm のマイクロリングレーザの出力は正確には測定できない。ただ、このとき、波長 1567.56nm における発振ピーク強度は入射前と比べて 19.2dB 減少したことが確認された。次に、CW 光の入射を停止したときのスペクトルを図 4-18(c)に示す。図 4-18(a)と比較してほぼ同じスペクトル特性であることが確認された。更に、短波長側の波長 1567.56nm の CW 光 10.0mW を同様にバスライン導波路に入射したときのスペクトルが図 4-18(d)である。波長 1569.24nm の発振ピーク強度が 15.8dB 減少した。CW 入射光を停止したときのスペクトル特性を図 4-18(e)に示す。こちらにも同様に CW 光の入射前後でほぼ同じスペクトル特性が確認された。これら一連の操作によってインバータ動作が確認された。

⁴⁷ バスライン導波路には、電極 1 と電極 3 を並列につないで、45.6mA を流した。バスライン導波路に全く電流を流さない状態では、InP が光を吸収してしまうため、バスライン導波路にある程度電流を注入する必要がある。

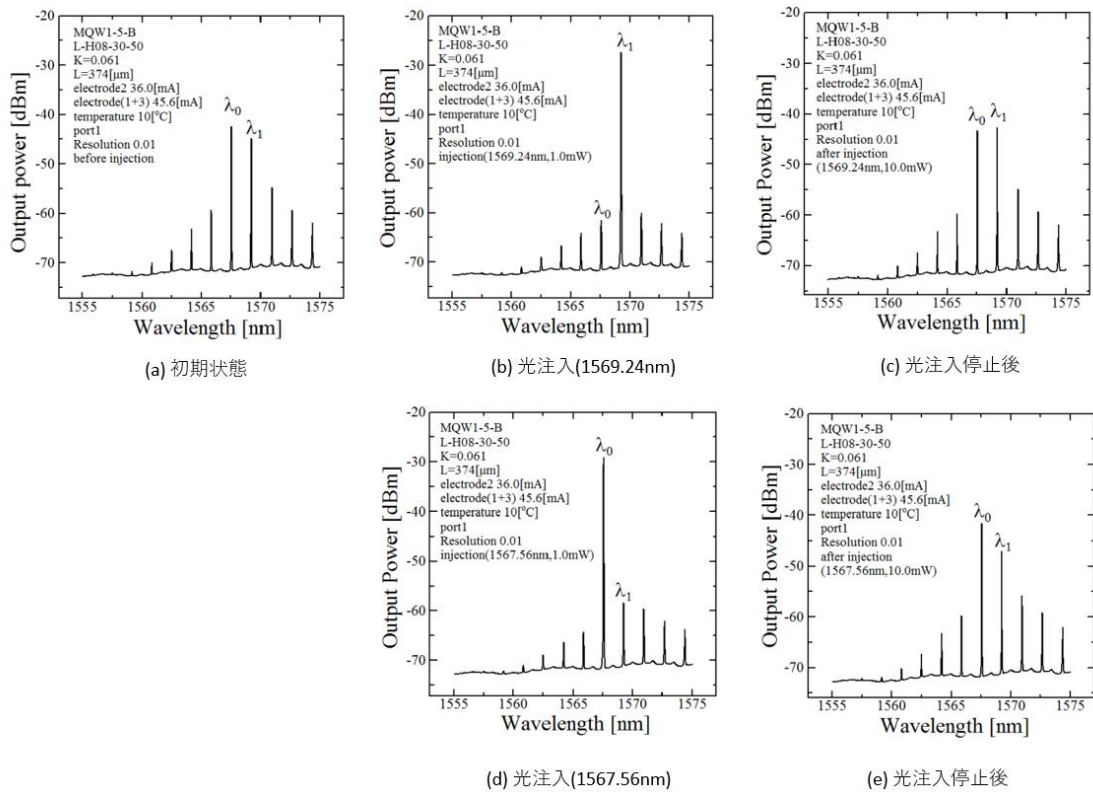


図 4-18 インバータ動作の評価結果 [69]

次にフリップフロップ動作に関する実験結果 [72]について詳細を説明する。 λ_1 で発振している状態(図 4-19①)に別の共振波長 λ_0 の CW 光-2.7dBm を入射と λ_0 でレーザ発振する(図 4-19②)。 λ_0 の注入を止めても λ_0 で発振波長を保持する(図 4-19③)。この様に発振波長を保持する動作がフリップフロップ動作である。次に初期状態で発振していた λ_1 の光を入射すると λ_1 で発振し(図 4-19④)、 λ_1 の注入を停止後も発振波長を保持する(図 4-19⑤)ことが確認された。これによってフリップフロップ動作⁴⁸が確認された。

48 正確にはフリップフロップにおける、セット、リセット動作である。

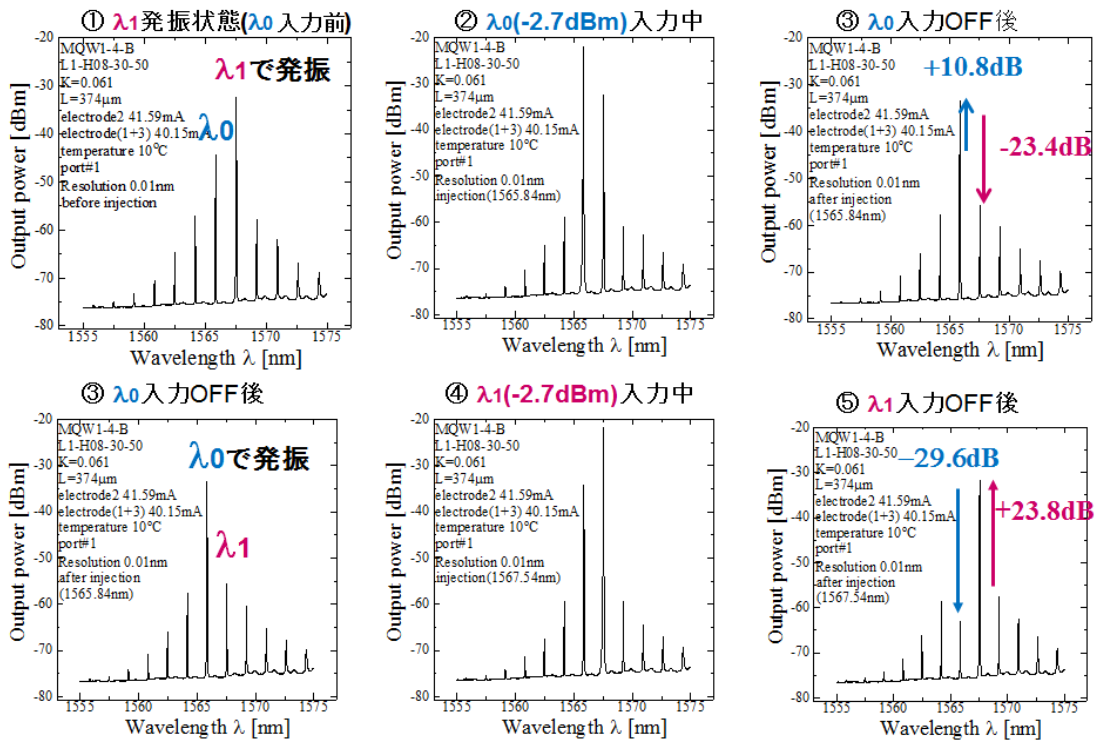


図 4-19 フリップフロップ動作の測定結果 [72]

4.6 非線形モデルに基づくフリップフロップ/インバータ動作の理論的検討

光注入停止状態にて発振波長が初期波長に戻るインバータ動作はヒステリシスが無い現象であり、発振波長が保持されるフリップフロップ動作はヒステリシスが有る現象である。これらを統一的に説明するモデルを構築するためには、下記の考慮(レート方程式の拡張および光学非線形効果の取り入れ)が必要と考えた。

① レート方程式の光子の数を 2 つに拡張する

インバータ動作もフリップフロップ動作も 2 つの波長の取り扱いが必要なため、レーザ動作を記述するレート方程式の光子の数を 2 つに拡張⁴⁹する。マルチレート方程式を下記に記載する。

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I}{qV} - V_g \frac{dg}{dN} (N - N_0) \sum S - \frac{n}{\tau_c} \quad (4.1)$$

⁴⁹ レート方程式の光子の数を 2 つ以上に拡張したレート方程式は一般的にマルチレート方程式と呼ばれる。

$$\frac{dS_0}{dt} = \Gamma V_g \frac{dg}{dN} (N - N_0) S_0 - \frac{S_0}{\tau_p} - \frac{\beta_{sp} N}{\tau_c} \quad (4.2)$$

$$\frac{dS_1}{dt} = \Gamma V_g \frac{dg}{dN} (N - N_0) S_1 - \frac{S_1}{\tau_p} - \frac{\beta_{sp} N}{\tau_c} \quad (4.3)$$

ここで、 N はキャリア密度、 N_0 はキャリア注入前のキャリア密度、 V_g は活性層体積、 dg/dN は微分利得、 S は光子密度、 τ_c はキャリア寿命、 τ_p は光子寿命、 β_{sp} は自然放出光係数をそれぞれ表している。添え字の 0 または 1 は縦モード番号を意味する。

② 適切な非線形モデルの追加

レーザ内部の光の非線形効果を考慮するにあたり、位相と振幅にそれぞれ影響を与える非線形効果を検討した。詳細を次節で述べる。なお、今回は取り上げなかった非線形効果として、光子密度の二乗に比例して光学損失が増加する二光子吸収(TPA: two photon absorption)や半導体内部の自由キャリアによる光の吸収に基づく自由キャリア吸収(FCA: free carrier absorption)、入力光強度が極度に強いときに発生する誘導ラマン散乱(SRS: Stimulated Raman Scattering)などがある。詳細は文献 [73]に記載されている。

4.6.1 位相の非線形性

マイクロリングレーザ内部の光強度は、リングの周回効果によって強い状態にある。この状況下ではカー効果 [74]が発生し、マイクロリングの屈折率が変化する [75] [76]ことが考えられる。加えて、マイクロリングレーザは出力導波路端面に強い反射(17%前後)を持つため反射戻り光が生じる。この反射戻り光がバスライン導波路の中でファブリ・ペロー反射を起こし、波長に対して周期的なリップルを生じさせる。ファブリ・ペロー反射光の一部が波長依存性を持ってマイクロリングレーザに結合し、マイクロリングレーザの光出力に影響を与える。更に、状態遷移時などにマイクロリングレーザの出力が変化すると、マイクロリングの等価屈折率が変わって発振波長が変化し、反射戻り光の量の変動したように見えて、結果としてレーザ内部の損失が変わり、結果として安定発振する波長非線形に変わると考えられる。これについて順を追って記述する。

図 4-20 にデバイスのレイアウトを示す。マイクロリングレーザは多重量子井戸(MQW)半導体マイクロリングと入力/出力バスライン導波路を備えている。バスライン導波路の両端面にはマッチングオイルが充填されており、バスライン導波路からの光出力を光ファイバ(先球ファイバ)にて受光する。ここでマイクロリングの中心に対して左右対称なデバイスレイアウトを仮定した。すなわち、マイクロリングとバスラインの結合領域からバスライン導波路の右側および左側の長さは等しいものとした。注入電流は、MQW 上に形成された別個の電極によって独立して制御される。外部の波長調

整が可能なレーザ光源からの光は入力バスライン導波路に入射され、マイクロリングレーザの発振に影響を及ぼす。本研究においては、外部入射光の波長はマイクロリングレーザの波長と完全に一致するものとする。

デバイスの詳細について補足する。マイクロリングレーザとバスライン導波路が光学的に結合するほど近接して形成されている。バスライン導波路の端面と光ファイバの間には反射を低減するためのマッチングオイルが充填されているが、反射を十分に抑制することが目的ではなく、ある程度の強度で反射させることを目的としている。マイクロリングレーザは電流を注入するとレーザ発振を起こし、レーザ発振時にマイクロリング内部を周回する光は、時計回り(CW:clock-wise)および反時計回り(CCW:counter-clock-wise)の2種類が発生する。ただ、本章では計算および議論を簡便化するためにその2つを特に区別しないこととした。つまり、どのようなレーザ発振状態にあってもCW/CCWが等しい強度で発生するものとした。なお、この過程はマイクロリングレーザの発振の向きを問わない現象を記述する際には、特に無理な仮定ではなく、度々用いられる仮定であることを補足する。現実的にもCW/CCWが同強度で生じることがある。

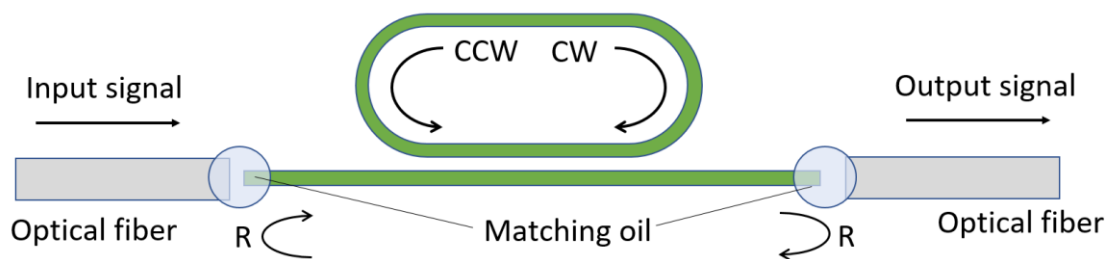


図 4-20 マイクロリングレーザのレイアウト

MQW 半導体マイクロリングレーザの内部には電流注入に伴うレーザ発振光に加えて外部からの入射光によって、高出力の光が存在するため、前述のカー効果による非線形効果が発生し得る。一般的にはレーザの内部に蓄積された光の強度が 100mW を超えるときに発生すると考えられている。内部の光が小さいときは、その影響はごくわずかで、結果として無視して差し支えない。しかしながら、本構成の様に、導波路端面にある程度の強度の反射がある場合は、この限りではないことを本節で明らかにする。以下の数式を用いて詳細を説明する。まず、バスライン導波路の端面とマッチングオイルの間に屈折率のミスマッチがある場合の電界強度反射率Rを次の様に求める。また、マイクロリングレーザの発振波長を次の様に求める。

$$R = \frac{(n_b - n_{oil})^2}{(n_b + n_{oil})^2} g_b \quad (4.4)$$

$$\lambda = \frac{n_r L_r}{M} \quad (4.5)$$

ここで、マイクロリングレーザとバスライン導波路の等価屈折率にカー効果を踏まえて以下の関係式があるとする。

$$n_r = n_{r0} + k_{Kerr} \sum S \quad (4.6)$$

$$n_b = n_{r0} \quad (4.7)$$

ここで、Rはバスライン導波路の端面のパワー反射係数、 n_b はバスライン導波路端面の等価屈折率、 n_{oil} は屈折率整合オイルの屈折率、 g_b はバスライン導波路の光の増幅率、 n_r はマイクロリングレーザの等価屈折率、 L_r はマイクロリングレーザの周回長、 M は共振次数である。また、 n_{r0} は初期状態におけるマイクロリングレーザの等価屈折率、 k_{Kerr} はカー効果係数、 S はマイクロリングレーザ内部の光子密度である。

図4-21は上記式から導かれる屈折率と光子密度の関係を示し、フォトン密度が増加するにつれて非線形的にマイクロリングレーザの等価屈折率が減少することを示している。図4-22は、マイクロリングレーザにおけるフォトン密度と波長の関係を示している。ここで、カー効果係数がとり得る値として、 -1.4×10^{-20} から $-5.5 \times 10^{-20} \text{ 1/cm}^3$ を仮定した。この値の中心値は -2.7×10^{-20} であり、これは文献 [75]を参考にマイクロリング内の周回数を考慮して算出したものである。図4-21と同様に、図4-22はマイクロリングレーザ内部の光子密度が増加するにつれて、マイクロリングレーザの共振波長が非線形的に短波長側に波長シフト⁵⁰していることが分かる。

⁵⁰ 短波長側に波長シフトすることをブルーシフト、長波長側に波長シフトすることをレッドシフトという。

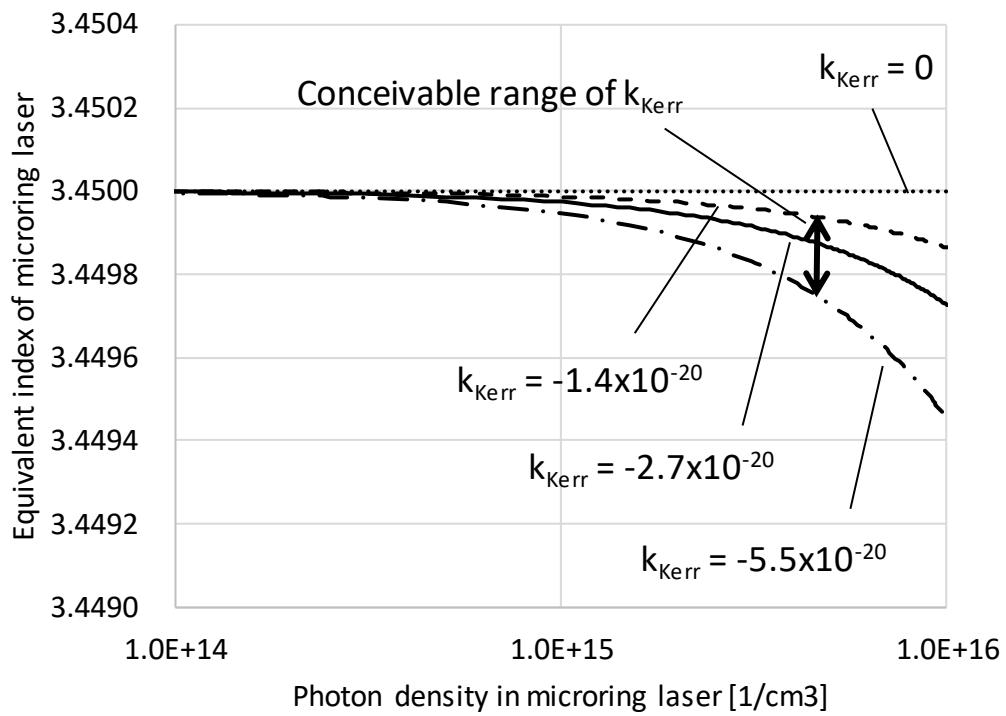


図 4-21 フォトン密度と屈折率の関係

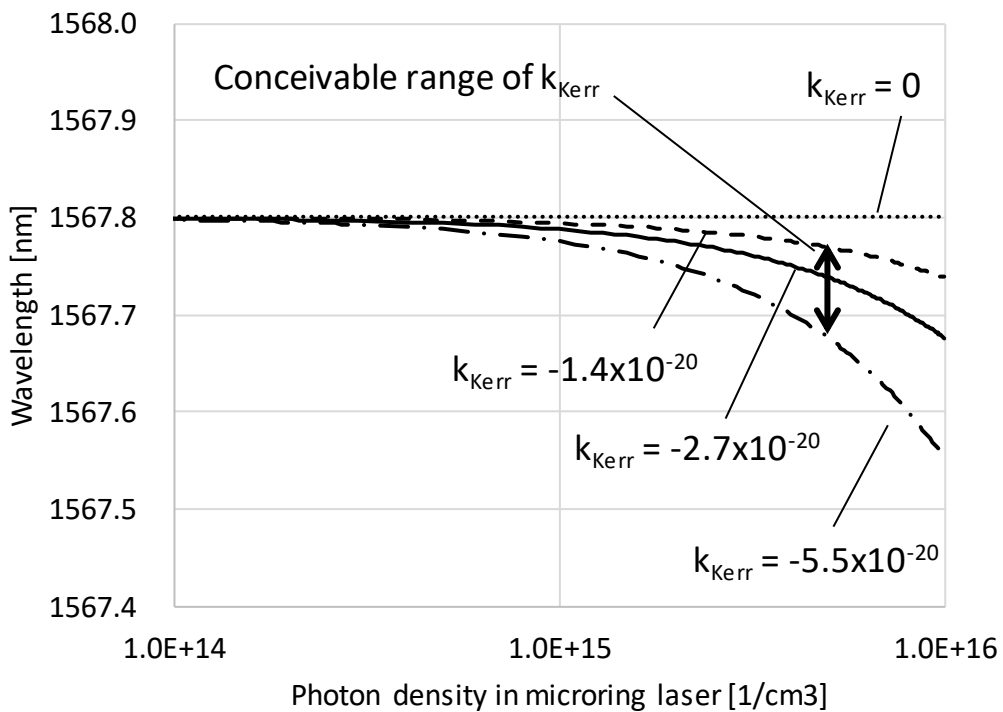


図 4-22 フォトン密度とマイクロリングレーザの発振波長

マイクロリングレーザとバスライン導波路の電力結合効率 K の定義を図 4-23 に示す。マイクロリングレーザの内部を導波する光のうち、バスライン導波路に結合して抜けていく電力強度を K (電力結合効率) とする。バスライン導波路の両端面にマッチングオイルに起因した反射があるため、バスライン導波路内部に定在波が発生し、その一部がマイクロリングレーザに結合して帰還するため、その結果として、電力結合効率は複雑な波長の関数となる。この構成における結合効率の導出を末尾付録にて記述する。

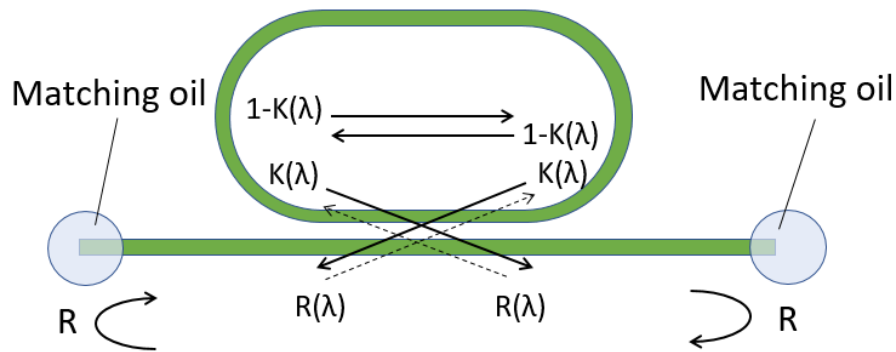


図 4-23 結合効率 $K(\lambda)$ の定義

$$K(\lambda) = k - \frac{k^2 R}{1 + (1 - k)R - 2\sqrt{(1 - k)R} \cos(2\pi \frac{n_b L_b}{\lambda})} \quad (4.8)$$

ここで、 $K(\lambda)$ は、マイクロリングレーザとバスライン導波路との結合効率であり、改めて波長の関数であることを示している。 k は、反射を考慮しない場合のリングレーザとバスラインとの間の電力結合効率である。カー効果およびバスライン導波路の端面反射を考慮すると、結合効率はマイクロリングレーザの発振波長 λ によって周期的に変化することが分かる。式(4.6)、(4.7)を式(4.8)に代入すると、次の関係が得られる。

$$K(S) = k - \frac{k^2 R}{1 + (1 - k)R - 2\sqrt{(1 - k)R} \cos(2\pi \frac{n_b L_b}{(n_{r0} + k_{Kerr} \sum S) M L_r})} \quad (4.9)$$

マイクロリングレーザとバスライン導波路の結合効率とマイクロリングレーザ内部の光子密度の関係を図 4-24 に示す。結合効率がマイクロリングレーザ内部の光子密度によって変化することが確認できる。カー効果係数は $-2.7 \times 10^{-20} \text{ 1/cm}^3$ で計算した。結合効率がマイクロリングレーザ内部の光子密度によって変化するという事は、光子密度の変化によって、マイクロリングレーザの内部損失⁵¹が変化することを意味している。従って、レーザの発振の安定性が内部光子密度によって変化することを表し、発振状態の遷移時などに内部光子密度の変化が大きいと、複数のレーザ発振可能条件があつて、結果としてフリップフロップ動作を起こす可能性があることを示している。

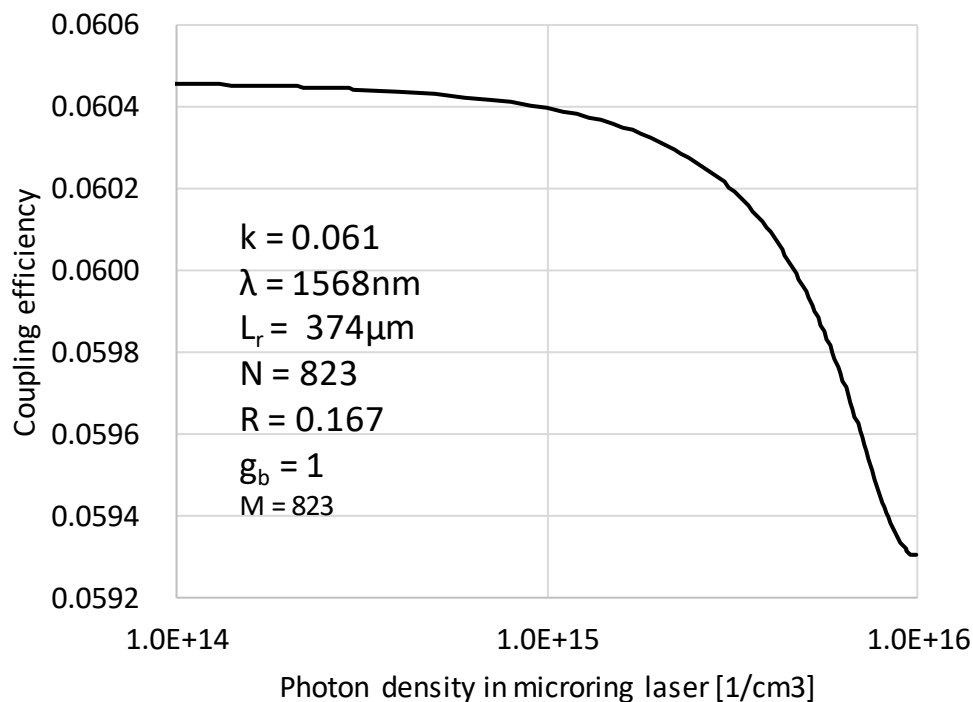


図 4-24 フォトン密度と結合効率 $K(\lambda)$

4.6.2 振幅の非線形性

前述の位相による非線形効果に加えて、振幅にも非線形効果が生じると考えられる。多くの場合においては、下記の式のように、キャリア注入によって利得が線形的に発生 [77] [78]し、振幅が線形的に増幅されると考える。

$$g(N) = \Gamma V_g \frac{dg}{dN} (N - N_0) \quad (4.10)$$

⁵¹ 厳密にはミラー損失を意味する。

上式の Γ は閉じ込め係数、 V_g は群速度、 dg/dn は微分利得、 N_0 は透明電流密度である。ここで、発生する利得が線形ではなく、レーザ内部に存在する光子の密度によって変化する [77] [78] 非線形な利得が生じると仮定する。また、発振しているモードの光子密度 S_0 が非発振のモードの光子密度 S_1 の利得に対して、影響を及ぼすものと仮定する。この過程は一般的に非線形利得と呼ばれ、古くから確認されている⁵²非線形効果の一つである。非線形利得は次の2式を用いて表せられる。

$$G_0(N) = \frac{g(N)}{1 + \epsilon_s S_0 + \epsilon_c S_1} \quad (4.11)$$

$$G_1(N) = \frac{g(N)}{1 + \epsilon_c S_0 + \epsilon_s S_1} \quad (4.12)$$

ここで、 ϵ_s は自己利得飽和係数、 ϵ_c は相互利得飽和係数である。図 4-25 に $G(N)$ を $g(N)$ で規格化した、 $G(N)/g(N)$ と光子密度の関係を示す。

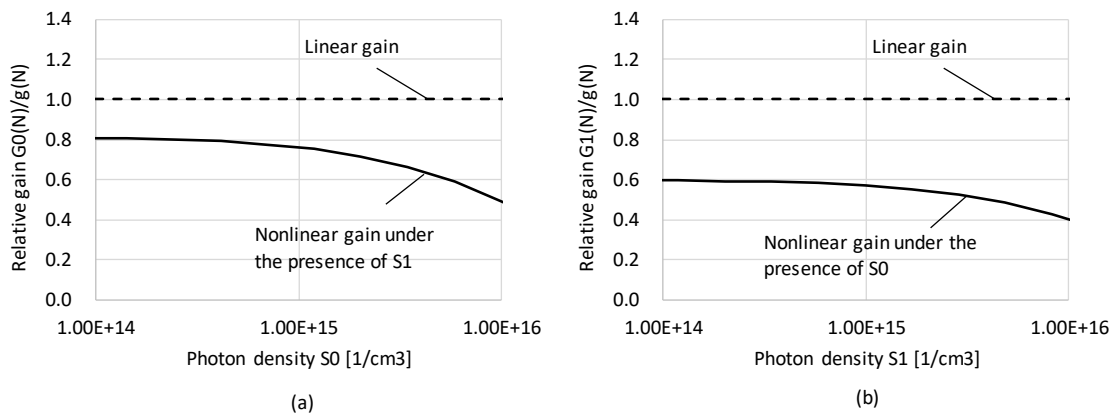


図 4-25 フォトン密度に対する非線形利得 (a)発振モード (b)非発振モード

図 4-25 より、内部光子密度が増加するにつれて、発振モードの利得が抑制されるが、それ以上に、非発振モードの利得が抑制され、結果として発振モードの発振安定性が増すことを暗に示している。

⁵² 著者が知る限りでは 1987 年から報告がある。詳細は文献 [77]を参照のこと。

4.6.3 非線形性を取り入れたマルチレート

マルチレート方程式によるレーザ動作の理論計算についてフローを説明する。レーザ動作の理論計算についてはこれまでに数々のものがある [79] [80] [81] [82] [83]が、インバータ動作とフリップフロップ動作を同一のデバイスで実現できることを説明するモデルは、筆者が知る限り今回のモデルが初めてである。

シミュレーションのフローは表 4-2 に示す通りである。まず、マイクロリングレーザとバスライン導波路に注入される電流密度の関数として内部の光子密度に(光強度と比例関係)を計算する。光子密度が高い方の波長を λ_0 とし、主発振モードとする。また、 λ_0 に隣接する波長 λ_1 で、主発振モードよりも低い光子密度強度で発振しているモードを副発振モードとする。次に、 λ_1 の波長のCW (continuous wave)光をバスライン導波路に入射して波長の変化を促す。最後に注入していたCW光を停止し、発振波長の変化を計算する。 λ_0 に戻るか、 λ_1 のままなのかで、インバータ動作かフリップフロップ動作か分かれる。ここで、計算を簡単にするために、計算するモードは、主発振モードと副発振モードとの二つのみ⁵³とし、また、発振方向のCWとCCWを区別しない。CWとCCWを区別しない理由は、レート方程式で光子を取り扱う際に、発振方向が何も情報を持たないためである。

表 4-2 シミュレーションのフロー

状態	詳細	波長
A: 初期状態	マイクロリングレーザに電流を注入して、内部の光子密度を計算する。	λ_0 : 主発振モード λ_1 : 副発振モード
B: CW 光注入	バスライン導波路にCW光を入射してマイクロリングレーザの波長変化を発生させる。	
C: 光注入停止	CW光の注入を停止して、マイクロリングレーザの光子密度を計算する。	$\lambda_0 > \lambda_1$: インバータ動作 $\lambda_0 < \lambda_1$: フリップフロップ動作

⁵³ レーザ発振時には無数の副発振モードが存在するが、強度が低いものとして考慮に入れない。

これまでのモデルを基に、マルチレート方程式は次の様に記述することができる。

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I}{qV} - V_g \frac{dg}{dN} \left(\frac{(N - N_0)S_0}{1 + \epsilon_{11}S_0 + \epsilon_{12}S_1} + \frac{(N - N_0)S_0}{1 + \epsilon_{22}S_1 + \epsilon_{21}S_0} \right) - \frac{N}{\tau_c} \quad (4.13)$$

$$\frac{dS_0}{dt} = \Gamma V_g \frac{dg}{dN} \frac{(N - N_0)S_0}{1 + \epsilon_{11}S_0 + \epsilon_{12}S_1} - \frac{S_0}{\tau_p} + \frac{\beta_{sp}N}{\tau_c} \quad (4.14)$$

$$\frac{dS_1}{dt} = \Gamma V_g \frac{dg}{dN} \frac{(N - N_0)S_1}{1 + \epsilon_{22}S_0 + \epsilon_{21}S_0} - \frac{S_1}{\tau_p} + \frac{K(\lambda)S_{in}}{\tau_p} + \frac{\beta_{sp}N}{\tau_c} \quad (4.15)$$

$$\frac{1}{\tau_p} = \frac{C}{n} \alpha_i + \frac{1}{2L_r} \ln\left(\frac{1}{1 - K(\lambda)}\right) \quad (4.16)$$

ここで、N はキャリア密度、S₀ はλ₀ の光子密度、S₁ はλ₁ の光子密度、t は経過時間、τ_p は光子寿命、τ_c はキャリア寿命、α_i はマイクロリングレーザの内部損失である。

4.6.4 レーザ発振の遷移

末尾の付録に記載したパラメータにて計算したマイクロリングレーザの光子密度 S₀ と S₁ の遷移を図 4-26 に示す。マイクロリングレーザへの注入電流を 36.0mA と 41.6mA で計算を行った。これは、前述の先行研究によって、36.0mA でインバータ動作を確認し、41.6mA でフリップフロップ動作が確認されたことによる。図 4-26 内部に記載した様にレーザ発振が A/B/C の3つの領域に分けられる。A のラベルがついた初期状態では、λ₀ の光子密度がλ₁ の光子密度より高い状況にあって、これはマイクロリングレーザの発振スペクトルのメインピークがλ₀であることを示している。ラベル B で示す波長λ₁ の CW 光注入領域では、λ₀ の光子密度が低下し、代わりにλ₁ の光子密度が増加している。言い換えれば、λ₁ の CW 光注入によってマイクロリングレーザの発振波長が変わったことを意味している。ラベル C の最後の領域は、CW 光注入を停止した後の領域である。

図 4-26(a)は、マイクロリングレーザへの注入電流 36.0mA において、CW 光注入停止後に発振波長がλ₀に戻る様子を示している。つまりインバータ動作である。一方、図 4-26(b)はマイクロリングレーザへの注入電流 41.6mA CW 光注入停止後に発振波長がλ₁のままであることを示している。これはフリップフロップ動作である。これらの結果より、MQW 半導体マイクロリングレーザが注入電流の制御によってインバータ動作もフリップフロップ動作も同一のデバイスで実現できることを理論的に示している。

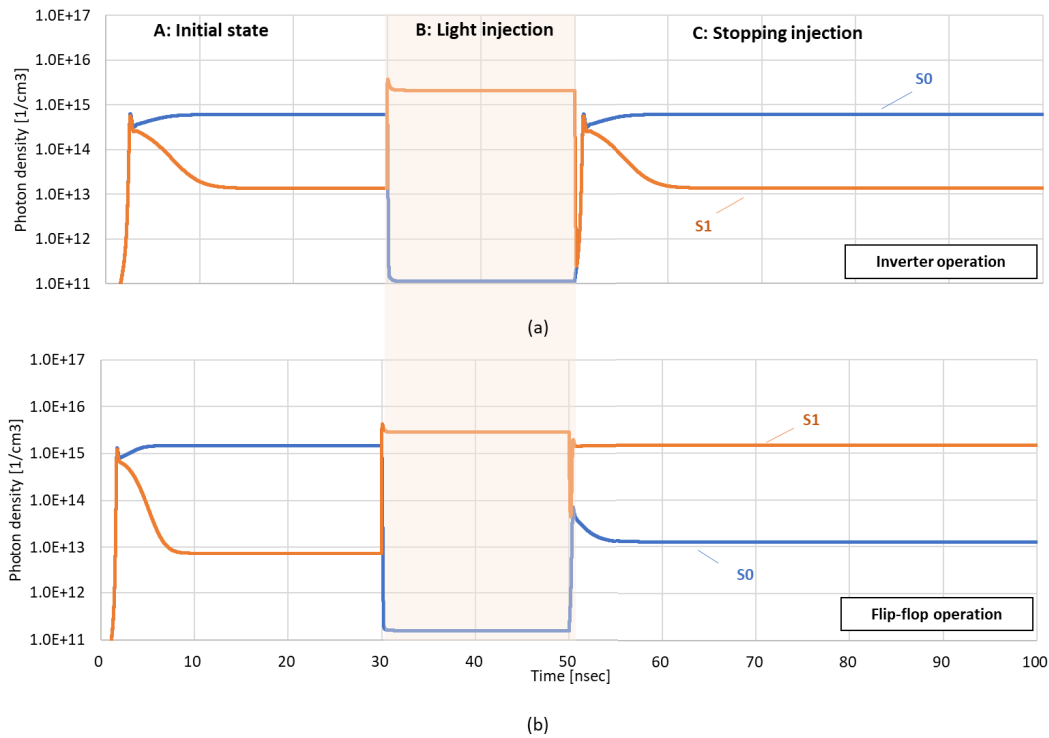


図 4-26 レーザ発振状態の遷移 (a)注入電流 36.0mA, (b)注入電流 41.6mA

4.6.5 計算結果の検討

これまでに構築してきた理論モデルの妥当性を検証するために、本節では先行研究の評価結果とシミュレーション結果の比較を行う。デバイスの構造および実験の評価系は文献 [27]に記載されているものである。

図 4-27 は、先行研究の評価結果を整理したものである。 λ_0 (1569.24 nm)と λ_1 (1567.56 nm)におけるマイクロリングレーザの光出力を示している。 λ_0 と λ_1 は隣接波長の関係にある。図中のそれぞれの点は、マイクロリングレーザへの注入電流が 36.0mA の時における、CW 光注入前の初期状態(シミュレーションにおける領域 A に該当)、CW 光注入中の状態(同じく領域 B)、また CW 光の注入を停止した状態(同じく領域 C)のものである。図中のプロットが右下にある場合は、 λ_0 の光出力が λ_1 の光出力よりも高い状態にあり、逆にプロットが左上にある場合は、 λ_1 の光出力が λ_0 の光出力よりも高い状態にあることを表している。先行研究による評価結果では、初期状態および λ_1 の注入を停止した後、 λ_0 の光出力は λ_1 の光出力よりも高い状態にあった。これは発振波長が λ_0 であることを意味し、すなわちインバータ動作であることを表している。インバータ動作の消光比は 8dB であった。図 4-28 は、 λ_0 と λ_1 の出力光強度を、図 4-27 と同様に、CW 光注入前の初期状態、CW 光注入中の状態、また CW 光の注入を停止した状態のものである。ただし、マイクロリングレーザへの注入電流は 41.6mA であり、図 4-27 と注入電流が異なる。初期状態においては λ_0 の光出力は λ_1 の光出力より高かったが、CW 光の注入停止後には λ_0 の光出力が λ_1 の出力を下回った。これは、マイクロリングレーザの発振波長が λ_1 のままであることを意味し、すなわち、

前節で議論したモデルに基づくフリップフロップ動作であることが分かる。

図 4-29 に、マイクロリングレーザへの注入電流に対する CW 光の注入停止後の SMSR を示す。SMSR は λ_0 と λ_1 の強度差で定義し、 $\text{SMSR} > 0$ の時は、フリップフロップ動作を表し、 $\text{SMSR} < 0$ の時はインバータ動作を表している。先行研究の実験結果である図 4-27 および図 4-28 から抽出した 2 点を図 4-29 にプロットした。またマイクロリングレーザへの注入電流を振ってシミュレーションした結果を図 4-29 に重ねてプロットした。実験結果とシミュレーション結果は傾向が十分に一致していることが分かる。十分な一致が見られることから、本節の計算モデルは正当なものであると考えられる。

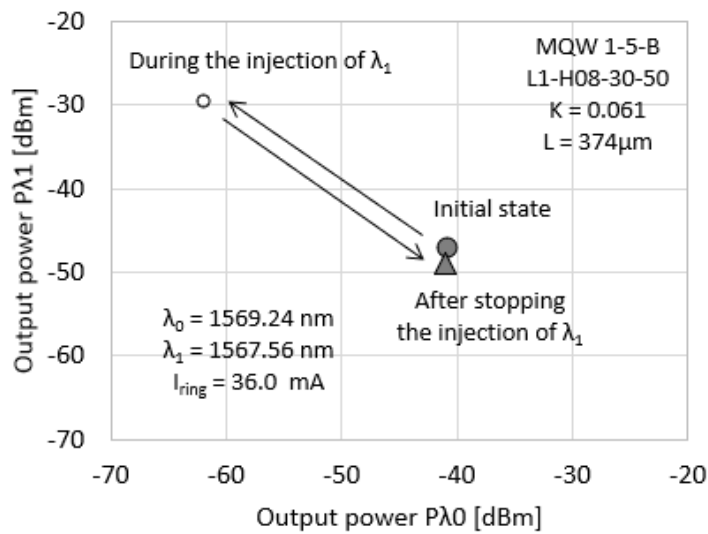


図 4-27 インバータ動作の実験結果

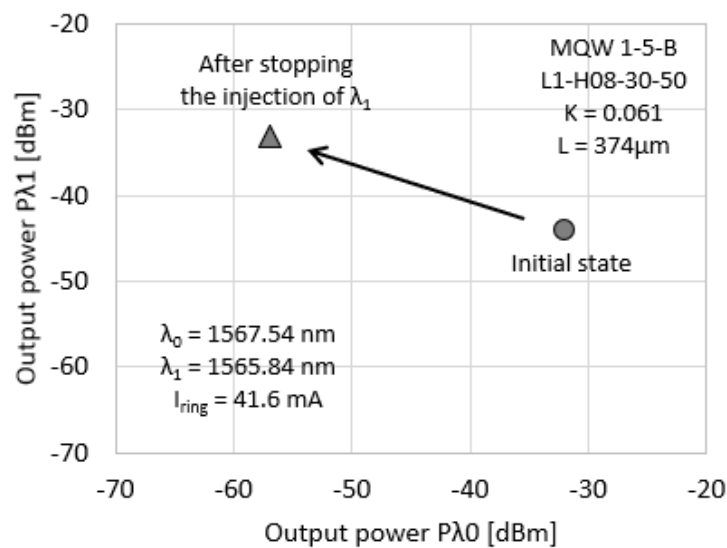


図 4-28 フリップフロップ動作の実験結果

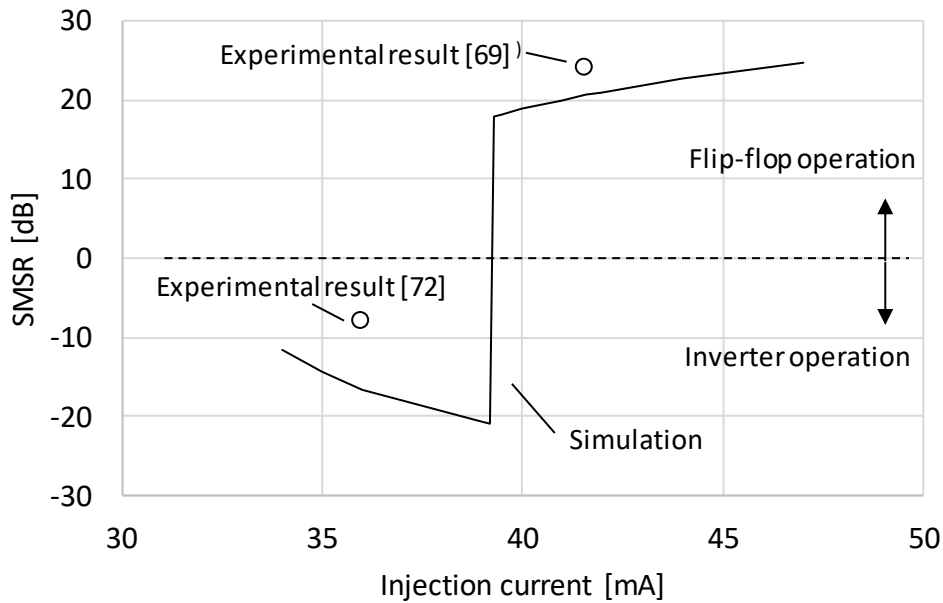


図 4-29 実験結果とシミュレーション結果の比較

これらの検討結果は定性的にも正しいと考えることができる。図 4-29 のシミュレーション結果を表すプロットはマイクロリングレーザへの注入電流があるしきい値を超えると、フリップフロップ動作を起こすことを示している。それは、あるしきい値で非線形光学が発現することを示している。

4.6.6 支配的モデルの検討

これまでに、位相と振幅の非線形効果のモデルを提案し、それらをマルチレート方程式に取り込み、マイクロリングレーザの挙動を検討してきた。ここでは、位相と振幅それぞれの非線形効果について、どちらの効果がより顕著であるかを調べるために、2 つの追加の数値シミュレーションを行った。1 つは位相の非線形効果のみ⁵⁴を取り入れたシミュレーションであり、もう 1 つは振幅の非線形効果のみ⁵⁵を取り入れたシミュレーションである。それぞれマイクロリングレーザへの注入電流は 41.6mA である。これはフリップフロップ動作が確認された電流値である。

数値シミュレーションの結果を図 4-30 に示す。図 4-30(a)は、位相の非線形効果のみの場合の結果を示す。CW 光の注入停止後は、発振波長が λ_0 に戻ったことを意味し、これはインバータ動作であることを表している。図 4-30 (b)は、振幅の非線形効果のみの場合の結果を示す。図 4-30(a)とは異なり、図 4-30 (b)では、CW 光の注入を停止後の発振波長は λ_1 のままであった。これはフリップフロップ動作を表している。これらのシミュレーション結果から、フリップフロップ動作を実

⁵⁴ 位相の非線形効果のみとは、カー効果と端面反射のみのモデルである。

⁵⁵ 振幅の非線形効果のみとは、利得の非線形性のみを取り入れたモデルである。

験的が確認された 41.6mA においては、位相の非線形効果より、振幅に対する非線形効果が支配的であると考えられる。

しかしながら、今後の研究においては、マイクロリングレーザ内部の光子密度の増加、および、バスライン導波路の反射率の向上によって、位相の非線形効果の影響が強くみられるようになると思われる。バスライン導波路との結合効率が低い⁵⁶マイクロリングレーザを用いることで、マイクロリングレーザ内部の光の周回数が増加し、非線形効果が強くみられるようになると思われる。また、CW 光の波長とマイクロリングレーザの波長にミスマッチがあっても影響を及ぼすようになると思われる。

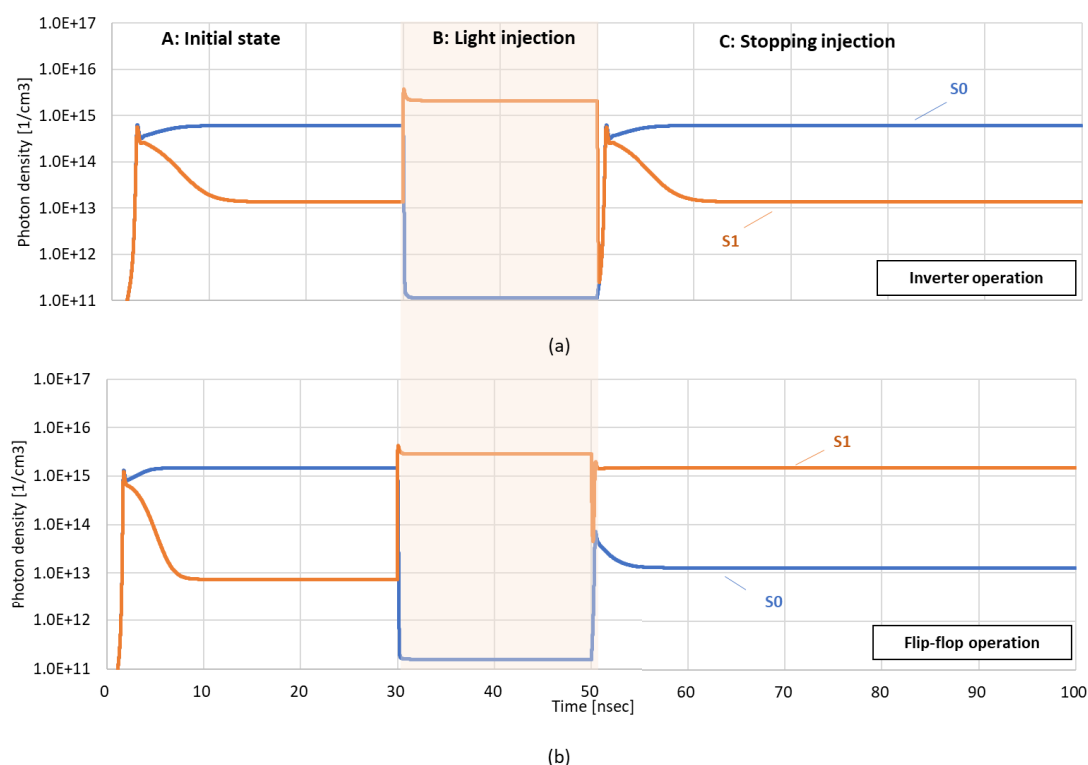


図 4-30 非線形効果の優位性比較

4.7 4章のまとめ

本章では InGaAs/InGaAsP から成る MQW 半導体マイクロリングレーザにおける隣接波長間のインバータ動作およびフリップフロップ動作について理論検討を行ってきた。カー効果と端面反射に基づく位相の非線形効果がレーザの発振状態に影響を与えることを明らかにした。また、自己利

⁵⁶ 結合効率が低い状態を Q 値(quality factor)が高いという。結合効率が低いと(Q 値)が高いと、内部の周回数が増え、結果として内在する光の強度が強くなることから、カー効果が発生しやすくなると考えられる。

得飽和および他者利得飽和に基づく振幅の非線形効果が重要な影響を与えることを明らかにした。位相と振幅の非線形効果を取り入れたシミュレーションにて、同一のデバイスでインバータ動作とフリップフロップ動作を実現できることを示した。加えて、先行研究の実験結果と比較することで、今回構築したモデルが妥当であることを示した。また、位相と振幅の非線形効果のうち、どちらがより有意な効果を持つかを検討し、現在の実験結果は振幅の非線形効果が有意であることを明らかにした。

第5章 他機関との成果比較と今後の課題

本章では前章までに得られた成果について、他機関との成果比較を行う。成果比較を行うことで、本研究の進捗を計測し、また本研究の今後の課題を抽出する。

5.1. 波長可変光源としての比較

本論文の 3 章におけるマイクロリングレーザは外部共振器を導波路で構成することにより、狭線幅でコンパクトなものが実現できた。また、後段に設けた光ブースターアンプによって高出力化を実現できた。これらの成果について他機関との比較を行う。他機関では次の 4 方式が盛んに研究されている。DFB レーザ、DBR レーザ、DR レーザ、空間結合外部共振器型レーザである。それぞれの特徴を次に述べる。

5.1.1 Distributed Feedback (DFB) レーザ

DFB レーザは、波長の異なる複数の DFB レーザについて、それぞれの出力を MMI(multi-mode interferometer)、または AWG (Arrayed waveguide grating)で合波し、その出力を後段の SOA でブーストする InP ベースの集積レーザ [84](図 5-1)である。筆者が知る限り、MMI タイプの DFB レーザは波長可変光源としても最も早く商用化されたレーザである。このレーザの波長可変の原理は次の通りである。DFB レーザを複数個搭載し、それぞれのレーザの波長は出力範囲が決められている。所望の波長に対応できるレーザに電流を流してレーザ発振させる。デバイスの温度を制御することで、出力波長を所望の波長に合わせこむ。本レーザは個別のレーザの合波に MMI が使用されることがほとんどであるため、内部の光学損失が大きい(~10dB)ことから、後段のブースト SOA で光を増幅するとしても、高出力化がやや困難である。MMI の代わりに AWG を用いた AWG タイプはロスが改善されて高出力化が望める可能性があるが、どちらのタイプでもキャビティ長を長くすることができない⁵⁷ことから、狭線幅化に難がある。

⁵⁷ 狭線幅を実現するためにレーザキャビティ長を長くする必要がある。しかしながら狭線幅を実現するために必要なだけキャビティ長を長くすると、デバイスサイズが大きくなるため、デバイスの取れ高が大幅に減る。InP を大変高価な材料であるため大幅なコスト悪化になる。従って、キャビティ長を長くすることは大変困難である。

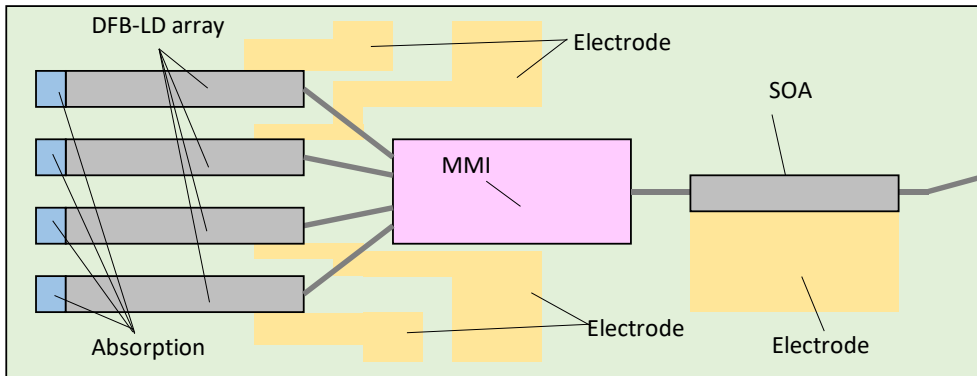


図 5-1 DFB レーザの構造

5.1.2 Distributed Brag Reflector (DBR) レーザ

DBR レーザは DFB レーザと同様に、InP ベースの集積レーザである。レーザの両端には DBR がついており、それぞれの DBR の反射波長を制御することで DBR レーザの発振波長を制御する (図 5-2)。多くの場合においては DBR レーザの後段にはブースト SOA が集積されている [85]。光出力は 16dBm、線幅は 500kHz 程度。DBR レーザも DF レーザと同様にキャビティ長を長くすることができないため、狭線幅化が困難である。

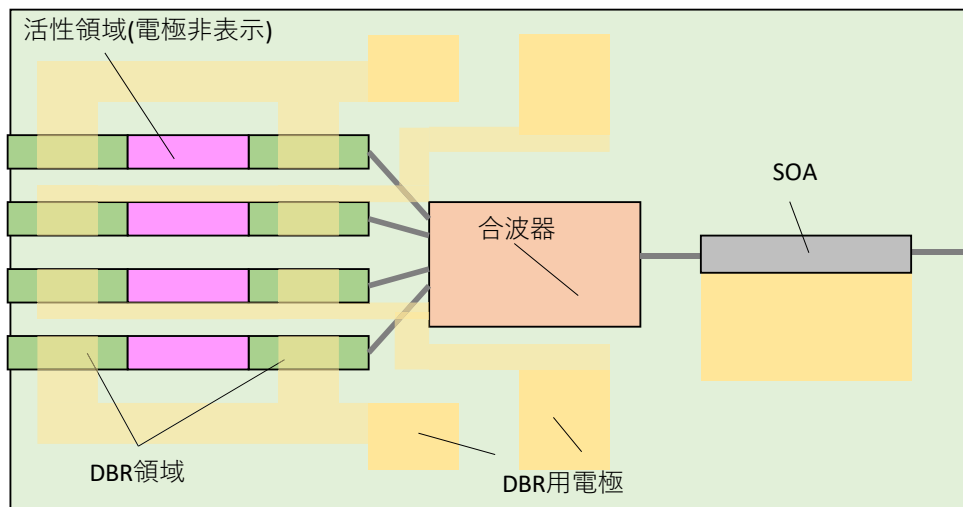


図 5-2 DBR レーザの構造

5.1.3 Chirped Sampled-Grating (CSG) レーザ

CSG レーザ [86]は DFB と DBR を組み合わせたもので、それぞれのグレーティングにはサンプルドグレーティングが用いられている。サンプルドグレーティングとはグレーティングピッチを緩やかに変化させたグレーティングであり、反射波長を DBR と比較してある程度広帯域にすることができる。DFB 側のグレーティングと合わせて、レーザの発振波長を制御することができる。SSG レーザの

後段にはブースト SOA が集積されている(図 5-3)。光出力は 16dBm、線幅は 500kHz 程度。SSG レーザも同様の理由で狭線幅化が困難である。ただ、本レーザはほかのどのタイプの波長可変レーザよりも波長の掃引速度が速いため(サブミリ秒オーダー)、早い掃引速度を必要とする OCT(optical coherent tomography)用の光源として用いられている。

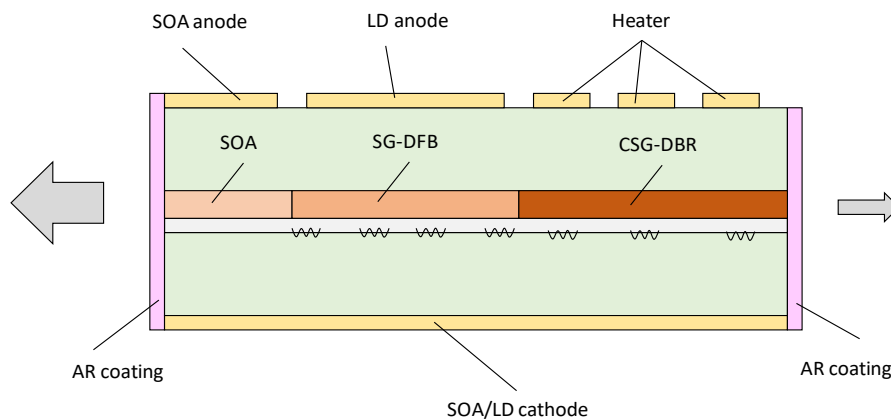


図 5-3 CSGレーザの構造

5.1.4 空間結合外部共振型レーザ

空間結合外部共振型レーザは、SOA と、2 つの透過波長が異なるエタロンおよび全反射ミラーからなるレーザ [87] [88](図 5-4)である。エタロンの透過波長を制御することで、SOA に帰還する波長が変わり、発振波長が制御される。一般的に商用利用されている同レーザには、後段に SOA がつけられていない。一般的に空間結合型はサイズがその他方式よりも大きくなるため、後段 SOA を設けることがスペース上困難であることが理由の一つであると思われる。また、空間結合型は光学特性が外部振動によって変化しやすいため、部品点数を極力多くしないことが構造上の要求であると思われる。光出力はブースト SOA がないながらも内部光学系の損失が大変小さいため 16dBm の出力が実現されている。また本レーザは空間結合タイプであるため共振器長をcmオーダーに長くすることができる。従ってどのタイプのレーザよりも狭線幅(<100kHz)である。狭線幅であることからデジタルコヒーレント光通信への適用に向いている。ただし、内部に空間結合をもつために振動に弱いという欠点がある。

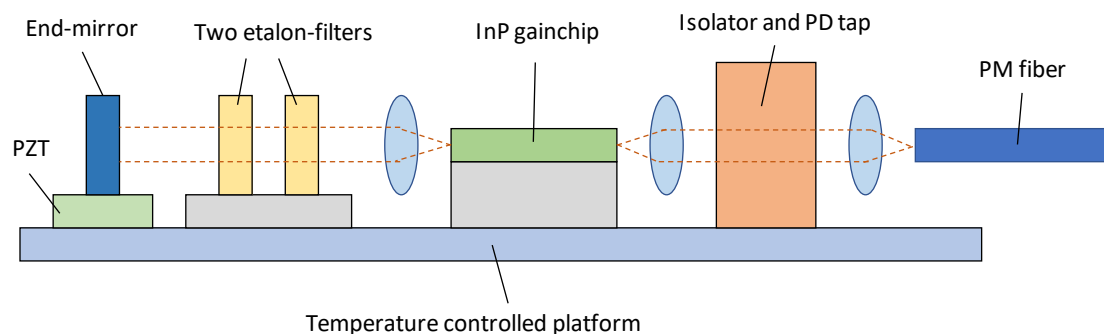


図 5-4 空間結合外部共振型レーザーの構造

5.1.5 導波路外部共振型レーザー

本レーザーは空間結合外部共振型レーザーの空間光学系を導波路で実現したものである [89](図 5-5)。本研究で採用した構造である。透過波長が異なる2つのリング共振器および全反射ミラー⁵⁸から構成されている。導波路タイプであることからキャビティ長を長くすることができる。InP とは異なり、シリカまたは Si で構成されるため、キャビティ長を長くしてもコスト悪化にはつながらない。また、SOA および導波路型波長フィルタを同一のプラットフォーム上に実装するため、振動に強いというメリットがある。本研究と同じ方式を採用している⁵⁹研究機関(東北大学山田・北研究グループ)の構造を下記に示す。同グループでは、1.3um 帯の量子ドットと組み合わせて、1.3um 帯の波長可変光源も報告している。

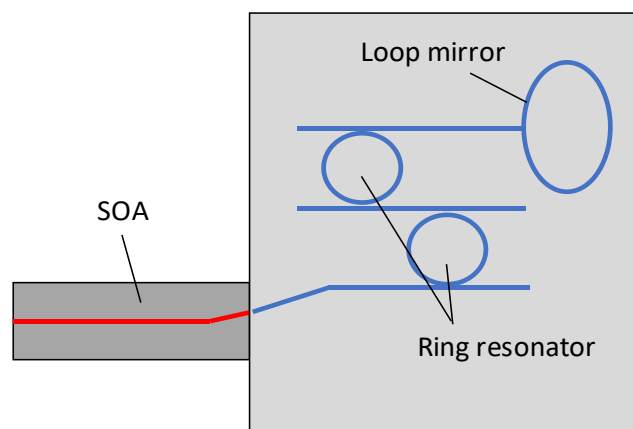


図 5-5 導波路外部共振型レーザーの構造

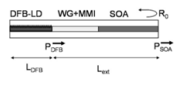
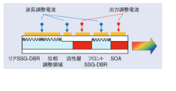
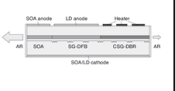
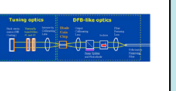
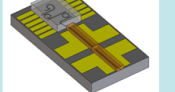
⁵⁸ 導波路型 ECL における全反射ミラーはその形状がループ形状であることから、ループミラーと呼ばれることが多い。

⁵⁹ 導波路型 ECL としての基本構造は同じであるがブースト SOA は搭載していない。

5.1.6 波長可変光源としての比較まとめ

それぞれの方式を表 5-1 にまとめる。表 5-1 を見ると、本研究は光通信用の波長可変光源に向けて特性を特化したものであることが改めて分かる。また、本研究は波長可変光源として十分な特性を示していることが分かる。

表 5-1 波長可変光源の構成と特性のまとめ

Type	DFB array	DBR	CSG-DR	External cavity	External Cavity by si waveguide
Structure					
Integration	InP based monolithic	InP based monolithic	InP based monolithic	Micro optics	Passive alignment
Filter	$\lambda/4$ -shift Grating	Sampled-grating	Chirped sampled-grating	FP-etalon	Ring resonator
Output Power	16dBm	16dBm	16dBm	16dBm	18dBm
Linewidth	300kHz	500kHz	300kHz	100kHz	100kHz
Features	<ul style="list-style-type: none"> Boost SOA Short cavity 	<ul style="list-style-type: none"> Boost SOA Short cavity 	<ul style="list-style-type: none"> Boost SOA Short cavity 	<ul style="list-style-type: none"> Single SOA Long cavity 	<ul style="list-style-type: none"> Boost SOA Long cavity

5.1.7 本研究の残存課題

論文発表時の 2015 年時点で光通信用波長可変光源として世界最高出力(100mW、20dBm)を達成できた。線幅もほぼトップクラスの特性(チップ単体で数十 kHz、uTLAとして 100kHz)を実現できた。目標とする特性は得られたと考えているが、すべての課題を解消できたわけではないと考えている。残存課題を下記に記述する。

① 更なる高出力化

現在の 20dBm(100mW)から 23dBm(300mW)を目指す。そのためには、内部の光学系の損失を更に低減することが必要である。具体的には、導波路の導波損失、チップ間の結合損失である。また、ブースタ SOA の高出力化が必要であり、高出力化を実現するためには、ブースタ SOA の長尺化が必要である。ブースタ SOA を長くすれば、ブースタ SOA の放熱特性が良くなり、高出力化が期待できる。また光増幅中のブースタ SOA 内部でのキャリア枯渇が緩和されるので、高出力化が期待できる。ただ、ブースタ SOA で増幅すると、ブースタ SOA 端面

での反射が増える⁶⁰ため、増加する反射量が許容できる範囲内で高出力化を検討する必要がある。

② 更なる狭線幅化

現在の 100kHz から数 kHz を目指す。そのためには、導波路長を現在の cm オーダ前半から cm オーダ後半にする必要がある。導波路の長尺化はレーザ発振の不安定化をもたらす可能性があるため、安定的に発振できる条件を探しつつ、長尺化することが必要となる。

③ 発振波長範囲の高レンジ化

現在 80nm 程度の発振レンジであるが、これを 100nm(1520nm-1620nm)程度に拡大できれば、通信用光源として C 帯/L 帯の両帯域を一つの波長可変光源でカバーできる。そのためには、リング共振器の FSR の設計再検討が必要である。FSR の変更は多くの場合においてモード利得差を低下させるため、モード利得差の低下を抑えた上で FSR を変更するために、マイクロリング共振器とバスライン導波路の結合効率を低くする必要がある。結合効率を低くすると、マイクロリング共振器内部での周回数が多くなるため、フィルタが急峻になりモード利得差が高くなる。ただ、周回数の増加によってリング共振器内部の光学損失も大きくなるため、導波路損失の低減施策が必要になってくる。つまり、発振波長の高レンジ化を行うためには、つまるところ導波路損失の低減施策が必要である。

④ ヒータの低消費電力化

発振波長制御するために二つのヒータにそれぞれ 70-80mW 程度投入しているが、これを省電力化の観点から 10-30mW 程度にしたい。そのためには、ヒータに断熱構造(図 5-6)を設ける必要がある。リング共振器横に断熱溝を設けることで、リング横に逃げる排熱経路を削除する。これによって、ヒータの熱が逃げることなくリング共振器に伝えることができるため、省電力化を実現できる。

⁶⁰ ブースタ SOA の両端面は AR コートが施されているが、ブースタ SOA の出力が大きいため、AR コートでの反射が必ずしも無視できるものではない。

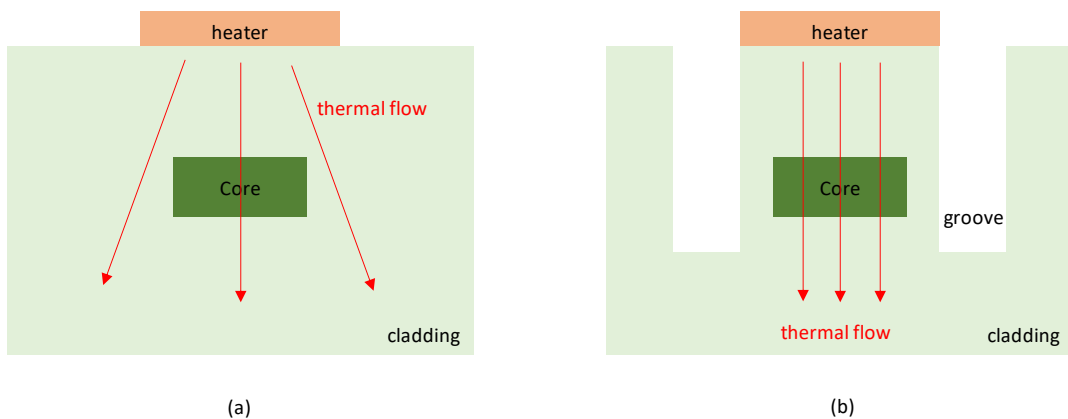


図 5-6 ヒータ近傍の断面図 (a)従来構造, (b)断熱溝構造

⑤ 1.3 μm 帯でのレーザ発振

本研究ではデジタルコヒーレント光通信への適用を目指して通信用波長の C 帯で設計を行ったが、1.3 μm 帯への設計も残存課題である。1.3 μm は主に近距離光通信に用いられており、近年はデータセンタ間での通信用途に需要が爆発的に増えている。1.3 μm 帯での波長可変光源を実現するためには、SOA を 1.3 μm 帯のものに変更することが必要である。また導波路の等価屈折率が 1.3 μm と 1.55 μm では異なるため、根本から設計の見直しが必要である。具体的には単一モード設計、FSR 設計、モード利得差設計がある。

⑥ 発振波長の連続チューニング

本研究のレーザはヒータへの電力投入によってレーザの発振波長がデジタル的に切り替わる。これを連続的(アナログ的に)に切り替える仕組みの実現が残存課題の一つである(図 5-7)。発振波長がアナログ的に切り替われば、OCT 用光源などの用途にも応用することができるようになる。アナログ的な切り替えを実現するためには、現在のリング共振器 2 つの構成から、リング共振器の数を 3 つ以上に増やす、またはデバイス全体の温度を高精度に制御するなどの工夫が必要になる。技術的な課題は大変大きいものと考えられる。

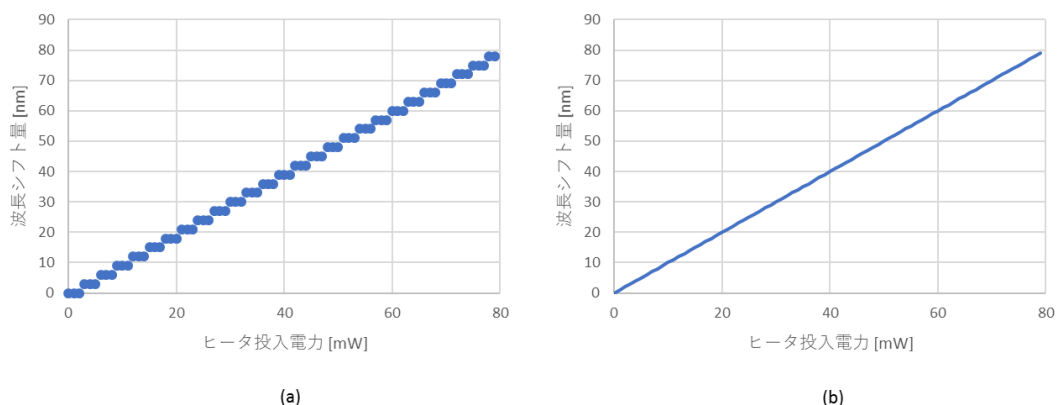


図 5-7 ヒータ投入電力と波長シフト (a)従来シフト, (b)アナログシフト

⑦ 掃引速度の高速化

発振波長の連続チューニングが実現できるようになると、掃引速度の高速化が重要になってくる。本研究では連続チューニングおよび波長高速掃引ができないが、仮に1ミリ秒程度で掃引できるようになれば、高出力、狭線幅、高速掃引と波長可変レーザとして必要な特性が全て揃うことになると考えられる。光通信光源からOCT用の医療用と光源まで広範囲なニーズに答えることが出来るようになる。

⑧ 複数波長の同時発振

コム光源としての用途を考えた場合、マイクロリングレーザが複数の波長でレーザ発振できれば有意な特性が得られると考えられる。現在は、単一波長でレーザ発振を行う設計のためには、マイクロリングレーザのFSRを80nm程度に設計している。これはSOAの発光帯域(60~80nm)以上になるように設計している。しかしながら複数波長のレーザ発振を実現するためには、SOAの発光帯域内に複数の共振波長が存在できるようにマイクロリングレーザのFSRを小さくすればよい。例えば、マイクロリングレーザのFSRを20nmとすれば、SOAの発振帯域内に3-4の発振可能波長が存在するようになる。コム光源に加えて、CWDM用の光源にも適用できる可能性がある。

⑨ 実装回数の削減

本章のマイクロリングレーザの作製において、実装は技術的に難易度の高いプロセスである。これは高精度の実装を要す素子が3つあるためである。従って、実装の数を0にする、それが不可能であっても、実装の数を減らすことは大変重要な検討項目であると考えられる。具体的には、SOAとブースタSOAは同材料のため、この二つの素子を一つにした素子があれば、実装の数を減らすことができる。実装が非常に簡素化される。SOAとブースタSOAを集積するためには、SOAとブースタSOAの間に適切な反射率を持ったLRコートに相当する機構を設ければ良いと考えられる。その機構としては、グレーティングが有望であろう。

⑩ 集積レーザ化

本章におけるマイクロリングレーザは SOA と波長可変フィルタが別の材料で構成されている。SOA が使われているのは Si が単独で発光できないためである。SOA、ブースタ SOA、Si フォトのそれぞれが別の材料で構成されているために、共通プラットフォームへの実装を必要とし、製作時間がかかる。現在のところ、Si が実用的な強度で発光するという報告はないが、今後研究が進展し、十分に発光するようになれば、発光部と波長可変部が同一の Si 基板の上に実現できるようになるため、プラットフォームおよび実装が不要⁶¹になる。結果として、製作時間が大幅に減り、かつ素子間の結合損失が原理的に発生しなくなる。結合損失が発生しないことはそのまま生産の歩留まりがあがることにつながり、大幅なコスト減につながる。究極的な形、あるべき姿だと考えられる。以上述べたように、発光領域およびフィルタ領域を同一の Si で実現することが波長可変光源の最終形態⁶²であると考えられる。

⁶¹ 同時に光学素子の実装が不要になるため、大幅なコスト減につながる。

⁶² 現在 InP でこれを目指すものがあるが、InP のデバイスサイズが大きくなるためコストメトリック的には最終形態にはならないと考えられる。ただ、一時的に流行する形態になる可能性がある。

5.2 光プロセッサとしての比較

本研究の 4 章におけるマイクロリングレーザは、レーザへの注入電流を制御することでインバータ動作およびフリップフロップ動作を一つのデバイスで実現する。マイクロリングレーザは波長に関するインバータ/フリップフロップデバイスである。一つのデバイスで両動作を実現できるのは、筆者が知る限り本デバイスのみである。一方、インバータ動作のみ、またはフリップフロップ動作を実現するデバイスは他機関で盛んに研究されている。波長に限らず、光出力の強度や、光を出力する方向に対して作用するデバイスが報告されている。フリップフロップ等の非線形な応答を示すデバイスとして、大きく次の 3 方式がある。DFB タイプ、VCSEL タイプ、MMI タイプである。それぞれの特徴を次に述べる。

5.2.1 Distributed Feedback (DFB) タイプのフリップフロップデバイス

非線形グレーティングとそれ以外のグレーティングの透過波長に少しずれを持たせた DFB レーザである [54](図 5-8)。非線形グレーティングとは、グレーティング内部の光強度を強い場合に透過波長が非線形に変化するグレーディングである。基本構造が DFB レーザであるため活性層への電流注入によって利得が発生する。非線形グレーティングに外部からの入射がない OFF 状態においては、非線形グレーティングとそれ以外のグレーティングの透過波長にずれがあるため、レーザ発振が行われず光が出力されない。非線形グレーディングに外部から光が入射されると、非線形効果が発現して非線形グレーティングとそれ以外のグレーティングの透過波長が一致し、DFB に光の帰還が生じレーザ光が出力される。別の非線形グレーティングに光パルスを入射すると、内部のデチューニングが変化し、DFB がオフ状態になる。つまり、リセットパルスとして機能する。

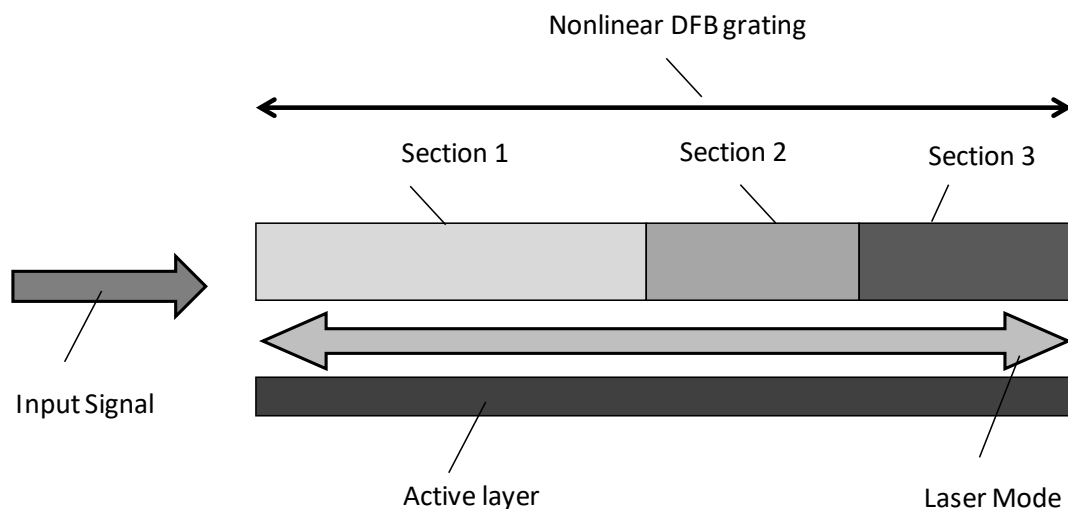


図 5-8 DFBタイプのフリップフロップデバイス

5.2.2 Vertical Cavity Surface Emitting LASER (VCSEL) タイプのフリップフロップデバイス

VCSEL タイプのデバイスとして、入射光の偏光で双安定動作を制御するデバイス [56](図 5-9)の報告がある。TE 偏光を VCSEL に入射すると TE 偏光でレーザ発振を続け、TM 偏光を VCSEL に入射すると TM 偏光でレーザ発振することを双安定動作に利用したデバイスである。DFB やその他のタイプのデバイスでは、レーザの端面の反射率が TM よりも TE が高いため、TE 偏光でレーザ発振を行う一方、VCSEL は端面が平板の反射ミラーであるため、TE/TM の反射率に差が付きにくいゆえに、両方の偏光で発振することを利用したものである。偏光間でフリップフロップ動作を行うため、後続に接続するデバイスが複雑なものになってしまうという欠点がある。

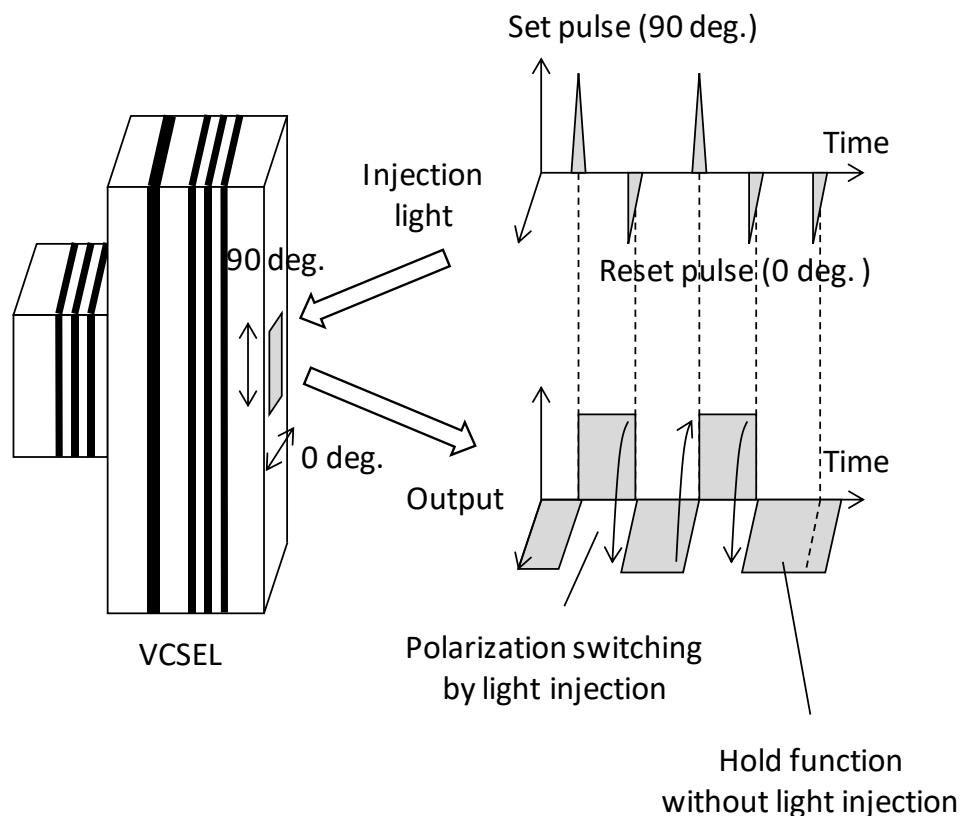


図 5-9 VCSEL タイプのフリップフロップデバイス

5.2.3 Multi-mode Interferometer (MMI) タイプのフリップフロップデバイス

MMI タイプのデバイスとして光を出力するポートについて全光フリップフロップ動作を行うデバイスの報告 [58] [59] [60](図 5-10)がある。これは 2x2MMI で構成されたレーザで、相互利得飽和に基づく二つのポート間の双安定性を利用したものである。MMI に電流を注入すると MMI が発光し、二つの出力ポートに光が出力される。この時、Set 光(または Rest 光)を MMI に入射すると、キャリア密度が変化し、MMI の特定の出力ポートから光が出力される。下図の例では、Set 光を入れると MMI 内部で Mode1 の光が立ち、結果として上側の出力ポートから光が出力される。逆に、Reset

光を入れると、Mode2の光が立ち、下側の出力ポートから光が出力される。以上述べたように、MMIタイプのデバイスは光の出力ポートに対して、フリップフロップ動作を行うデバイスである。

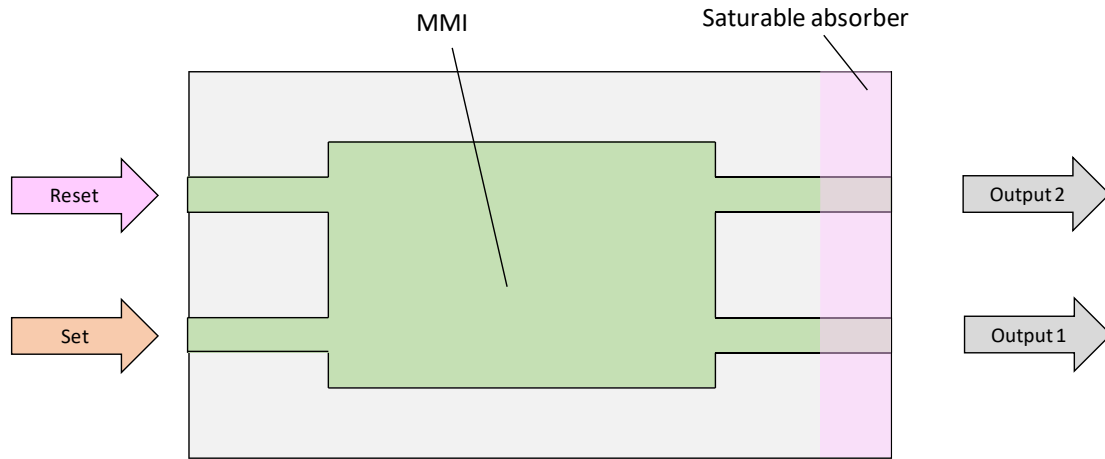


図 5-10 MMIタイプのフリップフロップデバイス

5.2.4 マイクロリングレーザタイプのフリップフロップデバイス

本研究以外でもマイクロリングレーザを用いた双安定デバイスが研究されている。一例として、マイクロリングレーザの発振方向(CW/CCW)で双安定動作 [90] [91]を実現している例(図 5-11)を述べる。マイクロリングレーザに電流を注入すると、注入電流が小さい領域では CW/CCW が等しくレーザ発振するが、注入電流が大きくなるとレーザ発振が不安定状態を経て、マイクロリングレーザが一方向性発振を起こすことを利用したものである。

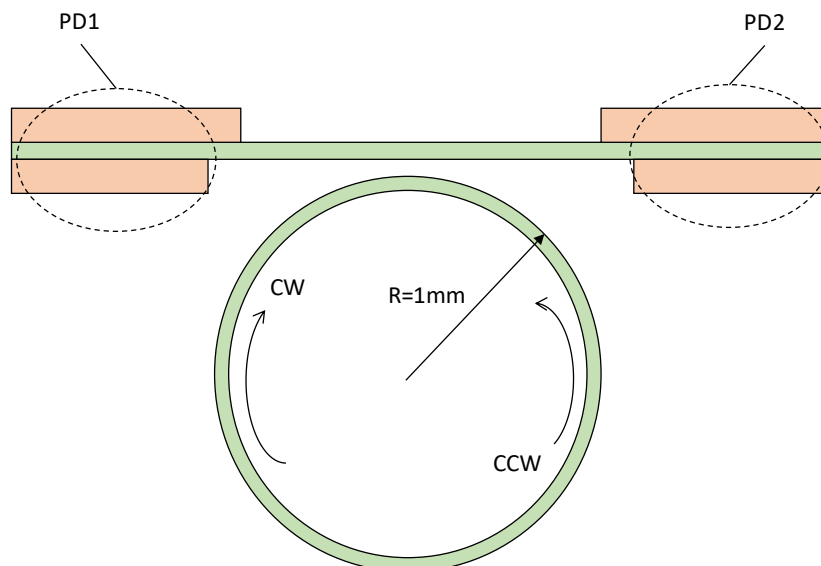
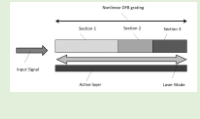
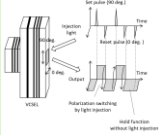
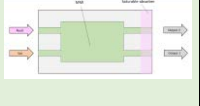
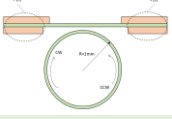



図 5-11 マイクロリングレーザタイプのフリップフロップデバイス

5.2.5 光プロセッサのまとめ

それぞれの方式を表 5-2 にまとめる。表 5-2 を見ると、本研究は光通信用の波長可変光源に向けて特性を特化したものであることが改めて分かる。また、本研究は波長可変光源として十分な特性を示していることが分かる。

表 5-2 光プロセッサのまとめ

	DFB	VCSEL	MMI	マイクロリング	
構造					
フリップフロップ特性	光出力	偏光	出力ポート	出力ポート (発振方向)	波長チャネル
製作性	× グレーティング波長の高精度な制御が必要	○ 通常のVCSELのため容易	○ ほぼ通常のMMIに近いため容易	○ 容易	○ 容易
縦列接続	× 波長多重化に難あり	× 困難	× ポートが変わるため困難	× ポートが変わるため困難	○

5.2.6 光プロセッサとしての残存課題

本研究ではマイクロリングレーザが光プロセッサとして動作するためのインバータ動作およびフリップフロップ動作を行うための基本理論を構築出来たが、いくつかの課題は残されている。残存する課題を下記に挙げる。

① 注入光波長のデチューニング量依存性の解明

本研究では、外部から入射する光について、その光とマイクロリングレーザの波長は同じものと仮定して検討を行った。そのため、外部から入射する光とマイクロリングレーザの波長にずれがあった場合にどのような振る舞いを見せるかは検討が出来ていない。波長がずれるにつれて外部光がマイクロリングレーザに作用しなくなると想定している。そのため、十分に強い光を入れても、本研究で検討した非線形効果が発現しないだろうと考えている。波長デチューニング量とレーザ動作が理論的に解明できれば、各マイクロリングレーザをどのような波長精度で制御すればよいか明確になる。

② マイクロリングレーザの発振波長制御

課題①からマイクロリングレーザの発振波長の精度が求めれば、それに沿う制御方法が必要になる。製作誤差を補正して、所望の波長に収める方法である。そのための方法として、マイクロヒータを用いる方法、キャリア注入を用いる方法、クラッドに UV 感光性材料を用いて UV トリミングを行う方法が挙げられる。

③ 非線形効果の増強

非線形効果をより強く発現するためには、マイクロリングレーザの内部損失を可能な限り低減する必要がある。現在は内部損失が大きいために光強度が低下し、非線形効果が発現しにくい状況にある。内部損失を改善すれば、マイクロリングレーザ内部の光強度がよくなり、結果として非線形効果が発現しやすくなると考えられる。そうであれば、4.6.6 章で検討した様に、位相による非線形性効果だけでも、同一デバイスによるインバータ/フリップフロップ動作の実現が出来るようになるかもしれない。

第6章 結論

光通信の更なる大容量化の実現に向けて、本研究はマイクロリングレーザを基本として次に述べる課題の解決方法の確立を目指した。

課題① 光多値化信号に適用できる高出力かつ狭線幅の波長可変レーザについて設計製作技術を確立すること。

課題② 全光情報処理機能を有する光プロセッサの実現に向けて、光プロセッサの基本動作であるインバータ動作およびフリップフロップ動作について、それらの動作を理論的に説明する数式モデルを構築すること。

課題①に関しては次に述べる検討や新規技術に開発によって設計製作技術を確立させた。高出力かつ狭線幅なレーザを実現するためには、レーザ内部の損失を極限まで減らした上でレーザキャビティを長尺化($>1\text{cm}$)する必要があると明らかにした。長尺なキャビティをコンパクトに実現するために、高屈折率材料でかつ近年ファンダリ利用によってデバイス作製が容易になったシリコン(Si)導波路を用いた。Si導波路によってマイクロリング共振器を形成し、これを外部共振器として光半導体アンプ(semiconductor optical amplifier, SOA)と結合させることで、波長可変マイクロリングレーザを構成した。Si導波路の損失低減やSOA-Si外部共振器間の高効率結合実装など、これまでにない様々なハイブリッド集積化技術を開発してマイクロリングレーザの設計製作技術を確立した。本技術を用いて試作したマイクロリングレーザは、光出力 100mW、線幅約 100kHz、SMSR(side-mode suppression ratio) $>40\text{dB}$ を実現し、実使用に耐える性能を持つことを実証した。100mWの光出力は光通信用単一モードレーザとして筆者が知る限り世界最高出力である。これらの詳細は3章にある。

課題②に関しては、次に述べる検討および非線形モデルの導入による新しい数式モデルの構築を行った。本研究が新しいモデルの構築によって説明するレーザの動作は、インバータ動作とフリップフロップ動作である。レーザがインバータ動作を示すかフリップフロップ動作を示すかは、設計段階で一意に決まるため、これまでは一つのレーザで両方の動作を実現することは困難であった。マイクロリングレーザを用いた本研究室の先行研究では、同一のレーザで両動作を実現できることを実験的に示した例があるが、理論的な裏付けが不十分であった。本研究ではレーザキャビティ内の光の位相および振幅について、それぞれに非線形なモデルを導入し、そのモデルをレーザ発振の挙動を記述するレート方程式に追加することで、実験結果を理論的に説明するモデルを構築した。これによってインバータ動作およびフリップフロップ動作が実験的にも理論的にも同一のデバイスで実現できることを示すに至った。これらの詳細は4章にある。

他機関の成果との比較を通して本研究の課題を抽出したのが5章である。高出力狭線幅マイクロリングレーザの残存課題は、更なる狭線幅化に向けて導波路長を長尺化すること、また更なる高出力化に向けて素子内部の光学損失を低減すること、また、ヒータの省電力化に向けて断熱溝構

造を取り入れることなどが挙げられる。光プロセッサとしてのマイクロリングレーザの残存課題は、外部入射波長とマイクロリングレーザの波長のデチューニング量がマイクロリングレーザの挙動にどのような影響を与えるか明らかにすること、マイクロリングレーザの発振波長の高精度な制御方法、および、非線形効果増強のための、内部損失の低減である。

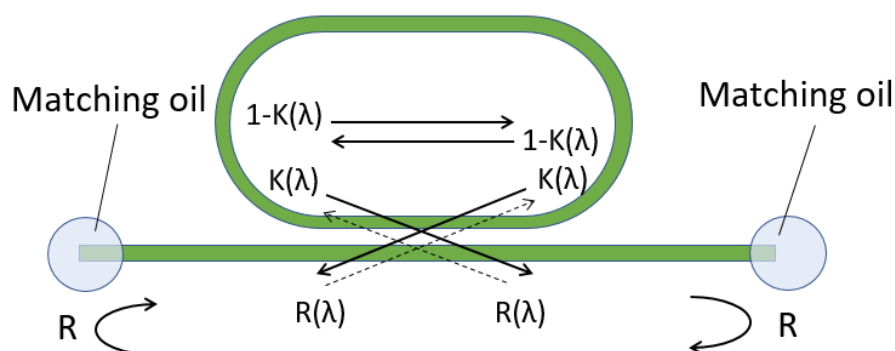
以上、本研究は、マイクロリングレーザにおける高出力狭線幅化の設計製作技術を確立し、また全光情報処理機能における基本動作を理論的に説明する数式モデルを示した。

Appendix

本編で説明を省略した項目について詳細を述べる。

A.1 反射がある場合のマイクロリングの結合効率の導出

マイクロリングレーザから出た光がバスライン導波路に結合して、バスライン導波路の端面で反射して結合領域に戻り、再度マイクロリングレーザに結合する場合を考える。マイクロリング、バスラインおよびマッチングオイルから構成される構造の概要を下記に示す。



Appendix 図 1 マイクロリングの結合効率 $K(\lambda)$ の定義

通常はバスラインの端面に無反射コーティングを施す⁶³ことで反射を無視できるほどに低減するが、本研究では無反射コーティングを施さず、むしろ反射があることで非線形効果を発現させている。無視できない十分な強度の反射があると、バスライン導波路の内部には反射による定在⁶⁴が形成されるため、電界の反射係数は波長 λ の関数になる。電界振幅反射係数 $r(\lambda)$ は無限等比級数和を用いて次の様に表せられる。

$$\begin{aligned}
 r(\lambda) &= \sqrt{k^2 R e^{-i\beta L_b}} + \sqrt{k^2 R^2 T e^{-i2\beta L_b}} + \sqrt{k^2 R^3 T^2 e^{-i3\beta L_b}} + \dots \\
 &= \frac{k\sqrt{R}e^{-i\beta L_b}}{1 - \sqrt{T}R e^{-i\beta L_b}}
 \end{aligned}
 \tag{A.1}$$

⁶³ 導波路端面に、単層または複層の誘電体膜を成膜することで反射率を-30dB~-40dB に低減することができる。

⁶⁴ ファブリ・ペロー反射により波長リップルを持つ。

ここで、 $T (= 1-k)$ はマイクロリングレーザとバスライン導波路の結合領域における電力透過率、 $\beta (=2\pi n_b/\lambda)$ はバスライン導波路における伝搬乗数である。電界振幅反射率の2乗である電力反射率 $R(\lambda)$ は次の式になる。

$$R(\lambda) = |r(\lambda)|^2 \quad (\text{A.2})$$

$$= \frac{k^2 R}{1 + (1 - k)R - 2\sqrt{(1 - k)R}\cos(2\pi \frac{n_b L_b}{\lambda})}$$

ここで、 $R(\lambda)$ はバスライン導波路から結合部領域へ戻る反射電力を示しているが、その方向はマイクロリングレーザから出た光とは逆になるとなることを補足する。しかしながら、今回の理論計算では、マイクロリングレーザ内部の光子密度をCW/CCWで区別しないため、CW/CCWの方向を考慮せずに、電力強度のみを考慮する。すなわち、マイクロリングレーザにどれだけの光が外に出て、反射で戻ってきて、結果どれだけの光がマイクロリングレーザの内部に留まるかを考える。つまり、マイクロリングレーザに残留する光 $(1-k)$ が $R(\lambda)$ によって増加することを示す。また、実効的な k が $R(\lambda)$ によって減少することを示す。これらを考慮することにより次の式を得る。

$$K(\lambda) = k - R(\lambda)$$

$$= k - \frac{k^2 R}{1 + (1 - k)R - 2\sqrt{(1 - k)R}\cos(2\pi \frac{n_b L_b}{\lambda})} \quad (\text{A.3})$$

上式に、 $k=0.061$ 、 $M=823$ 、 $R=0.167$ 、 $g_b=1$ を代入して得た光子密度と結合効率の関係が図 4-24である。

A.2 シミュレーションパラメータ

4.6 章で行ったシミュレーションについて、使用したパラメータを下記に記載する。

Appendix 表 1 シミュレーションに使用したパラメータ

Symbol	Description	Value
Material parameters		
C	speed of light	$3.00 * 10^8$ m/s
V_g	group velocity	$0.87 * 10^8$ m/s
q	electron charge	$0.87 * 10^{19}$ m/s
n_r	equivalent index of initial state of microring laser	3.45
n_b	equivalent index of busline waveguide	1.45
n_{oil}	refractive index of matching oil	1.45
Microring and waveguide parameters		
w_r	width of microring	2.00 μm
w_b	width of busline waveguide	2.00 μm
t_r	thickness of microring	182 nm
t_b	thickness of busline waveguide	182 nm
L_r	round-trip length of microring	374 μm
L_b	length of busline waveguide	1457 μm
M_0	resonance order of λ_0	822
M_1	resonance order of λ_1	823
k	coupling efficiency constant	0.061
Laser parameters		
k_{Kerr}	coefficient of Ker effect	$-2.70 * 10^{-20}$ 1/cm ³
V_{ring}	volume of MQW layer in the microring laser	$1.36 * 10^{-19}$ cm ³
N_0	carrier density at transparency	$1.70 * 10^{-14}$ 1/cm ³
Γ	confinement factor	0.90
dg/dN	differential mode gain	$1.00 * 10^{-16}$

α_i	loss of laser cavity	20 Neper/cm
β_{sp}	constance of spontaneous emission	$1.00 * 10^{-5}$
I_{th}	threshold current	25 mA
g_b	amplification factor in busline waveguide	1
τ_p	photon lifetime	$1.90 * 10^{-12}$ sec
τ_c	carrier lifetime	$2.00 * 10^{-9}$ sec
ϵ_s	self-saturation coefficient	$8.00 * 10^{17}$ cm ³ [92]
ϵ_c	cross-saturation coefficient	$8.50 * 10^{17}$ cm ³ [92]
S_{in}	CW light injection density	$1.00 * 10^{15}$ 1/cm ³

参考文献

- [1] T. Kato, "Series Coupled Microring Resonator Filter for Integrated Photonic Add/Drop Node," Department of Electrical and Computer Engineering, Graduate School of Engineering, Yokohama National University, Doctoral dissertation, 2005.
- [2] M. Takahashi, Y. Uchida, S. Yamasaki, H. Kawashima and K. Nara, "ZrO₂-SiO₂ Based Low Loss Ultra-High Δ PLC," OptoElectronics and Communications Conference, WL4-5, 2013.
- [3] C. R. Doerr, M. Cappuzzo, E. Chen, A. Wong-Foy, L. Gomez, A. Griffin, L. Buhl, "Bending of a planar lightwave circuit 2x2 coupler to desensitize it to wavelength, polarization, and fabrication changes," IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 17, No. 6, pp. 1211-1213, 2005.
- [4] A. Takagi, K. Jinguji and M. Kawachi, "Design and Fabrication of Broad-Band Silica-Based Optical Waveguide Couplers with Asymmetric Structure," IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol.28, No. 4, pp. 848-855, 1992.
- [5] A. Takagi, K. Jinguji and M. Kawaguchi, "Wavelength Characteristics of (2x2) Optical Channel-Type Directional Couplers with Symmetric of Nonsymmetric Coupling Structures," Journal of Lightwave Technology, Vol. 10, No. 6, pp. 735-746, 1992.
- [6] P. P. Absil, J. V. Hryniewicz, B. E. Little, R. A. Wilson, L. G. Joneckis, and P. -T. Ho, "Compact Microring Notch Filters," IEEE Photonics Technology Letters, vol. 12, issue 4, pp.398-400, 2000.
- [7] R. Grover, T. A. Ibrahim, T. N. Ding, Y. Leng, L. -C. Kuo, S. Kanakaraju, K. Amarnath, L. C. Calhoun, and P. -T. Ho, "Laterally Coupled InP-Based Single-Mode Microracetrack Notch Filter," IEEE Photon. Technology Letters, vol. 15, Issue 8, pp.1082-1084, 2003.
- [8] C. Vazquez, S. Vargas, J. Manuel, S. Pena and Pe. Corredera, "Tunable Optical Filters Using Compound Ring Resonators for DWDM," IEEE Photonics Technology Letters, vol. 15, issue 8, pp.1085-1087, 2003.
- [9] R. Grover, T. A. Ibrahim, S. Kanakaraju, L. Lucas, L. C. Calhoun, and P. -T. Ho, "A Tunable GaInAsP-InP Optical Microring Notch Filter," IEEE Photon. Technology Letters, vol. 16, issue 2, pp.467-469, 2004.
- [10] 伊藤利展、國分泰雄, "並列マイクロリング共振器による 1x2 インターリーバの作成," 電子

情報通信学会誌, J88-C, pp.13-21, 2005.

- [11] A. Melloni, "Synthesis of a parallel-coupled ring-resonator filter," *Optics Letters*, vol. 26, issue 12, pp.917-919, 2001.
- [12] B. E. Little, S. T. Chu, J. V. Hryniewicz, and P. P. Absil, "Filter synthesis for periodically coupled microring resonators," *Optics Letters*, vol. 25, no. 5, pp.344-346, 2000.
- [13] G. Griffel, "Synthesis of optical filters using ring resonator arrays," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 12, issue 7, pp.810-812, 2000.
- [14] Y. M. Landobasa, S. Darmawan and M.-K. Chin, "Matrix Analysis of 2-D Microresonator Lattice Optical Filters," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 41, issue 11, pp.1410-1417, 2005.
- [15] S. J. Emelett and R. A. Soref, "Synthesis of dual-microring-resonator cross-connect Filters," *Optics Express*, vol. 13, issue 12, pp.4439-4456, 2005.
- [16] J. K. S. Poon, J. Scheuer and Amnon Yariv, "Wavelength-Selective Reflector Based on a Circular Array of Coupled Microring Resonators," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 16, issue 5, pp.1331-1333, 2004.
- [17] S. Park, S. -S. Kim, L. Wang and S. -T. Ho, "Single-Mode Lasing Operation Using a Microring Resonator as a Wavelength Selector," *Journal of Quantum Electronics*, vol. 38, issue 3, pp.270-273, 2002.
- [18] K. Suzuki, I. Nakamatsu, T. Shimoda, S. Takaesu, J. Ushioda, E. Mizuki, M. Horie, Y. Urino, and H. Yamazaki, "WDM tunable dispersion compensator with PLC ringresonators," *OFC2004, WK3*, 2004.
- [19] Jacob B. Khurgin, "Optical buffers based on slow light in electromagnetically induced transparent media and coupled resonator structures: comparative analysis," *Journal of the Optical Society of America B*, vol. 22, issue 5, pp.1062-1074, 2005.
- [20] K. Djordjev, S. J. Choi, S. J. Choi, and P. D. Dapkus, "Vertically Coupled InP Microdisk Switching Devices With Electroabsorptive Active Regions," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 14, issue 8, pp.1115-1117, 2002.
- [21] S. J. Emelett and R. Soref, "Design and Simulation of Silicon Microring Optical Routing Switches," *Journal of Lightwave Technologies*, vol. 23, issue 4, pp.1800-1807, 2005.
- [22] Y. Kokubun, A. Miura and S. Inokuchi, "Vertically Coupled Waveguide Bends and Branches for Photonic Gate-Array Technology Using Cross-Grid Architecture," *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 43, No. 12, pp.8080-8084, 2004.

- [23] V. Van, T. A. Ibrahim, P. P. Absil, F. G. Johnson, R. Grover, and P. -T. Ho, "Optical Signal Processing Using Nonlinear Semiconductor Microring Resonators," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 8, issue 3, pp.705-713, 2002.
- [24] T. A. Ibrahim, R. Grover, L. -C. Kuo, S. Kanakaraju, L. C. Calhoun, and P. -T. Ho, "All-Optical AND/NAND Logic Gates Using Semiconductor Microresonators," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 15, issue 10, pp.1422-1424, 2003.
- [25] T. A. Ibrahim, K. Amarnath, L. C. Kuo, R. Grover, V. Van, and P. -T. Ho, "Photonic logic NOR gate based on two symmetric microring resonators," *Optics Letters*, vol. 29, issue 23, pp.2779-2781, 2004.
- [26] S. Mikroulis, H. Simos, E. Roditi and D. Syvridis, "Ultrafast All-Optical AND Logic Operation Based on Four-Wave Mixing in a Passive InGaAsP-InP Microring Resonator," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 17, issue 9, pp.1878-1880, 2005.
- [27] T. Miyamoto, S. Umehara, H. Kobayashi, R. Taniguchi, R. Katouf, T. Arakawa and Y. Kokubun, "All-optical flip-flop and inverter using adjacent lasing wavelengths by semiconductor microring laser," *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 53, No. 8S2, 08MB04, 2014.
- [28] B. Corbett, "Spectral characteristics of single-In/sub 0.7/Ga/sub 0.3/As quantum-well microring lasers," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 10, issue 1, pp.3-5, 1998.
- [29] P. P. Absil, J. V. Hryniewicz, B. E. Little, P. S. Cho, R. A. Wilson, L. G. Joneckis, and P. -T. Ho, "Wavelength conversion in GaAs micro-ring resonators," *Optics Letters*, vol. 25, issue 8, pp.554-556, 2000.
- [30] G. Sekiguchi, N. Kobayashi and Y. Kokubun, "Coupling efficiency control of vertically coupled microring resonator filter by microactuator," *IEEE Photonics Technology Letter*, vol. 18, no. 20, pp. 2141-2143, 2006.
- [31] S. T. Chu, W. Pan, S. Suzuki, B. E. Little, S. Sato and Y. Kokubun, "Temperature Insensitive Vertically Coupled Microring Resonator Add/Drop Filters by Means of a Polymer Overlay," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 11, no. 9, pp. 1138-1140, 1999.
- [32] N. Kobayashi, N. Zaizen and Y. Kokubun, "Athermal and Polarization-Independent Microring Resonator Filter Using Stress Control," *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 46, part 1, Number 8B, 2007.
- [33] N. Kobayashi, T. Sato and Y. Kokubun, "UV trimming of Polarization -

- independent Microring Resonator by Internal Stress and Temperature Control,” *Optics Express*, vol. 18, issue 2, pp. 906-916, 2010.
- [34] M. Chin, C. Xu and W. Huang, “Theoretical approach to a polarization-insensitive single-mode microring resonator,” *Optics express*, vol. 12, issue 14, pp.3245-3250, 2004.
- [35] G. Griffel, “Vernier Effect in Asymmetrical Ring Resonator Arrays,” *IEEE Photonics Technology Letters*, vol.12, no 12, pp. 1642-1644, 2000.
- [36] O. Schwelb and I. Frigyas, “Vernier Operation Of Series Coupled Optical Microring Resonator Filters,” *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 39, issue 4, no.20, pp. 257-261, 2003.
- [37] H. Haeiwa, T. Naganawa and Y. Kokubun, “Wide Range Center Wavelength Trimming of Vertically Coupled Microring Resonator Filter by Direct UV Irradiation to SiN Ring Core,” *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 16, no. 1, pp. 135-137, 2004.
- [38] S. Ueno, T. Naganawa and Y. Kokubun, “High UV Sensitivity of SiON Film and Its Application to Center Wavelength Trimming of Microring Resonator Filter,” *IEICE TRANS. ELECTRON.* vol. E88-C, no. 5, pp. 998-1004, 2005.
- [39] 伊藤利展, 國分泰雄, “マイクロリング共振器のフィルタ特性からのリング導波路損失の非破壊測定,” *Technical Report of IEICE*, vol. 102, no. 657, pp. 13-17, 2003.
- [40] S.T. Chu, B.E. Little, W. Pan, T. Kaneko, S. Sato and Y. Kokubun, “An eight-channel add-drop filter using vertically coupled microring resonators over a cross grid,” *IEEE Photonics Technology Letters*, vol.11, issue. 6, pp. 691-693, 1999.
- [41] 荒井 滋久、 小山 二三夫, “動的単一モードレーザとその動的波長変動,” *電子情報通信学会論文誌*, vol. J73-Ci, no. 5, pp.216-225, 1990.
- [42] B. W. Hakki and T. L. Paoli, “cw degradation at 300 K of GaAs double-heterostructure junction lasers. II. Electronic gain ,” *Journal of Applied Physics*, vol. 44, issue. 9, pp. 4113-4119, 1973, 1973.
- [43] N. Kobayashi, K. Sato, M. Namiwaka, K. Yamamoto, S. Watanabe, T. Kita, H. Yamada and H. Yamazaki, “Silicon Photonic Hybrid Ring-Filter External Cavity Wavelength Tunable Lasers,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 33, issue 6, pp. 1241-1246, 2015.
- [44] W. Bogaerts, R. Baets, P. Dumon, V. Wiaux, S. Beckx, D. Taillaert, B. Luyssaert, J. V. Campenhout, P. Bienstman and D. V. Thourhout, “Nanophotonic waveguides in silicon-on-insulator fabricated with CMOS technology,” *Journal of Lightwave Technologies*, vol. 23, issue 1, pp. 401-412, 2005.

- [45] C. Henry, "Theory of the linewidth of semiconductor lasers," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 18, issue 2, pp.259-264, 1982.
- [46] X. Q. Shi, "Au/Sn Solder for Face-Down Bonding of AlGaAs/GaAs Ridge Waveguide Laser Diodes," *Materials Letters*, vol. 58, no. 21, pp. 2695-2699, 2004.
- [47] K. Chu, W. Choi, Y. Ko, J. Lee, H. Park and D. Y. Jeon, "Flip-Chip Bonding of MEMS Scanner for Laser Display Using Electroplated AuSn Solder Bump," *IEEE TRANSACTIONS ON ADVANCED PACKAGING*, vol.30, issue 1, pp. 27-33, 2007.
- [48] G. Elger, J. Voigt and H. Oppermann, "Application of flip-chip-bonders in AuSn solder processes to achieve high after bonding accuracy for optoelectronic modules," *Lasers and Electro-Optics Society, WE3*, 2001.
- [49] R. An, C. Wang and Y. Tian, "Determination of the Elastic Properties of Au₅Sn and AuSn from Ab initio Calculations," *Journal of Electronic Materials*, vol. 37, no. 7, pp. 968-974, 2008.
- [50] K. Osada, S. Yamaguchi and M. Hirabayashi, "An Ordered Structure of Au₅Sn," *Trans. Jap. Inst. Met.*, vol. 15, no. 4, pp. 256-260, 1974, 1974.
- [51] J. H. Kuang, M. T. Sheen, C. F. H. Chang, C. C. Chen, G. L. Wang and W. H. Cheng, "Effect of temperature cycling on joint strength of PbSn and AuSn solders in laser packages," *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, vol 24, issue. 4, pp. 563-568, 2001.
- [52] 中山貴司、森 浩、山田 敦史、三瀬 一明 , "外部共振器レーザ用曲がり導波路型ゲインチップ," *アンリツテクニカル No.83*, Sep. 2006.
- [53] K. Huybrechts, G. Morthier and R. Baets, "Fast all-optical flip-flop based on a single distributed feedback laser diode," *OPTICS EXPRESS*, vol. 16, issue 15, pp. 11405-11410, 2008.
- [54] H. Zoweil, "Simulations of a Novel All-Optical Flip-Flop Based on a Nonlinear DFB Laser Cavity Using GPGPU Computing," *Optics and Photonics Journal*, vol. 6, no. 8, pp. 203-215, 2016.
- [55] 武田 浩司, "分布ブラッグ反射鏡を用いた多モード干渉双安定半導体レーザによる全光フリップ・フロップ," *東京大学 工学研究科 修士論文*, 2007.
- [56] T. Mori , Y. Sato and H. Kawaguchi, "Timing Jitter Reduction by All-Optical Signal Regeneration Using a Polarization Bistable VCSEL," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 26, no. 16, pp. 2946-2953, 2008.
- [57] K. Hamamoto, E. Gini, C. Holtmann, H. Melchior, S. Sudo, K. Mori, T. Sasaki and M. Yamaguchi, "Active multi-mode-interferometer semiconductor optical

- amplifier,” *Electronics Letters*, vol. 36, issue 14, pp. 1218-1220, 2000.
- [58] M. Takenaka, M. Raburn and Y. Nakano, “All-Optical Flip-Flop Multimode Interference Bistable Laser Diode,” *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 17, issue 5, pp. 968-970, 2005.
- [59] M. Takenaka and Y. Nakano, “Multimode Interference Bistable Laser Diode,” *Photon. Technol. Lett.*, 15, 1035, 2003.
- [60] M. Takenaka, K. Takeda, Y. Kanema and Y. Nakano, “All-optical switching of 40 Gb/s packets by MMI-BLD optical label memory,” *OPTICS EXPRESS*, vol. 14, no. 22, pp. 10785-10789, 2006.
- [61] K. Hamamoto, E. Gini, C. Holtmann and H. Melchior, “Single transverse mode active multimode interferometer InGaAsP InP laser diode,” *Electronics Letters*, vol. 34, issue 5, pp. 462-464, 1998.
- [62] H. Jiang, Y. Chaen, T. Hagio, K. Tsuruda, M. Jizodo, S. Matsuo and K. Hamamoto, “Single Wavelength (Non-Grating) High-Mesa Asymmetric Active-MMI All Optical Bi-Stable Laser Diodes,” 23rd International Conference on Indium Phosphide and Related Materials, May 22-26, 2011.
- [63] K. Takeda, M. Takenaka, T. Tanemura and Y. Nakano, “All-Optical Flip-Flop Based on Mach-Zehnder Interferometer Bistable Laser Diode,” *European Conference on Optical Communication*, Paper 1.2.5, 2009.
- [64] A.R. Bahrapour, S. Mohammad Ali Mirzaee, F. Farman and S.S. Zakeri, “All-optical flip-flop composed of a single nonlinear passive microring coupled to two straight waveguides,” *Optics Communications*, vol. 282, issue 3, pp.427-433, 2009.
- [65] L. Chrostowski, and W. Shi, “Monolithic Injection-Locked High-Speed Semiconductor Ring Lasers,” *JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY*, vol. 26, no. 19, pp. 3355-3362, 2008.
- [66] G. Genty, M. Lehtonen and H. Ludvigsen, “Optical bistability and signal processing in a microstructured fiber ring resonator,” *Applied Physics B*, vol. 81, issue 2-3, pp. 357-362, 2005.
- [67] M. Sorel, P. J. R. Laybourn, A. Scirè and S. Balle, G. Giuliani, R. Miglierina and S. Donati, “Alternate oscillations in semiconductor ring lasers,” *OPTICS LETTERS*, Vol. 27, No. 22, 1992, 2002.
- [68] 小林広樹、カトフ・レドワン、谷口理一、梅原周、荒川太郎、國分泰雄, “全光フリップフロップのための半導体マイクロリングレーザの非対称発振,” *応用物理学会春季学術講演会講演*, no. 29P-B3-16, 2013.

- [69] 梅原 周, “量子井戸マイクロリングのレーザ注入同期および SOA 中の相互変調効果を用いた光インバータ,” 横浜国立大学大学院工学府修士論文, 2015.
- [70] 宮本富成, “量子井戸半導体一方向性発振リングレーザの隣接発振波長を用いた一入力一出力光インバータの研究,” 横浜国立大学大学院工学府修士論文, 2014.
- [71] 早坂雄志, “マイクロリングレーザの発振特性測定からの非発光再結合領域深さの解明,” 横浜国立大学工学府卒業論文, 2016.
- [72] 小林 広樹, “量子井戸マイクロリングレーザを用いた全光フリップフロップに関する研究,” 横浜国立大学大学院工学府修士論文, 2013.
- [73] 土屋 昌弘, 梁 強徳、ヌネス・ルイス・ロメウ、曾 漢奇、, “将来ネットワークに向けた光増幅・スイッチング機能を有するシリコン・フォトニクス・デバイスに関する研究,” 情報通信研究機構季報, vol.52, no.3, pp. 13-24, 2006.
- [74] A. Ghadi, A. Bahrapour, R.Farrahi-Moghaddam, M. Taraz, “Coupling between microring resonators in presence of Kerr effect,” *Optics Communications*, vol 281, issue 9, pp.2644-2650, 2008.
- [75] J.-K. Seo and T. Mizumoto, “Measurement of nonlinear index changes in an InGaAsP/InP waveguide using an optical loop mirror interferometer,” *Conference on Lasers and Electro-Optics, CThJ5*, 2004.
- [76] 徐 在國、水本 哲弥、竹中 充、中野 義昭, “GaInAsP-DFB 導波路の光強度依存屈折率変化とその時間応答特性の測定,” 電子情報通信学会技術研究報告, OFT, 光ファイバ応用技術, vol. 103, no. 614, pp. 69-74, 2004.
- [77] C. L. Tang, A.Schremer, and T. Fuji, “Bistability in two-mode semiconductor lasers via gain saturation,” *Applied Physics Letters*, vol. 51, issue 18, pp. 1392-1394, 1987.
- [78] M. Takenaka and Y. Nakano, “Multimode Interference Bistable Laser Diode,” *IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS*, Vol. 15, No. 8, 2003.
- [79] S. L. McCall, “Instability and regenerative pulsation phenomena in Fabry-Perot nonlinear optic media devices,” *Applied Physics Letters*, vol. 32 issue 5, pp. 284-286, 1978.
- [80] D. Marcuse and T. P. Lee, “On Approximate Analytical Solutions of Rate Equations for Studying Transient Spectra of Injection Lasers,” *Journal of Quantum, Electronics*, vol. 19, no. 9, pp. 1397-1406, 1983.
- [81] T.Heil, I. Fischer, W. Elsaber and A. Gavrielides, “Dynamics of Semiconductor Lasers Subject to Delayed Optical Feedback: The Short Cavity Regime,” *Physical Review Letters*, vol. 87, issue 24, pp. 243901-243904, 2002.

- [82] P. Zorabedian, "Axial-Mode Intability in Tunable External-Cavity Semiconductor Lasers," *Journal of Quantum Electronics*, vol. 30, issue 7, pp. 1542-1552, 1994.
- [83] G. R. Gray and G. P. Agrawal, "Importance of Self-Induced Carrier-Density Modulation in Semiconductor Lasers," *Photonics Technology Letters*, vol. 4, issue 11, pp. 1216-1219, 1992.
- [84] 黒部立郎, 木村俊雄, 越 浩之, 向原智一, "次世代コヒーレント伝送向け DFB アレイ集積型波長可変レーザ," *電子情報通信学会技報*, vol. 115, no. 107, LQE2015-26, pp. 31-34, 2015..
- [85] N. フォトニクス研究所, "DBR アレイ型波長可変レーザ," *NTT フォトニクス研究所 研究成果の紹介* 1-7, 2004.
- [86] 藤原 直樹, 石井 啓之, 狩野 文良, "医療センシング用 140 nm 高速波長スイープ光源," *NTT フォトニクス研究所*, 2009.
- [87] S. L. Sochava, A. Daiber, M. McDonald, "Tunable laser operation with locally commensurate condition," *United States Patent*, patent no. US6665321B1, 2003.
- [88] "<http://www.pure-photonics.com/technology/>".
- [89] T. Kita, K. Nemoto and H. Yamada, "Silicon Photonic Wavelength-Tunable Laser Diode With Asymmetric Mach-Zehnder Interferometer," *Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 20, issue 4, 8201806, 2014.
- [90] M. Sorel, G. Giuliani, A. Scirè, R. Miglierina, S. Donati and P. J. R. Laybourn, "Operating Regimes of GaAs-AlGaAs Semiconductor Ring Lasers: Experiment and Model," *Journal of Quantum Electronics*, vol 39, issue 10, pp. 1187-1195, 2003.
- [91] M. Sorel and P. J. R. Laybourn, A. Scirè and S. Balle, G. Giuliani, R. Miglierina, and S. Donati, "Alternate oscillations in semiconductor ring lasers," *OPTICS LETTERS*, vol. 27, issue 22, pp. 1992-1994, 2002.
- [92] 姜 海松, "アクティブ MMI 型光 RAM メモリ素子に関する研究," *九州大学大学院総合理工学府博士論文*, 2012.
- [93] H. Ishii, K. Kasaya and Hiromi Oohashi,, "Spectral Linewidth Reduction in Widely Wavelength Tunable DFB Laser Array," *Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 15, issue 3, pp. 514-520, 2009.
- [94] A. Arbabi, S. M. Kamali, E. Arbabi, B. G. Griffin and L. Goddard, "Grating integrated single mode microring laser," *Optics Express*, vol. 23, issue 4, pp. 5335-5347, 2015 .
- [95] 藤野順二, 伊藤正康, 坂本博夫, 澤井章能, 藤本公三, "AnSn はんだを用いた GaAs チ

- ップのダイボンディング部の界面反応制御による品質改善,” 電子情報通信学会紙, vol. J91-C, no. 11, pp. 635-644, 2008.
- [96] O. Wittler, H. Walter, R. Dudek, W. Faust, W. Jun and B. Michel, “Deformation and fatigue behaviour of AuSn interconnects,” Electronics Packaging Technology Conference, pp. 297-301, 2006..
- [97] R. F. Broom, E. Mohn, C. Risch and R. Salathe, “Microwave Self-Modulation of a Diode Laser Coupled to an External Cavity,” Journal of Quantum Electronics, vol. QE-6, no. 6, pp. 328-334, 1970.
- [98] K. Y. Lau, L. Figueroa and A. Yariv, “Generation and Quenching of Intersubband Pulsations in Semiconductor Lasers Coupled to External Cavities,” Journal of Quantum Electronics, vol. QE-16, no. 12, pp. 1329-1336, 1980.
- [99] S. Donati and M. T. Fathi, “Transition from Short-to-Long Cavity and from Self-Mixing to Chaos in a Delayed Optical Feedback Laser,” Journal of Quantum Electronics, vol. 48, no. 10, pp. 1352-1359, 2012.
- [100] S. Ueno, T. Tatewaki, T. Ohdaira, Y. Shioya and Y. Kokubun, “Reversal of UV Sensitivity and Loss Reduction of SiON Microring Resonator by Thermal Annealing,” Japanese Journal of Applied Physics, vol. 45, no. 11, pp. 8691-8695, 2006.
- [101] 西山達也, 小川武, 坂本博夫, “Au-20Sn および Au-12Ge はんだの力学特性評価とナノレベル組織解析,” Journal of the Society of Materials Science, Japan, vol. 56, no. 10, pp. 913-919, 2007.
- [102] V. Simic and Z. Marinkovic, “Thin film interdiffusion of Au and Sn at room temperature,” Journal of the Less-Common Metals, vol. 51, pp. 177-179, 1977.

図表目次

図 1-1 光通信における通信容量増大の歴史	8
図 1-2 幹線系/メトロ系/アクセス系の概要	9
図 1-3 光通信のブロック概要	10
図 1-4 比屈折率と最小曲げ半径	12
図 1-5 周期律表	14
図 1-6 Si-Rib 導波路	15
図 1-7 Si 細線導波路	15
図 1-8 Rib 導波路とチャネル導波路のサイズイメージ	16
図 1-9 COMS 技術の転用による光デバイス製作	16
図 1-10 比屈折率差とデバイスサイズ	17
図 1-11 Si 導波路のヒータ省電力動作	18
図 1-12 Si 導波路の製作プロセス	19
図 1-13 マイクロリング共振器	21
図 1-14 通信フォーマットと要求線幅	23
図 1-15 本論文の構成	25
図 2-1 マイクロリング共振器	26
図 2-2 マイクロリングの Drop ポートの透過強度	27
図 2-3 マイクロリング共振器の周回損失	28
図 2-4 マイクロリング共振器のクロストーク	29
図 2-5 マイクロリングの周回長とFSRの関係	30
図 2-6 縦続接続マイクロリング共振器	31
図 2-7 バーニア効果による FSR 拡大(波長 1545-1555nm)	32
図 2-8 バーニア効果による FSR 拡大(波長 1500-1600nm)	32
図 2-9 周回長比率 M と FSR の関係	33
図 2-10 モード利得差($a=0.99$)	34
図 2-11 モード利得差 ($FSR_{total} = 90nm$)	34
図 2-12 ヒータ電流と電力の関係	36
図 2-13 ヒータ投入電力と共振波長シフト量の関係	36
図 2-14 半導体中の電子のエネルギー順位と光の放出過程	38
図 2-15 ダブルヘテロ接合	39
図 2-16 マイクロリングレーザ	40
図 3-1 3章におけるアプローチ	44
図 3-2 外部鏡レーザのレイアウト	45
図 3-3 試作したマイクロリングレーザの外観	45

図 3-4	マイクロリングレーザの構成.....	46
図 3-5	試作した Si 導波路の導波損失.....	47
図 3-6	Si 導波路近傍に存在する光の吸収源.....	48
図 3-7	線幅とレーザキャビティ長.....	49
図 3-8	キャビティ長と線幅の関係.....	50
図 3-9	モード利得差を計算するための結合効率の定義.....	51
図 3-10	レーザの波長チューニングの原理.....	52
図 3-11	結合効率とモード利得差およびリング損失の関係.....	52
図 3-12	FSR の設計値.....	53
図 3-13	素子実装の概要.....	54
図 3-14	実装位置ずれのヒストグラム.....	59
図 3-15	実装位置ずれと結合損失.....	59
図 3-16	試作したマイクロリングレーザモジュール.....	60
図 3-17	ヒータ投入電力とレーザ発振波長の関係.....	61
図 3-18	ブースタ SOA への注入電流と光出力.....	62
図 3-19	試作した uITLA.....	63
図 3-20	ヒータ投入電力による波長マップ.....	63
図 3-21	発振スペクトル(100 波長を重ねて表示).....	64
図 3-22	自己遅延ヘテロダイン干渉計の構成.....	65
図 3-23	線幅の評価結果.....	65
図 3-24	各 ch の周波数ずれ.....	66
図 3-25	各 ch の光出力ずれ.....	67
図 3-26	状態遷移時の光出力と波長.....	67
図 3-27	マイクロリング共振器の高温保管前後の共振波長シフト.....	69
図 3-28	マイクロリング共振器の屈折率の推定寿命.....	70
図 4-1	マイクロリングレーザで実現可能な機能 [68].....	73
図 4-2	マイクロリングによる光増強 [69].....	74
図 4-3	光パルス入射前のマイクロリング共振器の透過特性.....	75
図 4-4	光パルス入射前後のマイクロリング共振器の透過特性(自己位相変調).....	76
図 4-5	光パルス入射前のマイクロリング共振器の透過特性.....	76
図 4-6	光パルス入射後のマイクロリングの等価特性(相互位相変調).....	77
図 4-7	自己位相変調を用いた信号の波形整形 [69].....	78
図 4-8	相互位相変調効果を用いたインバータ動作 [69].....	78
図 4-9	相互位相変調効果を用いた XOR 演算 [69].....	79
図 4-10	マイクロリングレーザの概要.....	80
図 4-11	マイクロリングレーザの内部構成.....	80
図 4-12	マイクロリングとバスラインの結合部分.....	81

図 4-13 結合部の SEM 画像 [70].....	82
図 4-14 マイクロリングレーザの製作プロセス.....	83
図 4-15 マイクロリングレーザのデバイスレイアウト.....	84
図 4-16 マイクロリングレーザの測定系.....	84
図 4-17 デバイスの外観写真 [72].....	85
図 4-18 インバータ動作の評価結果 [69].....	86
図 4-19 フリップフロップ動作の測定結果 [72].....	87
図 4-20 マイクロリングレーザのレイアウト.....	89
図 4-21 フォトン密度と屈折率の関係.....	91
図 4-22 フォトン密度とマイクロリングレーザの発振波長.....	91
図 4-23 結合効率 $K(\lambda)$ の定義.....	92
図 4-24 フォトン密度と結合効率 $K(\lambda)$	93
図 4-25 フォトン密度に対する非線形利得 (a)発振モード (b)非発振モード.....	94
図 4-26 レーザ発振状態の遷移 (a)注入電流 36.0mA, (b)注入電流 41.6mA.....	97
図 4-27 インバータ動作の実験結果.....	98
図 4-28 フリップフロップ動作の実験結果.....	98
図 4-29 実験結果とシミュレーション結果の比較.....	99
図 4-30 非線形効果の優位性比較.....	100
図 5-1 DFB レーザの構造.....	103
図 5-2 DBR レーザの構造.....	103
図 5-3 CSG レーザの構造.....	104
図 5-4 空間結合外部共振型レーザの構造.....	105
図 5-5 導波路外部共振型レーザの構造.....	105
図 5-6 ヒータ近傍の断面図 (a)従来構造, (b)断熱溝構造.....	108
図 5-7 ヒータ投入電力と波長シフト (a)従来シフト, (b)アナログシフト.....	109
図 5-8 DFBタイプのフリップフロップデバイス.....	111
図 5-9 VCSELタイプのフリップフロップデバイス.....	112
図 5-10 MMIタイプのフリップフロップデバイス.....	113
図 5-11 マイクロリングレーザタイプのフリップフロップデバイス.....	113
Appendix 図 2 マイクロリングの結合効率 $K(\lambda)$ の定義.....	118

表 1-1 光通信帯域の波長範囲の概要	8
表 1-2 導波路型光デバイスの分類	20
表 3-1 素子の実装順序	56
表 3-2 半田材料の種類	56
表 3-3 素子の実装温度	57
表 3-4 半田のサイズ検討	58
表 3-5 評価項目	60
表 4-1 マイクロリングレーザの比較	71
表 4-2 シミュレーションのフロー	95
表 5-1 波長可変光源の構成と特性のまとめ	106
表 5-2 光プロセッサのまとめ	114

発表論文リスト

[第一著者として発表した論文]

学会論文誌

1. N. Kobayashi, Kenji Sato, Masahiko Namiwaka, Keisuke Yamamoto, Shinya Watanabe, Tomohiro Kita, Hirohito Yamada, and Hiroyuki Yamazaki, "Silicon Photonic Hybrid Ring-Filter External Cavity Wavelength Tunable Lasers," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 33, issue 6, pp. 1241-1246, Feb. 2015.
2. N. Kobayashi, Yusaku Kawamura, Ryosuke Aoki, and Yasuo Kokubun, "Nonlinear model analysis of all-optical flip-flop and inverter operation of microring laser," *Japanese Journal of Applied Physics*, vol.57, num. 3, 032201, 2018.

学会発表

1. 小林直樹、佐藤健二、波若雅彦、山本圭介、渡邊真也、北智弘、山田博仁、山崎裕幸、"ハイブリッド集積 Si フォトニクスリングフィルタ外部共振器型波長可変レーザ"、電子情報通信学会、東北大学、2015 年 09 月 招待講演
2. 小林直樹、河村雄作、青木椋祐、國分泰雄、"マイクロリングレーザにおけるインバータおよびフリップフロップ動作の動作原理を解明する非線形モデル"、応用物理学会春季学術講演会、早稲田大学、2018 年 03 月

研究会

1. 小林直樹、佐藤健二、波若雅彦、山本圭介、渡邊真也、北智弘、山田博仁、山崎裕幸、"次世代光通信に向けた Si フォトニクス波長可変レーザ"、光協会、機械振興会館、2015 年 10 月、招待講演

[第一著者以外で発表した論文]

国際会議

1. K. Sato, N. Kobayashi, M. Namiwaka, K. Yamamoto, T. Kita, H. Yamada, H. Yamazaki, "High output power and narrow linewidth silicon photonic hybrid ring-filter external cavity wavelength tunable lasers", European Conference on Optical Communication (ECOC), 21-25 Sept. 2014 (Post deadline paper).
2. K. Sato, N. Kobayashi, M. Namiwaka, K. Yamamoto, T. Kita, H. Yamada, H. Yamazaki, "Demonstration of silicon photonic hybrid ring-filter external cavity wavelength tunable lasers", European Conference on Optical Communication (ECOC), 27 Sept.-1 Oct. 2015 invited.

学会発表

1. 青木椋祐、小林直樹、河村雄作、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"、応用物理学会春季学術講演会、早稲田大学、2018年03月

研究会

1. 佐藤健二、小林直樹、波若雅彦、山本圭介、渡邊真也、北 智洋、山田博仁、山崎裕幸、"ハイブリッド集積シリコンフォトニクスリングフィルタ外部共振器型波長可変レーザの狭線幅および高出力特性"、OPE2014-139 pp. 1 - 6, 2014 [招待講演]

謝辞

本研究に限らず日頃から多大なご指導を頂いた指導教官國分泰雄教授に深く感謝する。また、様々な面で御討論および御協力頂いた本研究室 平成 27 年度博士課程修了渡邊達彦氏、同年修士課程修了生 芝田揚士氏、矢尾暢夫氏、同年卒業生 早坂雄志氏に感謝する。また、平成 28 年度卒業生 青木椋祐氏に感謝する。さらに、平成 29 年度修士修了生 河田涼氏、三浦聖矢氏、河村雄作氏 に感謝する。

合同研究報告会で貴重な御助言および御討論を頂いた馬場俊彦教授、西島准教授および馬場研究室諸氏、西島研究室諸氏に感謝する。事務的な面でお世話になった増永祐子秘書、3 年間お世話になった本学電子情報工学科の諸先生方に感謝する。

公私に渡って多大なるご指導を頂いた、日本電気株式会社佐藤健二シニアエキスパートに感謝する。

最後に様々な面で博士課程修了までのサポートをしてくれた親族に感謝する。特に、余裕のない経済状況から博士課程への進学を後押し、また二人の子育てで忙しいながらも心身共にサポートしてくれた妻恭子に感謝する。