

平成19年度 修士論文

超高速全光ゲートを利用したモードロックパルス発生器の
単一縦モード発振

学籍番号 0632040

中本 亮一

電子工学専攻 光エレクトロニクス講座

指導教官 上野芳康 准教授

副指導教官 富田康生 教授

概要

さらなる高速・大容量光通信を実現するため、従来の波長分割多重方式に光時分割多重高速化方式を組み合わせることが期待されている。そのような方式を用いた超高速光ネットワークの構築には、40 GHz 以上の高繰り返し周波数や 1~5 ps 程度の短パルス幅などの出力パルス特性に加え、高安定かつパルス幅が制御可能な光パルス光源が重要になる。本研究の超高速全光ゲートを用いた光パルス発生方式は、①集積化可能、②パルス幅、繰り返し周波数、パルスの発振波長をそれぞれ独立に設定できるため柔軟にシステムを変更できるといった利点があり、これまで繰り返し周波数 40GHz、パルス幅 2ps のパルス発生に成功している。

しかしながら、本研究以前のパルスは多モード発振を伴っており、繰り返し周波数の質が非常に悪いという欠点があった。

本研究の目的は、上記のパルス発生器において単一縦モード発振を実現することである。

これまでに得られた実験結果より、単一縦モードが実現できると予想される 3 dB 帯域幅 (<400 MHz) 以下のソリッドエタロンを研究試作し、高精度に動作条件調節することにより、180MHz の 3 dB 帯域幅を持つエタロンと光学系を組み立てることができた。

さらに注入連続光の光周波数を高精度に制御した結果、繰り返し周波数 10 GHz、パルス幅 2~5 ps のパルス本パルス発生方式において、従来 0-10dB 程度であったサイドモード抑圧比(SMSR)を 5 ps パルス発生時に 48 dB、2 ps パルス発生時に 35 dB と劇的に向上させることに初めて成功した。

この結果を受けて、本方式の高純度モードロックパルス発生原理の実証が、初めて完成したと考えられる。

本研究における数々の成果は、160 GHz パルス発生、さらに、本パルス発生方式の集積化・実用化に向け大きな役割を果たすと期待している。

目次

第1章 序論

1.1 光時分割多重	3
1.1.1 背景	3
1.1.2 全光信号処理技術	5
1.2 パルス発生器の研究動向	6
1.2.1 モードロック方式	6
1.2.2 その他のパルス発生方式	8
1.3 超高速全光ゲートを利用したパルス発生器	8
1.3.1 動作原理	8
1.3.2 本研究の目的と構成	11
参考文献	13

第2章 パルス発生器の予備的実験

2.1 はじめに	13
2.2 リニア型半導体光増幅器を用いたパルス発生	13
2.2.1 半導体光増幅器の基礎特性	13
2.2.2 実験構成	17
2.2.3 パルス発生実験結果	18
2.3 全光ゲート透過率特性	20
2.4 利得閾値特性	22
2.5 ノンリニア型半導体光増幅器を用いた 40 GHz パルス発生	24
2.6 100 GHz パルス発生	26
参考文献	28

第3章 高フィネスエタロンの設計と評価

3.1 はじめに	29
3.2 高フィネスエタロンの設計	29
3.3 高フィネスエタロンの透過スペクトル	30
3.4 エタロン中での分散による FSR への影響	35
3.5 まとめ	37
参考文献	38

第4章 連続光光源の光周波数制御	
4.1 はじめに	39
4.2 光源の基本特性	39
4.3 光周波数の設定分解能と時間安定性	40
4.3.1 温度コントローラによる光周波数の設定分解能と時間安定性	40
4.3.2 直流電源による光周波数設定分解能と時間安定性	41
4.3.3 ヘテロダイン法を用いた光周波数設定分解能、時間安定性測定	42
4.4 まとめ	44
第5章 リングレーザの単一縦モード発振	
5.1 はじめに	45
5.2 マルチモード帯域幅測定方法	45
5.3 実験結果	46
5.4 リングレーザの発振光周波数の時間安定性	48
5.5 まとめ	49
参考文献	50
第6章 パルス発生器の単一縦モード発振	
6.1 はじめに	51
6.2 10 GHz パルスの単一縦モード発振	51
6.2.1 5 ps パルス発生	51
6.2.2 CW 光同調光周波数範囲	54
6.2.3 2 ps パルス発生	56
6.3 まとめ	59
参考文献	60
第7章 結論	61
謝辞	62
付録1 SOAの故障レポート	63
付録2 講演会投稿予稿	

1 章 序論

本論文は、超高速の全光ゲートを使用した独自の特徴を持つパルス発生器の単一縦モード発振に関する研究成果をまとめたものである。本章では、光通信の発展の経緯を述べ、現在の商用システムの課題について述べ、全光信号処理の必要性を示す。次に全光信号処理で必須のパルス発生器について概説し、最後に本研究の目的と課題についてまとめる。

1.1 光時分割多重方式

1.1.1 研究背景

今現在の本格な光通信の研究が始まったのは、1960年代に半導体レーザが発明されてコヒーレントな光が用いられるようになってからであり、1979年には波長 1550 nm において理論限界といわれる伝送損失 0.2 dB/km の単一モード光ファイバが実現し、現在の光ファイバ通信の基礎が確立された。今現在の使われている信号の識別方式は、光搬送波を強度変調 (Intensity-Modulation) 信号にして、強度を直接検波 (Direct-Detection) する IM-DD 方式が主流である。さらに、広帯域かつ高利得な希土類添加ファイバの登場、波長時分割多重方式の (Wavelength Division multiplexing, WDM) の発明により、伝送容量は急激に拡大してきた。

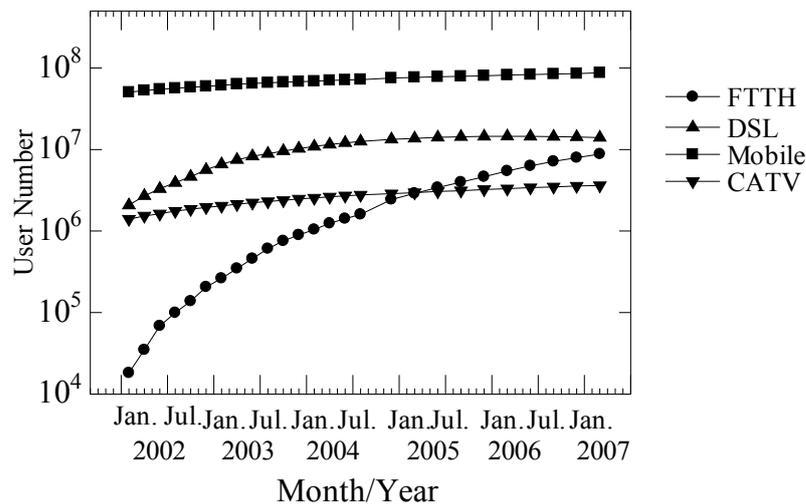


図 1.1 ブロードバンド契約者推移、総務省発表

図 1.1 は、我が国における各種ブロードバンドにおける契約者の推移を表している。光ファイバを各家庭に引き込む Fiber to the home, FTTH は急激に拡大していることが見て取れる。

さらに世界的な通信インフラの整備により、今後益々通信容量は増大していくことが予想される。このような通信容量の増大に対して、現在のシステムでは、信号の多重方式は WDM のみである。WDM の原理図を図 1.2 に示す。WDM では、互いに異なる波長で変調された光をカプラで多重 (Multiplexing, MUX) し、伝送後多重分離 (Demultiplexing, DEMUX) する。多重及び多重分離する素子としては、ファイバブラッググレーティング (Fiber bragg grating, FBG) などが良く知られている。この方式により、10.92 Tb/s (40Gb/s \times 273) の WDM 実験が報告されている [1]。しかしながら WDM では、図 1.2 からわかるように非常に多くのシステム構成・保守部品が必要であり、伝送容量を増やすには、高密度に波長を多重するため、波長の精密な制御が必要であるといった欠点があり、さらなる大容量化は困難である。

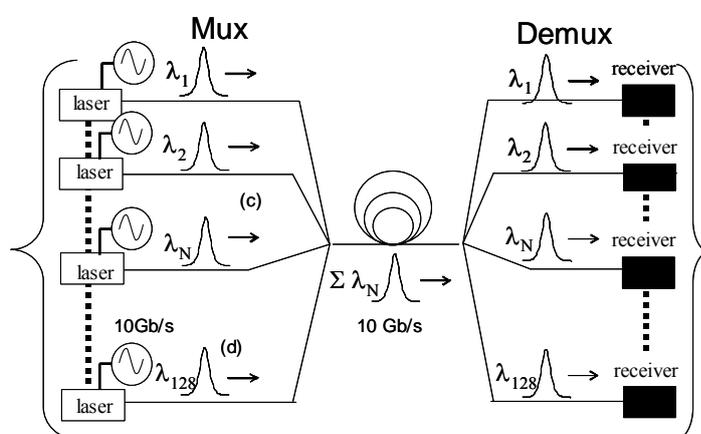


図 1.2 波長分割多重方式の概略図

その他の高速な伝送方式として、1 チャンネルあたりの伝送容量を増やす差動 4 値位相変調方式 (Differential Quadrature Phase Shift Keying) があり、 $8 \times 40\text{Gb/s}$ の伝送実験が報告されているが [2]、構成が複雑であり、光送受信器のサイズや消費電力が大きくなるといった課題があり、実用化には至っていない。

光時分割多重方式 (図 1.3) (Optical Time division multiplexing, OTDM) は、1 チャンネルあたりの伝送容量を増加させることができるため、WDM で問題となっているリソースの削減ができると期待されている。将来の光通信ネットワークは、WDM と OTDM を組み合わせたネットワークにすることが期待されている。

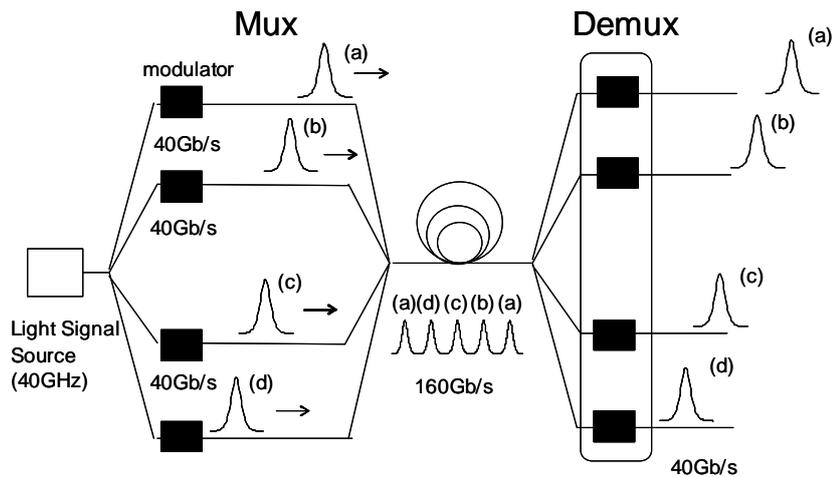


図 1.3 時分割多重方式の概略図

1.1.2 全光信号処理

OTDM 伝送方式では、超高速の信号(>40Gb/s)を取り扱うため、電子回路では信号処理しきれない。そのため、光信号を光信号のまま処理する全光信号処理を行うことがシンプルなシステム構成、省電力につながると期待されている。以下に代表的な全光信号処理の役割を述べる

・波長変換

現在、主に研究されている全光波長変換の構造の 1 つに、半導体光増幅器 (Semiconductor optical amplifier, SOA) と波長フィルタとバンドパスフィルタ(Band pass filter, BPF)を組み合わせた方法が良く用いられている (図 1.4)。波長フィルタとして、マッハツェンダー干渉計を用いた構成で、伝送速度 320 Gb/s の波長変換が報告されている[3]。また、SOA による変調成分を、フーリエ成分ごとに分離し、強度成分と位相成分を調節した後、再び合波させるスペクトル合成方式による波長変換も報告されている[4,5]



図 1.4 全光波長変換器

・多重分離

OTDMによって重ねられた多重信号は、伝送後にチャンネルごとに分離(DEMUX)しなければならない。次々世代光通信の伝送速度は160 Gb/sであり、40 Gb/s×4チャンネルで多重される。この場合、40 GHzのパルスと信号をDEMUXに入力し、1チャンネルごとに別々に取り出す。このDEMUXの方式には、SOAを用いた半導体型と非線形ファイバを用いたファイバ型の2種類がある。前者は半導体集積化技術を駆使して、小型化が可能、低消費電力といったメリットがあり、後者は超高速のDEMUXが可能であるといった利点がある。SOA型では、対称マッハツェンダー型(Symmetric mach zehnder, SMZ)[6]のDEMUXが代表的であり、336 Gb/sでのDEMUXが報告されている[7]。ファイバの非線形効果を利用した方式では、1.28 Tb/sのDEMUXが報告されている。

・全光 3R 再生

光信号を光ファイバで伝送するうちに、光信号はファイバの波長分散、偏波分散、自己位相変調などにより、

- 1 パルス幅が広がる。
- 2 光信号のピークパワーにばらつきが生じる
- 3 時間ジッタが生じる

信号の品質が劣化する。このような信号は、3R再生(Reshaping, Reamplifying, Retiming)しなければならない。現在 SMZ 型[9]、偏光識別対称マッハツェンダー型 (Polarization Discrimination Symmetric, PDSMZ)型[10]の全光 3R 再生実験が報告されている。

これら全光信号処理では、幅が狭く、かつ高繰り返し周波数のパルス光源が参照光として必須となる。次節でそれらのパルス光源についての報告を述べる。

1.2 パルス発生器の研究動向

1.2.1 モードロック方式

今現在、超高速の OTDM 実験で使われているパルス発生器はモードロック方式のパルス発生器が最も使われている。モードロック方式は主に、能動モードロック、受動モードロックに分けられる。これら二つの方式について概説する。

・能動モードロック

能動モードロックにおいては、レーザ共振期中に光変調器を挿入し、外部から電気信号による変調を掛けることでモードロック動作が生じて光パルスが発生する。能動モードロック方式は、増幅媒質として EDF を使うファイバ型と InGaAsP などの間接遷移型の半導体

を使う半導体型の 2 種類が光通信用のパルス光源によく用いられている。ファイバ型はモードロックファイバレーザ(Mode lock fiber laser, MLFL)[11]と呼ばれ、半導体型は集積化モードロック半導体レーザ(Monolithic mode locked laser diode, MLLD)[12]と呼ばれている(図 1.5)。

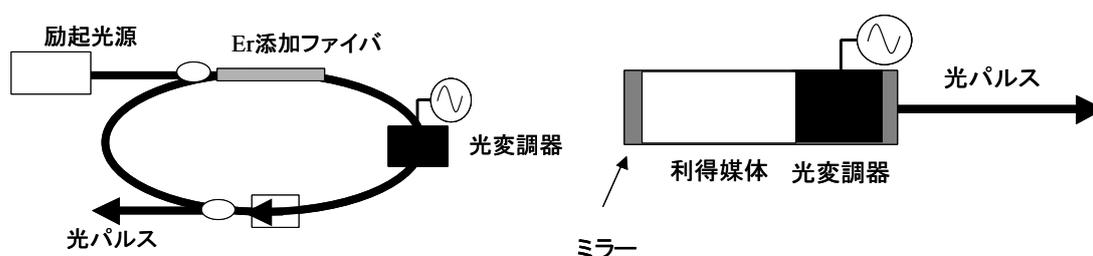


図 1.5 能動モードロックパルス発生器、右：MLFL、左：MLLD

MLFL は 40 GHz で動作するパルス発生器が市販されており、広波長帯域で動作させることが可能、動作周波数の自由度である同調周波数が広い、といった利点があるが、大型であることや、動作が不安定になりやすく、安定発振させるためには、複雑な制御が必要であるといった欠点がある。

また、能動モードロックタイプの MLLD は 40 GHz 程度の繰り返し周波数で動作するパルス発生器が報告されている[13]、小型であるといった利点はあるが、同調周波数が狭い、発振波長の自由度が少ないといった欠点がある。

・受動モードロック

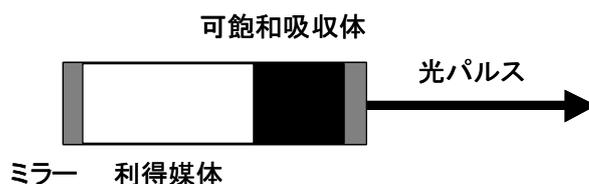


図 1.6 能動モードロックパルス発生器

受動モードロックパルス発生器は共振器内に可飽和吸収体を挿入した構造を持つ(図 1.6)。繰り返し周波数は、この共振器長で一意に決まり、40 GHz のパルス発生器の場合、1 mm ほどになる。よって繰り返し周波数の自由度はなくなる。パルス幅は可飽和吸収体の吸収回復時間の早さで決まる。

受動モードロック方式は、光変調器が不要なため、超高速のパルス発生が可能であり、

1 THz のパルス発生が報告されている。しかし、可飽和吸収体の光損傷耐性が脆弱であるという欠点がある。このような欠点を補うため、可飽和吸収体として量子ドット[14]やカーボンナノチューブ[15,16]を使用したモードロックパルス発生器も報告されている。

また、受動モードロックと能動モードロックを併用するハイブリッドモード同期方式で高純度のパルス発生を発生した報告もなされている[15]

1.2.2 モードロック方式以外のパルス発生方式

モードロック方式以外でパルス発生をさせる方式は、電界吸収型変調器 (Electro absorption modulator, EAM) で連続光(Continues wave)を変調する方式がよく用いられており、分布帰還型レーザーダイオード(Distributed feedback laser diode, DFB-LD)と EAM をモノリシックに集積したパルス発生器が報告されており[16]、長距離伝送実験などで使われている。繰り返し周波数 1 THz 以上の超高周波パルス発生方式としては、CW 光と CW 光を合波させることで光のうなりを発生させ、その光信号を分散フラットファイバで圧縮させることでパルスを発生させる方式[17]や、市販の MLLD の出力光を元にスーパーコンティニューム (Super Continuum, SC) 光を発生させ、フーリエ成分の強度を THz 間隔にすることで高繰り返し周波数のパルスを発生させる方式などが報告されている[18]。

また、主に計測用途で超高純度のパルス、“光コム”を発生させる方式が提案されている[19]。

1.3 超高速全光ゲートを利用したパルス発生器

1.3.1 動作原理

前出のパルス発生器などは各々課題があり、未だ商用システムでは使われていない。最近、上野らによって、超高速全光ゲートを使用したパルス発生器が報告された[20,21]。この超高速全光ゲートは遅延干渉型波長変換器 (Delayed inter Delayed-Interference Signal-Wavelength Converter, DISC) と呼ばれている。DISC のメカニズムは以下に説明する(図 1.7)。

1. 光パルスが SOA に入ることにより、相互位相変調 (Cross phase modulation, XPM) が CW 光に引き起こされる。
2. マッハツェンダ干渉計に入り、均等のパワーになるように分かれる。この時、片方に遅延 (Δt) が掛けられる。 Δt は概ね入力パルス幅である。両アームの位相差は概ね π になっている。
3. 合波することで、位相の透過窓が形成される。つまり、XPM による位相シフトが起きて

いる時に光が出力され、位相シフトが起きていないと、光が打ち消される。不要な λ_1 の信号光は、バンドパスフィルタ (Band pass filter, BPF) で除去される。

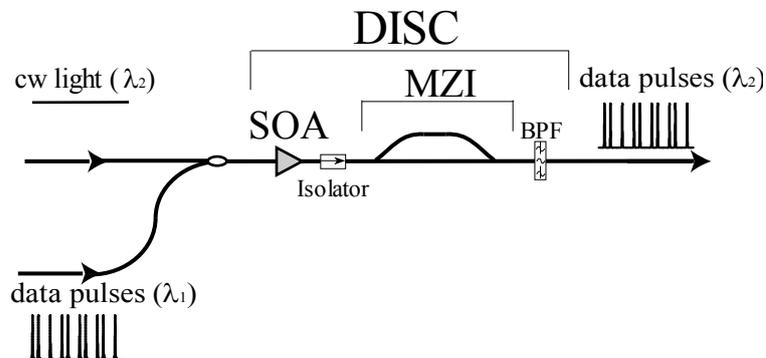


図 1.7 DISC の構成図

以上が DISC の大まかな動作である。次に DISC-loop 型パルス発生器(以下、DISC-loop)の動作を説明する。

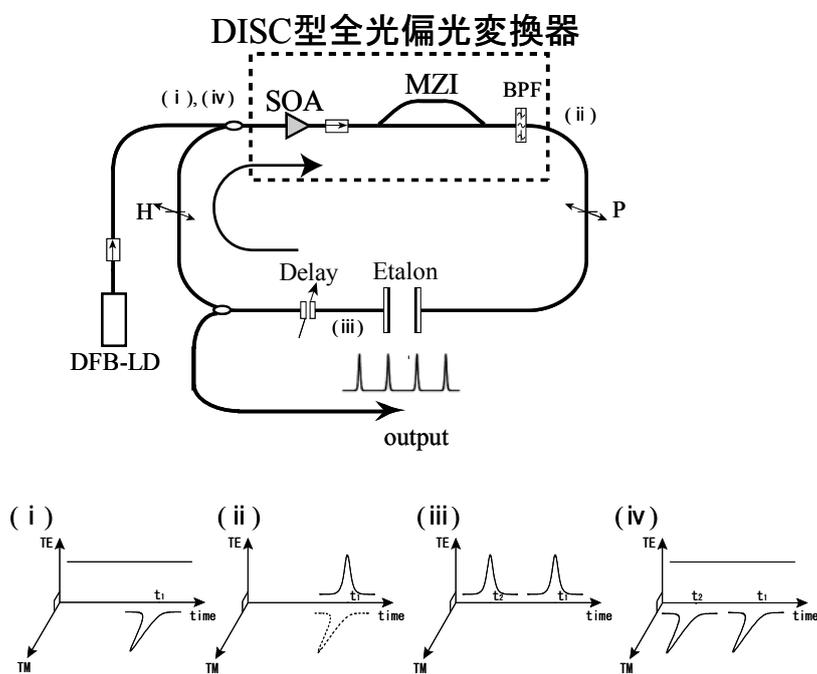


図 1.8 DISC-loop 型パルス発生器の原理図

図 1.8 に示すように、DISC-loop は外部連続光源とリング共振器で構成されている。リング共振器は前述の DISC 型全光ゲート、エタロン、偏光子(polarizer, P)、 $\lambda/2$ 波長板(Half wave plate, H)、遅延線で構成されている。その周回原理として、SOA から出力された増幅自然放出光 (Amplified Spontaneous Emission, ASE) のスパイクノイズが全光 DISC ゲートで連続光に微小な位相シフトを与え、連続光を変調することで、初期パルスが発生する。その初期パルスが再度、SOA に帰還し、連続光に微小な位相シフトを与えることで、再び新たなパルスが発生する。この動作が繰り返されることで、リング共振器を周回する光の状態は、定常状態に移行する。その定常状態において、(i)のようにパルスと連続光を互いに直交偏光にした上で DISC ゲートに inputs する。DISC ゲートにおいて、連続光がパルスによって変調され、新たな連続光の偏光を持ったパルスが発生する。この光は TE 偏光である。また、CW に変調をほどこした TM 偏光のパルスは偏光子により消光される。これが DISC における偏光変換動作である(ii)。これは CW レーザ発振を抑制するために行われる。その後、(iii)のように、エタロンによって、パルスは分離し、エタロンの自由スペクトル間隔に相当する遅延時間が与えられる。そして、偏光制御器によって、TE 偏光のパルスは TM 偏光に変えられ、SOA に帰還する(iv)。 delay はリング共振器周波数がエタロン周波数の整数倍になるようにするために用いられる。これにより、リング共振器内部がエタロン周波数の繰り返し周波数を持つパルス列で埋め尽くされる状態が作られる。これにより、強度のそろったパルス列が形成される。以上が DISC-loop の動作原理である。

本パルス発生器の利点は、

- ・ パルス幅が MZI の遅延時間で、パルス波長が外部連続光光源で、繰り返し周波数がエタロンで、決定されるため、従来のパルス発生器よりも自由な制御が可能となる。これは、前述の超高速・大容量 TDM-WDM ネットワークを構築する上で、柔軟なシステム設計ができる。
- ・ 第 2 に、可飽和吸収体に代表される、特殊な光学材料や部品を必要とせず、SOA や MZI などの従来型汎用集積化部品のみで構成される点である。これは、集積化が可能、長期信頼性が高い(壊れにくい)、大量生産性が良いことを示している。原理的に集積化が可能

2001 年に本方式により初めて上野らにより繰り返し周波数 10GHz、パルス幅 5ps のパルス発生の実証が報告された[22]。また 2006 年には、40GHz、2ps のパルス発生が鈴木らによって報告されている[23]。

1.3.2 本研究の目的と構成

前節で、DISC-loop の大まかな動作原理と今までの研究成果について述べた。しかし、本研究以前のパルスには、問題があった。それはマルチ縦モード発振を伴っているという点であった。図 1.9 にその様子を示す。

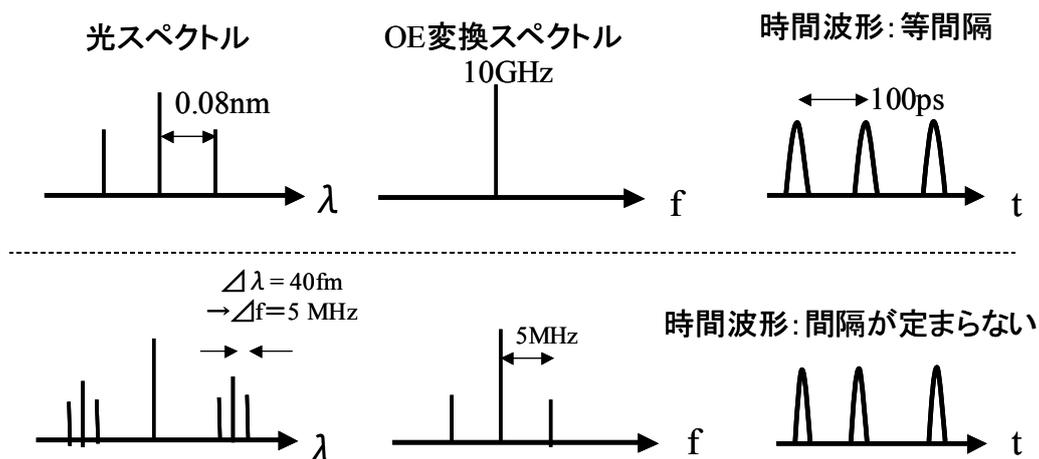


図 1.9 DISC-loop の発振状態、上段: 単一縦モード発振状態、下段: マルチ縦モード発振状態

単一縦モードの場合、繰り返し周波数が 10 GHz だとすると、光スペクトルの間隔はおよそ 0.08 nm になる(中心波長 1550 nm の場合)。これを光-電気変換(OE 変換)した信号のスペクトルを測定すると、10 GHz の成分が 1 本立つ形になり、時間波形は等間隔のパルスが発生しているといえる。

しかしマルチ縦モード発振状態(下段)だと、共振器周波数間隔で光スペクトルが発生してまい、これの OE 変換スペクトルを測定すると、5 MHz 間隔でスペクトル成分が立つ。この発振状態の時間波形は、間隔が定まらない非常に質の悪いパルスが発生している状態になっていると思われる。

本研究の目的は、本パルス発生方式において、単一縦モード発振を実現することである。本研究以前では、リング内に EAM によって変調された光をいれることで単一縦モード化を目指す光注入同期などいくつかの試みがあったが、単一縦モード化は実現していない。

単一縦モード化を目指すには、主に 2 つあり、

- ・ 高フィネスのエタロン、つまり狭い 3 dB 帯域幅 (Bandwidth, 以下 BW) のエタロンを用いることで、余分な縦モードを取り除く。

- ・ 共振器長を短くし、縦モードの周波数間隔を広げる。

の二通りがある。2 番目の方法では、共振器長を数 m のオーダーまで短くしなければならず、現段階の研究室環境で実現は非常に難しい。よって 1 番目の方法で単一縦モード化を目指すことにした。

エタロンを MLFL の共振器長に組み込むことで余分な縦モードを取り除く研究はいくつか為されているが[24, 25, 26]、本方式において単一縦モード発振を実現した報告は、筆者の知る限り、未だ為されていない。

以下に本論文の構成を説明する。

2 章では先の研究[22]を元に、さまざまな SOA を使ってパルス発生をし、パルス発生を行うことができる SOA かどうか、実験を行った。

3 章では先に述べた狭い BW のエタロンと設計と透過スペクトルの評価について述べる。さらに、パルス発生をする上で影響してくると思われた、エタロン中での分散の影響について述べる。

4 章では、注入 CW 光の光周波数の制御が、高フィネスエタロンを使う上で重要になることが予想されたので、どの程度制御が可能なのか、実験を行った上で考察した。

5 章では、高フィネスエタロンを使用したリングレーザの実験について述べる。

6 章で、DISC-loop の単一縦モード動作の結果を報告する。

最後に、7 章において本研究の成果を要約し、今後の研究課題をまとめて、本研究の結論とする。

参考文献

- [1] K. Fukuchi, T. Kasamatsu, M. Morie, R. Ohhira, T. Ito, K. Sekiya, D. Ogasahara, and T. Ono, "10.92-Tb/s (273x40-Gb/s) triple-band/ultra-dense WDM optical-repeated transmission experiment," in *proc. Optical Fiber Communication Conference 2001*, post deadline paper PD24.
- [2] C. Nancy, H. Denschlag, E. Gottwald, P. Krummrich, J. Leibrich, E. D. Schmidt, B. Lankl, and W. Rosenkran, "High Spectral Efficiency 1.6-b/s/Hz Transmission (8 40 Gb/s With a 25-GHz Grid) Over 200-km SSMF Using RZ-DQPSK and Polarization Multiplexing", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 13, No. 5, pp. 469-471, May 2001.
- [3] Y. Liu, E. Tangdiongga, Z. Li, S.Zhang, H. de Waardt, A.M.J.Koonen, G.D. Khoe and H.J.S. Dorren, "Error-Free 320 Gb/s SOA-Based Wavelength Conversion Using Optical Filtering," in *Proc. Optical Fiber Communication Conference 2006*, post deadline paper PD28
- [4] J. Leuthold, D. M. Marom, S. Cabot, J. J. Jaques, R. Ryf, and C. R. Giles, "All-Optical Wavelength Conversion Using a Pulse Reformatting Optical Filter," *IEEE J. Lightwave Technol. Lett.*, Vol. 22, No. 1, pp. 186-192, Jan. 2004.
- [5] Y. Ueno, R. Nakamoto, J. Sakaguchi, and R. Suzuki, "Optical-spectrum-synthesizer design within an all-optical semiconductor gate to reduce waveform distortion induced by carrier-cooling relaxation at sub-Terahertz frequencies," *Opt. Express.*, Vol. 14, No. 26, pp. 12655-12664, Dec. 2006.
- [6] K. Tajima, "All-optical switch with Switch-off time unrestricted by carrier lifetime," *Jpn. J. Appl. Physics* Vol. 32, No. 12, pp. 1746-1749, Dec. 1993.
- [7] S. Nakamura, Y. Ueno, K. Tajima, J. Sasaki, T. Sugimoto, T. Kato, T. Shimoda, M. Itoh, H. Hatakeyama, T. Tamanuki, and T. Sasaki, "Demultiplexing of 168-Gb/s data pulses with a hybrid-integrated symmetric Mach-Zehnder all-optical switch," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 12, No. 4, pp.425-427, Apr. 2000.
- [8] M. Nakazawa, T.Yamamoto and K.R.Tamura, "1.28 Tbit/s-70 km OTDM transmission using third- and fourth-ordersimultaneous dispersion compensation with a phase modulator", *IEEE Electron. Lett.*, vol. 36, No. 24, pp.2027-2029, Nov. 2000
- [9] S. Nakamura, Y. Ueno, K. Tajima, J. Sasaki, T. Sugimoto, T. Kato, T. Shimoda, M. Itoh, H.

Hatakeyama, T. Tamanuki, and T. Sasaki, "Demultiplexing of 168-Gb/s data pulses with a hybrid-integrated symmetric Mach-Zehnder all-optical switch," *IEEE Photon., Technol. Lett.* Vol. 12, No. 4, pp.425-427, Apr. 2000.

[10] Y. Ueno, S. Nakamura, and K. Tajima, "Penalty-free error-free all-optical data pulse regeneration at 84 Gb/s by using a Symmetric-Mach-Zehnder-type semiconductor regenerator," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 13, No. 5, pp. 469-471, May. 2001.

[11] H. Takara et al., "20GHz transform-limited optical pulse generation and bit-error-free operation using a tunable, actively mode locked Er-doped fiber ring laser," *Electron. Lett.*, Vol.29, pp.1149-1150, Jun. 1993

[12] R. S. Tucker, U. Koren, G. Raybon, C. A. Burrus, B. I. Miller, and T. L. Koch, "40GHz active mode-locking in a 1.5 um monolithic extended-cavity laser," *Electron. Lett.*, Vol.25, No. 10, pp. 621-622, May. 1989

[13] S. Arahira, S. Oshiba, Y. Matsui, T. Kunii, and Y. Ogawa, "Terahertz-rate optical pulse generation from a passively mode-locked semiconductor laser diode," *Opt. Lett.*, Vol. 19, No. 11, pp. 834-836, Jun. 1994

[14] M.G. Thompson, D. Larson, A.R. Rae, K. Yvind, R.V. Penty, I.H. White, J. Hvam, A.R. Kovsh, S.S. Mikhlin, D.A. Livshits, and I.L. Krestnikov, "Monolithic Hybrid and Passive Mode-Locked 40GHz Quantum Dot Laser Diodes" in *European Conference on Optical Communication 2006*, We4.6.3

[15] S. Amhira, N. Mineo, K. Tachibana and Y. Ogawa, "40GHz hybrid mode locked laser diode module operated at ultra-low RF power with impedance matching circuit," *Electron. Lett.*, Vol.39, No. pp. 287-.289, Feb. 2003

[16] H. Kawanishi, Y. Yamauchi, N. Mineo, Y. Shibuya, H. Murai, K. Yamada, and Hiroshi Wada "EAM-Integrated DFB Laser Modules With More Than 40-GHz Bandwidth," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, VOL. 13, NO. 9, pp.954-956, Sep. 2001

[17] Y. Ozeki, S. Takasaka, J. Hiroishi, R. Sugizaki, T. Yagi, M. Sakano and S. Namiki, "Generation of 1 THz repetition rate, 97 fs optical pulse train based on comb-like profiled fibre," *Electron. Lett.*, Vol.41, No.19, pp. 1048-1050, Sep. 2005.

- [18] S. Anzai, Y. Komai, M. Mieno, N. Wada, T. Yoda, T. Miyazaki, and K. Kodate, "Repetition Rate and Central wavelength Tunable Terahertz Optical Clock Generation Using Variable Bandwidth Spectrum Shaper," In *proc. OECC 2007*, 11D2-2
- [19] D. J. Jones, S. A. Diddams, J. K. Ranka, A. Stentz, R. S. Windeler, J. L. Hall, and S.T. Cundiff, "Carrier-Envelope Phase Control of Femtosecond ModeLocked Lasers and Direct Optical Frequency Synthesis," *Science* Vol.288, No. 5466, pp. 635-639, Apr. 2000.
- [20] Y. Ueno, S. Nakamura, K. Tajima, and S. Kitamura, "3.8-THz Wavelength Conversion of Picosecond Pulses Using a Semiconductor Delayed-Interference Signal-Wavelength Converter (DISC)," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 10, No. 3, pp. 346-348, Mar. 1998.
- [21] Y. Ueno, S. Nakamura, and K. Tajima, "All-Optical Divided-Clock Extractor Using an Ultrafast All-Optical Symmetric-Mach-Zehnder-Type Semiconductor Switch Embedded in an Optical Loop," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 39, No. 8A, pp. 803-805, Aug. 2000.
- [22] Y. Ueno, S. Nakamura, and K. Tajima, "5-ps, 10-GHz pulse generation from an all-optical semiconductor switch embedded in a ring cavity," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 79, No. 16, pp. 2520-2522, Oct. 2001.
- [23] R. Suzuki, T. Ohira, J. Sakaguchi, and Y. Ueno, "40-GHz mode-locked pulse generation with a new scheme of SOA-based pulse generation," in *proc CLEO/QELS 2006*, paper no. CMG5.
- [24] K. S. Abedin, M. Hyodo, and N. Onodera, "Active stabilization of a higher-order mode-locked fiber laser operating at a pulse-repetition rate of 154 GHz," *Opt. Lett.*, Vol 26, No.3, pp. 151-153, Feb. 2001.
- [25] S. Gee, F. Quinlan, S. Ozharar, and P.J. Delfyett, "Simultaneous Optical Comb Frequency Stabilization and Super-Mode Noise Suppression of Harmonically Mode-Locked Semiconductor Ring Laser Using an Intracavity Etalon," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 17, No. 1, pp. 199-201, Jan. 2005.
- [26] M. Yoshida, K. Kasai, and M. Nakazawa, "Mode-Hop-Free Optical Frequency Tunable 40-GHz Mode-Locked Fiber Laser," *IEEE J.Quantum Electron.*, Vol. 43, No. 8, pp. 704-708 Aug. 2007.

2 章 パルス発生の子備的実験

2.1 はじめに

この章では、様々な種類の SOA を使ってパルス発生を行い、その結果について述べる。本研究以前では、1 種類のみ SOA を使ってパルス発生を行っていたが、本研究において初めて多種類の SOA を使ってパルス発生を行った。

2.2 リニア型半導体光増幅器を使ったパルス発生

2.2.1 半導体光増幅器の増幅特性

過剰光パワーによるモジュール SOA の入力端面損傷が続いたため、研究室に豊富にあるチップタイプのリニア型の SOA (以下、chip-SOA) を使ってパルス発生器の試作回路を組んだ(損傷については、付録 1)。ここでいうリニアとは、プリアンプとしての用途を主眼において設計された SOA という意味である。一方ノンリニアの SOA とは、非線形効果によるスイッチング用途を主眼において設計された SOA である。

しかしながら、SOA としての基本構造は変わらないため、リニアの SOA でも、非線形効果が生じる。つまり XPM による波長変換が可能である。図は chip-SOA の写真である。

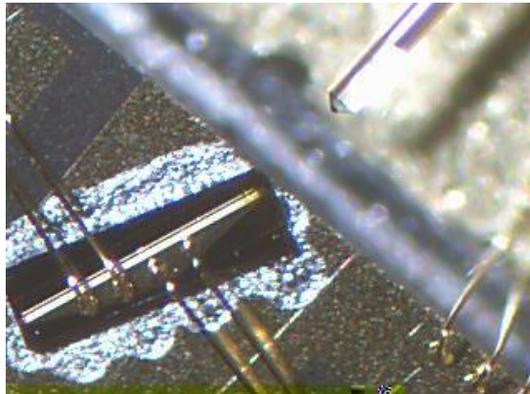


図 2.1: chip-SOA 左下: chip-SOA 本体、活性層の長さ: 1000 μm 、右上 : 先球ファイバ

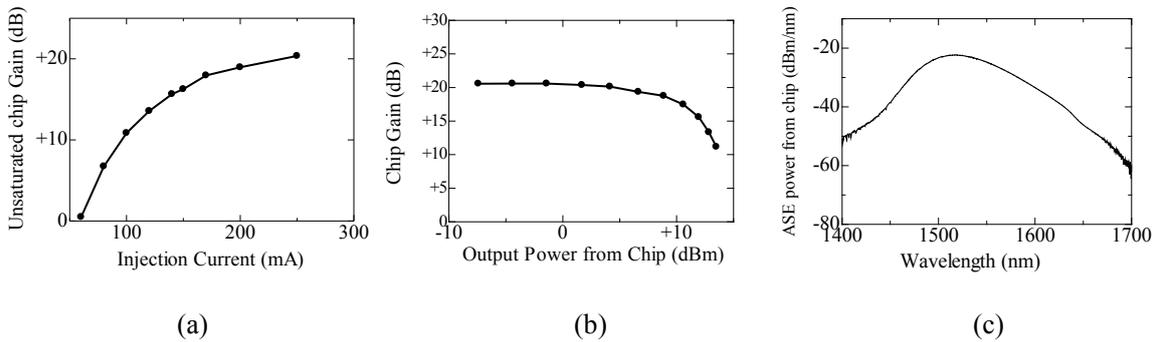


図 2.2: chip-SOA の基礎特性、(a)非飽和利得、(b)飽和出力特性、(c)ASE 光スペクトル

chip-SOA の活性層の長さは 1000 μm の物を用いた。この SOA の増幅器としての基礎特性を図 2.2 に示す。図 2.2 (a)は chip-SOA 非飽和利得特性であり、入力光強度を -30 dBm とした時の利得量である。注入電流を 250 mA とした時、20.4 dB の利得量があった。利得が 22 dB の非線形型の SOA でパルス発生に成功していたことから、十分な利得量があると判断した。図 2.2 (b)は飽和出力特性である。飽和出力パワーは、非飽和利得の最大値が 3 dB 下がった時の出力パワーと定義すると、 $+11.6 \text{ dBm}$ であった。

図 2.2 (c)は ASE 光のスペクトルである。ピークが 1517 nm 付近に存在し、3 dB 帯域幅は 65 nm であった。パルス発生はこの帯域内の波長で行った。

2.2.2 実験構成

実験構成図を図 2.3 に示す。SOA とファイバのカップリングには、曲率半径 6 μm の偏波保持タイプでない、分散シフトファイバ(Dispersion shift fiber, DSF)を用いた。光学系や chip-SOA のマウントは、本研究室の坂口氏が組み立てた物を使用した[1]。

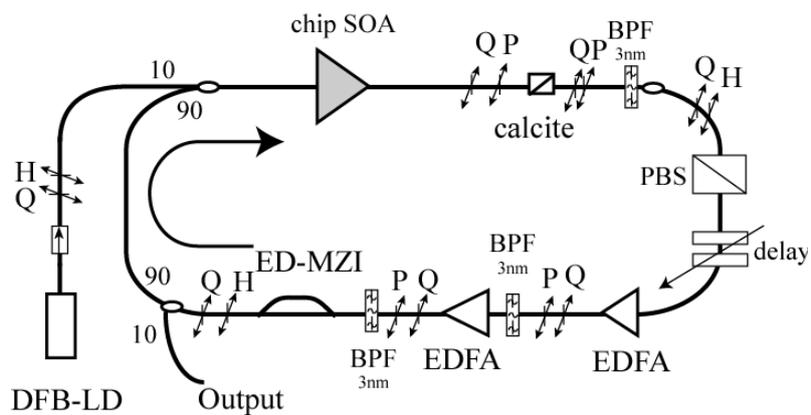


図 2.3: chip SOA を用いたパルス発生実験

DFB-LD: Distributed feedback laser diode, Q: Quarter wavelength plate, H: Half wavelength plate, P: Polarizer, PBS: Polarization beam splitter, BPF: Band pass filter, EDFA: Erbium doped fiber

amplifier, ED-MZI: Energy distributed mach zehnder interferometer

2.2.3 パルス発生実験結果

SOA の注入電流を 250 mA とした。EDFA の非飽和利得の合計値を 54 dB とし、chip-SOA に入る CW 光強度は -6.5 dBm とした。ED-MZI の自由スペクトル間隔は 10 GHz であり、カルサイトの遅延時間は 5 ps の物を用いた。その結果、パルスを発生させることができた。

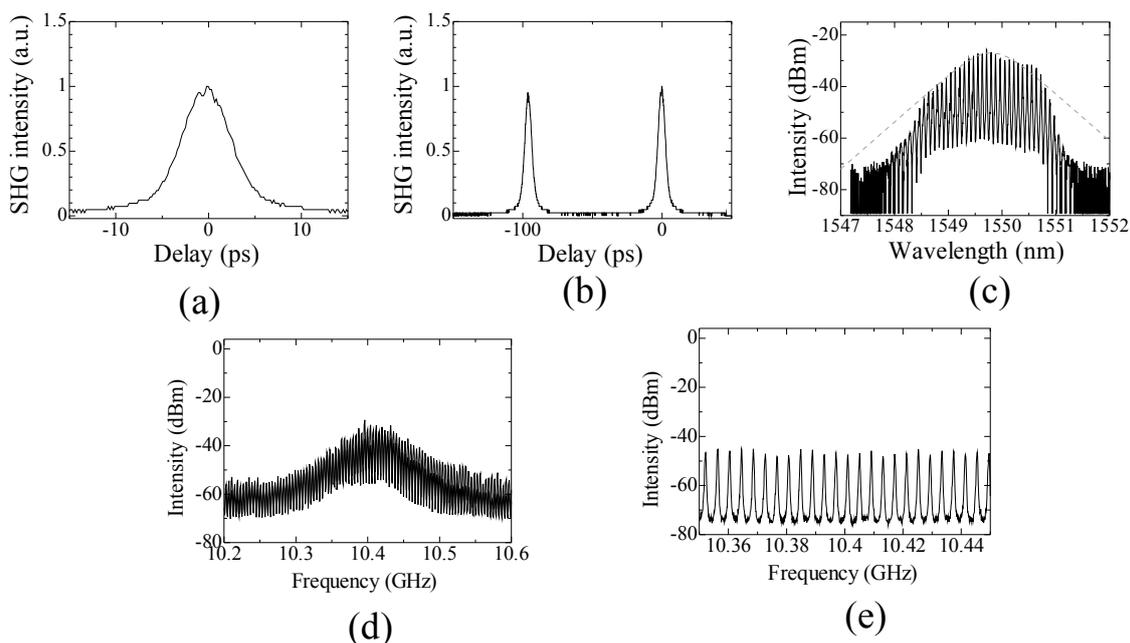


図 2.4: 10 GHz, 5 ps パルス発生実験結果 (a)、(b): 自己相関波形、(c): 光スペクトル, 実線: 実験結果、点線(灰色) 計算結果 (sech^2)、(d)、(e): OE 変換スペクトル

図 2.4(a),(b)より自己相関波形の半値幅は 5.7 ps となり、これを実際の時間波形の半値幅に換算すると、3.7 ps となり、図 2.4 (c)より時間バンド幅積は 0.40 となった。パルスの消光比は 16 dB と、ノンリニア型の SOA を用いたときのほぼ同じ程度であった。図 2.4 (d), (e)から、SMSR は 0 dB、共振器周波数は 4 MHz であり、本研究以前の結果とほぼ同じ値になった。

また、活性層の長さが 700 μm の chip-SOA でも同様にパルス発生を試みたが、パルスは発生しなかった。その時の光スペクトルを図 2.5 に示す。

パルス発生が起こらなかった原因として、非飽和利得が小さいことがあげられる。700 μm の SOA の非飽和利得は 12 dB であった。利得の変調が原因で位相シフトが起こるため、利得が大きいほど位相シフトが大きくなり、出力光は大きくなる。利得が小さいと位相シフトが小さくなり、出力光は弱くなる。そのため EDFA で利得を補いきれず、パルス発振が

できなかったと思われる。パルス発生時に EDFA の利得が足りないと、図 2.5 に示すようなレーザ発振状態になる。DISC 内部のマッハツェンダ干渉計の透過スペクトルピーク付近が一番レーザ発振しやすいため、注入 CW 光 (波長 1548.5 nm) の両サイドにレーザ発振成分が現れる。DISC のスイッチング特性、DISC の透過率特性については、次節で詳しく述べる。

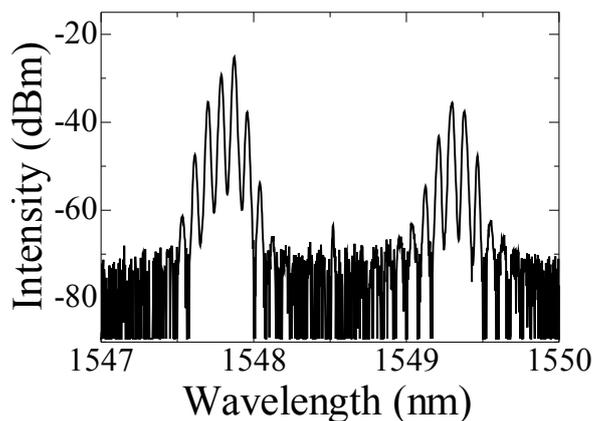


図 2.5: 利得が十分でないときの DISC-loop 出力光の光スペクトル

次に 40 GHz、5 ps のパルス発生実験を試みた。EDFA の非飽和利得の合計値を 56 dB とした。その他の動作条件は、10 GHz、5 ps の時と同じある。

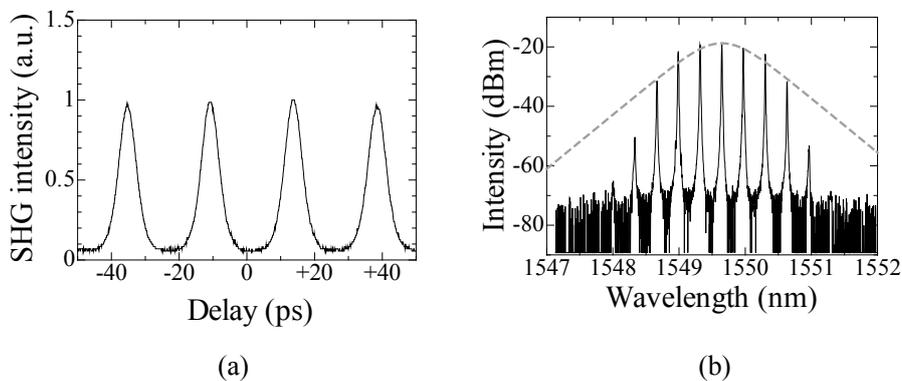


図 2.6: 40 GHz, 5 ps パルス発生実験結果、(a): 自己相関波形、(b): 光スペクトル、実線: 実験結果、点線: 計算結果 (sech^2)

自己相関波形の半値幅は 6.0 ps となり、これを実際の時間波形の半値幅に変換すると、4.0 ps となり、図 2.4 (c)より時間バンド幅積は 0.43 となった。パルスの消光比は 12.5 dB と 10 GHz のときより悪化した。これは、非線形位相シフト量が下がったため、DISC の透過率が悪くなったのが原因だと思われる。

2.3 全光ゲート透過率特性

全光ゲート透過率 (以下、DISC 透過率)とは、クロック信号 λ_1 からクロック信号 λ_2 への波長変換効率のことを言う(図 2.7)。

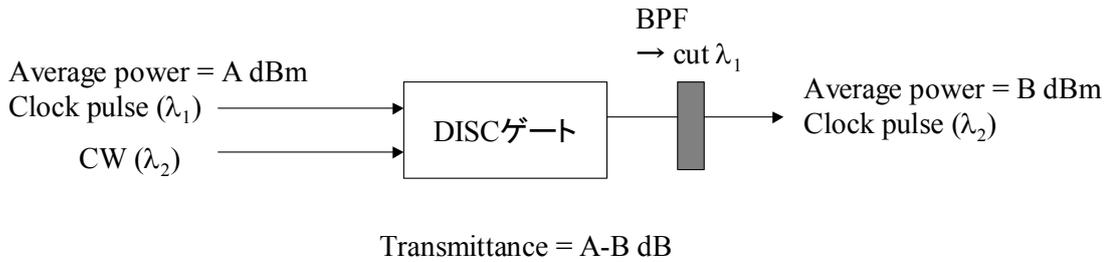


図 2.7: 全光ゲート透過率計算模式図

DISC 透過率は、位相シフト量がおおよそ π になる時に最大値を取り、また、非飽和利得量に比例する。よって非飽和利得が大きいノンリニア型の SOA が、DISC 透過率が大きいと予想できる。

最近、大平により DISC 透過率の系統的研究が為され[2,3]、SOA を 2 台カスケード接続することで透過率が+になることが報告されている[4]。

これまでの実験では、DISC 透過率の損失とリング共振器中の受動部品の損失を補うために、共振器中に 2 台も EDFA を入れていた。DISC 透過率を上げることで、EDFA が 1 台になり、共振器長が短くなるため、その分単一縦モードが発生しやすくなる。よって DISC-loop に最適な SOA を選ぶことにした。

クロック信号は、繰り返し周波数 12.5 GHz、パルス幅 5 ps、中心波長は 1556 nm とし CW 光の強度を -2 dBm に統一し、波長は 1548 nm とした。

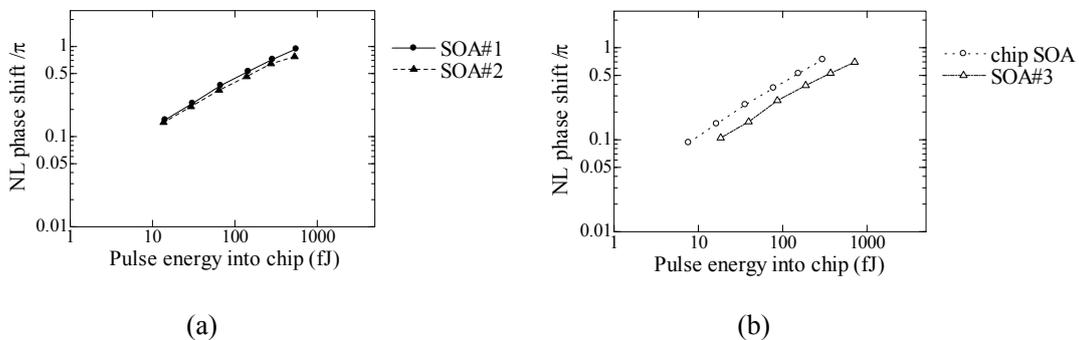


図 2.8: 非線形位相シフト量、(a)ノンリニア型 SOA、(b)リニア型 SOA

図 2.8 はパルスエネルギー(パルスの平均光強度/パルス繰り返し周波数)と非線形位相シフトの関係を表した図である。図 2.8 (a)と(b)より、非線形位相シフト量は、SOA#1、SOA#2、chip-SOA でほぼ同じ値をとっていることが見て取れ、入力パルスエネルギーが 100 fJ のとき、 0.5π 程度になった。

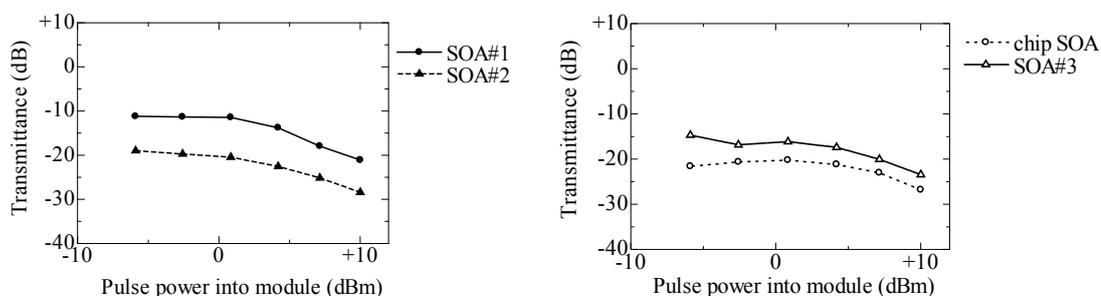
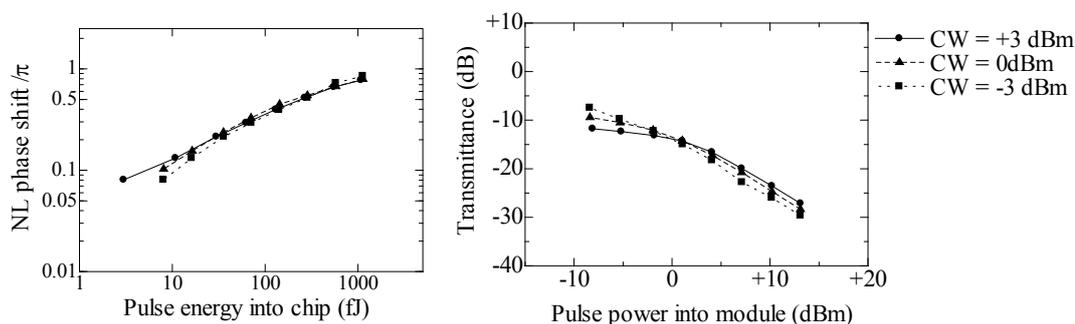


図 2.9: DISC 透過率、(a)ノンリニア型 SOA、(b)リニア型 SOA

図 2.9 は DISC 透過率の測定結果である。横軸の'module'とは、SOA の結合損失を含めた値である。DISC 透過率の値は、パルスを入力パワーが+0.8dBm のとき、SOA#1 = -11.4 dB、SOA#2 = -20.5 dB、chip-SOA = -20.2 dB、SOA#3 = -16.1 dB となった。非線形位相シフトが大きいかに関わらず、SOA#2 と SOA#3 の透過率が悪いのは、結合損失が大きかったためである。

これらの結果より、SOA#1 を用いることで、一番共振器長を短くできるという結論に至った。

DISC 透過率は DISC-loop をする上で重要である。よって SOA#1 に関して、いろいろなパラメータに関して系統的に調べていくことにした。



(a)非線形位相シフト量

(b)DISC 透過率

図 2.10 : CW 光パワーによる比較、(a)非線形位相シフト量、(b)透過率特性

図 2.10 は CW 光パワーによる比較である。パルス幅は 2 ps にした。非線形位相シフト量はほとんど変わらないことが見て取れる。DISC 透過率の各曲線は、入力パルスパワーが 0 dBm 近傍でクロスしていることが見て取れる。入力パルスパワーがおよそ +13 dBm のとき、DISC 透過率は最大 2.4 dB の開きがあった。また、入力パルスパワーがおよそ -12 dBm のとき、DISC 透過率に最大 4.3 dB の開きがあった。これらの結果から、入力パルスパワーに応じて適切に CW 光パワーを設定しなければならないことがわかる。これら DISC-loop に注入する CW 光に関しては、次節で述べる。

繰り返し周波数を 50 GHz にした時の結果を図 2.11 に示す。

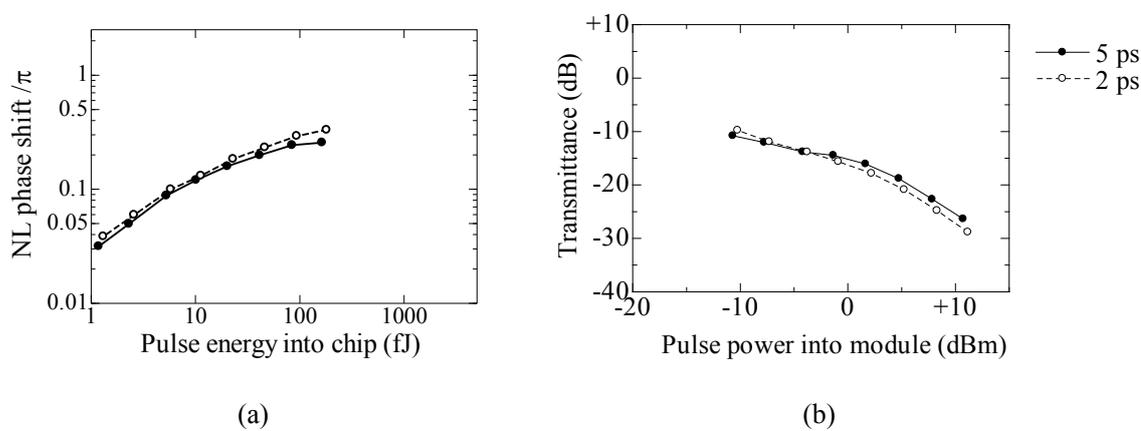


図 2.11: 繰り返し周波数 50 GHz の時のゲート特性
(a)非線形位相シフト量、 (b)透過率特性

繰り返し周波数を 50 GHz にすると、非線形位相シフト量、DISC 透過率は 12.5 GHz、2ps の DISC 透過率と比べて、50GHz、2 ps の DISC 透過率は 3.5dB 下がった。これは、繰り返し周波数が上がることで、パルス 1 つあたりのエネルギーが減り、非線形位相シフトが起りにくくなり、結果的に DISC 透過率が下がったためである。

これらの結果から、10 GHz、2 ps のパルス発生から、同じ実験構成で 50 GHz 2 ps のパルス発生を行う場合、EDFA で補償する利得を 4 dB 程度補償すればよいことがわかる。

2.4 利得閾値特性

利得閾値特性とは、DISC-loop がどの程度の利得からパルス発振するかを表した特性である。loop 利得 G_{loop} は、その動作条件下での DISC 透過率の最大値と共振器内のパッシブ素子のロスと、EDFA の小信号利得を足したと定義する[5]。理論どおりであれば $G_{loop} = 0$ dB のあたりでパルスが発生するはずである。SOA#1 を使い、DISC-loop をパルス発振させ、利

得閾値特性を測定した。

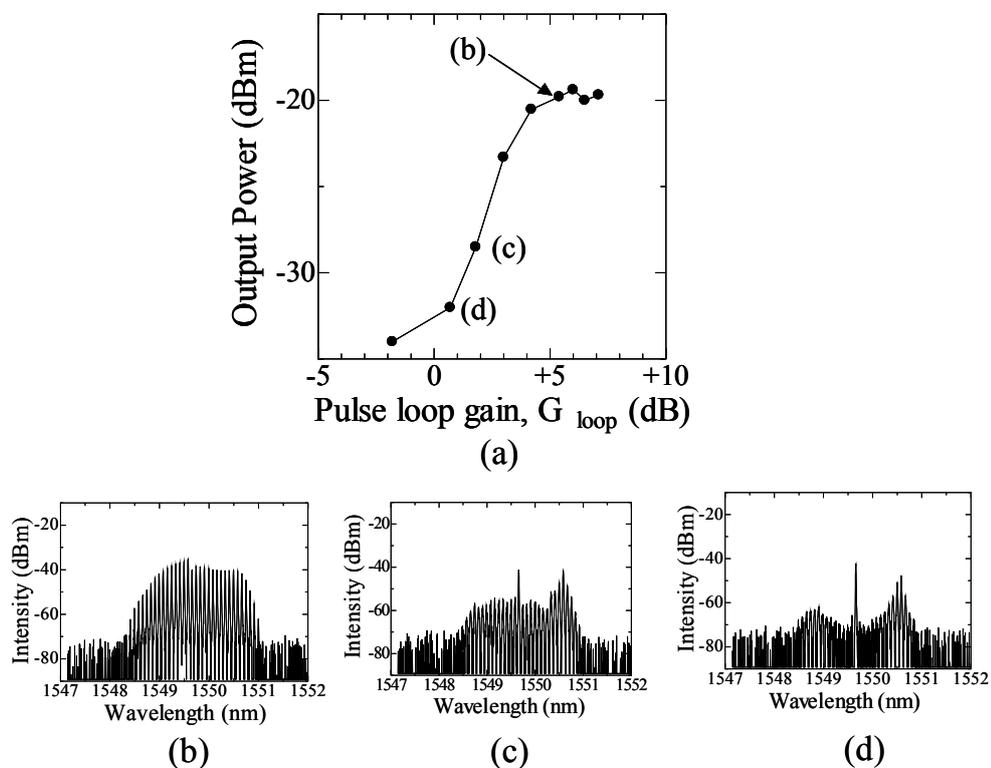


図 2.12: 利得閾値特性と光スペクトル、(a)利得閾値特性、(b) $G_{loop} = +5.4$ dB、(c) $G_{loop} = +1.8$ dB、(d) $G_{loop} = +0.7$ dB

図 2.12 がその実験結果である。ED-MZI と遅延時間が 5 ps のカルサイトを用いてパルス発生を試みた。図 2.12 (b) より、利得が十分な場合、10 GHz 間隔でスペクトル成分が立ち、それらの包絡線がきれいなパルス形状を為している。EDFA の利得を下げていき、 $G_{loop} = +1.8$ dB の点でスペクトルの形状が乱れ、 $G_{loop} = +0.7$ dB の点でパルスが発生しなくなった。よって $G_{loop} = 0.7-1.8$ dB が利得閾値であることがわかり、概ね理論どおりの結果が得られた。これらの結果より、SOA#1 を用いたパルス発生でも参考文献[5]の定義が成り立っていることがわかった。

2.5 ノンリニア型半導体光増幅器を用いた 40 GHz パルス発生

本研究以前に、40 GHz、2 ps のパルス発生に成功している。この繰り返し周波数とパルス幅のパルスを発生させることが出来るかどうか確かめた。図 2.13 が実験構成である。

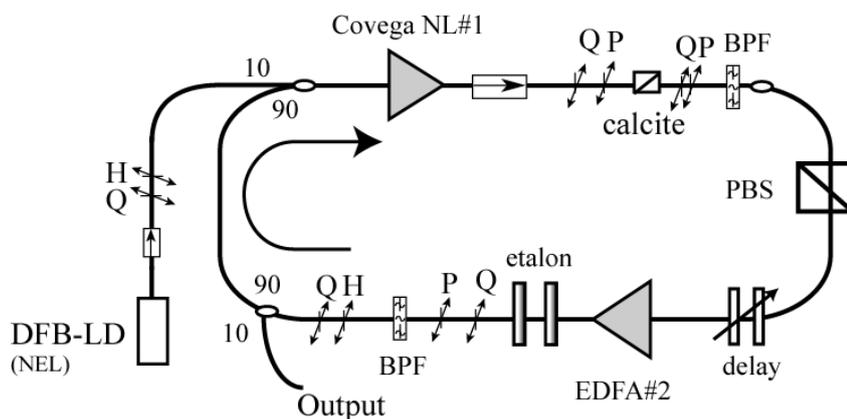


図 2.13: 40 GHz パルス発生実験構成図

エタロンの FSR は 40 GHz、BW は 2.6 GHz である。

実験を行った結果、CW 光パワーによって、パルス発生可否が決まるということがわかった(図 2.14)

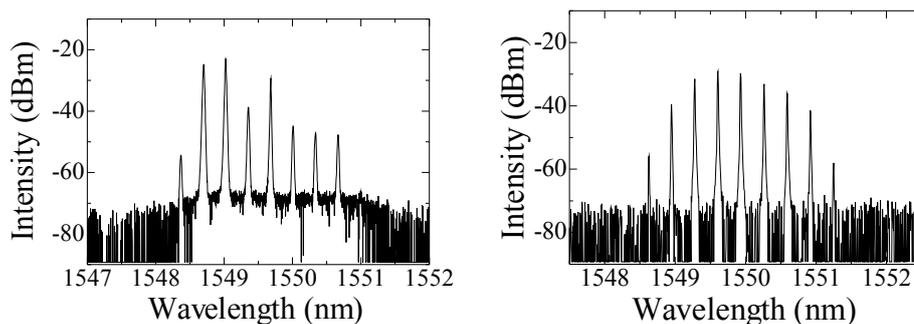


図 2.13: 40 GHz パルスのスペクトル、(a) CW 光パワー: -2.1 dBm、
(b) CW 光パワー: -0.7 dBm

この原因について、以下のように考えた。

1. 繰り返し周波数でパルス幅が広い場合、DISC 透過率は大きくなる。すると EDFA の非

飽和利得値が小さくてすむ。

2. 高繰り返し周波数、パルス幅が狭くなるほど DISC 透過率は小さくなる。すると EDFA の非飽和利得値を大きくしなければならない。それに伴って、EDFA の出力光パワーが大きくなる。低繰り返し周波数でパルス幅が広い場合の注入 CW 光と同じパワーでどうさせようとする、リングを周回している光と CW 光のパワーの比が大きくなる。
3. リング周回の光パワーが大きくなると、SOA でのキャリアの大部分がリング周回光の増幅に消費され、CW 光にキャリアが消費されなくなる。つまり CW 発振しやすくなる。
4. 逆に注入 CW パワーが強すぎると CW パワーの増幅にキャリアの大半が消費され、周回パルスによる XPM がかからなくなる。よって、CW パワーと周回パルスパワーの比率をパルスの繰り返し周波数、パルス幅に応じて変えなければならない。

上記の理由により、動作させるパルスに応じて適切に CW 光パワーを設定しなければならないことがわかった。これらの詳しい理論設計は今後の課題である。

次に、図 2.14 は遅延時間 5 ps パルス発生時の光スペクトルである。CW 光パワーが大きいと、スペクトルがきれいに整形されていることがわかる。この実験と考察を元に、遅延時間が 1.7 ps のカルサイトに变えて、パルス発生を試みた。CW 光パワーは +0.6 dBm とした。

その結果、繰り返し周波数 40 GHz、パルス幅 1.5 ps のパルスを発生させることができた (図 2.15)。パルスの消光比は 19 dB とこれまでの実験結果と良好な値であった。

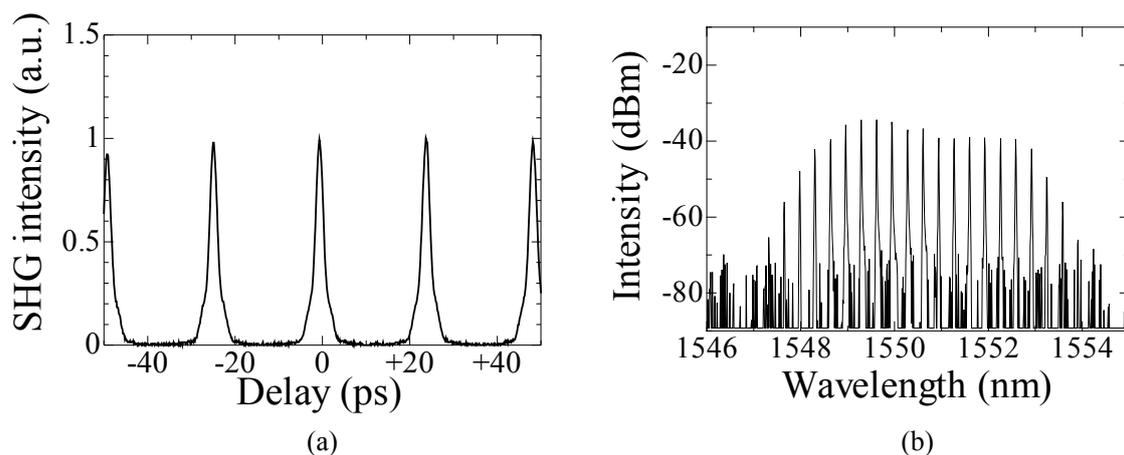


図 2.15: 40 GHz、1.7 ps パルス発生実験結果、(a): 自己相関波形、(b): 光スペクトル

図 2.15(a)を見てみると、パルスの裾野が広がっていることが見て取れる。本研究以前の結果においても MZI の遅延幅が 2 ps 以下のパルス発生になると、パルスの裾野が理想的な sech^2 波形と比べて広がっていた。このような広い裾野を持つ時間波形を、裾野の狭い pedestal-free な時間波形にすることは、今後の課題である。

SOA#1 を用いることで本研究以前の大きな成果である、40 GHz、2 ps のパルス発生を再現することができた。

2.6 100 GHz パルス発生

OTDM において、高繰り返し周波数のパルスは重要である。次々世代の光通信の伝送容量は 1 チャンネル 40 Gb/s 程度であり、それを 4 波多重すると 160 Gb/s となる。これらの信号を 3R 再生する場合、伝送容量と同じ繰り返し周波数を持つクロックパルスが必要になる。そのような 160 GHz の超高繰り返し周波数のパルス発生への足がかりとして、100 GHz の超高繰り返し周波数のパルス発生を試みた。

パルス発生を行う際の動作条件を述べる。用いたエタロンは、Fibera 社製のファイバエタロンを用いた。FSR が 100 GHz、フィネスが 75、よって BW は 1.3 GHz である。また、挿入損失は 2.5 dB である。カルサイトの遅延時間は 1.7 ps とした。注入 CW 光のピーク波長は 1550.79 nm、パワーは +0.6 dBm とした。EDFA を 2 台使い、合計の非飽和利得値を 50 dB とした。BPF の 3 dB 帯域幅は 5 nm とした。

結果を図 2.16 に示す。図 2.16(a)より、パルスのピーク波長が注入 CW 光のピーク波長と一致していないことが見て取れ、パルスのピーク波長は 1549.17 nm であった。その結果、図 2.16(b)、(c) のような消光比の非常に悪いパルスとなった。この原因として、パルスの非線形位相シフトの低下が挙げられる。用いている EDFA の飽和出力パワーは +15-18 dBm である。よって高繰り返し周波数になるにつれて、パルスエネルギーは少なくなるため、非線形位相シフト量は減る。非線形位相シフトが起こらない場合、パルス発生器は CW 発振してしまう。非線形位相シフト量が足りないので、パルス発振状態と CW 発振状態が混在した状態となり、粗悪なパルスが発生してしまったと考えられる。解決手段として、

- ・ SOA をカスケード接続にして、非線形位相シフト量を増やし、DISC の透過率特性を良くする。
- ・ 非線形位相シフト量の大きい多重量子井戸構造の SOA を用いる。

等が挙げられる。

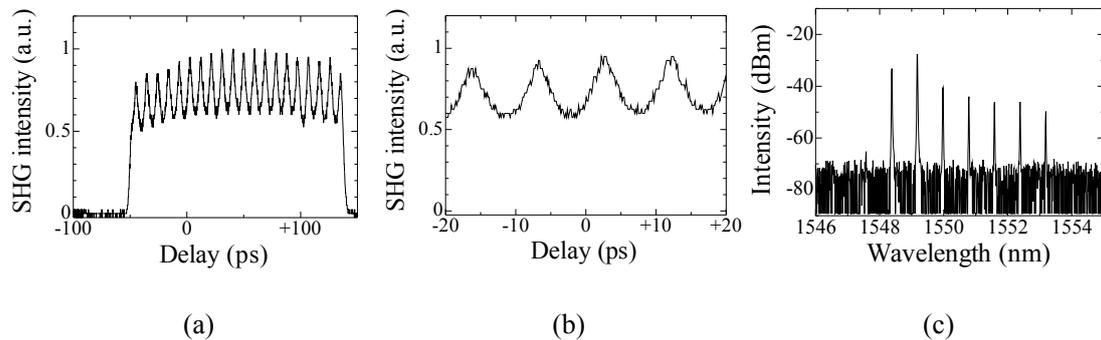


図 2.16: 100 GHz、 1.7 ps パルス発生実験結果、 (a)、(b): 自己相関波形、 (c): 光スペクトル

2.7 まとめ

この章ではいろいろな SOA を用いてパルス発生を行った。リニア型で活性層の長さが 1000 μm の chip-SOA を先球ファイバカップリングし、パルス発生を試みた。その結果 10、40 GHz、5 ps のパルス発生に成功した。また、ノンリニア型の SOA を使い、40 GHz、1.5 ps のパルス発生に成功することができた。さらに、100 GHz の繰り返し周波数のパルス発生を試みたが、粗悪なパルスしか出すことができなかった。消光比の大きい、品質の良いパルス発生は今後の課題である。

パルスを発生させる条件として、

- SOA チップの非飽和利得は 20 dB 以上が望ましい。
- パルス発生の条件に応じて、適切に注入 CW 光パワーを決めなければならない。

が挙げられた。

本研究以前に考慮されていなかったこれらの考察を踏まえた上で、DISC-loop の単一縦モード発振を目指すことにした。

参考文献

- [1] J. Sakaguchi, Ferran Salleras, K. Nishimura, and Y. Ueno, "Frequency-dependent electric dc power consumption model including quantum-conversion efficiencies in ultrafast all-optical semiconductor gates," *Opt. Express*, Vol. 15, No. 22, pp. 14887-14900, Oct. 2007.
- [2] 大平高志、坂口淳、鈴木励、上野芳康、「半導体 DISC-Loop 型高周波光パルス発生器に利用する高速偏光変換器のパルス透過率」第 66 回応用物理学会学術講演会、2005 年 9 月、徳島大学、徳島市、Vol.3、P.1034、8a-T-16 s
- [3] 大平高志、坂口淳、鈴木励、上野芳康、「半導体 DISC-Loop 型光パルス発生器内部の全光変換透過特性の設計解析」第 53 回応用物理学会関係連合講演会、2006 年 3 月、武蔵工業大学、世田谷区、Vol.3、P.1045、22p-Y-10
- [4] 大平高志 2007年度修士論文, "超高速光ゲートの時間多重信号周波数スケーリング則の研究,"
- [5] R. Suzuki, S. Kobayashi, J. Sakaguchi, and Y. Ueno, "Threshold condition for pulse generation from a DISC-loop-type pulse generator," in *Proc IQEC/CLEO-PR 2005*, paper CMF1-4.

3章 高フィネスエタロンの設計と評価結果

3.1 はじめに

この章で、単一縦モード発振に必須の高フィネスエタロンの設計とその評価を行う。過去の実験結果より、単一縦モードに必要なエタロンの BW は 400 MHz -1000 MHz 程度と見積もられた (図 3.1),[1]。

この章では、BW が上記の値以下のエタロンの作製し、その評価結果について論ずる。

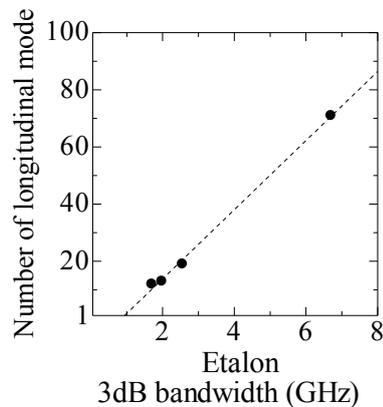


図 3.1: マルチ縦モード本数のエタロン 3dB 帯域幅依存性

3.2 高フィネスエタロンの設計

エタロンとは図 3.2 に示すように鏡を向かい合わせたような構造を持つ、光の共振器の一種であり、周期的な透過スペクトルを持つ光フィルタである。エタロンはソリッドエタロンとエアギャップエタロンの二つに分けられる。今回はソリッドエタロンを用いて実験することにした。

以下にその理由を述べる。

- 安価に多種類のエタロンを発注することができる。
- エアギャップエタロンだと、大型のためファイバからエアギャップエタロンへの光学系が複雑になる。
- ソリッドエタロンをミラーホルダに装着することによって、容易に入射光角度を最適にすることができる。

エタロンの重要なパラメータは、透過スペクトルの間隔 (Free spectral range, FSR) と透過スペクトルの 3 dB 帯域幅である(図 3.2)。FSR は次のような式で計算される[2]。

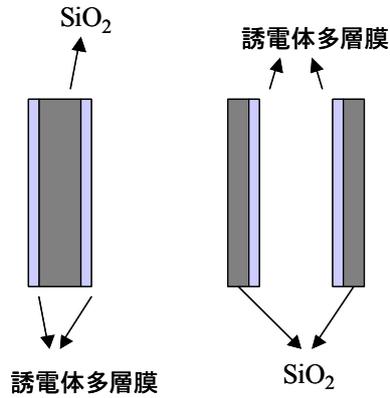


図 3.2: エタロンの模式図、右：ソリッドエタロン、左：エアギャップエタロン

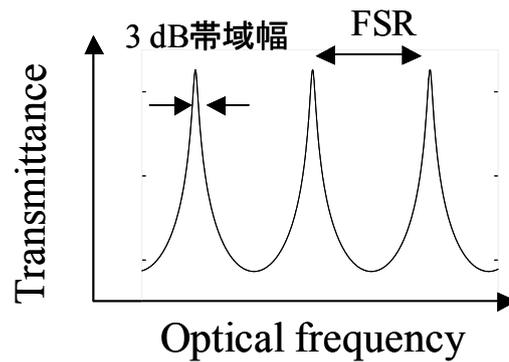


図 3.3: エタロンの透過スペクトルの模式図

$$\text{FSR} = \frac{c}{2 \cdot n \cdot d} \quad (2.1)$$

c は真空中の光速、 n は屈折率、 d は板厚を表している。

エタロンの媒質は合成石英(SiO_2)を使用している。石英には合成石英と熔融石英の2種類があり、どちらも分子式は同じであるが、合成石英の方が熔融石英より気泡が少ないために、壊れにくいといった利点がある。

次に透過スペクトルのBWについて説明する。BWは誘電体多層膜の反射率で決まり、反射率が高くなるほどBWは狭まり、フィネス(finesse, F)というパラメータがよく用いられている。フィネスと反射率(Reflectivity, R)の関係は以下ようになる。

$$F = \frac{\pi \cdot \sqrt{R}}{1 - R} \quad (2.2)$$

すると、BW は以下のように計算される。

$$BW = \frac{FSR}{F} \quad (2.3)$$

以上がエタロンの透過スペクトルを構成する基本的な式である。これらの式を用いて、所望のエタロンの設計を行うことにし、FSR を 10 GHz、40 GHz とした。理由は以下の通りである。

- ・ 研究室にある電気スペクトルアナライザの測定可能周波数は 30 GHz である。40 GHz のパルスが単一縦モード発振しているかどうかは、当研究室の実験装置だとヘテロダイイン検波法を用いなければならない。繰り返し周波数が 10 GHz であれば、ヘテロダイイン検波法を用いることなく、単一縦モード発振が起きているかどうか電気スペクトラムアナライザで容易に測定できるため。
- ・ 40 GHz という繰り返し周波数は、商用の電子回路で動作不可能になる周波数近傍である。全光信号処理はこれ以上の繰り返し周波数で動作することが望まれているため。

エタロンの BW は 400 MHz 以下になるように反射率を設定することにした。表 2.1 が設計仕様である。

Sample name	反射率	反射率の 精度	板厚 (mm)	波長 (nm)	FSR (GHz)	フィネスの		挿入損失 見積もり
						フィネス	誤差 見積もり	
#a, #b	0.9690±0.0015		2.57±0.01	1550	40	100	±5%	0.5dB
#c, #d	0.9937±0.0005		2.57±0.01	1550	40	500	±10%	1.8dB
#e, #f	0.9690±0.0015		10.26±0.01	1550	10	100	±5%	1.5dB
#g, #h	0.9937±0.0005		10.26±0.01	1550	10	500	±10%	5.6dB

表 3.1: エタロンの設計仕様

また、過去に購入したエタロンの仕様を参考にし、エタロンの面精度を $\lambda/20$ 以下、平行度 2 秒以内を要求仕様に付け加えた。大きさは、ミラーホルダに取り付けるため、直径 30mm とした。次に挿入損失に関しては、10 dB 以下になることが望ましいと考えた。石英ガラスの吸収(係数: 5×10^{-8})による挿入損失の計算値は表右端のようになった (見積もり先: 日本航空電子工業株式会社)。この程度の値であれば、EDFA の利得で十分補償できるため、この設計仕様でエタロンを発注することに決めた。

3.3 高フィネスエタロンの透過スペクトル

図 3.4 が完成した高フィネスエタロンである。高フィネスになればなるほどエタロンの入射光に対する角度調節が厳密になる。よって角度調節が容易に行えるように、ミラーホルダを取り付けた。実際に実験に使用するときの光学系の写真は図 3.5 のようになる。使用したミラーホルダは、シグマ光機社製ミラーホルダ（型番：MHG-30）を使用した。角度の設定分解能は 0.39° /回転である。このミラーホルダをオプトクエスト社製カートリッジ型対向モジュール（型番：PCUA）に取り付けた。この対向モジュールの挿入損失は 0.6 dB 程度である(図 3.6)。

完成したエタロンの透過スペクトルを測ることで、仕様を満たす製品かどうか確かめた。白色光源として OSA を使い、透過スペクトルを OSA で測った。白色光源として EDFA を使用した。また、光スペクトラムアナライザ(Optical spectrum analyzer, OSA) は、ADVANTEST 社製(型番：Q8384)を使用し、波長分解能を 0.01 nm (1.25 GHz)とした。図 3.7 が OSA で測定した、 $\#e$ のエタロンの透過率スペクトルである。

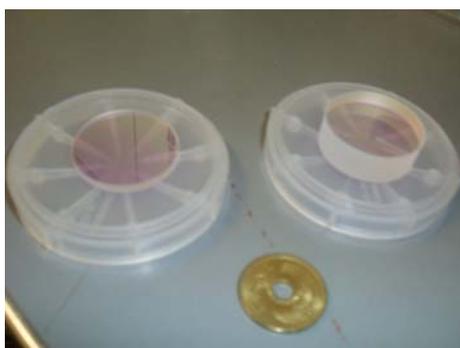


図 3.4: 高フィネスエタロン
左: FSR = 40 GHz、右: FSR = 10 GHz



図 3.5 実験時の光学系

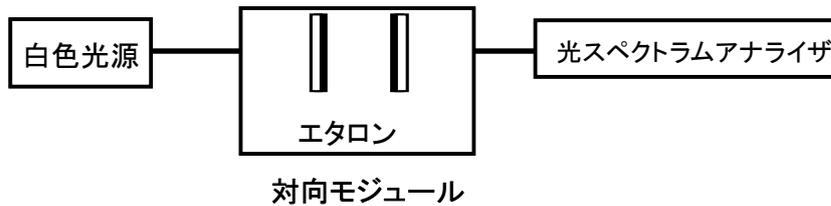


図 3.6 透過スペクトル測定実験構成図(a)

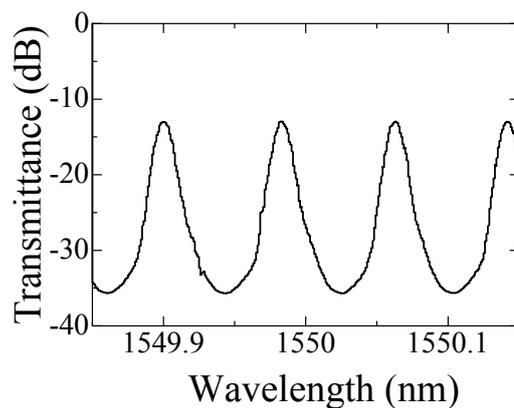


図 3.7: エタロン(#e)の透過スペクトル

Insertion loss が 13 dB 程度あり、透過スペクトルが歪んでいることが見て取れる。このようなスペクトルが得られた原因としては、光スペクトラムアナライザの分解能が、エタロンの BW より広いことが上げられる。よって、これ以上の分解能を持つ透過スペクトルの評価方法が必要である。図 3.8 が考案した実験構成図である。

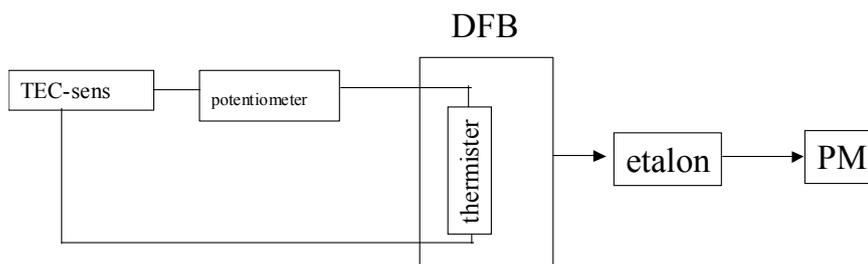


図 3.8: 透過率スペクトル測定実験構成図(b)

この方法は DFB-LD のチップの温度が増えると DFB-LD の発振光周波数がレッドシフトすることを利用した方法である。DFB-LD の出力光を使用して透過スペクトルをサンプリングし、パワーメータ(PM)で光の強度を測定した。DFB-LD のチップの温度が 2 mK 上がると、光周波数はおよそ+30 MHz シフトする。DFB からの出力光の線幅はおよそ 170 kHz であり、

エタロンの BW より十分狭い。以上のことから OSA の分解能以上で透過スペクトルが測定可能である。

測定したエタロン#e の透過スペクトルは、図 3.9 のようになった。フィッティング曲線と若干ずれている原因として、エタロンの媒質の温度変化が挙げられる。室温が変化すると、エタロンの媒質の温度も変化し、媒質がわずかに膨張、収縮する。それによって共振器長が変わり、結果的に透過スペクトルのピーク波長がシフトしてしまう。これによってフィッティング曲線と若干のずれが生じてしまったのではないかと思われる。

設計したエタロンのフィネス、挿入損失の測定結果一覧を表 3.2 に示す。表より、挿入損失が総じて最初の見積もりの値より大きいことが見て取れる。その結果、BW は設計値より大きくなってしまった。この結果について、作製者と話し合ったところ、以下のような原因が考えられた。

- ・最初に作製者が行った理論解析結果での挿入損失は、光の減衰係数:k を 5.0×10^{-8} で計算していた。(石英での吸収による減衰のみ)しかし上の値はいろいろな要因が絡んで、悪くなることもある。

- 1.エタロンの面精度→仕様の $\lambda/20$ では不十分だと思われる。

- 2.コリメート系での誤差→対向モジュールのレンズの F 値、放射角度、光路長が best になっていない。

(対向モジュールの挿入損失は 0.5dB 程度であるが、0.1dB 未満の光学系が望ましい)

- 3.基板での散乱

- ・結論：空間的な誤差要因を考慮しておらず、k の値が、 3.8×10^{-7} と仮定すると、実験結果と概ね一致する。→Insertion-loss は大きくなる。透過スペクトルの 3 dB 帯域幅は広くなる。

(ボトムレベルは変わらない。)

光学系を見直すとなると複雑な構成にせざるを得ず、共振器長が長くなってしまうのでこの光学系で実験を行うことにした。

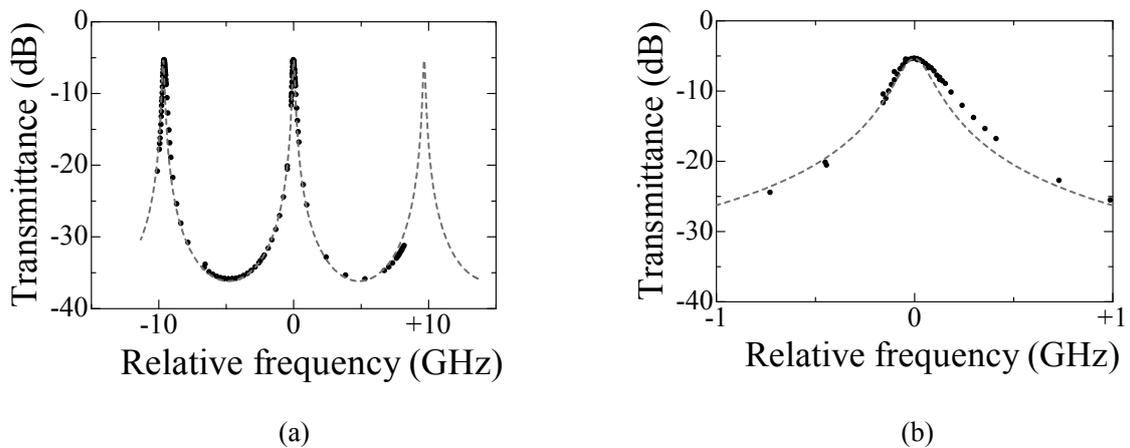


図 3.9: DFB-LD で測定した#e の透過スペクト、点: 測定点、破線: フィネス= 53、挿入損失 = 5.5 dB、(a) 表示のスペン = 30 GHz (b) 表示のスペン= 2 GHz

	フィネス		挿入損失		3dB 帯域幅 (MHz)	
	設計値	測定値	設計値	測定値	設計値	測定値
#a	100	93	0.5	1.6	400	430
#b	100	93	0.5	1.4	400	430
#c	500	192	1.8	9.4	80	210
#d	500	222	1.8	7.6	80	180
#e	100	53	1.5	5.5	100	180
#f	100	53	1.5	5.5	100	180
#g	500	83	5.6	17.0	20	120
#h	500	83	5.6	18.0	20	120

表 3.2 設計したエタロンの特性一覧

3.4 エタロン中での分散による FSR への影響

ソリッドエタロンの場合、石英の波長分散によって FSR が変わってしまう。DISC-loop では、エタロンの透過スペクトルのピークに光スペクトル成分が立つ。よって FSR が変わると単一縦モードになっても、光スペクトルの間隔が帯域内であるおそれがある。参考文献[3]によれば、C バンド内(1510 nm ~ 1570 nm)での波長分散による FSR の変化量は、FSR が 50 GHz の場合、およそ 8 MHz 程度である。パルス発生において使用する BPF の帯域幅は、パルス幅 1 ps の場合で約 10 nm である。よってこの帯域内での FSR の変化量は 1.3 MHz

程度である。

次に屈折率の波長依存性のデータと(2.1)式を用い、波長によって FSR がどの程度違うか計算した。図 3.10 は屈折率の波長依存性を表している[4]。

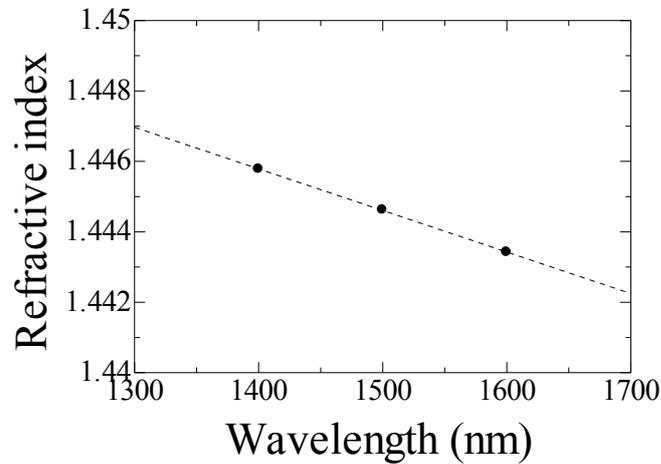


図 3.10: 合成石英の屈折率の波長依存性、破線: $-1.18 \times 10^{-5} / \text{nm}$ の近似曲線

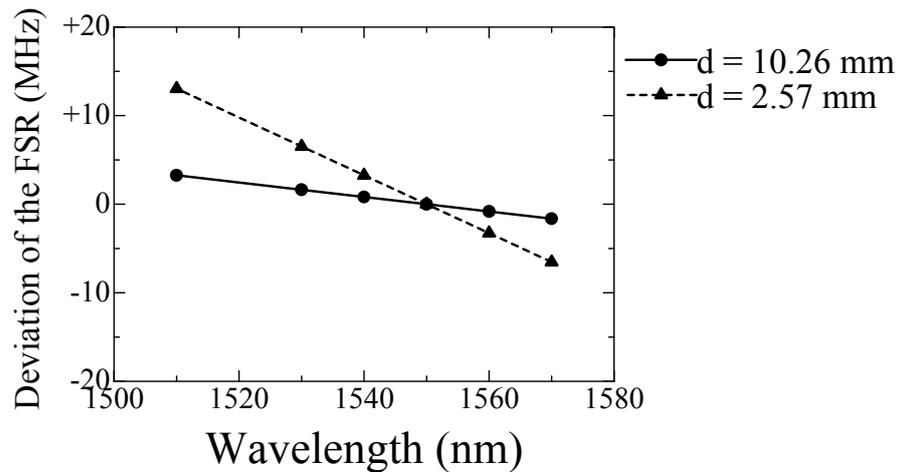


図 3.11: 媒質が合成石英である場合の FSR の波長依存性

板厚は表 3.1 の設計値を用いた。図 3.11 が計算結果である。板厚が 10.26 mm とした場合 C バンド内で FSR は 5 MHz 変動すると計算された。同様に板厚が 2.57 mm とした場合、C バンド内で FSR は 20 MHz 変動すると計算された。

DISC-loop は共振器周波数の整数倍の光スペクトル成分が立つ。このことより、パルス幅 1ps 以下のパルス発生においては、分散による FSR の変動は無視できると思われる。

3.5 まとめ

本研究以前の実験結果より、単一縦モード発振が期待できるソリッドエタロンを設計し、完成品(製作：日本航空電子工業株式会社)の透過スペクトルを測定した。DFB-LDの温度変化によって波長掃引を行い、透過スペクトルを測ったところ設計値が板厚 = 10.26 mm、反射率 = 0.969 のエタロン(#e)では、挿入損失 5.5 dB、BW は 180 MHz であった。単一縦モード発振が実現できると期待される 3 dB 帯域幅以下のエタロンを得ることが出来た。

参考文献

- [1] Max Born and Emil Wolf, “Principles of Optics 7th edition ,“ ISBN:0-521-64222-1
- [2] 鈴木 励 2006 年度修士論文, ”半導体全光偏光変換を利用した 40GHz モードロックパルス発生の研究,”
- [3] Precision Photonics 技術資料
<http://www.precisionphotonics.com/technology/EtalonAdvanced.pdf>
- [4] 信越石英株式会社 技術資料
<http://www.sqp.co.jp/seihin/catalog/pdf/g2.pdf>

4章 連続光光源の光周波数制御

4.1 はじめに

高フィネスエタロンを使う上で、連続光の光周波数制御は必須である。この章では、できるだけ精密に連続光の光周波数制御を行うことを目標にし、その方法と結果について論ずる。

4.2 光源の基礎特性

DISC-loop は、共振器内に CW 光を注入することで、始めて動作する。使用したレーザは市販されている分布帰還型レーザ(distributed feedback laser diode, DFB-LD)で、NTT エレクトロニクス社製(型番 : NLK1C6BAAA)である。図 4.1 に印加電圧-電流特性(V-I 特性)と電流-光出力特性とスペクトルを示す。

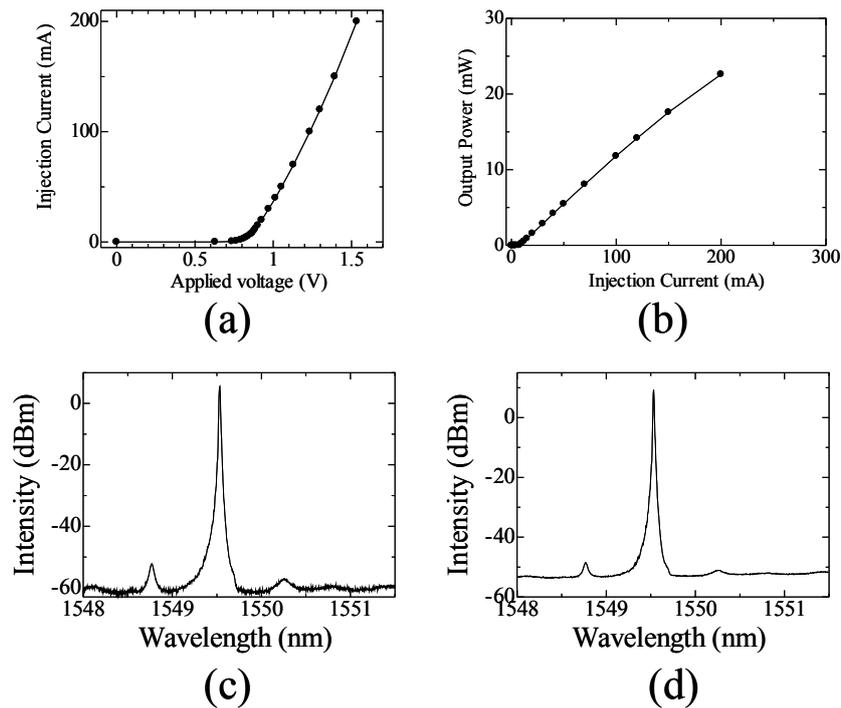


図 4.1: DFB の基礎特性

(a)V-I 特性、(b)I-L 特性、(c)出力光のスペクトル、(d)EDFA で増幅後のスペクトル、OSA の分解能 : 0.01 nm

サイドモード抑圧比(Side mode suppression ratio, SMSR)は 58 dB であった。出力光の線幅は 170 kHz 程度であり、リング共振器周波数(5~12 MHz)より十分狭い。よって共振器周波数

成分が、CW 光の線幅によって潰されるということはない。実験上、リング共振器に注入する CW 光を 0dBm 以上にする必要がある場合があり、その時は EDFA で増幅する(図 4.1 (d))。この時の EDFA は 1480 nm 励起のポンプ LD のものを用いた。増幅によって光信号雑音比 (Optical signal noise ratio, OSNR)は 66 dB から 62 dB に悪化したが、この程度の値であればパルスの消光比などに影響はしないと予想される。パルス発生実験時は、CW 光の発振波長は 1550 ± 1 nm とした。

4.3 光周波数の設定分解能と時間安定性

4.3.1 温度コントローラによる光周波数設定分解能と時間安定性

エタロンの BW が狭くなるほど、CW 光の光周波数(波長)を厳密にエタロンの透過スペクトルのピークにあわせなければならない。DFB-LD 内の半導体の温度、及び注入電流を変えることによって DFB-LD からの出力光の光周波数をシフトさせることが出来る。DFB-LD 内の温度は市販の温度コントローラ(Thorlabs 社製、型番: TED200C)によって、レーザ内の温度を制御されており、概ね 25°C が設定温度である。この温度コントローラの 24 時間の安定性は 1 mK 未満、温度の設定分解能は 2 mK、温度の設定確度は ± 10 mK である。これは市販されている温度コントローラで最高性能のものであり、これ以上の分解能で温度を精密に設定することは難しい。図 4.2 は温度の設定値と発振光周波数の関係を表した図である。温度を上げると DFB 内の回折格子の格子間隔が伸びるため、光周波数は減る (波長は長波長側にシフトする。)。

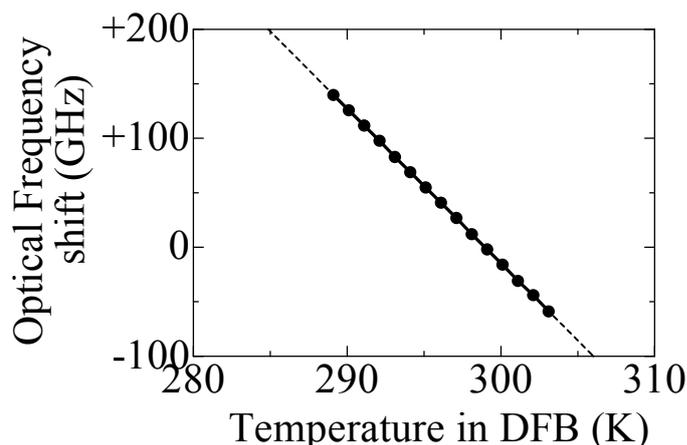


図 4.2: 温度による光周波数シフト量、実線: 測定点、破線: 近似曲線

近似曲線の傾きから、光周波数シフト量は -14 GHz/K となった。この温度コントローラの仕様に当てはめてみると、光周波数の設定分解能は 28 MHz、時間安定性は 14 MHz 未満と計

算された。

4.3.2 直流電源による光周波数設定分解能と時間安定性

DFB-LD は、注入する電流を変えても発振光周波数がシフトする。これは注入するキャリア量が増えると、DFB-LD の駆動に用いる直流電流源は、昭和電子工業製の高安定度可変直流安定化電源（型番：318-20）を用いた。設定分解能は、設定電圧の 50 ppm、電圧変動は 0.1 mV、電圧のリプルと雑音の総量は 2 mVpp 以下が仕様である。DFB-LD 駆動回路は図 3.3 のようになる。R は電流を制御するために入れており、抵抗値は 10 Ω である。 ΔR は DFB-LD の微分抵抗値であり、図 4.1(a)より、4 Ω である。図 4.4 は設定電流値対ピーク光周波数シフト量の関係を表した図である。

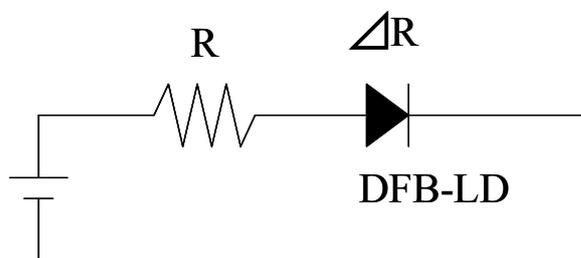


図 4.3: DFB-LD の駆動回路図

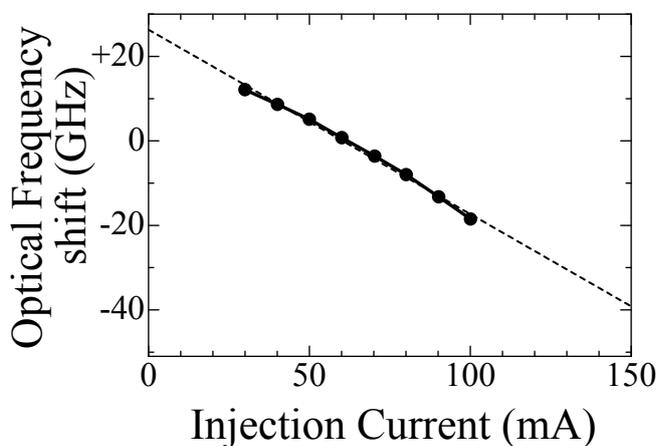


図 4.4: 注入電流による光周波数シフト量、実線：測定点、破線：近似曲線

近似曲線から、傾きは-0.5GHz/mA となった。この値から、直流電流源の仕様と図 4.2 の回路図から光周波数の設定分解能と時間安定性を計算すると、光周波数の設定分解能は 10 Ω の抵抗を使用したとき 4 MHz、20 Ω を使用したとき2 MHz 程度、時間安定性は 10 MHz 未満と予想された。

4.3.3 ヘテロダイン法を用いた光周波数設定分解能、時間安定性測定

研究室で用いている OSA の光周波数分解能は 1.25 GHz (波長分解能: 0.01 nm)であり、光周波数の微小変動を測定することはできない。よって実験に使う DFB-LD を 2 台用意し、まったく同じ前述の仕様の温度コントローラと直流電源を用いて、ヘテロダイン法を使うことによって、DFB-LD の光周波数設定分解能と出力光の時間安定性を測定することにした。図 4.5 が実験構成図である。

以下が大まかな実験手順になる。

1. QP の直後に OSA を繋ぎ、DFB2 からの光を ON にし、DFB1 からの光を OFF にする。QP を用いることで、DFB2 からの光を消光する。
 2. DFB1 からの光を ON にし、QH を使い消光する
 3. P を 90° まわす。こうすることで、DFB1 からの光と DFB2 からの光の偏光が一致させる。さらに、DFB1 と DFB2 からの光のパワーを一致させる。
 4. ESP で電気(Radio frequency, RF)信号を測定する。
- 以上が行った実験手順である。

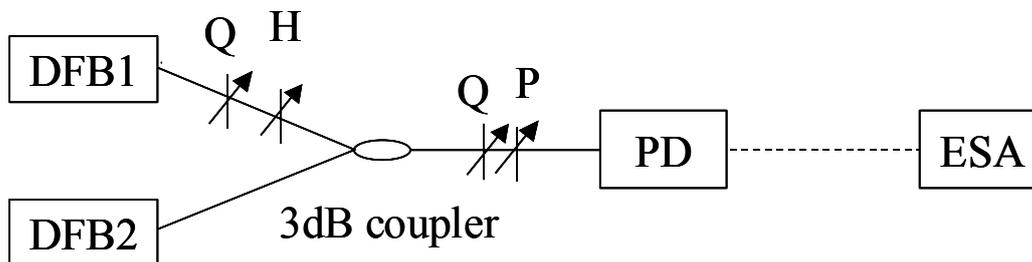


図 4.5: ヘテロダイン法の実験構成図

Q : $\lambda/4$ 波長板、H : $\lambda/2$ 波長板、PD : Photo Detector、ESA : 電気スペクトラムアナライザ、実線 : レーザー光の経路、破線 : 電気信号の経路

実験結果を図 4.6 に示す。この時の温度コントローラの温度設定値は 300K、301K にした。

図 4.6(a)より、波長間隔は 0.05 nm であることが見て取れ、その差周波成分が ESA で測定できた。図 4.6(b)は直流電源によって光周波数をシフトさせた時の様子を表した図である。この時、DFB-LD に流れる電流を制御するための抵抗値を 10 Ω にした。電圧を 0.1 mV (電流値換算で 7.1 μ A) 変えることで、光周波数は -4 MHz シフトし、前述の予想値と概ね一致した。微小に電源の電圧を変えたときの系統的な結果が図 4.7 である。近似曲線から光周波数設定分解能は -3.7 MHz (+0.1mV あたり -3.7 MHz の周波数シフト) となり、共振器周波数以下の分解能を得ることがわかった。

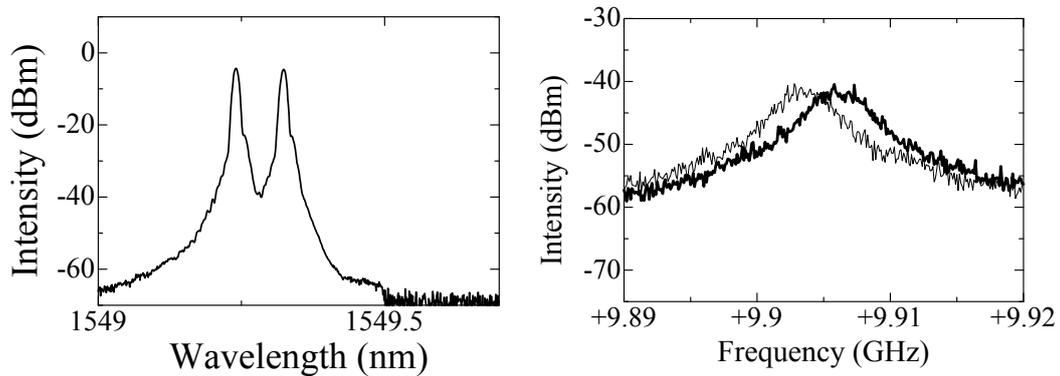


図 4.6: ヘテロダイン実験結果 (a)光スペクトル、(b)OE 変換信号のスペクトルの様子、太線：シフト前、細線：シフト後

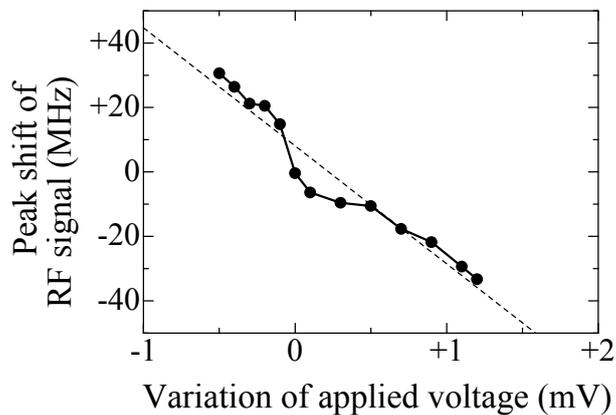


図 4.7: 印加電圧による光周波数シフト
実線：測定結果、破線：近似曲線

光周波数の安定性は、以下の 2 つの方法で測った

1. ESA の表示モードを Max hold (400 秒) にし、スペクトルの半値幅 (FWHM) から求める。
2. ESA の表示モードを Average mode (Average count : 10) にし、ピークのシフト量の時間変化を測定する。

1 の実験方法の結果を表 3.1 に示す。この時の室温は 296 K であった。この結果、設定温度が室温に近ければ、光周波数の時間変動は小さいということがわかった。表中段の結果から、1 台あたりの光周波数の時間変動は、5 MHz 程度であった。

また、2の方法による測定結果を、図 4.8 に示す。OE 変換信号のピークを取る周波数が最大で 6 MHz シフトした。この結果から、1 台あたりの時間安定性は 3 MHz 程度であると思われた。両者が概ね一致していることから、この DFB-LD の光周波数分解能は 4 MHz、時間安定性は 3-5 MHz と結論づけた。これらの結果から、共振器周波数以下で、CW 光の光周波数を制御できると思われる。

Temperature	FWHM (MHz)
#1 = 301K, #2 = 300 K	22
#1 = 297 K, #2 = 297 K	10
#1 = 293 K, #2 = 293 K	17

表 3.1: 設定温度による光周波数の安定性

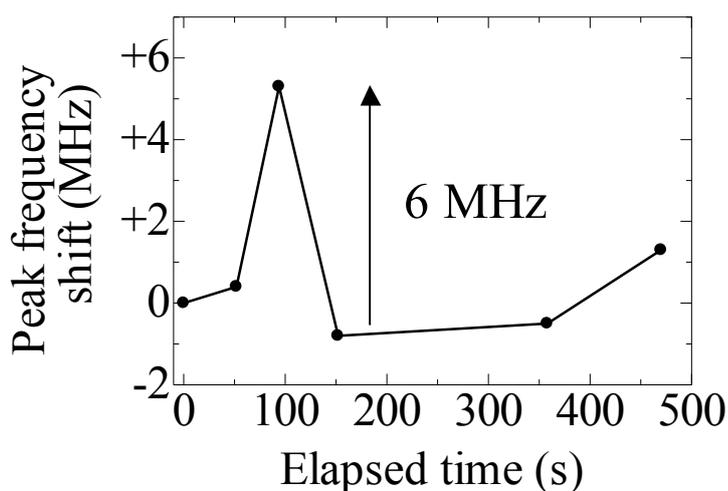


図 4.8: OE 変換信号のスペクトルピークの時間変動

4.4 結論

単一縦モード発振を目指す上で重要となる CW 光源の光周波数の制御性について調べた。その結果、設定分解能は 3.7 MHz、安定性は 3-5 MHz 程度と見積もられた。DISC-loop の共振器周波数は 5 - 12MHz 程度であるため、共振器周波数以上の精度で CW 光の発振光周波数を調節できるシステムを構築できると結論付けた。

5章 リングレーザの単一縦モード発振

5.1 はじめに

この章では、高フィネスエタロンを使用したリングレーザの実験結果について述べる。さらに、新しく考案した2-ring構造で単一縦モードが実現できるかどうかを、リングレーザの光周波数の時間安定性について調べ、考察を述べる。

5.2 マルチ縦モード帯域幅測定方法

リングレーザから出力光のマルチ縦モードの評価は自己遅延ホモダインや自己遅延ヘテロダインなどが良く用いられている[1]。

この方法では音響光学変調器 (Acoustic optical modulator, AOM) が必要なので、[2]の方法を用いてマルチ縦モード発振か単一縦モードかを測定した。

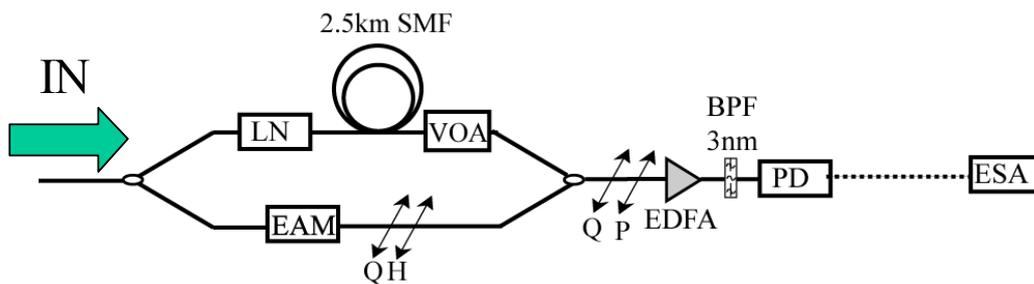


図5.1: 自己遅延ヘテロダインによるマルチ縦モード帯域幅測定系、 実線: 光の経路、破線: 電気信号の経路

図5.1がマルチ縦モードの帯域幅を測定する実験構成図である。図左端から入力されたリングレーザ光はカプラによって2つに分けられる。LN強度変調器(LiNbO₃, LN)とEAM変調器(Electro amplitude modulator, EAM)によってそれぞれ強度変調が掛けられ、片方に2.5 kmのシングルモードファイバ (Single mode fiber, SMF)によって遅延を掛けている。可変アッテネータ(Variable optical attenuator, VOA)によって強度を調節して、Q、H、P、で両アームの偏光をあわせられた後に、EDFAで増幅され、BPFで余分なASE光を除去した後に、PDでOE変換した後に電気スペクトラムアナライザ(Electric spectrum analyzer, ESA)でマルチ縦モード帯域を測定した。

5.3 実験結果

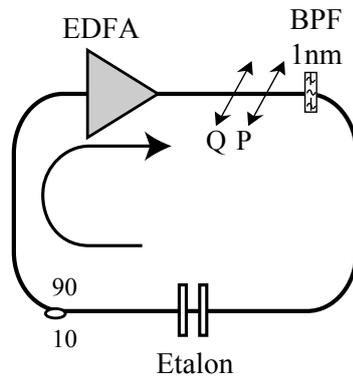


図5.2: リングレーザの実験構成

図5.2がリングレーザの実験構成である。Qで偏光を直線偏光にし、更にPを調節することで、リングレーザの出力パワーを最大にした。エタロンのBWは180 MHz–6.7 GHzの物を用いた。BPFの帯域幅を1 nmとし、発振する光周波数がエタロンのFSRの間隔でシフトすることを防いだ。共振器長の長さは、DISC-loop型パルス発生器の長さと同様にした。

図5.3にリングレーザ出力光の特性を示す。エタロンのBWは180 MHz、FSRは40 GHzのものである。図5.3は、EDFAのポンプ電流対リングレーザの出力特性である。図5.3(a)より、閾値は25 mA近傍であった。図5.3(b)は、出力光の光スペクトルである。光信号雑音比 (Optical signal noise ratio)は50 dBと、DFB-LDの出力光のそれと同程度であった。

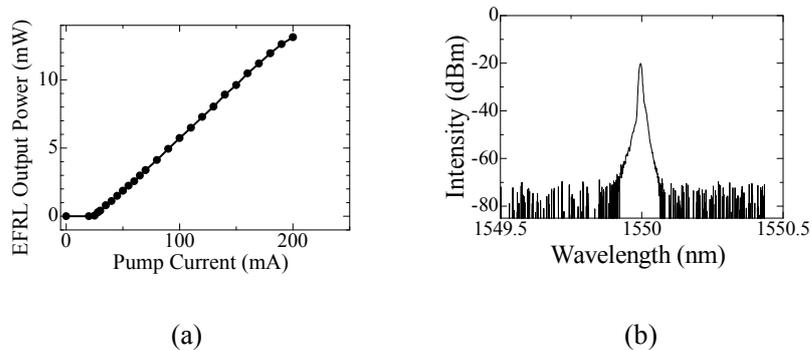


図5.3: リングレーザの出力光特性 (a) ポンプ電流対リングレーザの出力 (b)出力光の光スペクトル

この出力光を、自己遅延ヘテロダイン法を用いてマルチ縦モードの発振帯域を測定した時の結果を図5.4に示す。ヘテロダイン法の時、LNの変調周波数を6.239875 GHz、EAMの変調周波数を900.000 MHzとした。

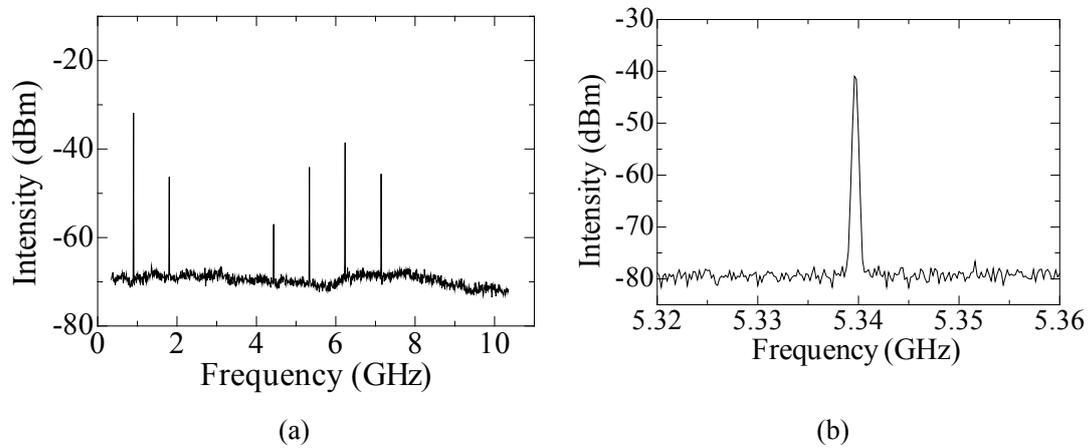


図5.4: 自己遅延ヘテロダイン法による出力光のOE変換スペクトル

図5.4(a)より、多数のスペクトル成分が立っていることが見て取れる。これはLNによる変調が正弦波状ではなく、矩形波で変調されているため、多数のサイドバンドが立つためである。2つの変調器による差周波成分である、5.34 GHz付近の成分を拡大したところ単一縦モード発振であることが見て取れる。このときのSMSRは38 dBであった。図5.5は、エタロンのBWについて系統的に実験した結果である。

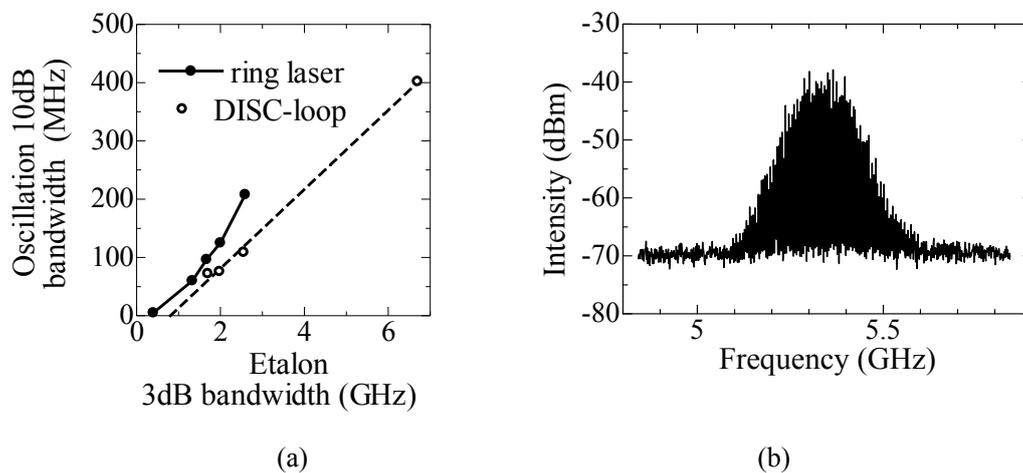


図5.5: マルチ縦モード発振帯域のエタロンのBW依存性、(a)DISC-loopとの比較、(b)BW = 2.6 GHzの時のOE変換スペクトル

過去のDISC-loopの実験結果[3]と比べたところ(図5.5(a))、リングレーザの多モード発振の帯域幅とリングレーザの帯域幅がほぼ同じであることが見て取れる。これによりBWが180

MHzのエタロンを用いれば、DISC-loopにおいて単一縦モード発振が期待できると思われる。図5.5(b)はエタロンのBWを2.6 GHzにした時の結果であり、共振器周波数である4.6 MHzごとに多数の縦モード発振を伴っていることが見て取れる。

5.4 リングレーザの発振光周波数の時間安定性

高フィネスエタロンを用いることで、EDFAのリングレーザで単一縦モード発振が実現できることがわかった。そこで、図5.6のような構成を考案した。

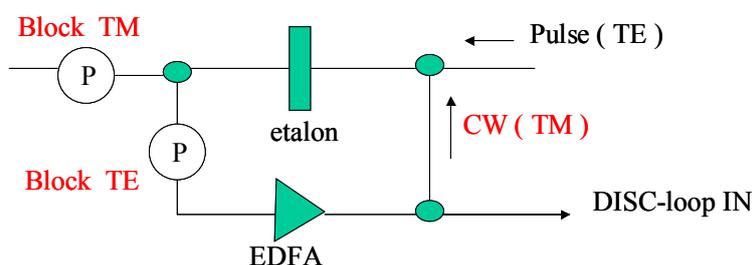


図5.6: 2-ring構造を持つDISC-loop

二つのPは、CW発振とパルス発振がそれぞれ独立に行うことができるように挿入される。この構成の利点は以下のように考えた。

1. CW光の光周波数を、自動的にエタロンの透過スペクトルのピーク付近に合わせることができる。
2. リングレーザのため、EDFAの利得スペクトルの帯域幅分だけCW光の発振する光周波数を可変できる (波長換算で1530–1560 nm程度)。
3. 共振器長の長いリングレーザのため、線幅が数kHzオーダーと非常に狭い。

そこで4章の実験と同様に、この光源の光周波数の時間安定性を測定した。図4.5と同様の構成にして、片方をDFB-LD、もう片方をリングレーザとした。図5.7が実験結果である。半値幅が200 MHz程度と、非常に広がった。DFB-LD出力光の光周波数の時間安定性は3 MHz程度であることから、リングレーザ出力光の光周波数は短時間の内に200 MHz程度シフトしていることがわかった。これは共振器長が長いために、光路長が安定せず、結果的に発振する光周波数が安定していないためであると思われる。この問題を解決するには、リングレーザの光周波数を安定化させるため複雑な構成を設計しなければならない[4]。

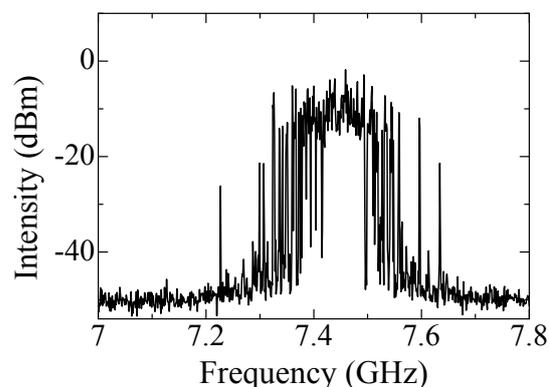


図5.7: リングレーザ出力光とDFB-LD出力光のビートによるOE変換スペクトル

5.5 まとめ

EDFAを増幅媒質にし、高フィネスエタロンを用いたリングレーザを構成し、縦モードの様子を測定したところ、単一縦モード発振していることがわかった。DISC-loop型パルス発生器のマルチ縦モード発振の帯域幅と今回のEDFAリングレーザの縦モード発振帯域幅を比べたところ、概ね一致していることがわかった。このことから、高フィネスエタロンを用いれば単一縦モード発振が実現できると期待された。

また独自の2-ring構造を持つDISC-loopを考案した。しかしリングレーザ出力光の光周波数の時間安定性が200 MHz程度と非常に悪いため、安定化回路を構築しない限り単一縦モード発振は期待できないと思われる。この構造によるDISC-loopの単一縦モード発振は今後の課題とし、DFB-LDを用いた従来型のパルス発生器で単一縦モード発振を目指すことにした。

参考文献

- [1] L. E. Richter, H. I. Mandelberg, M. S. Kruger and P. A. Mcgrath, "Linewidth Determination from Self-Heterodyne Measurements with Subcoherence Delay Times," *IEEE J. Quantum Electron.*, Vol. 22, No. 11, pp. 2070-2074, Nov. 1986.
- [2] 稲田功一郎 2006年度卒業論文, "光ヘテロダイン法による160GHz領域の周波数スペクトル計測方法の研究,"
- [3] 鈴木 励 2006年度修士論文, "半導体全光偏光変換を利用した40GHzモードロックパルス発生の研究,"
- [4] 多久島 裕一 他, "単一周波数・偏波安定化ファイバレーザ," 信学技報 Vol.97, No.364 (19971105) pp. 27-32

6章 パルス発生器の単一縦モード発振

6.1 はじめに

これまでの実験で、DISC-loopによるパルス発生を行い、本研究以前のパルス発生の再現を行った。その結果、10-40GHz、パルス幅 1.7-5 ps のパルス発生と利得閾値特性を再現することができた。

また、単一縦モード実現のために高フィネスエタロンを設計、評価し、十分 BW が狭い物が得られていることを確認した。さらに、共振器内に入れ CW 光の光周波数を、共振器周波数より高い精度で制御できた。

これらの実験結果を踏まえた上で、DISC-loopの単一縦モード発振を試みた。

6.2 10 GHz パルスの単一縦モード発振

6.2.1 5 ps パルス発生

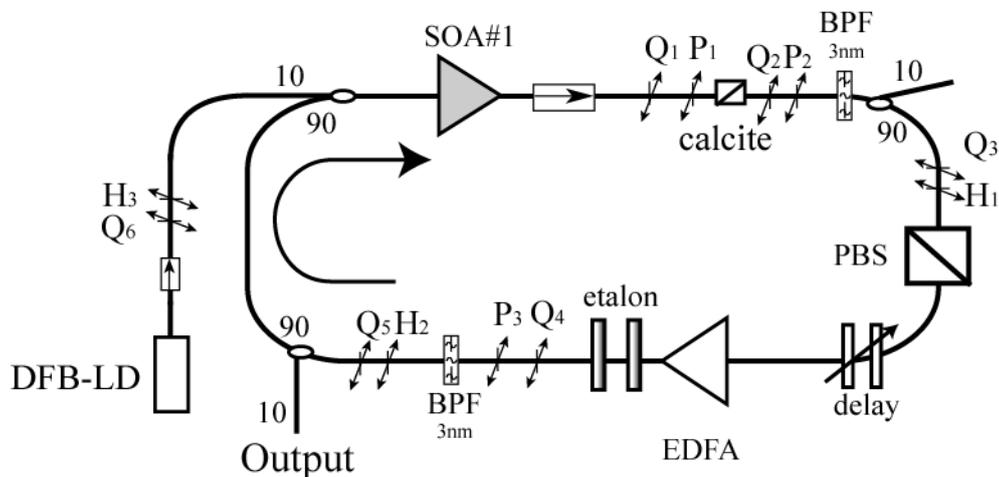


図 6.1: 単一縦モード発振実験構成図

図 6.1 が実験構成図である。用いたエタロンの FSR は 10GHz、BW は 180 MHz である (表 3.2 の#e)。EDFA で補償する非飽和利得値を 28 dB とした。また、SOA に注入する CW 光パワーを -4.6 dBm とし、波長は 1549.22 nm とした。SOA の注入電流は 400 mA、EDFA のポンプへの注入電流 120 mA とした。次に単一縦モード発振のために行った CW 光の光周波数の設定手順を説明する。

1. 最初に、エタロンの透過スペクトルのピークと、DFB-LD 出力光の発振光周波数が一致するように、DFB-LD の印加電圧と温度をコントロールした。
2. エタロンの媒質中での温度変化によって透過スペクトルのピーク波長がシフトするので、手早くパルス発生器の偏光の調節を終わらせた (10 分以内)。
3. 共振器をリング状にし、SOA と EDFA のポンプレーザの注入電流を上げた。
本研究以前のパルス発生手順[1]に従い、SOA に帰還する光の偏波を Q_5 、 H_2 で調節し、カルサイトの後の Q_2 、 P_2 を調節することで位相バイアスを調節し、マルチ縦モードのパルスを発生させた。
4. マルチ縦モード発振のパルスを出した状態から、OE 変換スペクトルを ESA で観察し、SMSR ができるだけ大きくなるまで delay と DFB-LD の印加電圧を調節した。

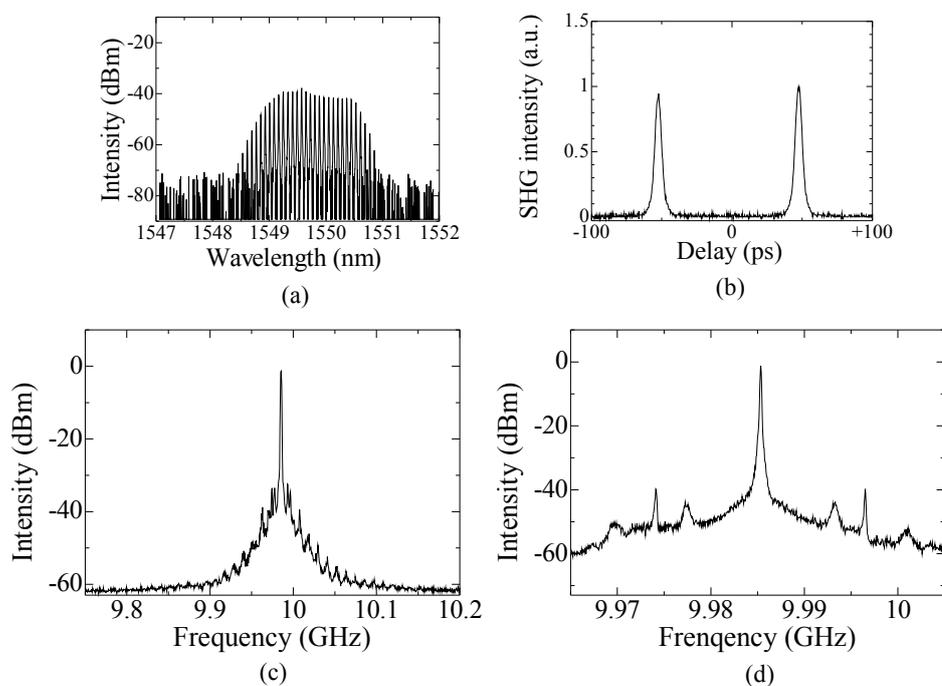


図 6.2: EDFA の非飽和利得 = 28 dB の時のパルス発生、(a)光スペクトル、(b)自己相関波形 (c)、(d)パルスの OE 変換スペクトル

図 6.2 は、パルス発生の実験結果である。BPF の帯域内で光スペクトルが立っていることがわかる(図 6.2(a))。図 6.2(b)よりパルス幅は 3.8 ps であり、遅延時間より若干狭い値になった。自己相関波形の消光比は 15.5 dB であり良好な値を得ることが出来た。(図 6.2(b))。図 6.2 (c)、(d)より、OE 変換スペクトルのピークは 9.9854 GHz であり、共振器周波数は 11.2 MHz であった(分解能 100 kHz)。SMSR は 38.4 dB であり、本研究以前の結果と比べて 30 dB 改善

することに成功した。

EDFA の非飽和利得値が 28dB では、閾値利得ギリギリの動作条件であったため、次に高利得で短尺の EDFA を用いて同様の手順でパルス発生実験を行った。この短尺の EDFA は前方励起と後方励起により、前方励起のみの EDFA より高利得である。EDFA の長さは 4.8m 程度である[2]。非飽和利得値は 40 dB とし、EDFA 以外の実験構成は同じにした。また SOA の注入電流は 500 mA、EDFA のポンプへの注入電流 300 mA、500 mA とした。さらに 2 章での考察により、SOA に入力する周回パルスパワーと CW 光パワーの比率がどの程度 SMSR に影響を及ぼすか実験することにした。CW 光の波長は 1549.23 nm で固定した。

図 6.3 が、[1]で作製した EDFA を用いたパルス発生実験結果である。パルス幅は 3.9 ps であり、MZI の遅延時間幅より若干狭くなった(図 6.3(a))。

次に自己相関計で測定したパルス波形から消光比を計算した。通常、測定したパルス波形から、測定した測定系のバックグラウンド(パルスを OFF にした状態で、リングの外の EDFA と、自己相関計に内蔵されている光電子増倍管の利得を ON にした状態)の値を引き、パルスの消光比を計算する。するとパルス波形の最小値が 0 となり、消光比が ∞ dB となった。これはバックグラウンドの値に、パルス波形の最小値が埋もれているためである。よってバックグラウンドの値を引かないことにした(図 6.3(b))。図 6.3(b)の波形の消光比は 15.2 dB であった(図 6.3(b))。 実際のパルス波形の最小値は、上の値より小さいと思われるので、消光比は 15.2 dB より大きいと思われる。

図 6.3(c)、(d)より OE 変換スペクトルのピークは 9.9872 GHz のところに立っていることが見て取れる。共振器周波数は 11.7 MHz であった。この値から共振器長を計算すると、26 m となった。SMSR は 48.1 dB であり、先の結果より 10 dB 高めることができた。OE 変換スペクトルとエタロンの透過スペクトルを見比べてみると、ピークとその両隣の縦モードが発生するところの透過率の比が 0.2dB 程度であることが見て取れる。よってエタロンの 3 dB 帯域幅は共振器周波数より大きくても単一縦モード発振が可能であることがわかる。3dB 帯域幅と共振器周波数の比は 15.4 であり、10 GHz、5 ps のパルス発生において、この比率でパルス発生器を構築すれば、単一縦モード発振が実現できると思われる。

図 6.4 は SMSR が最大となる周回するパルスパワーと CW 光パワーの比率を表した図である。CW 光パワーを増やすことで、周回するパルスパワーと CW 光パワーの比率を変えた。CW 光パワーの増減の範囲は -6.6 dBm から +2.1dBm とした。CW 光パワーを強めても、周回パルスパワーの増減の範囲は 0.5 dB と小さかった。これは SOA に入射するパルスのパワーが EDFA の飽和出力パワーで決まっているおり、EDFA のポンプの注入電流を上げない限り飽和出力パワーは大きくならないためである。SOA に入る CW 光パワーが +0.4 dBm、周回パルスパワーが +4.9 dBm の時、SMSR が最大値を取った (図 6.3 の結果)。この比率のとき最も CW レーザ発振が抑制され、パルス発生しやすい動作条件であると思われる。しかしこの比率は動作させる SOA、繰り返し周波数、パルス幅によって変わってくるものが予想され、系統的な実験と理論設計は今後の課題である。

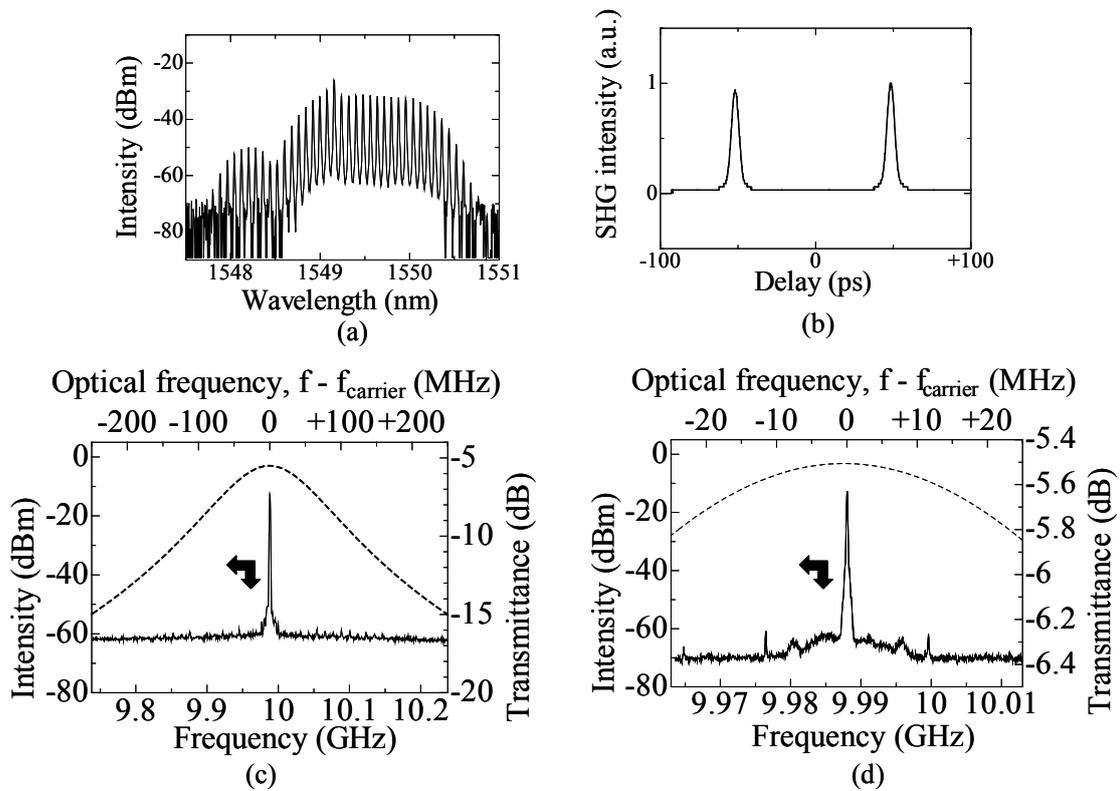


図 6.3: EDFA の非飽和利得値 = 40 dB の時のパルス発生、(a)光スペクトル、(b)自己相関波形、(c)、(d)実線: パルスの OE 変換スペクトル実線: 測定結果、破線: エタロンの透過スペクトル

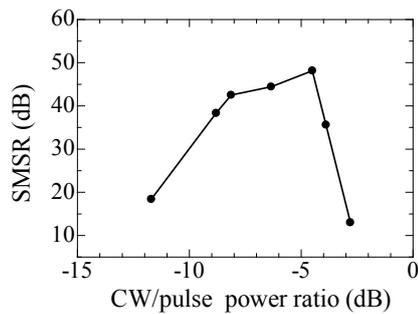


図 6.4: SMSR が最大となる CW 光パワーと周回パルスパワーの比率

6.2.2 CW光同調光周波数範囲

単一縦モード発振を実現する上で、重要なことはCW光の光周波数がエタロンのピークに正確に一致していることである。DFB-LDの発振光周波数は温度、注入電流によって変わり、さらにソリッドエタロンの場合、エタロンの透過スペクトルのピーク波長も温度によって

変わる。よって発振光周波数のずれがどの程度であれば許容されるか調べることにした。CW光の発振光周波数を少しずつ変化させていくことでSMSRがどのように変わっていくか調べた。

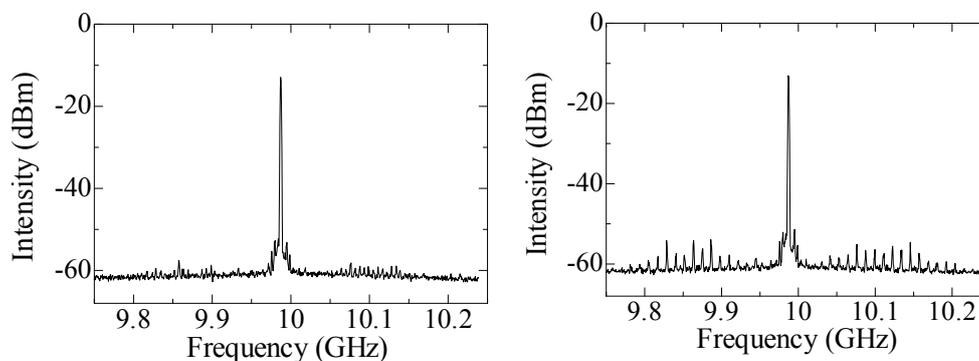


図 6.5: SMSR の悪化の様子、(a)SMSR が最大の状態、(b) (a)の状態から-25 MHz 光周波数をシフトさせた状態

図 6.5 は SMSR がどのように悪化していくかを表した図である。最適な光周波数からおよそ-25MHz シフトさせることで、ピークの両サイドにスペクトル成分が多数発生していることが見て取れる。

図 6.6 より、3dB 帯域幅は 40 MHz であり共振器周波数より 3 倍強広い値を取った。ITU において 100 GHz 間隔の WDM で使われる光源の光周波数の時間安定性が ± 5 GHz と規定されていることを考えると、非常に正確に光周波数をコントロールしなければならないことがわかる。使用した DFB-LD の温度の時間安定性、設定分解能を 4 mK 以下、印加電圧の時間安定性 1 mV 以下、注入電流換で換算すると 70 μ A と、一般に用いられている駆動制御システムと比べて非常に小さくしなければならないことを示しており、非常にコストがかかる。しかしながら、これらの値は共振器長を短くすれば大きくなると思われ、それに伴ってシステムの時間安定性と分解能も大きくできると予想される。

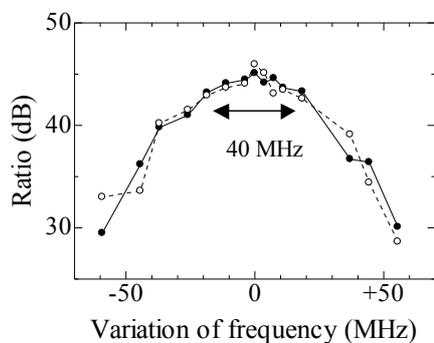


図 6.6: CW 光同調光周波数範囲、黒点: 9.8-9.9 GHz の範囲での SMSR、白点: 10.1-10.2 GHz の範囲での SMSR

6.2.3 2 ps パルス発生

より狭い幅のパルスは、より多くのチャンネルを時間多重できるため、OTDM の実用上重要となる。よってカルサイトの遅延時間を 2.2 ps とし、パルス発生を試みた。SOA の注入電流は 500 mA、EDFA のポンプへの注入電流 500 mA と 500 mA とした。この時の EDFA の非飽和利得値は 43 dB である。SOA の非飽和利得値も帯域幅が 5 nm のものを使用した。注入 CW 光パワーは +1.6 dBm、波長は 1549.22 nm で固定した。

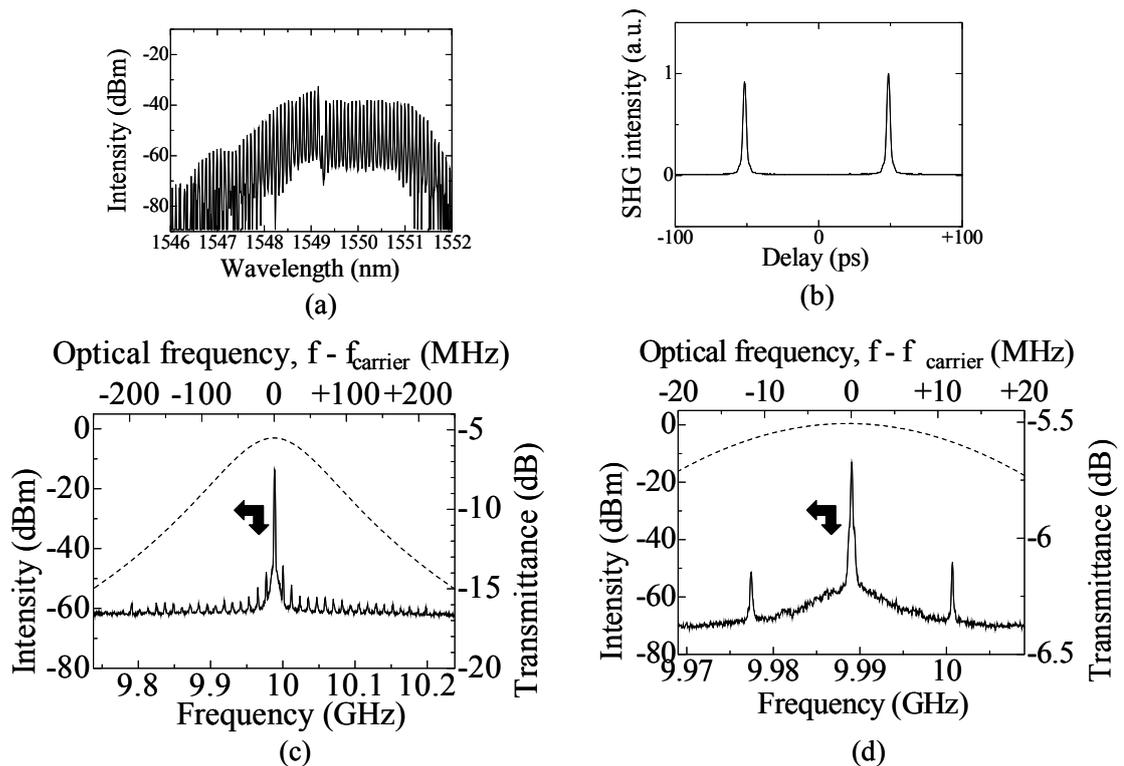


図 6.7: 遅延時間 2.2 ps のパルス発生、(a)光スペクトル、(b)自己相関波形 (c)、(d)パルスの OE 変換スペクトル、実線: 測定結果、破線: エタロンの透過スペクトル

図 6.7 に実験結果を示す。SMSR を大きくするための偏光の調節と、歪みを小さくするような位相バイアスの調節の両立が難しく、光スペクトルの一部が窪んだ(図 6.7(a))。

図 6.7(b)の波形の消光比は 19.6 dB であった。前節の図 6.3(b)に関する説明で述べたとおり、実際のパルスの消光比はこの値より大きいと予想される。パルス幅は 2.1 ps と、カルサイトの遅延時間とほぼ一致した。

OE 変換スペクトルから、共振器周波数は 11.7 MHz であった。SMSR は 35 dB となり、10 GHz、5 ps の時と比べて悪くなった。しかしながら、これまでの結果と比べて、30 dB 程度改善することができた。

短パルス発生時に SMSR が悪くなった原因として次のように考えた。

1. パルス幅が狭くなるほど、光スペクトルの発振帯域は大きくなる。
2. それによってパルスの中心光スペクトルから見て、発振帯域端で発生する光スペクトルの次数は大きくなる。
3. エタロンの FSR が共振器周波数の整数倍が理想であるが、共振器長の微小なずれによって、FSR が共振器周波数の整数倍と一致しなくなる。高次の高調波ほど倍数が大きくなるので、誤差が大きくなりやすい。
4. 結果的にパルスの中心光スペクトルと光スペクトルの端の周波数間隔が一致しなくなる。

これは共振器周波数と FSR の差を小さくする、つまり共振器長を短くすることで解決できると思われる。

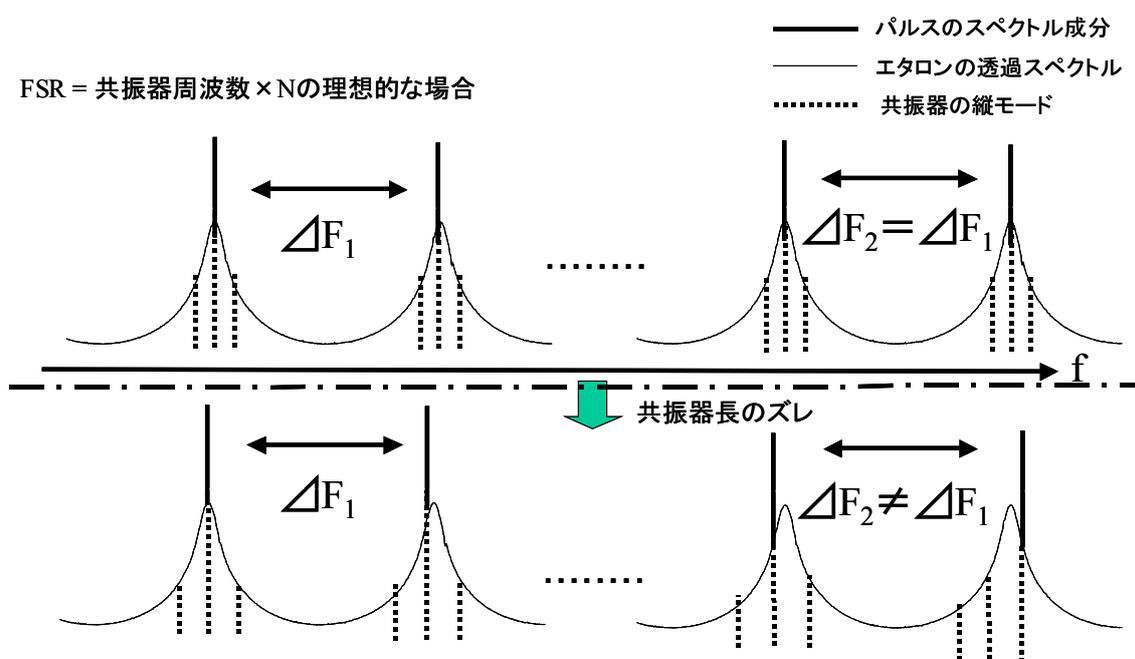


図 6.8: 短パルス発生時における、SMSR 悪化の模式図

単一縦モード発振にするための調節は難しく、注入する CW 光の光周波数制御の他に、SOA に入射する周回パルス光の偏光調整(図 6.1 の Q_5 、 H_2)を慎重に調節しなければならないことがわかった。図 6.9 は、 Q_5 、 H_2 はそれぞれ微小($<1^\circ$)に動かした時の OE 変換スペクトルの変化を表した図である。 Q_5 、 H_2 を少し動かしただけで、OE 変換スペクトルの雑音レベルが急激に上がった。雑音レベルが大きくなるとパルスの時間ジッタは大きくなる。

一方光スペクトル、自己相関波形に大きな変化は見られなかった。これらの結果より時間ジッタの少ないパルスを得るためには、SOA でスイッチングした後の TM 成分のパルスを偏光子で精度よく消さなければならないことがわかった。用いている偏光子の偏光消光比は 50 dB 以上あり、市販品で最高クラスのものである。

よって小型化する際に偏光子、波長板の精度を保たなければならないが、小型化によって偏光消光比の精度が悪くなると、図 6.9(b)のように単一縦モードの質は悪くなると考えられる。

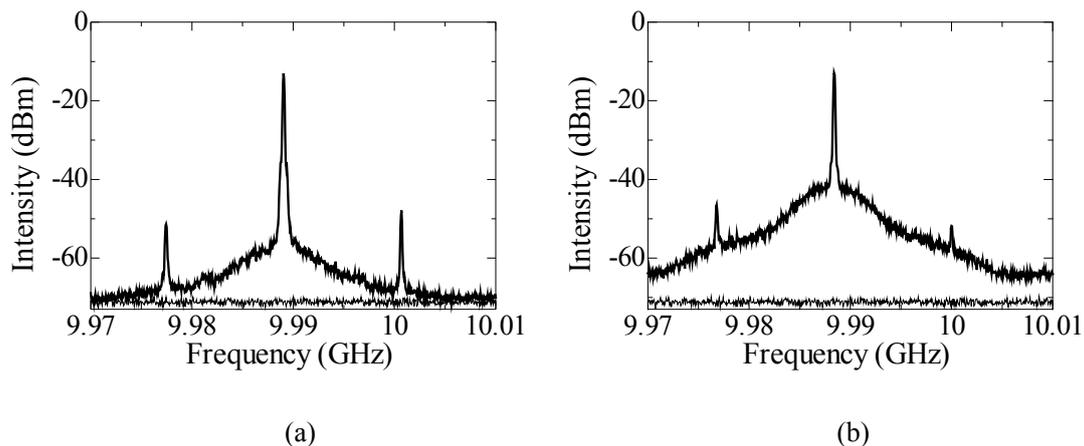


図 6.9: 偏光による OE 変換スペクトルの雑音レベルの悪化、(a)最適な偏光状態の時のスペクトル、(b) (a)の状態より Q、H を微小に ($<1^\circ$) 動かしたときのスペクトル、太線: パルスのスペクトル、細線: 測定系のバックグラウンド

6.3 まとめ

BW が 180 MHz のエタロンを用い、共振器長を 26 m とした上でパルス発生実験を行った。注入 CW 光の光周波数を共振器周波数以下の精度で制御することにより、DISC-loop の単一縦モード発振が実現できた。測定された共振器周波数は 11.7 MHz であった。繰り返し周波数 10 GHz、カルサイトの遅延時間が 5 ps のパルス発生において、周回パルスのパワーと注入 CW 光のパワーの比率を最適にすることで SMSR を 48 dB にまで高めることができ、本研究以前の結果と比べて 40 dB 改善することができた。エタロンの 3 dB 帯域幅と共振器周波数の値の比は 15.4 であることから、概ねこの値以下でパルス発生を行えば単一縦モード発振が常に期待できると思われる。

また、10 GHz、2 ps のパルス発生においても SMSR を 35 dB にすることができた。さらに SOA に入射する周回パルス光の偏光状態を、SMSR が最大の状態から微小に ($<1^\circ$) ずらすことで OE 変換スペクトルがどのように変化するか測定し、小型化する際に偏光子、波長板の精度を保たなければならず、単一縦モード発振にはエタロンの 3 dB 帯域幅と共振器長の他に、偏光子の偏光消光比も関わるという新しい見識が得られた。

今後は 40 GHz のパルスにおける単一縦モード発振を目指し、ヘテロダイン法[3,4,5]を用いてパルスの縦モードを測定する予定である。

参考文献

- [1] 鈴木 励 2006 年度修士論文, ”半導体全光偏光変換を利用した 40GHz モードロックパルス発生の研究,”

- [2] 稲富友一 2007 年度卒業論文, “レーザ共振器損失補償用・短尺高密度 Er 添加ファイバ増幅器の製作,”

- [3] 稲田功一郎 2006 年度卒業論文, “光ヘテロダイン法による 160GHz 領域の周波数スペクトル計測方法の研究,”

- [4] H. Tsuchida, “Timing-jitter measurement of 78-GHz optical time-division multiplexed pulses by optoelectronic harmonic mixing,” *Opt. Lett.*, Vol. 27, No. 22 pp. 2040-2042, 2002

- [5] H. Tsuchida, “Timing noise measurement of 320 GHz optical pulses using an improved optoelectronic harmonic mixer,” *Opt. Lett.*, Vol. 31, No. 5 , pp. 628-630, 2006

7章 結論

本研究では、超高速全光ゲートである DISC を利用したパルス発生器、DISC-loop 型パルス発生器の単一縦モード化を高フィネスのソリッドエタロンを使うことで目指した。

まず始めに、先の研究とは種類の違う SOA を用いて、パルス発生が可能かどうか実験を行った。その結果、リニア型 SOA、ノンリニア型 SOA とともにパルス発生を行うことができ、利得閾値特性を再現することができた。さらに、ノンリニア型の SOA を用いて、本研究以前にはなされなかった、40 GHz、1.5 ps のパルス発生を行うことができた。

次に高フィネスのソリッドエタロンを研究試作し、その評価を行った。DFB-LD 内部の温度変化による発振光周波数シフトを利用することで、エタロンの透過スペクトルを測定した。エタロンへの入射光角度を 0.1° 以下の制御で調節し、3 dB 帯域幅を測定したところ、180 MHz であった。これによって、単一縦モード発振が起こると予想された 3 dB 帯域幅以下のエタロンと光学系を得ることが出来た。

次に、同じ仕様の DFB-LD と同じ仕様の直流電源、温度コントローラを用いて注入連続光の光周波数の厳密制御実験を行った。その結果、光周波数の設定分解能が 3.7 MHz、安定性が 3 MHz 程度であり、パルス発生器の共振器周波数以下の精度で注入連続光の光周波数を制御できるシステムを組むことが出来た。

それらの結果を考慮した上で繰り返し周波数 10 GHz、パルス幅 5 ps のパルス発生を試みたところ、これまで 0dB から 10 dB 程度であった SMSR を最大 48 dB まで高めることが出来た。また、10 GHz、2 ps の短パルス発生においても、SMSR を 35 dB にまで向上させることができ、本研究以前の結果と比べて大幅に改善できた。

以上のように、本パルス発生方式において、高性能化、原理解明の面で多くの進展を得た。

今後の課題として、40 GHz パルス発生の単一縦モードの実証、OE 変換スペクトルの位相雑音測定による時間ジッタ測定、さらに本パルス発生方式の集積化等が上げられる。

謝辞

学部の時代から、4年という長期に渡り懇切なる御指導、御鞭撻を賜りました上野芳康准教授に心より感謝致します。本研究を進めるにあたり、研究に対する多くの御助言、御指摘、御討論を下さった上野研究室の博士課程の坂口淳理学博士に深く感謝致します。また3年半に渡り、共に研究し、大きな励みとなった大平高志君に深く感謝致します。また研究員の Ferran Sallearas 博士は予稿の執筆の際に多くの助言をしていただき、厚くお礼申し上げます。博士前期課程1年の竹内宏幸君には、実験や予稿執筆の助言を多く手助けしていただき、深く感謝致します。また、同じく博士前期課程1年の本間正徳君、西田武洋君も研究に対する多くの御助言を頂き、深く感謝しております。さらに、研究室の運営を進めていく上で大きな助けとなった学部生の稲富友一君、小深田雄君、森本勇樹君、山路健瑠君に深く感謝しております。

研究を行う上で必須であった高フィネスエタロンの設計の助言と、製造をしていただいた株式会社日本航空電子工業の方々、特に伊藤和彦氏、香川昌義氏に深く感謝しております。また、研究に際して多くのアドバイスを頂いた三木・來住研究室の松浦基晴博士、SOA 破損の原因である Q スイッチについて相談していただいた西岡一准教授に謹んで御礼申し上げます。

付録1 SOAの故障レポート

ここでは2006年10月から続いたSOAの故障について述べる。

2006年10月19日、AVANEX社製のSOA(研究室整理番号: AVANEX #3)が故障した。SOAに異常が発生した場合、次のSOAの基礎特性を測定することで、SOAの故障原因を推定する。

- ・ SOAのV-I特性を測定することで、SOAが静電気等により電氣的に故障していないか確かめる。
- ・ SOAのASE光のスペクトルを測定することにより、SOAとファイバのカップリングが適切に行われているか確かめる。

SOAのV-I特性を測定したところ、故障前後の値は一致した。次に、SOAに図1は故障した時のSOA端面(光の入力側)からのASE光スペクトルである。

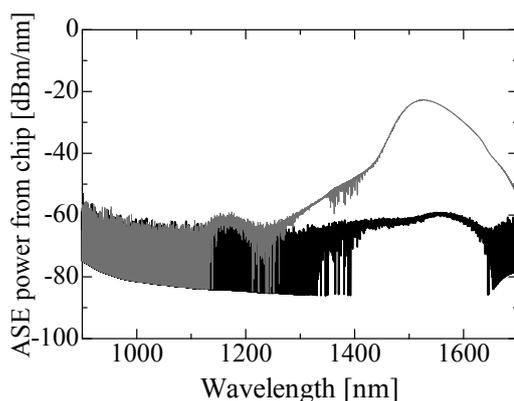


図1 故障前後のASE光スペクトル、細線: 故障前、太線: 故障後

故障前後で、ピークパワーが27 dBも下がった。SOAとピッグテールファイバのカップリングがはずれる原因として、

- ・ ピッグテールファイバを引っ張ってしまい、SOAとピッグテールファイバのカップリングがずれる。
- ・ 高強度の光がSOAに入射することにより、SOAの端面が焼け、カップリングが劣化する。

が考えられる。故障前後で、SOA及びピッグテールファイバを動かしてないため、SOAの端面が劣化したのではないかと推測された。しかしながら、故障前後で変わった操作を行っていなかったため、SOA端面が徐々に劣化して、10月19日について壊れたのではないかと考えた。

次に使うSOAとして、Inphenix 社製のSOA（研究室整理番号: Inphenix NL#1）を使用してパルス発生を行った。しかしながら、このときはパルス発生に失敗した。パルス発生に失敗した理由をこのとき断定できなかったため、パルス発生に成功していたAVANEX社製のものと同じ型番である、SOA（研究室整理番号: Inphenix NL#1）を用いることにした。このSOAではパルス発生に成功し、40 GHz、2 psのパルスを発生させることができた。しかし2007年1月16日に実験を行う際、異常を発見し、AVANEX #3と同じ症状が起こっていることがわかった。さらに、パルス発生を起こすことが出来なかったInphenix NL#1も壊れていることが、2007年4月13日の検査でわかった。このことから、一旦パルス発生の実験を中止し、故障の対策を立てることにした。

故障の原因であるが、Qスイッチによるジャイアントパルスの発生原因がではないかと考えられた。Qスイッチとは、共振器内部の利得が急激に上がるか、損失が急激に下がることで非常にピークパワーが高い単パルスが発生してしまうことをいう。以下のようにジャイアントパルスが発生すると考えている。

1. リングの状態にして、パルス発生を行う。パルス発生はループ内の偏光を調節することで発生させる。調節が不適切だとCW発振を起こし、調節が適切だと、パルス発振を起こす。よって、CW発振からパルス発振の過渡状態が存在する。
2. CW発振からパルス発振の状態で、リング内部の光が一旦止まる。EDFAの励起は行われているので、増幅のための反転分布は形成された状態を保つ。つまりエネルギーは溜まった状態になる。
3. 低パワーのスパイクノイズがループを何回も周回することにより、単一のジャイアントパルスとなる。
4. SOAの破壊閾値パワーを超えることで、SOAの入力端面が焼ける。

以上のプロセスでSOAの端面が焼けると考えた。以下の項目はジャイアントパルスが特に起こりやすいと考えられる操作である。

- EDFAのポンプ電流を急激に上げる。(電流が流れている状態でON-OFFする。)
- 偏光子、及び波長板の角度を急激に変える。

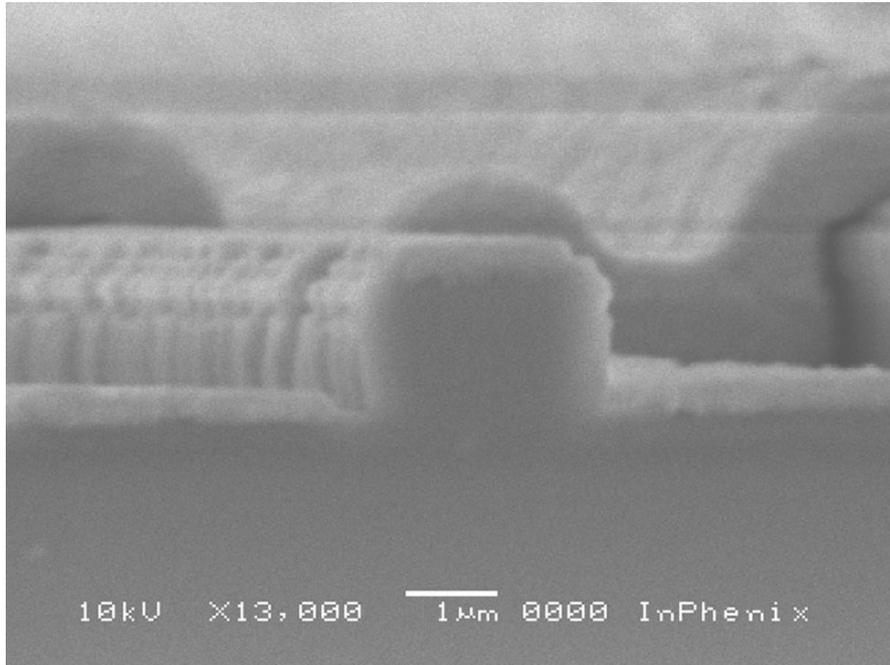
1つめの項目について、EDFA(#4, #2)の励起パワーのつまみを回して0にせず、pumpのON-OFFキーで光を停めていたことがあるため、これが原因であると考えられた。よってゆっくりポンプ電流を上げることにした。偏光調節は急激に動かすことはないが、特に注意してゆっくりすることにした。

メーカーに Inphenix NL#1 の SOA を郵送し調査してもらったところ、表 1 のような返答が帰ってきた。図 2 は SOA 端面を走査型電子顕微鏡 (Scanning electron microscope, SEM) で観測した写真である。

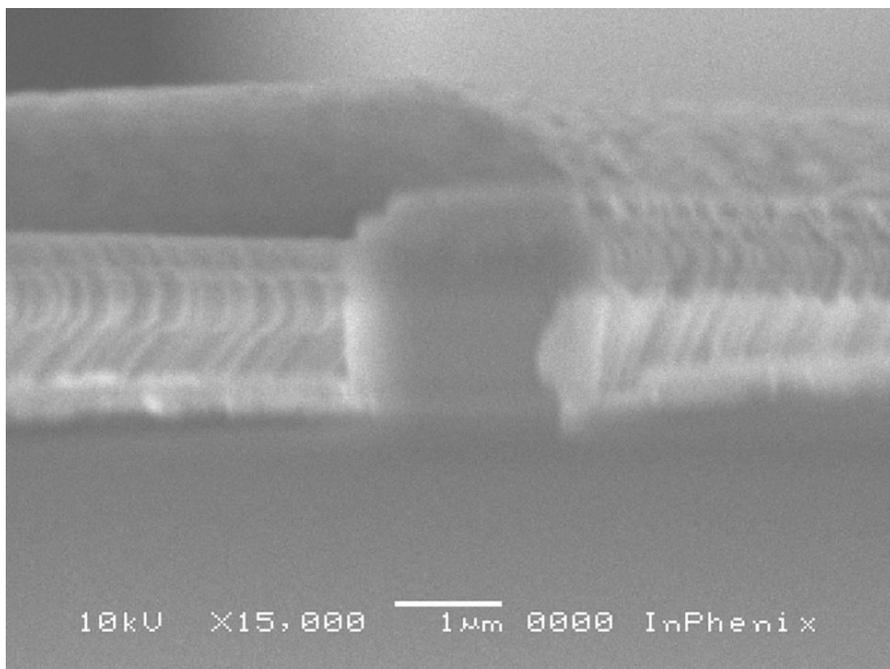
INPHENIX Customer Corrective Action Request			RMA NA	DATE
TO: Quality Assurance Mngr.		FROM: UEC	ITEM (S) RECEIVED ON:	
PRODUCT / SUBJECT IPSA1503 - 1550nm SOA				
FIRST REPORTED:		Disposition:		
SECTION 1 DISCREPANCY				
S/N: 860401324				
CORRECTIVE ACTION REQUIRED:				
<input checked="" type="checkbox"/>	IDENTIFY CAUSE OF DEFICIENCY	<input type="checkbox"/>	REVISE INSTRUCTION/PROCEDURE	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	ACTION TAKEN TO CORRECT DEFICIENCY	<input type="checkbox"/>	PROVIDE TRAINING -	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	ACTION TAKEN TO PREVENT RECURRENCE	<input type="checkbox"/>	GENERATE TOOLING/FIXTURING	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	ASSIGNED TO: Manufacturing Engineer, Test Engineer			
SECTION 2 ANALYSIS, CAUSE AND CORRECTIVE ACTION				
ANALYSIS:				
<p>SN: 860401324, Internal ID 5A538-SA168-04-57-9B. All pins of SOA device were bend upon receiving. Pin 4 was also cut short. Retested the device: Chip Vt/Vr (0.535w/inf) OK, thermistor (10.11K) OK and TEC OK. ASE power of Input and output sides are 35uW and 761uW at 250mA. Input side ASE power 35uW is abnormal. ASE ripple became smaller (0.5dB) at 250mA comparing with original data (1dB).</p> <p>De-lid device and removed input side lens fiber. The power could not be recovered after re-couple input side with another good lens fiber.</p> <p>Dis-assembly the COS and sent to SEM for further analyze. Hunter 07-31-07</p> <p>SEM: There is a small metal part protruding one facet and a small spot on another facet where close to active area, see Fig. 1 and Fig. 2. Zhenghua 8/2/2007</p>				
CONCLUSION				
<ol style="list-style-type: none"> 1. Device was damaged due to the power drop on one facet 2. There is no fiber displacement issue because the power could not recover although using new fiber to realign. 3. Inphenix's workman ship does not contribute to this failed SOA. 4. There is one small spot on one facet that could be the reason for the input facet power drop. 5. What is the root cause for this spot, we are not clear. Based on our experience, it may probably due to the high power density on the facet. 				
VP of Engineering Lisa Li		Quality Assurance Manager: Joe Faver		DATE:
SECTION 3 QUALITY ASSURANCE FOLLOW-UP				
ACCEPT:	DATE:	BY:	CONDITIONALLY ACCEPTED - FOLLOW-UP ON:	
REJECT:	NEW CAR #		FOLLOW-UP ACCEPTABLE	DATE: BY:

Form RMA-1 (07/04)

表 1: SOA 製造メーカーの診断結果



(a)



(b)

図 2: SOA の端面の SEM 像、(a)入力端面、(b)出力端面

次にInphenix製非線形型SOA（研究室整理番号: Inphenix NL#2）を使い実験を行った。10 GHz、5 psのパルス発生実験を行った。パルス発生自体には成功したが、入力端面のASEスペクトルのピークパワーが5.3 dB下がった。よって、再び実験を中断した。

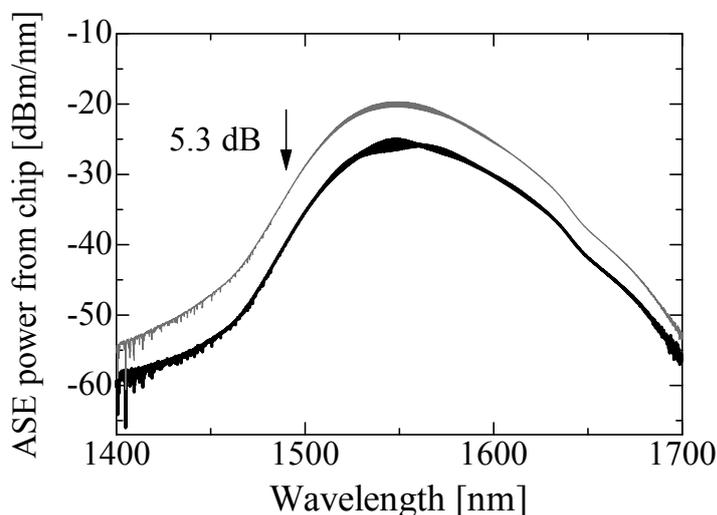


図3: Inphenix NL#2のASE光スペクトル、細線: 故障前、太線: 故障後

次にchip-SOAを使いパルス発生実験を行ったが、入力端面のASEパワーは低下しなかった。次にCovega製非線形SOA (研究室整理番号: Inphenix NL#2)を用い実験を行った。このSOAはケース収納することにした。理由は以下の通りである。

- ・ エアコンの風等によりICクリップが揺れ、サージが発生し、SOAを損傷させることを防ぐ。
- ・ ピッグテールファイバを引っ張り、SOAのカップリングが外れるのを防ぐ。

特に前者の対策については、エアコンの風が当たりやすい場所に移してからSOAが壊れ始めたので、この対策は効果的ではないかと期待された。

しかしながら、何回か実験するとSOAは再び壊れてしまった。対策を再び考えたところ、有効そうな手立てとして、

- ・ EDFAの入力をモニタして、入力下がったり0になった時に、励起光源を停止したり出力をシャットダウンするような構成を入れる
- ・ EDFAをSOAに置き換える。

等が上げられた。最後にSOAが壊れた時間経過を図4にまとめる。

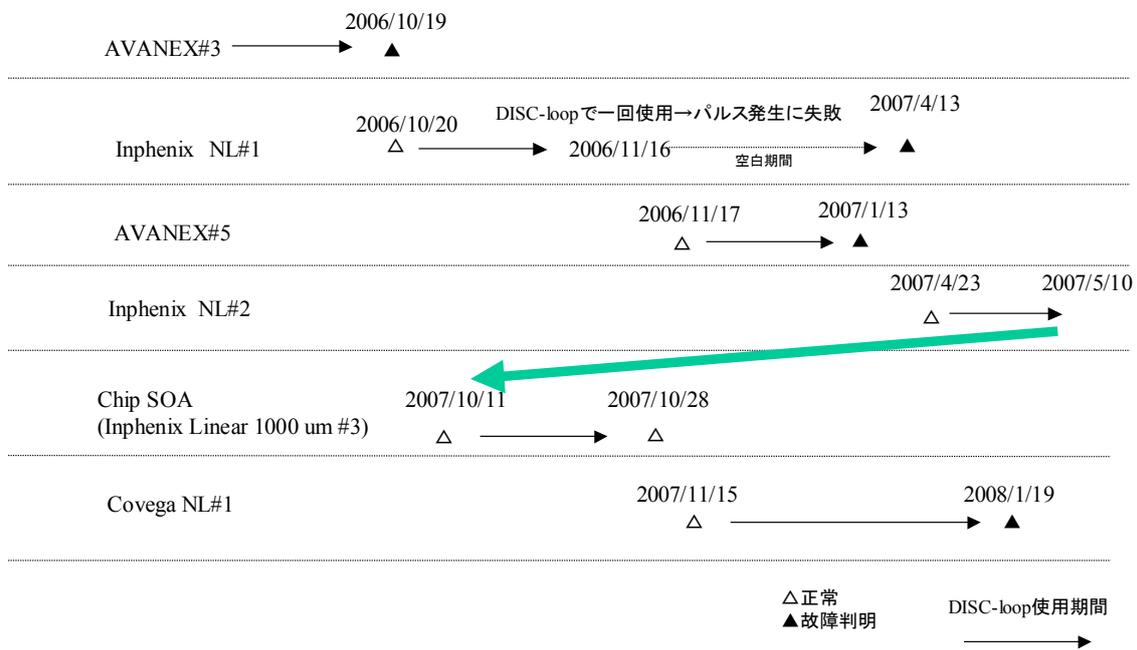


図4: SOA故障の時間経過

SOA-XPM スペクトル合成方式による超高速波長変換の理論設計

Investigation of ultrafast-wavelength conversion by SOA-XPM spectral synthesis

電気通信大学 電子工学科, ○中本亮一、坂口淳、上野芳康

Graduate school of Electronic Engineering, University of Electro-Communications

○ Ryoichi Nakamoto, Jun Sakaguchi, Yoshiyasu Ueno

nakamoto@ultrafast.ee.uec.ac.jp

序 SOAによるXPMとマッシュェンダー干渉計(MZI)を用いた波長変換、DISCが報告されている[1]。MZIの代わりに、SOAによる被変調光を分光し、光スペクトル成分ごとに振幅、位相スペクトルを調節した後に合波する、スペクトル合成による波長変換の研究も報告されている。信号フォーマットの変換、入力パワーダイナミックレンジの拡大のために、MEMSを用いたスペクトル合成が報告されているが[2]、信号の高速化、短パルス化によるキャリアクーリング現象、キャリア密度の指数的緩和によるサブパルス[3,4]を抑制するためのスペクトル合成の研究は、今まで為されていなかった。

本研究 キャリアクーリング現象を考慮したSOAのXPMを計算により再現した。MZIの透過スペクトルを用いて波長変換出力を計算したところ図1のようになり、サブパルスが発生していることがわかる。信号周

波数間隔の分解能を持つ複素強度フィルタを設計し(図2)、計算したところ、サブパルスを抑制できた(図3)。クロック信号(信号周波数25GHz, パルス幅2ps)での波長変換出力の消光比は23dB、PRBS(信号ビットレート25Gb/s, パルス幅2ps, ワード長 $2^{31}-1$)での消光比は17dBであった。

結論 DISCのMZIを複素強度フィルタに拡張する「SOA-XPMスペクトル合成方式」の有効性を示した。

[1]Y.Ueno et al., JJAP. **11** (1999) 1243, [2]J.Leuthold et al., IEEE JLT. **1** (2004) 186. [3] J. Mørk et al., IEICE TRANS. ELECTRON. **7** (2004) 1126, [4] J.sakaguchi et al., JJAP. **44** (2005) 1358.

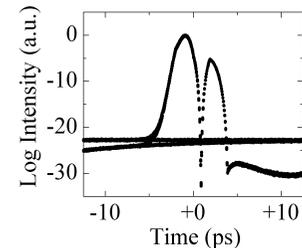


図1 1000bit アイパターン(MZI)

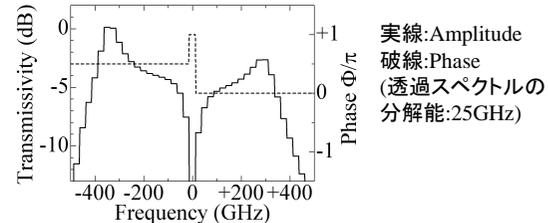


図2 複素強度フィルタの透過スペクトル

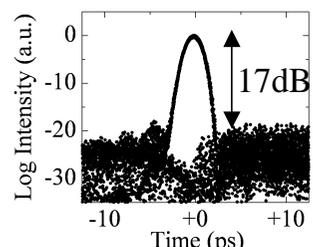


図3 1000bit アイパターン(図2の透過スペクトル)

Expanded-DISC方式による超高速波長変換の理論設計

中本 亮一, 坂口 淳, 上野 芳康

電気通信大学 電子工学専攻

e-mail:nakamoto@ultrafast.ee.uec.ac.jp

1 はじめに

将来のフォトニックネットワークを実現するためには、光信号を電気信号に変換すること無く光信号の波長を変換する全光波長変換が重要である。全光波長変換の方法として、半導体光増幅器(Semiconductor Optical Amplifier, SOA)による相互位相変調とマッハツェンダー干渉計を用いた波長変換(Delayed Interference Signal wavelength Converter, DISC¹)や、周波数分解能 Δf ごとに被変調光を分光し、強度と位相を調節した後合波させる、Spectrum synthesizerを用いた波長変換²が報告されている。DISCによる波長変換は320Gb/sでの動作が実証³されている。信号が高速化、短パルス化するにつれて、キャリアクーリング現象による波形歪み(=サブパルス)⁴顕著になる。サブパルスを抑制するためにSpectrum synthesizerを用いた波長変換方式Expanded-DISC方式(図1)の理論解析を行った。

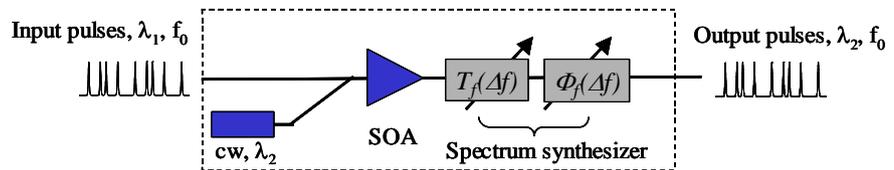


図1. Expanded-DISC方式による波長変換の構成図

2 現在までの研究成果

図2はキャリアクーリング現象の影響を受けたキャリア密度振動波形である。従来のレート方程式にキャリア密度が半分程度回復したところで、キャリア寿命 τ_1 (=10ps)が τ_2 (=50ps)に変わるというモデルを用いた。入力信号の周波数は25GHz、パルス幅は2psとした。すると、DISC出力波形(遅延時間=2ps)は図3のようになり、サブパルスが発生することがわかる。

サブパルスを抑制するために、図4のような透過スペクトルを持つSpectrum synthesizerを設計した。周波数分解能は、信号周波数と同じ25GHzである。このフィルタを用いて、擬似ランダム信号(25Gb/s、ワード長 $2^{31}-1$)を波長変換すると、時間波形は図5(a)のようになった。パターン効果があるものの、サブパルスが抑制されていることがわかる。

図5(b)は1000bit重ね書きしたアイパターンである。時間波形の消光比は14dB程度であり、良好な結果が得られた。これより、Expanded-DISC方式はサブテラヘルツの全光波長変換に有効であると期待される。

参考文献

1. Y. Ueno et al., IEEE PTL, **3** (1998) 346.
2. J. Leuthold et al., IEEE JLT, **1** (2004) 186.
3. Y. Liu et al., OFC 2006, PDP28.
4. J. Mørk et al., IEICE TRANS. ELECTRON, **7** (2004) 1126.

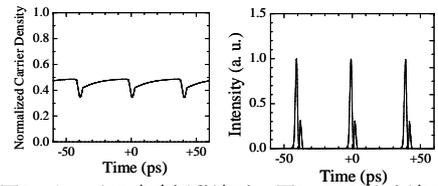


図2. キャリア密度振動波形 図3. DISC出力波形

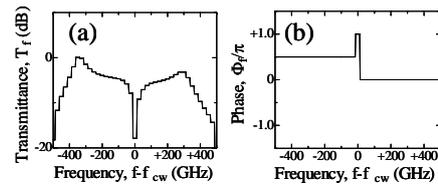


図4. Spectrum Synthesizerの透過スペクトル (a)強度透過スペクトル, (b)位相透過スペクトル

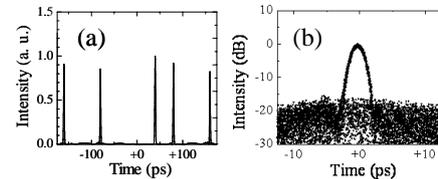


図5. Expanded-DISCによる波長変換出力 (a)時間波形, (b)アイパターン

160-GHz-class optical-clock circuit with semiconductor optical amplifiers

Ryoichi Nakamoto, Rei Suzuki^(a), Takashi Ohira, Jun Sakaguchi and Yoshiyasu Ueno

Univ. of Electro-Communications (UEC), Dept. of Electronic Engineering
1-5-1 Chofugaoka, Chofu-shi, Tokyo, 182-8585 Japan
Tel: +81-42-443-5207, e-mail: nakamoto@ultrafast.ee.uec.ac.jp

(a) Present address: Hitachi Communication Technologies, Ltd., Tokyo, Japan.

ABSTRACT

The authors investigate improved mode-locking characteristics for delayed-interference wavelength converter (DISC)-loop type pulse generators. We are aiming at the generation of high quality single mode pulses by using a high finesse etalon to suppress the spectral components associated to the long cavity length. Our results show that a high finesse etalon (40GHz of free spectral range, finesse of 93, 3dB bandwidth of 430MHz) inserted in a EFRL with equivalent cavity length improves the side mode suppression ration by 39dB. These results pave the way to high quality 160GHz lasers to be used in future optical networks.

1. INTRODUCTION

Ultrashort pulses with repetition rates as high as 40 GHz are needed for the optical time-division multiplexed (OTDM) systems, which will operate at 160 Gb/s in the near future. OTDM rests on the generation of high quality mode-locked pulses with a high repetition rate. Mode-locking techniques can be roughly divided into two main categories: passive mode locking using a saturable absorber and active mode locking. The fragility of the saturable absorber is the main drawback of the former method, whereas the latter needs a very fast electronic drive. The DISC-loop type pulse generator using DISC [1] (Figure 1) was proposed to solve these problems [2] (Figure 2).

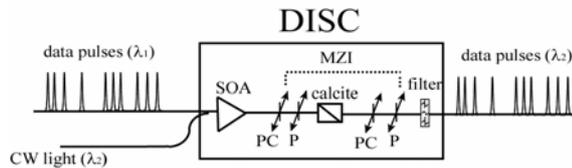


Fig. 1: DISC structure

SOA : Semiconductor Optical Amplifier, MZI : Mach-Zehnder interferometer, PC : polarization controller, P : polarizer

The pulse repetition rate, full-width at half-maximum (FWHM) is determined by free spectral range (FSR) of etalon, delay time of calcite. DISC-loop can generate short pulse such as 1ps, so we expect to drive it with 160GHz.

Recently, the pulse generation at repetition rate = 40GHz, FWHM = 2ps was reported [2]. However, these results were operated with multimode oscillation. If multimode oscillation is occurred, the pulse repetition rate isn't settled. We must drive DISC-loop with singlemode oscillation to be settled pulse repetition rate. About previous results, if using an etalon 3dB bandwidth = 400MHz, we can drive DISC-loop with singlemode oscillation.

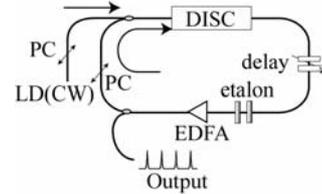


Fig. 2: DISC-loop type pulse generator

DISC : switch CW, etalon : determining repetition rate
delay : adjust cavity length, EDFA : compensate loss in loop

In this letter, we measured the oscillation bandwidth of Erbium doped fiber amplifier ring laser (EFRL) with the same cavity length as our DISC-loop and using a high finesse etalon to test whether the 3dB bandwidth is enough narrow.

2. EXPEREMENTAL SETUP

Figure 3 shows the experimental setup. The gain medium of the EFRL was an Erbium-doped fiber amplifier (EDFA). The cavity length was 46m. In EFRL, polarization controller (PC) and polarizer (P) were used to be output with single polarity.

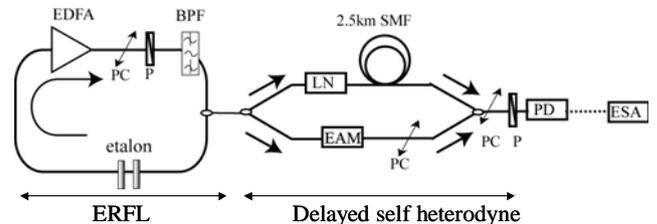


Fig. 3 : Experimental setup

solid line : optical path, dashed line : electric path

A cavity length determines frequency space of multimode oscillation. When cavity length is 46m, frequency space is 5.1MHz. Delayed self heterodyne is useful to measure bandwidth with oscillating such narrow space. In generally, a acoustic optical modulator is used. But measurement range of oscillation is limited about 100MHz. We used a LiNbO₃ modulator (LN) and a Electro-Absorption modulator (EAM) to expand the range. The LN and EAM modulated the EFRL output (modulation frequency of 6.24GHz and 0.90GHz, respectively), and mixed these to generate beat signal. The beat signal was converted electric signal by the photo detector (PD), and measured by the electric spectrum analyzer (ESA). The frequency resolution of the delayed self heterodyne is determined by fiber length of delay. We used a single mode fiber (SMF) with a length of 2.5km, giving a frequency resolution of 19kHz.

3. RESULT

Fig.4 shows pump power vs. output power and output spectrum from EFRL when using a etalon (FSR = 40GHz, finesse = 93, 3dB bandwidth = 0.43GHz, etalon-#a). When the pump power = 28mW, laser oscillation was occurred. We set pump current = 60mA to align condition of DISC-loop. Total gain in EFAL is threshold + 15dB [5]. Optical signal noise ratio (OSNR) of the output is 50dB.

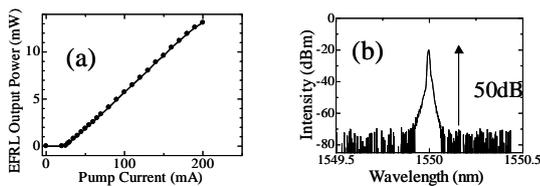


Fig. 4 : (a) EFRL output characteristic using etalon-#a, threshold pump current = 28mA (threshold pump power = 10mW) (b): EFRL output spectrum, pump current = 60mA (pump power = 31mW, Total gain = threshold + 15dB)

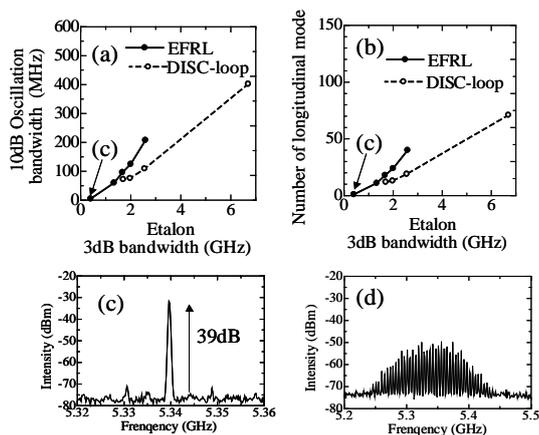


Fig. 5. (a):Comparison EFRL oscillation bandwidth and DISC-loop one. (b):Comparison EFRL number of longitudinal mode and DISC-loop one. (c):RF spectrum using etalon-#a (3dB bandwidth =430MHz) (d):RF spectrum using etalon-#b (3dB bandwidth = 2.0GHz)

Figure 5 shows results of heterodyne. From figure 5 (a), we found that oscillation bandwidth of Erbium-doped fiber amplifier ring laser (EFRL), same cavity length as DISC-loop and using the same etalon, were coincident with oscillation bandwidth of pulse from DISC-loop. From figure 5 (b) shows number of longitudinal mode in 10dB bandwidth. When using etalon-#b, FSR = 40GHz, finesse = 20, 3dB bandwidth = 2.0GHz, the number was 24. Figure 5 (c) and 5 (d) show RF spectrum obtained by delayed self heterodyne. When using the etalon-#a, side mode suppression ratio (SMSR) is 39dB. And the SMSR is 0dB, 10dB oscillation bandwidth is 96MHz when using etalon-#b. When we drove DISC-loop using etalon-#b, 10dB oscillation bandwidth was 72MHz and the number of longitudinal mode was 12 [6].

4. CONCLUSION

We have demonstrated that the use of a high finesse etalon in a EFRL results in the generation of single mode pulses with a side mode suppression ratio of 39dB. The application of the same technique to a DISC-loop pulse generator, with its intrinsic advantages for independent selection of temporal pulse-width and repetition rate, will give rise to the generation of high-quality single mode pulses at high repetition rates for future OTDM networks.

REFERENCES

- [1] Y. Ueno, S. Nakamura, K. Tajima and S. Kitamura "3.8-THz Wavelength Conversion of Picosecond Pulses Using a Semiconductor Delayed-Interference Signal-Wavelength Converter (DISC)," IEEE Photonics Technol. Lett. vol. 10, no. 3, pp. 346-348, March 1998.
- [2] Y. Ueno, S. Nakamura, and K. Tajima, "5-ps, 10-GHz pulse generation from an all-optical semiconductor switch embedded in a ring cavity," Appl. Phys. Lett., vol. 79, no. 16, pp. 2520-2522, Oct. 2001.
- [3] R. Suzuki, T. Ohira, J. Sakaguchi, and Y. Ueno, "40-GHz mode-locked pulse generation with a new scheme of SOA-based pulse generation," CLEO/QELS 2006, paper no. CMG5, May 21-26, 2006,
- [4] K. Matsumoto, "OPTO-ELECTRONIC MEASURING INSTRUMENTS" GUIDE, Optoelectronics, ISBN 4-902312-05-0, pp. 72-76, 2004
- [5] R. Suzuki, S. Kobayashi, J. Sakaguchi, and Y. Ueno, "Threshold condition for pulse generation from a DISC-loop-type pulse generator," IQEC/CLEO-PR, CMF1-4, pp. 1522-1523, July 11-15, 2005.
- [6] R. Suzuki, "40GHz mode locked pulse generation using all optical polarization conversion by semiconductor," master thesis, March 2006.

Semiconductor mode-locked pulse generator with intra-cavity high-finesse etalon

Ryoichi Nakamoto, Takashi Ohira^(a) and Yoshiyasu Ueno

Department of Electronic Engineering, University of Electro-Communications, Chofu, Tokyo

(a) Present address: Fujitsu Access, Ltd., Kanagawa, Japan

e-mail: nakamoto@ultrafast.ee.uec.ac.jp

Ultrashort pulses with repetition rate over 40 GHz are needful for the optical time-division multiplexing (OTDM), which operate over 160 Gb/s in the near future. The delayed interferometer signal converter (DISC) [1] loop type pulse generator (Fig. 1) has the advantages in the long-term stability, large-scale integration in the near future [2]. In this scheme, the pulse repetition rate and the pulsewidth are determined by the etalon free spectral range (FSR) and delay time in the Mach-Zehnder interferometer, respectively.

Previously, we demonstrated pulse generation at repetition rate = 40 GHz, pulse width = 2 ps with this scheme [3]. However, these results suffered from multi mode oscillation preventing the stabilization of repetition rate, so we aim at the generation of high quality pulses with single mode oscillation. One of the ways of removing multimode oscillation is the use of high finesse etalons. Fig. 2 shows the measured number of longitudinal modes as a function of the etalon bandwidth. We can extrapolate that oscillation will be single mode for a bandwidth about 400 MHz (finesse 100). Fig. 3 shows the measured transmittance of an etalon with finesse 220 (3dB bandwidth = 180 MHz), which should result in single mode operation when used in the DISC-loop.

In the symposium, we will present some results with using the high finesse etalons.

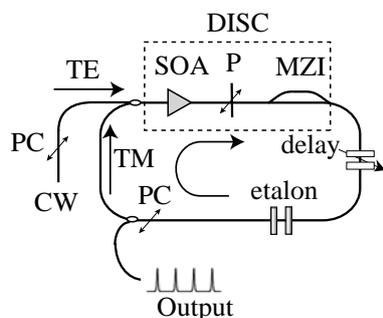


Fig. 1. DISC-loop type pulse generator

CW: continues wave

PC: polarization controller

SOA: semiconductor optical amplifier

P: polarizer

MZI: Mach-Zehnder interferometer

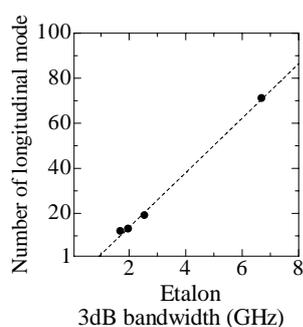


Fig. 2. Number of longitudinal mode on pulse generation (40GHz, 5ps)
dash line: approximated curve

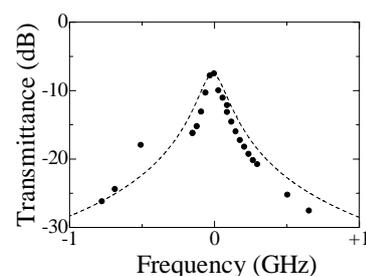


Fig. 3. Transmittance of high finesse etalon
dot: Measured point around 1550 nm (192 THz)
dash line: fitting curve
3dB band width = 180 MHz, finesse = 220

References

1. Y. Ueno et al., IEEE Photonics Technol. Lett. vol. 10, no. 3, pp. 346-348, March 1998
2. Y. Ueno et al., Appl. Phys. Lett., vol. 79, no. 16, pp. 2520-2522, Oct. 2001.
3. R. Suzuki et al., CLEO/QELS 2006, paper no. CMG5, May 21-26, 2006.
4. R. Suzuki "40GHz mode locked pulse generation using all optical polarization conversion by semiconductor," master thesis, March 2006.

半導体全光ゲートを利用する受動的モードロックパルス発生器の単一縦モード発振達成

Achievement of single longitudinal mode oscillation of the passive mode locked pulse generator using the semiconductor ultrafast all optical gate

電気通信大学 電子工学専攻 ○中本亮一、竹内宏幸、坂口淳、上野芳康

University of Electro-Communications, Dept. of Electronic Engineering

○Ryoichi Nakamoto, Hiroyuki Takeuchi, Jun Sakaguchi and Yoshiyasu Ueno

nakamoto@ultrafast.ee.uec.ac.jp

【はじめに】半導体光増幅器とマッハツェンダー干渉計を用いた全光パルス発生方式[1]は①集積化可能、②パルス幅、繰り返し周波数、パルスの発振波長をそれぞれ独立に設定できるため柔軟にシステムを変更できるといった利点がある。繰り返し周波数は、リング共振器内部に挿入するエタロン、もしくはエネルギー分配マッハツェンダー干渉計(ED-MZI)の自由スペクトル間隔で決定される。しかし、これらの 3 dB 帯域幅が共振器周波数に対して広いため多モード発振が起こるという問題があった[2]。今回、エタロンのフィネスを高めることにより単一縦モード発振を達成したので報告する。

【本研究】従来の多モード発振パルスの RF スペクトルを図 1(a)に示す。今回は高フィネスかつ低損失なソリッドエタロンを試作し、パルスの単一縦モードパルス発振を試みた。ソリッドエタロンへの入射光角度を精密調節した結果、170 MHz と狭い 3 dB 帯域幅 (フィネス = 59 相当) を得た(図 1(b))。また、注入連続光の光周波数をソリッドエタロンの透過スペクトルのピークに共振器周波数以下の精度で合わせた。発生させたパルス(パルス幅 = 3.9 ps)の RF スペクトルを測定したところ、共振器周波数は 11.7 MHz、SMSR は 44 dB(図 1(b)) であった。

【結論】本研究により、本方式の高純度モードロックパルス発生原理実証を達成した。今後は高純度 40 GHz パルス発生を目指す。

[1] Y. Ueno *et al.*, Appl. Phys. Lett. **79** (2001) 2520. [2] 鈴木他, 第 66 回応用物理学会学術講演会, 22p-Y-9, 2006 年 3 月

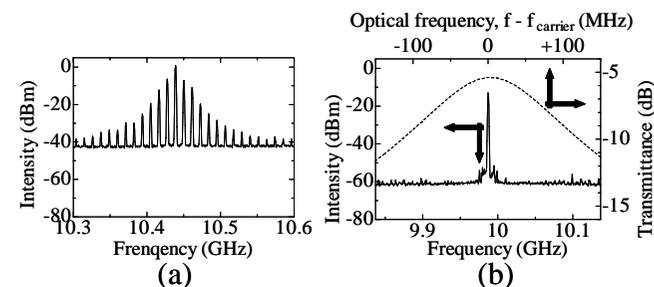


図1 出力光のOE変換後のRFスペクトル
(a) ED-MZIを使用した、多モード発振状態、SMSR = 7 dB
(b) 高フィネスエタロンを使用した、単一縦モード発振状態(実線)
SMSR = 44 dB。
破線はエタロンの透過スペクトル(相対周波数スペクトル、計算値)。