

論文要旨

デジタル化やオンライン化に伴う通信データ量の増大によって、高速・高効率な光通信技術の需要は急速に高まっています。微小共振器を用いた光周波数コムであるマイクロコムは、非線形光学効果の1つである四光波混合を発生原理とする光パルスである。マイクロコムは従来の光周波数コムと比較して、小型・省エネルギー・高繰り返しといった特徴を持つことから、光通信を含む様々な分野で応用研究が報告されている。マイクロコムを用いた光通信応用の先行研究の多くは、デジタルコヒーレント通信による大容量な長距離伝送を目標としている。一方、強度変調・直接検出 (intensity modulation-direct detection; IM-DD) は、低遅延、高い信頼性、優れたコストパフォーマンスにより、データセンタをはじめとする中距離伝送において依然として数多く利用される通信方式である。データセンタの市場規模は今後も拡大が予想されるため、それを支える基盤技術の発展が望まれている。この光源を微小共振器によるマイクロコムで代用することで、コストパフォーマンスと大容量通信の両立を実現することが期待される。本論文では、フツ化マグネシウム結晶共振器によるマイクロコムを用いた IM-DD 方式による波長分割多重 (Wavelength division multiplexing; WDM) 伝送の実験を行っている。FSR 20 GHz のフツ化マグネシウム結晶共振器を用いた 40 km 伝送の伝送特性を測定し、エラーフリーな伝送を達成した。本研究の結果は、将来のデータセンタでの実用化に向けて、IM-DD 方式によるマイクロコムを用いた波長分割多重通信の応用可能性を示すものである。

第 1 章では、本研究に関する基礎知識として微小光共振器や光周波数コムの概要について紹介し、本研究の目的を述べる。

第 2 章では、微小光共振器の基礎理論と作製方法を述べる。

第 3 章では、マイクロコムの基礎理論と発生方法について述べる。

第 4 章では、マイクロコムの伝送特性について実験結果を示す。

第 5 章では、本論文を統括して結論を述べる。

Thesis abstract

Wavelength division multiplexing transmission from a magnesium fluoride microresonator

The demand for high-speed and high-efficiency optical communication technology has been rapidly growing due to the increase in the amount of communication data associated with digitization and online communication. Microcomb, which are optical frequency combs using microcavities, are optical pulses based on the generation of four-wave mixing, which is one of the nonlinear optical effects. Compared with conventional optical frequency combs, microcomb are compact, energy-saving, and highly repetitive, and their application research has been reported in various fields including optical communications. Most of the previous studies on optical communication applications using microcomb have targeted large-capacity long-distance transmission by digital coherent communication. On the other hand, IM-DD system is still used in data centers and other medium-range transmission applications because of its low latency, high reliability, and excellent cost performance. Since the market scale of data centers is expected to continue to grow, it is desirable to develop the fundamental technology to support it. By substituting microcomb for the light source, it is expected that both cost performance and high-capacity transmission can be achieved. In this paper, I present an experiment of wavelength-division multiplexing transmission by IM-DD system using a microcomb. Error-free transmission is achieved at 40 km transmission using microcomb with FSR of 20 GHz. The results of this study demonstrate the applicability of wavelength division multiplexing transmission using microcomb with IM-DD system for practical use in data centers.

Chapter 1 describes the basic knowledge and the purpose of this thesis.

Chapter 2 describes the theory about microresonator and method of fabrication.

Chapter 3 describes the theory about microcomb and experiments for their generation.

Chapter 4 shows the experimental results of the transmission characteristics of microcomb.

Chapter 5 summarizes this thesis.

目次

第1章 序論	3
1.1 はじめに	3
1.2 微小光共振器	3
1.2.1 光共振器	3
1.2.2 ウィスパリングギャラリーモード (WGM) 共振器	4
1.2.3 フッ化マグネシウム結晶共振器	6
1.3 光周波数コム	6
1.4 マイクロコム	8
1.4.1 微小光共振器による光周波数コム	8
1.4.2 共振器における分散	9
1.5 散逸性カーソリトン	10
1.6 光通信	11
1.7 本研究の目的	15
1.8 本論文の構成	16
第2章 微小光共振器	17
2.1 フッ化マグネシウム結晶共振器の作製	17
2.1.1 接着	17
2.1.2 切削	18
2.1.3 研磨	19
2.2 微小光共振器の光学特性	20
2.2.1 Q 値の理論	20

2.2.2	光学特性の評価	21
第3章 散逸性カーソリトン		24
3.1	散逸性カーソリトンの理論	24
3.2	散逸性カーソリトンの発生	28
第4章 波長分割多重通信への応用		34
4.1	伝送特性	34
4.2	散逸性カーソリトンのコム線における伝送特性	35
4.2.1	コム線伝送の測定方法	35
4.2.2	コム線伝送の測定結果	36
4.3	散逸性カーソリトンによる波長分割多重通信実験	37
4.3.1	波長分割多重通信の測定方法	37
4.3.2	波長分割多重通信実験 (FSR 9.6GHz)	38
4.3.3	波長分割多重通信実験 (FSR 20GHz)	46
第5章 結論		51
謝辞		53

第1章 序論

1.1 はじめに

光は人類にとって身近に存在する物理現象であり，古来から光を有効に利用しながら生活してきた．光は非常に高速であることから，情報を離れた場所まで伝える情報伝達手段としても古くから様々な方法で利用されてきた．例えば，のろしやモールス信号といったものが例として挙げられる．この光が実用的な通信システムとして導入されたのは，レーザの発明と低損失な光ファイバ技術が実現されて以降のことである．光通信システムは長距離で，高速な，高品質な通信であるという特徴があることから注目を浴び，急速な研究開発が行われてきた．1990年代からインターネットと携帯電話が人々の生活に浸透し始め，現在では通信技術は生活と切り離すことができないものとなっている．光通信システムはその現代の通信技術の核となっている．

新型コロナウイルス感染症の世界的拡大を契機として，企業活動・教育・家庭といった様々な場面でオンライン化やデジタル化がより一層進められている．第5世代移動通信システム（5G）をはじめとするデジタル技術の開発・整備に向けた取り組みが加速することが予想され，光通信システムにおける基盤技術に要請される事項は多岐にわたる．

本研究では，微小光共振器をテーマとして光通信システムにおける光源に着目した．微小光共振器に入射した光は，非線形光学効果によって多数の周波数成分をもつマイクロコムが生成される．このマイクロコムは小型・省電力・高繰り返しといった特徴を有することから様々な分野で応用研究が行われている．光通信システムの要請を満たす新たなデバイスの開発に向けて，マイクロコムの活用可能性を模索する本研究が，微小光共振器の光通信システムにおける応用可能性の一助となれば幸いである．

1.2 微小光共振器

1.2.1 光共振器

共振とは，振り子のようなエネルギーを有する振動する波動や物体に対して外部から周期的な刺激を与えたとき，系の振動が増幅する現象である．外部からの周期的な刺激が物体の固有振動数に近いほどその効果は大きくなる．この現象は楽器や無線機器の同調回路など様々なもので利用されており，光においても同様の共振現象が発生する．光共振器と

は、光を空間的に閉じ込める系によって特定の共振周波数の定常波を生じる光学機器であり、レーザや干渉計に用いられる。

代表的な光共振器としてはファブリー・ペロー (Fabry-Perot) 型共振器が挙げられる。Fig.1.1. にファブリー・ペロー型共振器の概念図を示す。この共振器は2枚の平行に配置された平らな反射鏡によって構成された平面鏡共振器である。鏡を往復する光学距離が波長の整数倍となる共振条件を満たすと、共振器内の光が増強される。共振条件を満たす一連の波長の異なる光が縦モードであり、隣接する縦モードの波長 (周波数) 間隔は自由スペクトル領域 (free spectral range; FSR) と呼ばれる共振器の重要な構成要素である。半導体レーザにはファブリー・ペロー型共振器が用いられる。光が共振器内を往復して増幅され得られる利得が導波路での吸収や光出力などの損失に釣り合うまで大きくなったとき、共振周波数において発振を開始する。

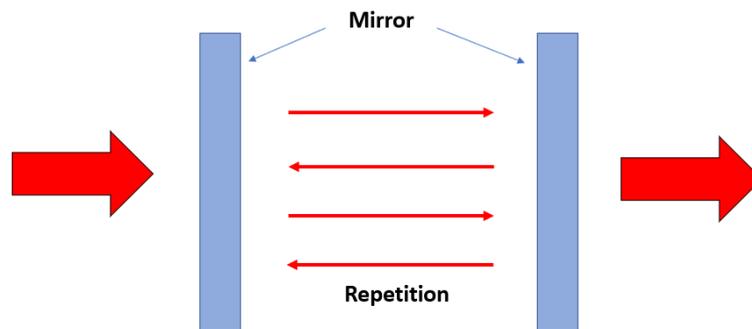


Fig. 1.1. Illustration of Fabry-Perot resonator.

1.2.2 ウィスパリングギャラリーモード (WGM) 共振器

光の共振を行うリング型の導波路と光の入出力を行うバス導波路で構成されるリング共振器といった分類の光共振器には、その代表的な例としてウィスパリングギャラリーモード (whispering gallery mode; WGM) 共振器が挙げられる。円形回廊の建造物の壁近くでささやくと、音波が壁に沿って回廊を伝わる現象が起こる。イギリスの物理学者 Rayleigh (1842-1919) はセント・ポール大聖堂のドームでのこの現象を連続的な壁面での反射による音の伝搬として説明した。このような波の伝わり方はウィスパリングギャラリーモードと呼ばれ、WGM 共振器では光が閉曲面に沿って全反射を繰り返しながら伝

搬する^[1]。屈折率 n の材料から作製された半径 R の WGM 共振器において、FSR は以下で表される。

$$\text{FSR} = \frac{c}{2\pi n R} \quad (1.2.1)$$

これは同じ材料から作製された WGM 共振器の FSR は共振器のサイズによって決まることを意味する。

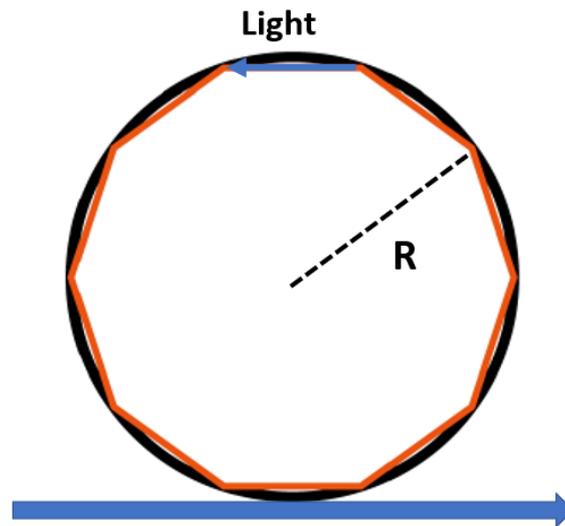


Fig. 1.2. Illustration of WGM microresonator.

Fig.1.2. は WGM 共振器の構造を表す図である。共振器の性能は Q 値と呼ばれ、光を共振器内部にどれだけ長時間閉じ込められるかを表す数値で評価される。WGM 共振器は一般的に極めて高い Q 値を示す。WGM 共振器は $\mu\text{m} \sim \text{mm}$ 程度と非常に小さいサイズで作製可能であり、共振器内部のモード体積も小さい。また共振器内部の光エネルギー密度が高まることから、光と物質間の相互作用が強まるために非線形光学効果が観測される^[2]。微小光共振器は、シリコンナイトライド (SiN)^[3]、シリカ (SiO_2)^[4]、フッ化マグネシウム (MgF_2)^[5]、フッ化カルシウム (CaF_2)^[6] といった様々な材料で作製される。またシリコン基盤をエッチングし炭酸ガスレーザーによるレーザーリフトすることで作製されるトロイド共振器、結晶を切削し形成する結晶共振器等、形状においても複数の種類が存在する。

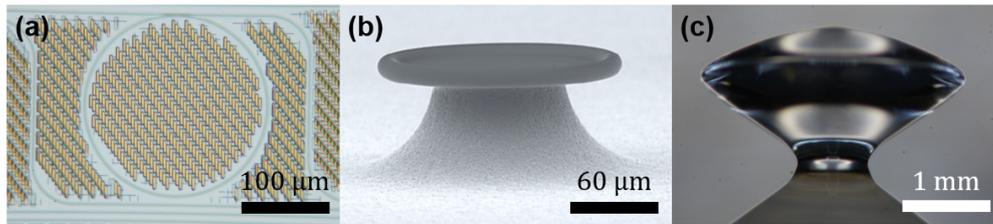


Fig.1.3. Various types of resonators. (a)Silicon nitride chip. (b)Silica troid. (c)Magnesium fluoride resonator.

1.2.3 フッ化マグネシウム結晶共振器

フッ化マグネシウム (magnesium fluoride; MgF_2) 結晶は可視光帯から通信波長帯を含む幅広い透過波長領域をもつ一軸性の異方性結晶である^[7]。フッ化マグネシウム結晶は耐熱性に優れ、切削・研磨といった人的加工が容易なために微小光共振器の材料として適している。さらにフッ化マグネシウムは3次光非線形媒質であり、異常分散となることからマイクロコムが発生する条件を満たしている。フッ化マグネシウム結晶光共振器は 10^9 を超える極めて高いQ値を示すため、狭いFSRのマイクロコムを得ることができる。そのためシリコンナイトライドのFSRは、100～1000 GHzであるのに対して、フッ化マグネシウム結晶光共振器のFSRは数十GHzとなる。結晶光共振器は、通常切削とそれに続く研磨によって手作業で作製されるため、精密な形状制御には限界がある。しかし最近の研究では、精密な機械加工によってこの欠点を克服した完全に制御された結晶光共振器作製の可能性が示される^[8]。

1.3 光周波数コム

光周波数コム (optical frequency comb; OFC) とは、周波数軸上で等しい周波数間隔で並んだモード群であり、時間軸上では光パルス列という特徴をもつ光である。周波数領域における形状が櫛 (コム) 状であることから光周波数コムと呼ばれている^[9]。Theodor Hänsch, John Hall の両氏はこの技術を精密分光測定技術法の研究に使用し2005年にノーベル物理学賞を受賞しており、光周波数コムは世界的に注目を集めている技術である。

光周波数コムの生成法は複数存在し、その代表的なものとしてモード同期レーザーを使用して光パルス列を生成する方法がある^[10]。レーザー媒質として幅広い波長のレーザーを共振・増幅させることのできるチタンサファイア (Ti:Sapphire) が開発されたことからモード同期レーザーに利用が始まり、その後はエルビウム、イッテルビウムといった希土類添加

ファイバレーザが主流となっている。

周波数軸上における光周波数コムのスペクトルの間隔は繰り返し周波数 f_{rep} と呼ばれ、その間隔で周波数 0 Hz まで外挿した際のオフセット周波数をキャリアエンベロープオフセット周波数 f_{ceo} と呼ぶ。そのため m 番目のスペクトル線の周波数 f_m は以下のように表される。

$$f_m = f_{\text{ceo}} + m \cdot f_{\text{rep}} \quad (1.3.1)$$

また、光周波数コムを時間軸で観測する光パルス列の時間間隔は、繰り返し周波数 f_{rep} の逆数で表される。共振器のもつ分散によって、光パルスの包絡線と搬送波の進む速度が異なるため、光パルス一つ毎に位相差 $\Delta\phi$ が生まれる。この位相差 $\Delta\phi$ はキャリアエンベロープ位相と呼ばれ、以下のような関係を満たす。

$$f_{\text{ceo}} = \frac{\Delta\phi}{2\pi} f_{\text{rep}} \quad (1.3.2)$$

これらの2つの式から THz 帯域に存在する極めて高い光周波数が、MHz ~ GHz 帯域に存在する f_{rep} , f_{ceo} を変数とした単純な1次式に表すことができる。これは光コムの周波数間隔を用いることで、マイクロ波領域と光周波数領域をダイレクトにつなげた測定を容易に実現することができる。このことから光周波数コムは光のものさしと形容される。光周波数コムの f_{rep} は高精度に測定可能であるが、 f_{ceo} は直接測定することはできない。 f_{ceo} の測定においては、光周波数コムの帯域を1オクターブ以上に広げ、2次高調波を発生させてビート信号を測定する自己参照法 (f-2f 法) ^[11] により測定することができる。第2高調波の低周波端のモード ($2f_n$) と基本波の $2n$ 番目のモード (f_{2n}) の干渉からビート信号 (f_{beat}) を取ることで f_{ceo} を得ることができる。

$$\begin{aligned} f_{\text{beat}} &= 2f_n - f_{2n} \\ &= 2(nf_{\text{rep}} + f_{\text{ceo}}) - (2nf_{\text{rep}} + f_{\text{ceo}}) \\ &= f_{\text{ceo}} \end{aligned} \quad (1.3.3)$$

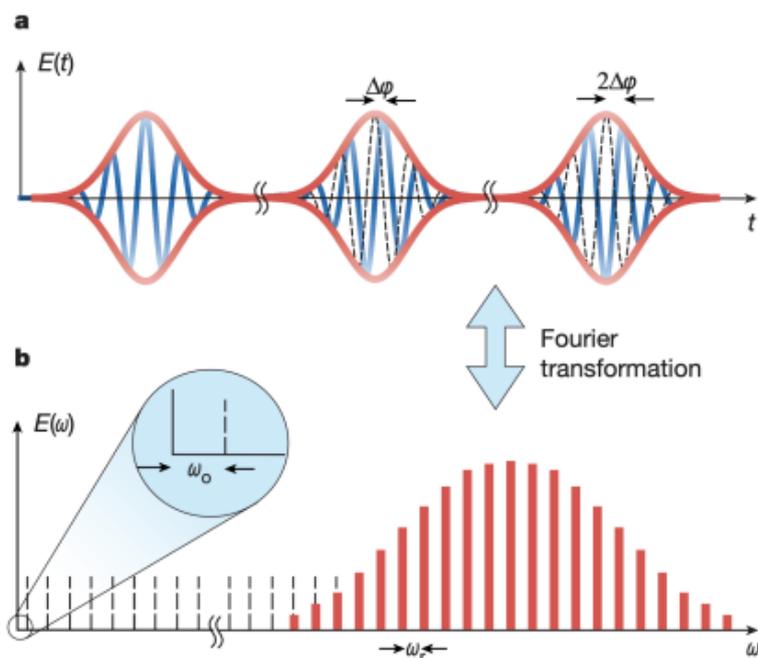


Fig. 1.4. Consecutive pulses of the pulse train generated by a mode-locked laser and the corresponding spectrum. (a) Optical pulse train. (b) A frequency comb spectrum. [T. Udem, R. Holzwarth, and T. W. Hänsch, “Optical frequency metrology,” *Nature*, 416, 233 - 237, 2002]

1.4 マイクロコム

1.4.1 微小光共振器による光周波数コム

光周波数コムには、微小光共振器を利用することで生成させる手法も存在する^[12]。これは連続光 (continuous wave; CW) レーザを共振器に入射し、非線形光学効果の一種である四光波混合 (fourwave mixing; FWM) が連鎖的に生じることによって、レーザ波長を中心に共振器の FSR 間隔で光周波数コムが生成される。この手法により生成される光周波数コムは、光カーコムやマイクロコム (microcomb) と呼ばれている。四光波混合は2つの異なる波長の光を3次非線形媒質に入射した際に、パラメトリック相互作用の結果として新たな波長の異なる2つの光 (シグナル光とアイドラ光) が生じる現象である。シグナル光とアイドラ光が WGM 共振器の共振モードであるとき、共振器内部に2つの光は閉じ込められ、それぞれの光を新たな励起光源として新たなシグナル光とアイドラ光が生じるという連鎖的な現象によって光周波数コムが発生する。よって微小光共振器の

FSR がマイクロコムの f_{rep} にほとんど一致し、10 GHz ~ 1 GHz という高い繰り返し周波数となる。Fig.1.5. はマイクロコムの概念図である。

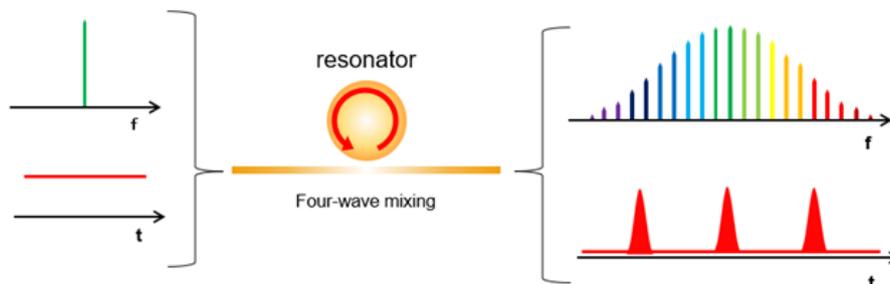


Fig. 1.5. Illustration of a microresonator-based optical frequency comb.

1.4.2 共振器における分散

光の分散とは媒質の屈折率における周波数依存性を有する性質のことである。例えば、光がプリズムを通るとき波長の違いによって屈折角が異なるが、これは分散によって起こる現象である。光共振器の場合、分散によって共振周波数、FSR が光の波長に依存する。この分散は媒質の種類によって決定される材料分散と、媒質の構造に由来する構造分散の2種類が挙げられる。共振角周波数は任意の角周波数 ω_0 を中心として中心から数えた相対的な番号 μ として数えるとき、 ω_μ の共振角周波数はテイラー展開により以下のように表される。

$$\omega_\mu = \omega_0 + D_1\mu + \frac{1}{2}D_2\mu^2 + \frac{1}{6}D_3\mu^3 + \dots \quad (1.4.1)$$

ここで、 D_1 は共振器の ω_0 における縦モード間隔、 D_2 は共振器の分散を表す。Fig.1.6. は分散の影響を表す図である。 $D_2 < 0$ の場合を正常分散、 $D_2 > 0$ の場合を異常分散という。異常分散である $D_2 > 0$ の場合は高周波数となるほど FSR は広くなり、共振周波数は全体的に高くなる。一方正常分散 $D_2 < 0$ の場合は逆に周波数が高いほど FSR は狭まくなり、共振周波数は全体的に低くなる。共振器の分散を制御するためには材料分散だけでなく、精密な構造分散の設計が必要となる。

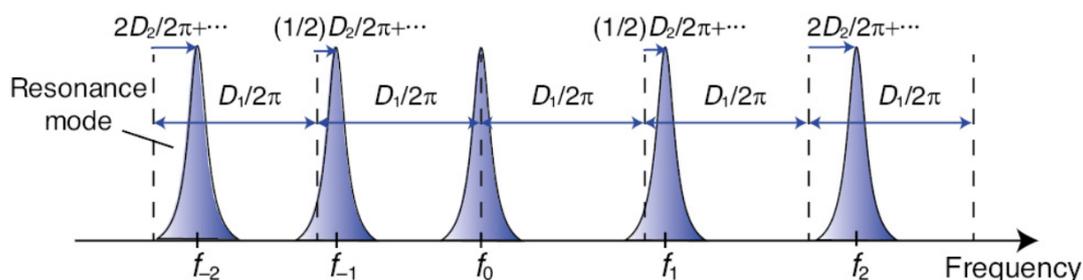


Fig. 1.6. Resonance frequencies taking dispersion into account. The mismatch between the equidistant comb grid (black dashed line) and the resonance mode (blue) corresponds to the microresonator dispersion. [S. Fujii, and T. Tanabe. “Dispersion engineering and measurement of whispering gallery mode microresonator for Kerr frequency comb generation,” *Nanophotonics* 9, 1087-1104 (2020).]

1.5 散逸性カーソリトン

ソリトン (soliton) とは一般的に、非線形方程式に従うパルス状の波動のことであり、長距離の伝搬においても形状、速度は不変で安定している。特にそのパルス波が光波の場合、光ソリトンと呼ばれる。微小光共振器を用いたソリトンの形成は、分散と自己位相変調 (self phase modulation; SPM) が釣り合い、利得と損失によるパワーも釣り合うという 2 つの均衡を満たすことにより実現される^[13]。自己位相変調による共振周波数のシフトは高周波から低周波に向けて生じる。そのため、ソリトンの形成には高周波となるほど FSR が広がる異常分散である必要がある。またこのような条件を満たすソリトンを生成するためには、共振周波数とポンプ周波数の差を表すデチューニングの調整も必要である^[14]。ソリトン生成には、共振波長に対してポンプ光の波長が長波長側の領域であることが要求される。これらの均衡とデチューニングの制限を満たし、微小光共振器内で生成されるマイクロコムを散逸性カーソリトン (dissipative Kerr soliton; DKS) と呼ぶ。散逸性カーソリトンの実証により、様々な分野で応用研究が報告されている^{[15][16][17]}。

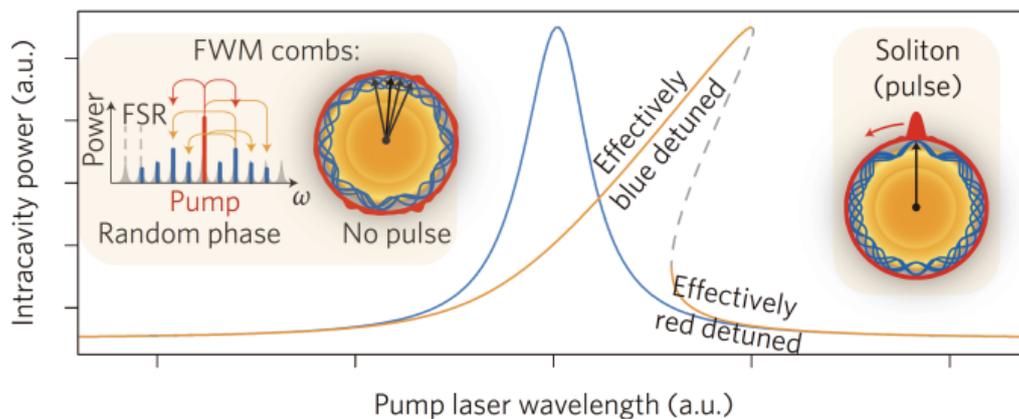


Fig. 1.7. Bistable intracavity power as a function of laser detuning for a linear (blue) and a nonlinear resonator (orange). The dashed line marks an unstable regime. The effectively blue-detuned and the effectively red-detuned regimes are indicated. In FWM combs the phases of the comb lines are constant but random, which leads to a periodic but not pulsed intracavity waveform. The left inset shows the optical spectrum resulting from cascaded FWM and illustrates how the superposition of comb frequencies (blue waves) with arbitrary phase (black arrows) results in a periodic intracavity power (red). The presence of a soliton implies synchronized phases and a pulsed intracavity power (right inset). a.u., arbitrary units. [T. Herr, V. Brasch, J. D. Jost, C. Y. Wang, N. M. Kondratiev, M. L. Gorodetsky, and T. J. Kippenberg, “Temporal solitons in optical microresonators,” *Nature Photonics*, 8 (2), 145 - 152 (2013).]

1.6 光通信

光に情報を乗せて通信に利用する光通信は、レーザと光ファイバ技術の発展を契機として近年急速に発展してきた。インターネットの利用拡大によってデジタル化が進展した。現在では様々な機器がネットワークにつながっており、情報通信は人々の生活に不可欠となった。光通信に用いる光ファイバには低損失、広帯域、曲げやすい、細径、軽量、無誘導といった特徴がある。このため光通信には長距離大容量の情報を高速に伝送できるといった利点がある。

光通信には大きく分けて2つの方式がある。強度変調・直接検波 (intensity modulation-direct detection; IM-DD) 方式は光の強度に情報を乗せ、その強度を直接検波する方式である。シンプルな変復調方式であるため低コストでの制御が可能となり、高い信頼性と低遅延といった特徴を持つ。高速信号では伝送可能距離が制限されるため、1000 kmを超えるような長距離の伝送に使用されることは少ないが、伝送距離が40～120 kmであるデータセンタ等で現在でも利用される重要な通信方式である。データセンタの市場規模

は今後も拡大が予想され、それに伴う基盤技術の低価格化、省電力化、小型化といった特性の改善が求められる。

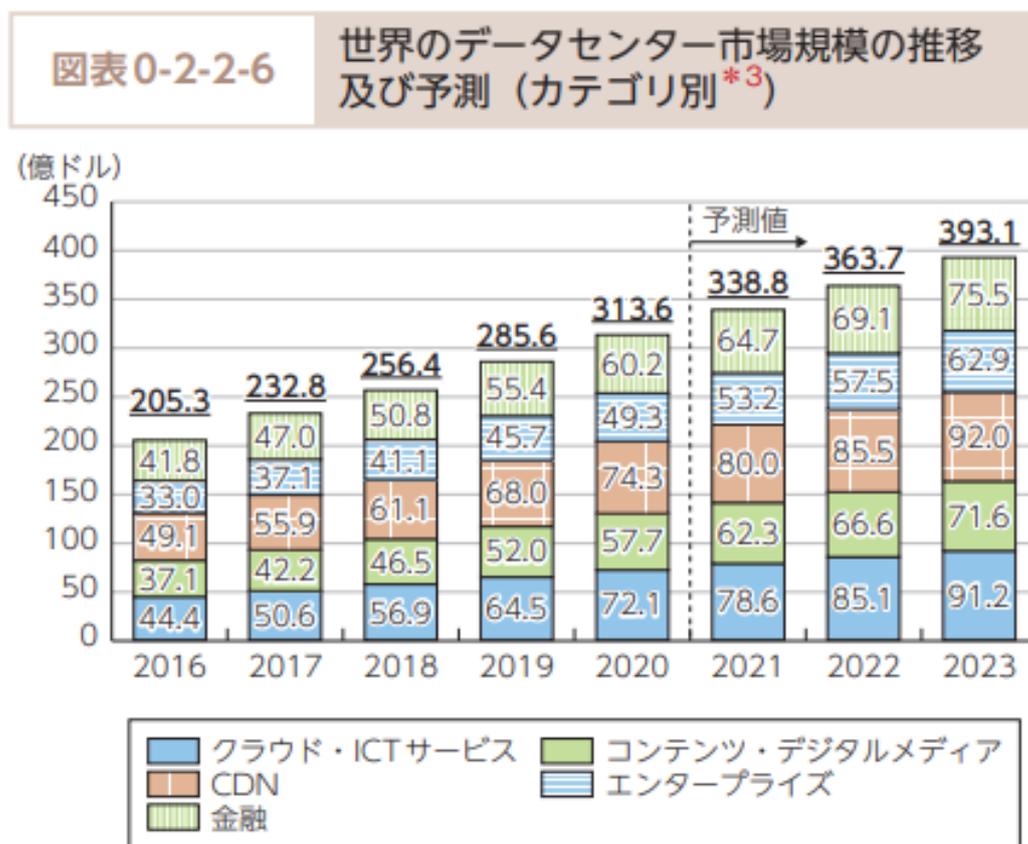


Fig. 1.8. Global Data Center Market Size Trends and Forecasts. [令和3年版情報通信白書(総務省) (<https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r03/pdf/index.html>)]

2つ目の方式であるコヒーレント方式は、強度変調のみならず、変調に光の周波数や位相を利用するによって、効率的に大容量の伝送を行う方式である。4位相偏移変調(quadrature Phase Shift Keying; QPSK)方式では、2系列の4相位相偏移変調信号を同時に伝送する。直角位相振幅変調(quadrature amplitude modulation; QAM)方式では、振幅と位相の両方に情報を乗せている。近年のコヒーレント通信では、各信号成分をA/D変換器によってデジタル信号に変換し、デジタル信号処理により復調を行う研究開発が発展し、そのために長距離伝送が可能となっている^[7]。デジタル信号処理はDSP(digital signal processor)内で信号位相推定、偏波補償、波長分散補償等を行うことでデータを正確に復調することが可能となる。一方で系が複雑となり、消費電力やコスト

面は悪化する。

また、1つの光ファイバによって大容量の伝送を行うための多重化技術も存在する。時分割多重 (time division multiplexing; TDM) は異なるタイムスロットで複数の信号を伝送する多重化技術である。波長分割多重 (wavelength division multiplexing; WDM) はチャンネルごとに違う周波数に変調して複数の信号を伝送する多重化技術であり、現在光通信で主流の多重化技術として用いられている。その他、複数のコアをもつマルチコア光ファイバを用いる空間分割多重 (space division multiplexing; SDM) の研究も近年進められており^[18]、多重化技術によって大容量光通信システムは発展を続けている。

従来の WDM 伝送ではチャンネル数と同じ個数だけの光源が必要となるが、この光源をマイクロコムによって代用する研究が報告されている。マイクロコムの各コム線を WDM 伝送におけるキャリアとして用いるため、消費電力の削減や系の小型化が期待される。

先行研究では、以前は MI コムやチューリングパターンコム^[19]による伝送であったが、近年は散逸性カーソリトンを用いた通信応用研究が行われている。特に長距離伝送を想定したコヒーレント方式による大容量伝送が盛んに報告されている^{[20][21]}。コヒーレント方式による伝送応用では、シリコンナイトライド共振器からの2つのマイクロコムを使用し、50 GHz のキャリア間隔に変換することで最大 55 Tbit/s という非常に大容量な総伝送容量を実現するコヒーレント通信も実証されている^[22]。

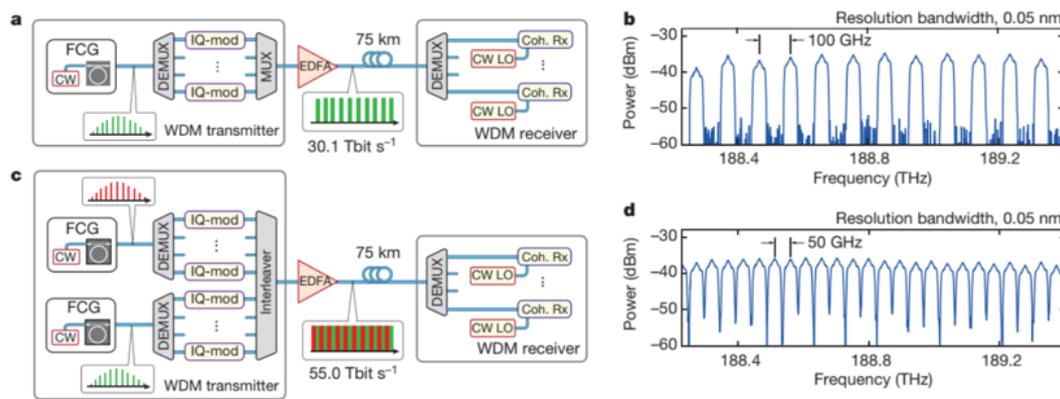


Fig. 1.9. Data transmission using microresonator dissipative Kerr-soliton combs for massively parallel WDM. (a) Principle of data transmission using a single DKS comb generator as the optical source at the transmitter. (b) Section of the optical spectrum of the WDM data stream. (c) Principle of data transmission using a pair of interleaved DKS combs at the transmitter. (d) Section of the optical spectrum of the WDM data stream. [P. Marin-Palomo, J. N. Kemal, M. Karpov, A. Kordts, J. Pfeifle, M. H. P. Pfeiffer, P. Trocha, S. Wolf, V. Brasch, M. H. Anderson, R. Rosenberger, K. Vijayan, W. Freude, T. J. Kippenberg, and C. Koos, “Microresonator-based solitons for massively parallel coherent optical communications,” *Nature* 546(7657), 274 - 279 (2017).]

またその他にはダークパルス^[23] やソリトンクリスタルと呼ばれる特殊な状態のソリトンコムに注目した応用研究も報告されている。

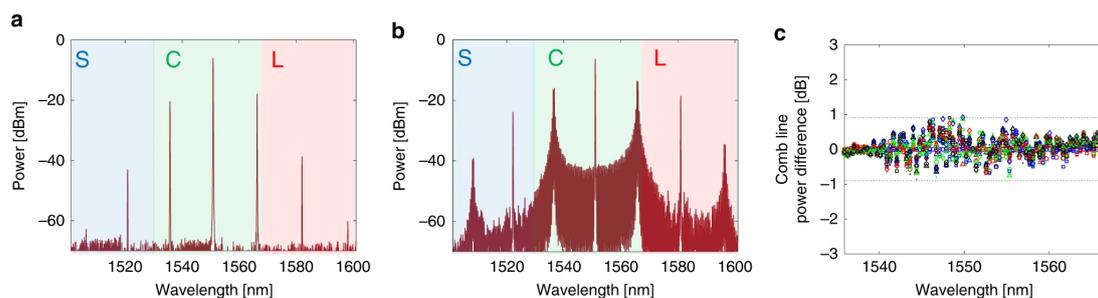


Fig. 1.10. To generate a soliton crystal, a laser is slowly tuned from the red side of a resonance to a pre-set wavelength. a A primary comb (Turing pattern) is initially generated as the laser is tuned into resonance with the ring. b Spectrum of the soliton crystal oscillation state used for experiments. The state had a characteristic ‘scalloped’ micro-comb spectrum, corresponding to the single temporal defect crystal state illustrated over the ring. At the pre-set wavelength, a soliton crystal forms, with spectral features based around the primary comb lines. The state that we use provides comb lines over most of the optical communications C-band. c Soliton crystal comb line power difference for 10 independent crystal generation instances (different symbols indicate distinct generation instances). Comb line powers remain within ± 0.9 dB of the initial spectrum, indicating reliable generation of the desired soliton crystal state. [B. Corcoran, M. Tan, X. Xu, A. Boes, J. Wu, T. Nguyen, S. Chu, B. Little, R. Morandotti, A. Mitchell and D. Moss, “Ultra-dense optical data transmission over standard fibre with a single chip source,” *Nature communications* 11, 2568 (2020).]

マイクロコムによる通信応用の先行研究の多くはコヒーレント通信によって大容量化することを目的としている。共振器材料は集積化可能な特徴をもつシリコンナイトライドの研究が多く報告されている。これは一方データセンタやローカルネットワーク等の中短距離伝送では、IM-DD方式でのシンプルで低コスト、低遅延な伝送が必要とされる。IM-DD方式による伝送は、微小光共振器を用いた伝送の報告例があるが^[19]、ソリトンコムを利用した実証実験は行われていない。そのためソリトンを用いたIM-DD方式のWDM伝送によってコスト面と伝送容量の両面を実現することで、中距離伝送における利用が期待される。

1.7 本研究の目的

微小光共振器によるマイクロコムは、従来の光周波数コムの特徴とともに小型で、高繰り返し、省エネルギーといった特徴を有することから将来の大きな可能性を秘めたものである。マイクロコムを用いた光通信応用の先行研究の多くは、デジタルコヒーレント通信による大容量な長距離伝送を目標としている。しかしながら光通信技術に対する要望は長距離伝送の大容量化だけではない。中距離伝送にあたるデータセンタでは、今後も市場

規模の拡大が予想されるため基盤技術の発展が望まれており、データセンタでは低遅延性や信頼性、コストパフォーマンスが重視されるため IM-DD 方式の光通信が利用されている。

そのため、本研究の目的はフッ化マグネシウム結晶共振器による散逸性カーソリトンを用いた IM-DD 方式の波長分割多重通信の実証実験を行い、フッ化マグネシウム結晶を材料とした微小光共振器を光通信の光源に用いる優位性を明らかにすることである。マイクロコムの周波数特性を活かして多重化可能であることから波長分割多重を採用した。またフッ化マグネシウム結晶共振器によるマイクロコムの密なコム線間隔は、高密度な WDM 伝送の光源となりうる可能性があることから共振器材料としてフッ化マグネシウムを選択した。本研究では IM-DD 方式の WDM 伝送の光源として将来データセンタでの実用化に向けて、フッ化マグネシウム結晶共振器によるマイクロコムの多波長成分伝送における伝送特性の評価を行った。

1.8 本論文の構成

本論文は5つの章によって構成されている。本章では本研究の目的とその基礎となる事項について述べた。第2章では本研究で用いるフッ化マグネシウム結晶共振器について説明する。フッ化マグネシウム結晶共振器の作製を行ったため、その作製方法について述べ、その共振器の光学特性について説明する。また本研究では共振器を利用することで発生させた光周波数コムであるマイクロコムを伝送に用いる。そのため、第3章ではマイクロコムの発生とその安定化についての理論と実験方法を説明する。次に第4章でマイクロコムを用いた波長分割多重通信実験について述べ、最後に第5章で結論を述べる。

第2章

微小光共振器

2.1 フッ化マグネシウム結晶共振器の作製

フッ化マグネシウム結晶は比較的硬度が低い素材であることから結晶を加工することによって共振器を作製することが可能であり、大きく分けて3つの工程によって作製される。まずスピンドルに挿入する部分である真鍮棒とフッ化マグネシウム結晶を接着する工程、次に微小光共振器の概形を切削する工程、最後に切削された結晶の表面を研磨にする工程である。共振器のFSRは同じ材料の共振器であればそのサイズによって決定される。本研究では高密度の波長分割多重通信を行うことを目的とするため、FSRが10GHz(直径:6.9mm)のマイクロコムが発生する高Q値な微小光共振器を作製することを目標とした。

2.1.1 接着

共振器の材料として使用したフッ化マグネシウム結晶と結晶を固定する真鍮棒をFig.2.1.に示す。共振器の導波路に対して光軸が垂直であるz-cutのフッ化マグネシウム結晶を共振器の材料に使用した。フッ化マグネシウム結晶は直径10mm、厚さ2mm、真鍮棒を通すために中心に直径2.3mmの穴あけ加工が施されたものを使用した。次の工程よりスピンドルを用いるため、最初の工程はスピンドルに挿入する真鍮棒とフッ化マグネシウム結晶の接着する。真鍮棒は直径4mm、長さ60mmであり、その先端2mmを直径2.3mmに加工されたものを使用した。接着には粘度の高いUV硬化剤を使用する。UV硬化剤を真鍮棒の先に塗布し、フッ化マグネシウム結晶の穴を真鍮棒にはめ込む。その後切削の作業でも用いるダイヤモンドペーパーが真鍮棒と接触することを防ぐために、フッ化マグネシウム結晶付近の真鍮棒に満遍なくUV硬化剤でカバーし、UV硬化剤にUVライトを5分程度照射することで硬化させた。

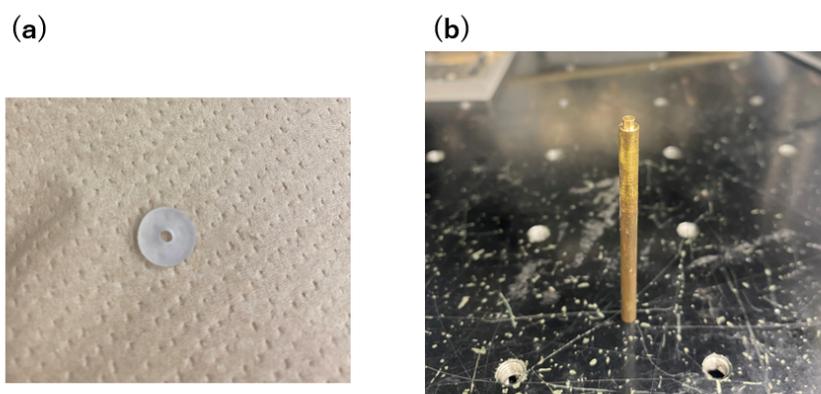


Fig. 2.1. (a)Magnesium fluoride crystal. (b)Brass rod.

2.1.2 切削

本項はフッ化マグネシウム結晶を切削することで、微小光共振器の導波路を形成する工程である。切削作業の写真を Fig.2.2. に示す。前項で接着した真鍮棒にエアスピンドルに挿入し、固定する。エアスピンドルで高速回転させたフッ化マグネシウム結晶にダイヤモンドペーパーを当て続けることにより加工する。フッ化マグネシウム結晶は力を強く加えると簡単に欠損する。共振器の導波路に欠損がある場合には光は伝搬されないため、慎重な作業が必要となる。割り箸の先端に固定したダイヤモンドペーパーを軽く押し当てながら少しずつフッ化マグネシウム結晶を切削する。導波路となる箇所は、伝播するモードの数を抑えるために鋭角となるように形成を行う。また切削工程によって微小光共振器の概形が決まるため、共振器の FSR に直結する作業となる。共振器作製の目標となる直径 6.9 mm 程度となるよう直径を確認しながら作業を行った。

切削作業完了後には切削によってフッ化マグネシウム結晶の粉末が発生するため、研磨の工程で付着することのないよう清掃を行う必要がある。フッ化マグネシウム結晶の表面に残る粉末はエタノールを用いて洗浄を行ってから研磨に移る。



Fig. 2.2. Grinding process.

2.1.3 研磨

ダイヤモンドペーパーで切削されたままの導波路状態では光が伝搬せず共振が起こらないため、導波路を研磨する工程が必要となる。ダイヤモンドペーストを研磨剤としてレンズティッシュに付着させたものをフッ化マグネシウム結晶の導波路部分に当てることで研磨を行う。ダイヤモンドペーストは粒度の異なる4種類 ($3\ \mu\text{m}$, $1\ \mu\text{m}$, $0.5\ \mu\text{m}$, $0.25\ \mu\text{m}$) を粒子の粗いものから順に使用した。Fig.2.3(a) は研磨作業に使用した研磨剤である。ダイヤモンドペーストはそれぞれ、30分、45分、60分、70分の時間をかけて使用し導波路の研磨を行う。ダイヤモンドペーストの粒度を変更する際には、フッ化マグネシウム結晶はエタノールを用いて洗浄して付着しているダイヤモンドペーストを落とし、使用するレンズティッシュやゴム手袋の交換を行う。研磨後の製作したフッ化マグネシウム結晶共振器の写真を Fig.2.3.(b) に示す。

研磨における注意点は、粒度の粗いダイヤモンドペーストでの研磨に多くの時間をかけた場合、導波路部分を丸い形状に変えてしまうことである。また粒度の細かいダイヤモンドペーストによる研磨は、それ以前の研磨が不十分な場合いくら時間をかけても、ソリトンが発生するまで共振器の Q 値を高めることが難しい。

共振器を使用する際には、エタノールを浸したレンズティッシュを用いてクリーニングを施すことによって、大気中のほこりなどの共振器の Q 値を悪化させる原因となるものを取り除くことができる。しかし共振器作製から半年ほど経過すると、ソリトンの発生及び安定化をすることが難しくなる事態が生じた。これは共振器の Q 値が低下したことが原因であり、2ヶ月おきに $0.25\ \mu\text{m}$ のダイヤモンドペーストで再研磨することによって Q

値が改善され、問題なくソリトン発生にフッ化マグネシウム結晶共振器を使用することが可能となった。

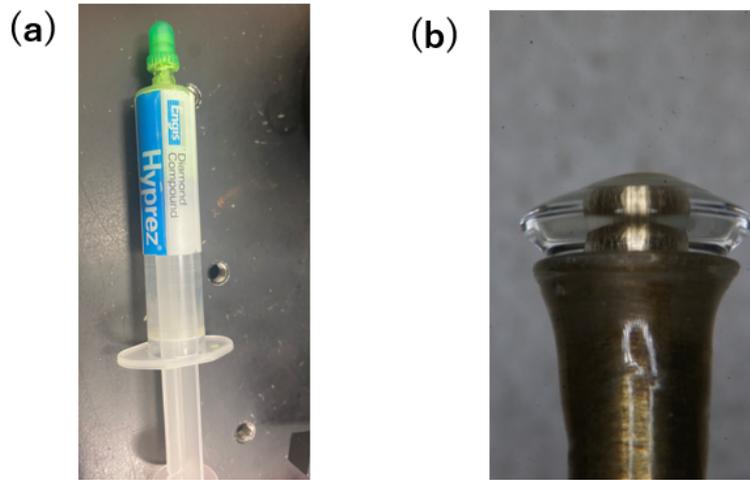


Fig. 2.3. (a)Diamond paste. (b)Fabricated magnesium fluoride resonator.

2.2 微小光共振器の光学特性

2.2.1 Q 値の理論

Q 値とは、一般的に振動系の振動状態を表す無次元量である。Q 値の低い振動系はそのエネルギーの分散が大きく、Q 値の高い振動では振動が長く続くこととなる。光共振器における Q 値の定義は、共振器に蓄えられるエネルギーと共振器から散逸するエネルギーによって表される。

$$Q \equiv 2\pi \times \frac{\text{Energy stored (J)}}{\text{Energy loss per cycle (J)}} \quad (2.2.1)$$

Q 値の高さは光を内部に閉じ込める強さを表す。そのため共振周波数 ν_r と光子寿命 τ_p を用いると、Q 値は、

$$Q = 2\pi\nu_r\tau_p \quad (2.2.2)$$

と表される。共振器光子寿命は共振線幅に反比例することが知られている。そのため、共振スペクトルの半値全幅 (full width at half maximum; FWHM) $\Delta\nu$ を用いて以下の式で表される。

$$Q \propto \frac{\nu_r}{\Delta\nu} \quad (2.2.3)$$

このため、光をどのくらい閉じ込められるかを表す共振器の Q 値の高さは、測定の際には共振器光子寿命や共振線幅から算出することができる。

2.2.2 光学特性の評価

光共振器の測定は、その Q 値によって異なる。光共振器の Q 値が低い場合にはレーザーで共振モードに対して波長掃引を行い、共振器の透過スペクトルを取得する。

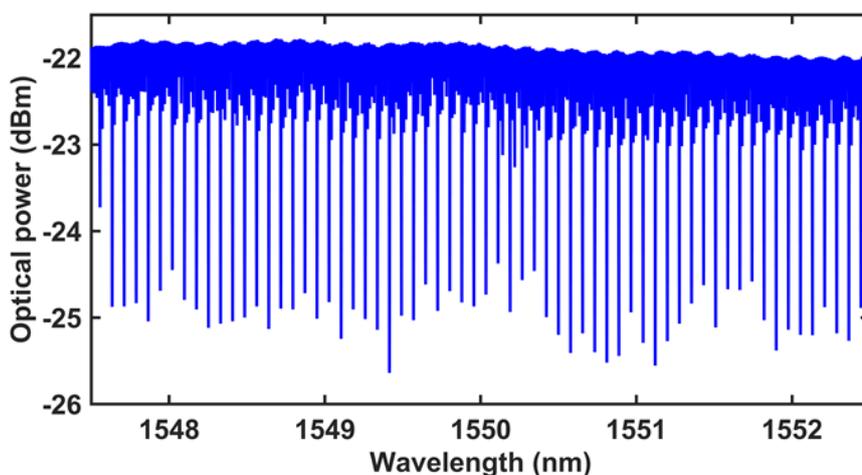


Fig. 2.4. Result of transmission spectrum.

Q 値が低い場合にディップの共振線幅は測定可能な広さがあり、ローレンツ関数によりフィッティングすることによって Q 値を求めることができる。Fig.2.4. は Q 値の低い共振器サンプルの透過スペクトルである。これを用いてローレンツフィッティングを行った結果を Fig.2.5. に示す。このモードの Q 値は 2.37×10^7 と測定された。

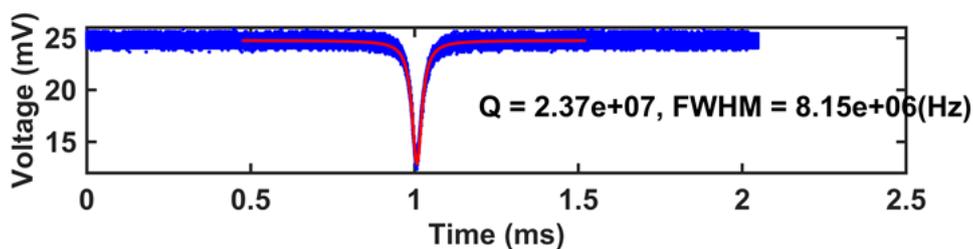


Fig. 2.5. Result of measurement of Q factor by Lorentzian fitting.

しかしこの方法は Q 値が高い場合には共振線幅は狭帯域となるため、正確なローレン

ツフィッティングを行うことができなくなる。Q 値が 10^8 の後半を超える高い Q 値を求めたい場合には、オシロスコープを用いて時間領域の透過率波形を取得する。このときリングダウン (ring-down) と呼ばれる干渉縞が観測される。共振器からの指数的な漏れ光を観測することにより光子寿命を導くことによって Q 値の測定を行うことができる。Fig.2.6. はリングダウンによる測定を行ったセットアップである。半導体レーザー (Santec TSL-710) を用いて、波長: 1,550 nm, パワー: 0 dBm の連続光を結晶共振器のに入力する。ファイバ偏波コントローラ (fiber polarization controller; FPC) は結晶共振器に光を入力する前に偏波を調整することを目的として使用した。結晶共振器からの透過光を受光し、オシロスコープによって透過率を観測する。ファンクションジェネレータ (function generator; FG, nf; WF1946) から周波数: 20 Hz, 電圧: 2.5 V のランプ信号を入力することで、レーザーの波長掃引を行っている。

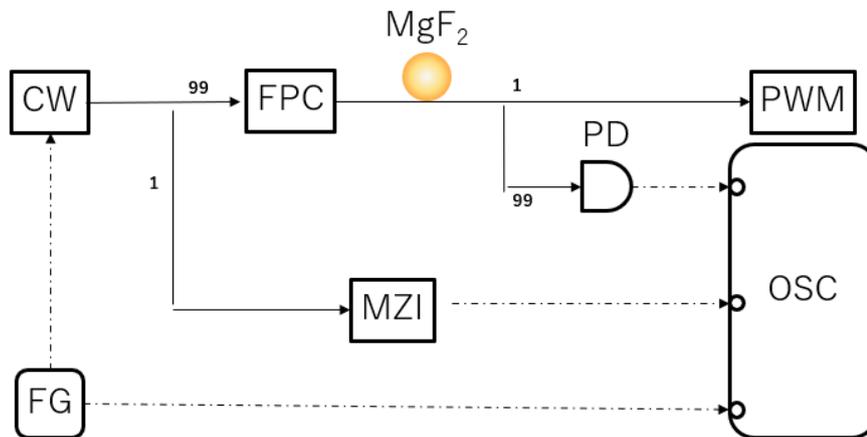


Fig.2.6. Setup of Q factor measurement. CW; continuous wave. FPC; fiber polarization controller. PWM; optical power mete. FG; function generator. MZI; Mach - Zehnder interferometer. OSC; oscilloscope.

作製したフッ化マグネシウム結晶共振器の Q 値測定のため、リングダウン法によってフィッティングした波形を Fig.2.7. に示す。計算結果は $Q = 1.85 \times 10^9$ となった。

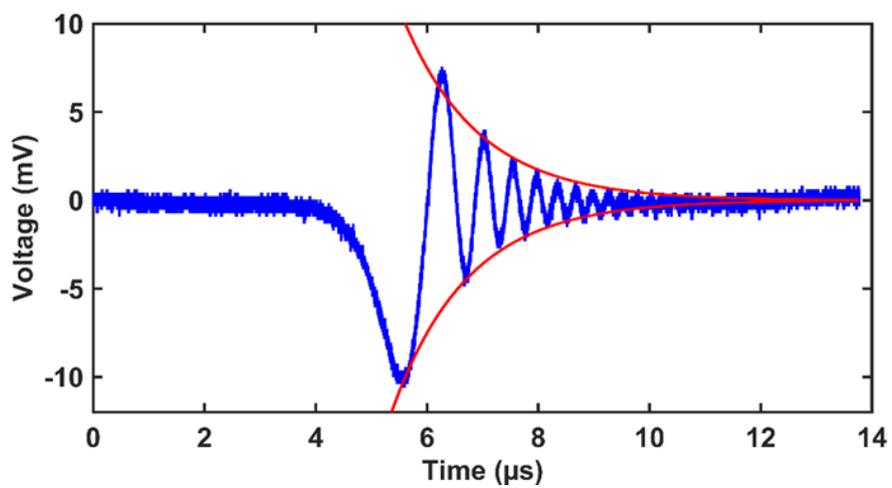


Fig. 2.7. Result of measurement of Q factor by ring down method.

第3章

散逸性カーソリトン

3.1 散逸性カーソリトンの理論

光の電磁界に対する誘電体の応答は誘電分極 \mathbf{P} により表現され、光電界強度 \mathbf{E} が十分小さい場合、次の式で表される。

$$\mathbf{P} = \epsilon_0 \chi \mathbf{E} \quad (3.1.1)$$

ここで ϵ_0 は真空の誘電率、 χ は媒質の電気感受率である。

しかしレーザーのような高強度の光を当てた場合には、物質は光に対して非線形応答を示す。このときの非線形効果を含む電気分極 \mathbf{P} を電界 \mathbf{E} について Taylor 展開する。

$$P = \epsilon_0 (\chi^{(1)} E + \chi^{(2)} E^2 + \chi^{(3)} E^3 + \dots) \quad (3.1.2)$$

光の強度が弱いときは2次以降の項は無視することができ、分極は線形とみなすことができるが、強度が大きいときは2次以降の項は無視することができ、分極は電界に比例すると言えるが、光強度が大きい場合には2次以降の項は無視できなくなることにより、非線形光学効果による現象が観測される。3つの周波数成分を持つ光が媒質中に存在しているとき、光電場は次式で与えられる

$$E(z, t) = E_1 e^{i(k_1 z - \omega_1 t)} + E_2 e^{i(k_2 z - \omega_2 t)} + E_3 e^{i(k_3 z - \omega_3 t)} \quad (3.1.3)$$

よって、3次の非線形分極は次のように表すことができる。

$$P_{\text{NL}}^{(3)}(z, t) = \sum_n P_{\text{NL}}(\omega_n) e^{i(k_n z - \omega_n t)} \quad (3.1.4)$$

この式から3次非線形光学効果は説明される。 $\omega_n = \omega_1, \omega_2, \omega_3$ で与えられる周波数を代入すると光カー効果を表すことになる。このときの非線形分極は次のように表される。

$$P_{\text{NL}}(\omega_n = \omega_k) e^{i k_n z} = \epsilon_0 \chi^{(3)} (3E_k E_k^* + 6E_l E_l^* + 6E_m E_m^*) E_k e^{i K_k z} \quad (3.1.5)$$

括弧内の第1項は自身の電界強度によって変調されるため自己位相変調 (self phase modulation; SPM) と呼ばれる。また、括弧内の第2項は他の光の電界強度によって変調されているため相互位相変調 (cross phase modulation; XPM) と呼ばれる。光強度 I を用いると屈折率の変化は次のように表される。

$$n(I) = n_0 + n_2 I \quad (3.1.6)$$

I は光強度, n_2 が非線形屈折率と呼ばれる物質固有の値である. この式より物質の屈折率が光の強度に比例して変化することが分かる. これを光カー効果と呼ぶ.

3次非線形光学効果による現象の1つに四光波混合 (four wave mixing; FWM) がある. また, 四光波混合には縮退四光波混合 (degenerate FWM) と非縮退四光波混合 (non-degenerate FWM) の2種類がある. 縮退四光波混合は1つの周波数から2つの異なる周波数の光が発生し, ポンプ光の周波数が縮退している. 非縮退四光波混合では異なる周波数を持つ2つの光からさらに異なる2つの周波数の光が発生する. 四光波混合の発生には以下の位相整合条件を満たすことが必要である.

$$P_{\text{NL}}(\omega_n = \omega_k - \omega_l + \omega_m)e^{ik_n z} = 6\epsilon_0\chi^{(3)} E_k E_l E_m^* e^{i(k_k - k_l + k_m)z} \quad (3.1.7)$$

$$P_{\text{NL}}(\omega_n = 2\omega_k - \omega_l)e^{ik_n z} = 3\epsilon_0\chi^{(3)} E_k^2 E_l^* e^{i(2k_k - k_l)z} \quad (3.1.8)$$

四光波混合が微小光共振器内で連続的に発生することによりマイクロコムは形成される. そのため, マイクロコムの発生には非線形光学効果が起こる光強度の強い励起光が必要となる. 四光波混合によってマイクロコム形成される様子を表す図を Fig.3.1. に示す.

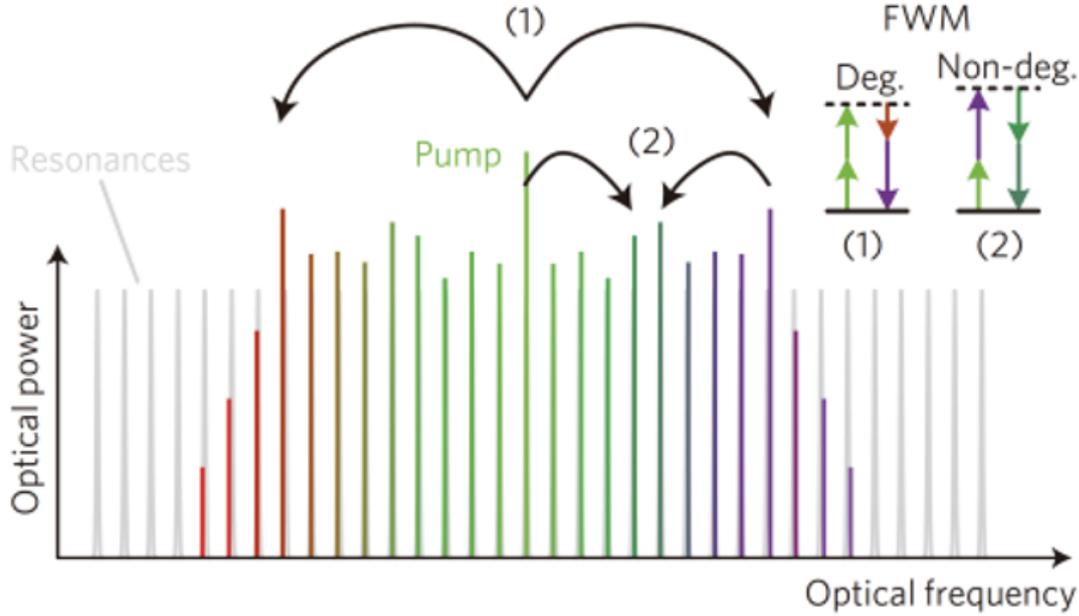


Fig. 3.1. Illustration of Kerr comb formation by multi-stage FWM. Degenerate FWM (1) converts two photons at the pump frequency to a pair of photons that are up- and downshifted in frequency, whereas cascaded nondegenerate FWM (2) populates the remaining resonances. [J. Pfeifle, V. Brasch, M. Lauer mann, Y. Yu, D. Wegner, T. Herr, K. Hartinger, P. Schindler, J. Li, D. Hillerkuss, R. Schmogrow, C. Weimann, R. Holzwarth, W. Freude, J. Leuthold, T. J. Kippenberg, and C. Koos, “Coherent terabit communications with microresonator kerr frequency combs,” Nature Photonics, 8, 375 - 380, 2014]

微小光共振器を用いたソリトンは、微小光共振器内と光ファイバ中での分散と自己位相変調によるパルス圧縮が釣り合うことにより実現される。ソリトンは長距離伝搬しても速度、形状が保存される。ファイバ中のソリトンは、非線形シュレディンガー方程式 (nonlinear Schrödinger equation; NLSE) によって規定される。マイクロコムのダイナミクスは、利得を表す入力光パワー、損失を表す Q 値、分散特性、非線形光学効果の 4 つの要素からなる。散逸性カーソリトンは、非線形シュレディンガー方程式に入力パワーとデチューニングの項を加えた Lugiato-Lefever 方程式 (LLE) により記述される^[24]。以下に簡略化された Lugiato-Lefever 方程式を記述する。

$$\frac{\partial E(\phi, t)}{\partial t} - j\frac{1}{2}D_2\frac{\partial^2 E}{\partial \phi^2} - jg|E|^2E = -\left(\frac{\kappa}{2} + j\cdot\delta\omega\right)E + \sqrt{\frac{\kappa\eta P_{\text{in}}}{\hbar\omega_0}} \quad (3.1.9)$$

ここで ϕ はリング導波路の方位座標, $\delta\omega$ がデチューニングに, F が f は共振器のカップリングと内部エネルギーから決まる定数である. この非線形方程式の解は利得と損失を考えない場合にのみ記述することができ, デチューニングは正となる. このため散逸性カーソリトン生成するためには, 共振器が異常分散特性を持ち, ポンプ周波数が共振周波数より低周波側であることが必要となる.

散逸性カーソリトン生成時にはポンプ光を短波長側 (blue detuned) から長波長側 (red detuned) に波長掃引を行う. ポンプ光が共振に入ると四光波混合により初めのはコム線が数本発生する. 次にそれぞれのコム線によって四光波混合が起こり, 共振器の内部パワーが不安定な状態となる. 波長掃引が共振周波数シフトの最大値まで達すると, ソリトンが形成される. 共振器内に存在する光パルスの個数に応じて透過率がステップ状に遷移することからこの波形はソリトンステップと呼ばれる. 光パルスが1個のみ場合はシングルソリトン, 複数存在する場合はマルチソリトンと呼ばれる. ソリトンステップの段の個数はランダムに決定される. Fig.3.2. の (a) は微小光共振器に光を入力した際の透過率である. 離散的なステップの形を確認することができる. (b) が各ステップの位置での光スペクトラムであり, X I がシングルソリトンと呼ばれる状態の光スペクトラムである. (c) はそれぞれの RF ビート信号を示す.

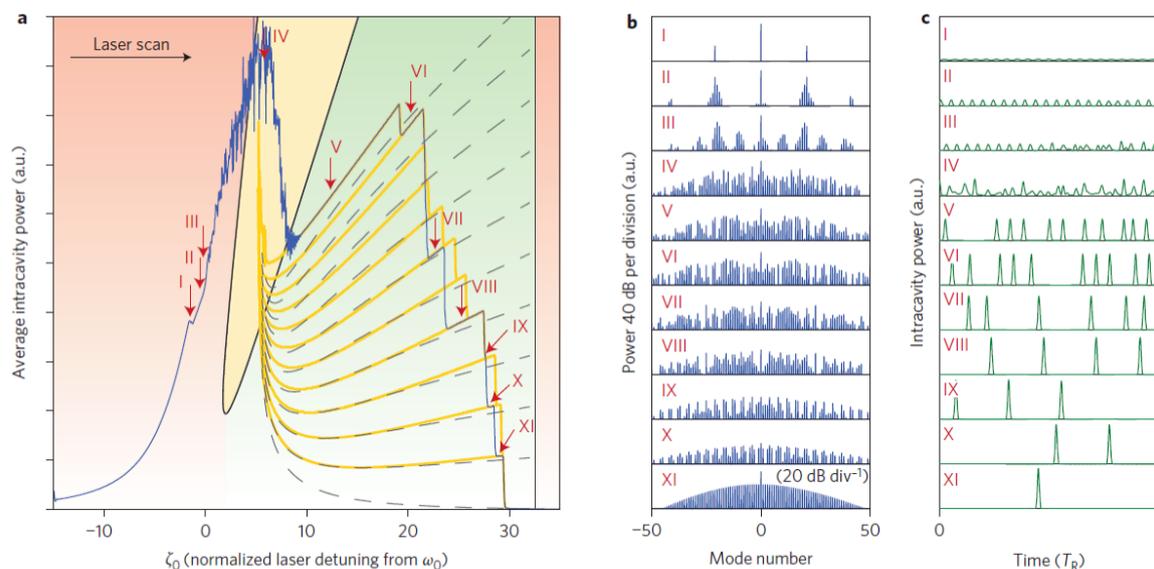


Fig. 3.2. (a) Transmission observed when scanning a laser over a resonance of a high-Q Kerr-nonlinear MgF2 microresonator (coupled pump power 5 mW). The transmission signal follows the expected triangular resonance shape (see inset) with deviations in the form of discrete steps (green shading). (b) Evolution of the optical power spectrum for three different positions in the scan; spectrum II and, in particular, the mesa-shaped spectrum III exhibit a high-noise RF beat signal. (c) Down-mixed RF beat signal. [T. Herr, V. Brasch, J. D. Jost, C. Y. Wang, N. M. Kondratiev, M. L. Gorodetsky and T. J. Kippenberg. “Temporal solitons in optical microresonators,” *Nature Photonics*, 8, 145-152 (2014).

3.2 散逸性カーソリトンの発生

散逸性カーソリトンの発生及び安定化を行う，実験系を Fig.3.3. に示す．

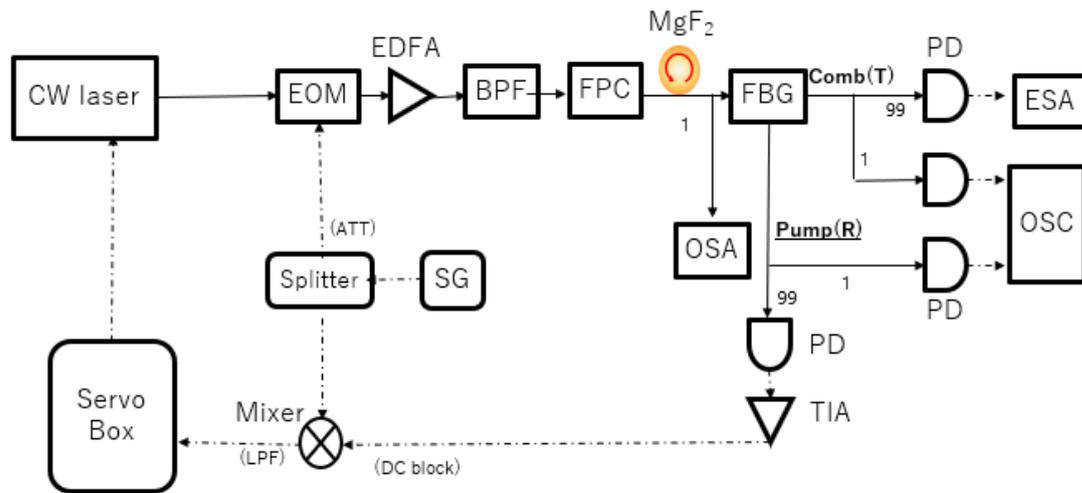


Fig.3.3. Experimental setup of generating and stabilizing a dissipative Kerr soliton EOM; electro-optic phase modulator. EDFA; erbium-doped fiber amplifier. BPF; optical band-pass filter. VOA; valuable optical attenuator. ESA; electrical spectrum analyzer. TIA; transimpedance amplifier. SG; signal generator. LPF; electrical low-pass filter.

励起光源には波長 1,550 nm, パワー 10.6 dBm のファイバレーザ (Koheras BASIK E15) を用いた. このレーザ光はスペクトル線幅が狭いため安定性が高いことや, 高い光出力であること, 内部にピエゾ素子を搭載し, 数 nm 程度の外部電気信号による波長掃引が可能となることからこのレーザを光源に使用した. 波長掃引のため, サーボボックス (Vescent D2-125) から周波数 20 Hz で, 0 ~ 5 V のランプ波を印加する.

非線形光学効果を起こすため, 微小光共振器に光を入射する前にエルビウム添加ファイバ増幅器 (erbium-doped fiber amplifier; EDFA, Pritel LNHP-PMFA-30-IO) を用いて 28 ~ 30 dBm まで入力光のパワーを増幅させる. EDFA の直後にある光バンドパスフィルタ (optical band-pass filter; BPF) は, EDFA の使用により発生する増幅自然放出光 (amplified spontaneous emission; ASE) 雑音を除去する目的で帯域が 1 nm の光バンドパスフィルタを使用した. ポンプ光周辺以外の ASE 雑音を中心周波数をレーザ波長に合わせることで遮断した.

微小光共振器と導波路の結合方法にはテーパファイバを用いている. テーパファイバとは熔融延伸することによって, 入射端に対して出射端が小さい口径をした形状の光ファイバのことである. 本研究では, セラミックヒータを用いて加熱しながら光ファイバを固定したステージを両側に動作させ, 引き延ばすことによって作製した. 導波路と共振器の間での光結合は導波路から漏れ出すエバネッセント光によって行われ, テーパファイバ用い

ることで、伝搬損失と結合損失を少なくする利点がある。

微小光共振器でソリトンが発生した後は、ファイバブラッググレーティング (fiber Bragg grating; FBG, Alnair Labs WTF-200) に入力し、励起レーザ光のみを反射して減衰させ、残りの全コム線を透過させる。励起レーザ光と透過したソリトンはそれぞれフォトディテクタで受光し、ソリトンステップを観測するためオシロスコープで波形をモニターした。また透過したソリトンは広帯域のフォトディテクタを用いて受光後、電気スペクトラムアナライザ (electrical spectrum analyzer; ESA, Advantest R3273) に入力することでビート信号を取得し、正確な $f_{\text{rep}} = \text{FSR}$ を測定する。

次にカップリングの操作について説明する。微小光共振器のカップリングはソリトン発生にとって重要な要素となる。テーパファイバの太さ、結合位置、結合する角度を変化させることによって、カップリングの状態は変化する。まずテーパファイバの太さを調整し、オシロスコープ上でソリトンステップを探索する。ソリトンステップは、波長掃引のみを行っていた最中にソリトンが存在していた時間を示している。そのためデチューニングを固定可能な長さのソリトンステップが必要となる。テーパファイバの結合位置、結合角度、FPC によって偏波を調整することによって、ソリトンステップを長さを伸ばす。カップリングはテーパファイバの結合位置の僅かな変化によっても変化するため、非常に慎重な操作を行うことが重要となる。Fig.3.4. にオシロスコープで透過波形をモニターし、ソリトンステップを観測した際のスクリーンショットを示す。

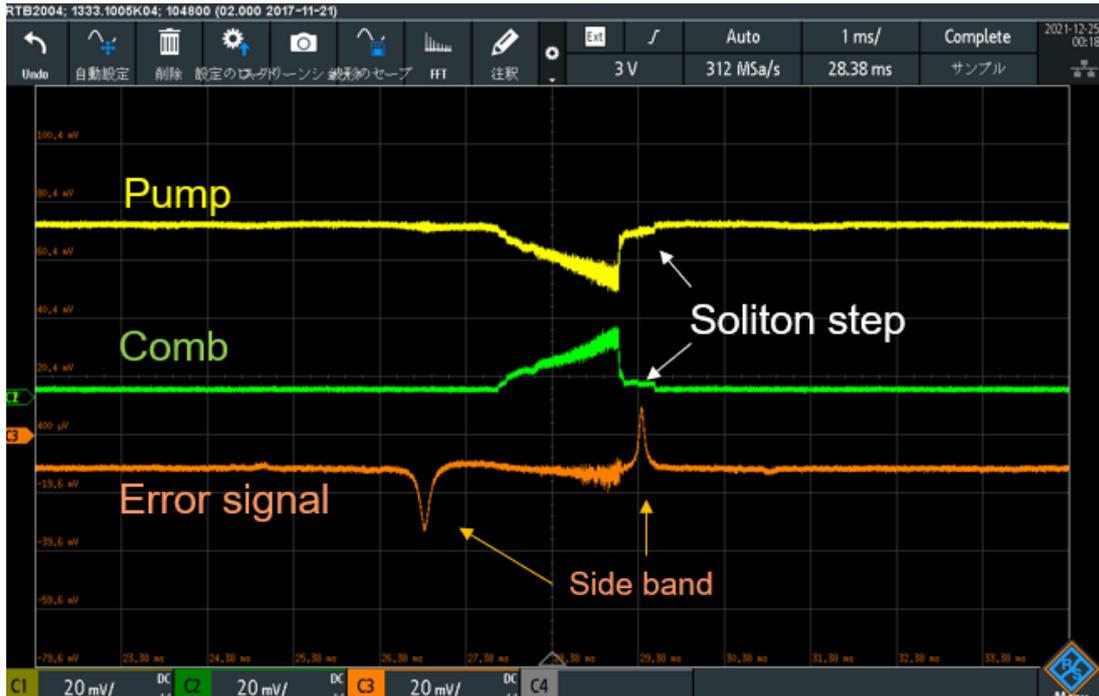


Fig. 3.4. Screen shot of soliton step.

波長掃引のみでは僅かな時間しかソリトンが存在できない。そのためソリトンを利用するためには、波長掃引だけではなく、デチューニングを固定してソリトンの安定化を行うことが必要となる。本実験においては、レーザの周波数をファブリー・ペロー共振器の共振にロックする技術である Pound - Drever - Hall 周波数安定化法^[25]を用いた。まず、電気光学変調器 (electro-optic modulator; EOM, Photline; MXAN-LN) では、信号発生器 (signal generator; SG, Hewlett Packrd; E4421B) から電気信号を印加することで、レーザ光のサイドバンドを生成する。微小光共振器へ入射後ファイバブラッググレーティングによって反射された光は、フォトディテクタとトランスインピーダンス・アンプ (transimpedance amplifier; TIA) によって受光と増幅をした後に、電気ミキサ (Mini-circuits; ZP-3+) を介して EOM へ入力する電気信号との積が出力される。この出力の低周波信号から反射パワーの周波数に対する変化が得られる。そのためローパスフィルタ (low-pass filter; LPF, Mini-circuits; BLP-1.9+) によって低周波信号を取り出し、サーボボックスへ入力することでフィードバック制御によってデチューニングが固定されレーザを共振にロックすることができる。

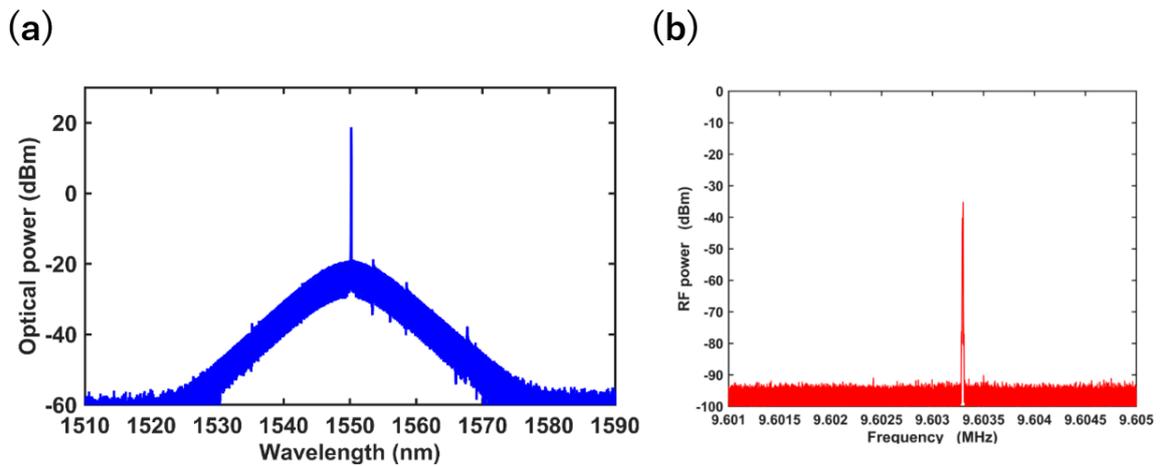


Fig. 3.5. Soliton. (a): Optical spectrum. (b): RF spectrum.

Fig.3.5. は第 2 章で作製した共振器を用いて発生させたソリトンの光スペクトルと電気スペクトルである。ポンプ波長 1550.2340 nm, 共振器への入力光パワー 0.77 W, 信号発生器の周波数と振幅はそれぞれ 6.9 MHz, -0.60 dBm の条件でソリトン発生を行っている。

電気スペクトルの結果から, ソリトンの FSR が 9.603 GHz であることが分かる。FSR の値からフッ化マグネシウム結晶共振器の直径は, 約 7.185 mm と算出される。第 2 章での共振器の作製目標は, FSR が 10 GHz (直径: 6.9 mm) のマイクロコム発生であった。このことから目標とするフッ化マグネシウム結晶共振器は 3.97 % の精度で作製できた。

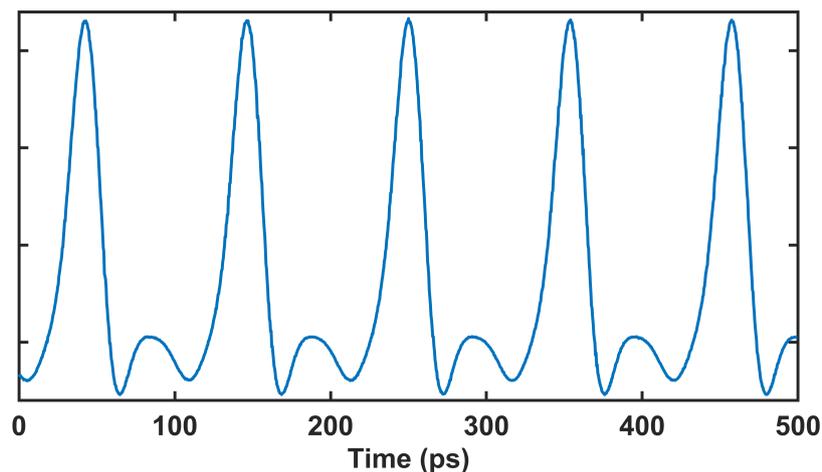


Fig. 3.6. Soliton pulse.

Fig.3.6. は発生したソリトンコムを広帯域なフォトディテクタで受光後，サンプリングオシロスコープ (Agilent; 86100A) に入力しモニターした結果である．この図から発生したソリトンコムが時間軸上でパルス列となっていることが確認できる．

第4章

波長分割多重通信への応用

4.1 伝送特性

本研究においては、伝送実験の伝送特性としてアイパターンと符号誤り率の測定を行った。実際の光通信システムでは、様々な「1」と「0」のパターンの信号を伝送する。様々な信号パターンの波形応答を重ねて表示したものをアイパターンと呼ぶ。観測される形状が人間の目のような形をしていることがその名前の由来である。オシロスコープに測定するパルス列を入力し、トリガにタイミングパルスを入力することでアイパターンを測定することができる。NRZ では「1」に相当するときタイムスロット全体で高い電圧、「0」に相当するとき低い電圧となる。雑音がある場合には完全に開いたアイパターンを得ることはできない。アイパターンの縦軸から雑音の影響を観測することができ、横軸から時間的揺らぎの情報を得ることができる。Fig.4.1. にファイバレーザの光を 10 Gbit/s で変調した際のアイパターンを示す。

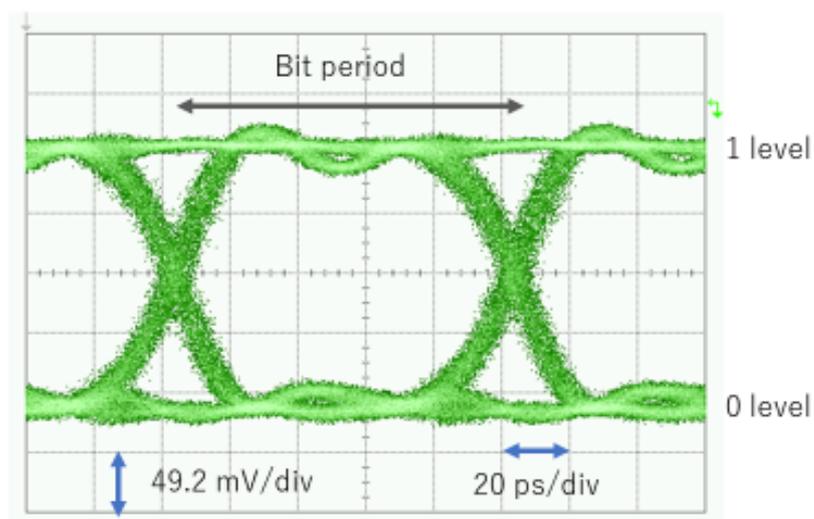


Fig. 4.1. Eye-pattern.

符号誤り率 (bit error rate/ratio; BER) は伝送した全データに対し、受信したデータにどの程度誤りが含まれているかを表す指標であり、値が小さいほど伝送性能が高いこと

を意味する。BER は受光パワーと相関をもち、受光パワーを高くすると 0 に向かって低下する。本研究において BER が 10^{-9} を下回るとエラーフリー伝送可能であるとする基準とした。ファイバレーザを変調した場合の BER のグラフを Fig.4.2. に示す。

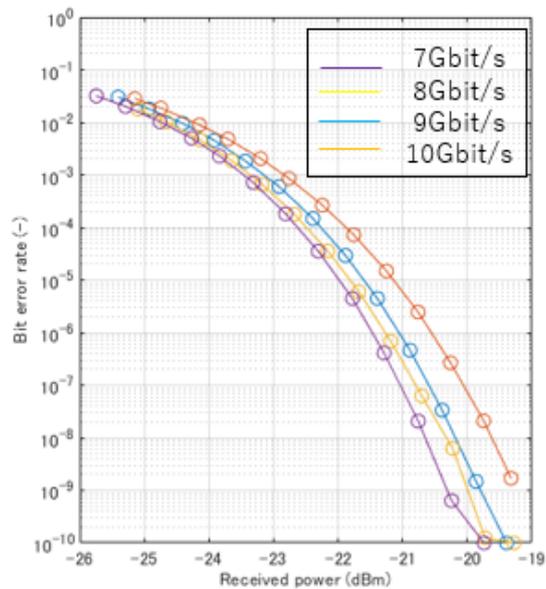


Fig. 4.2. An example of bit error rate.

4.2 散逸性カーソリトンのコム線における伝送特性

4.2.1 コム線伝送の測定方法

研究室で既に報告されているソリトンコムのコム線における伝送特性の測定に用いた実験系を Fig.4.3. に示す。第 2 章で作製したフッ化マグネシウム結晶共振器を使用し、第 3 章に記した系によって発生と安定化を行ったマイクロコムを伝送に用いた。

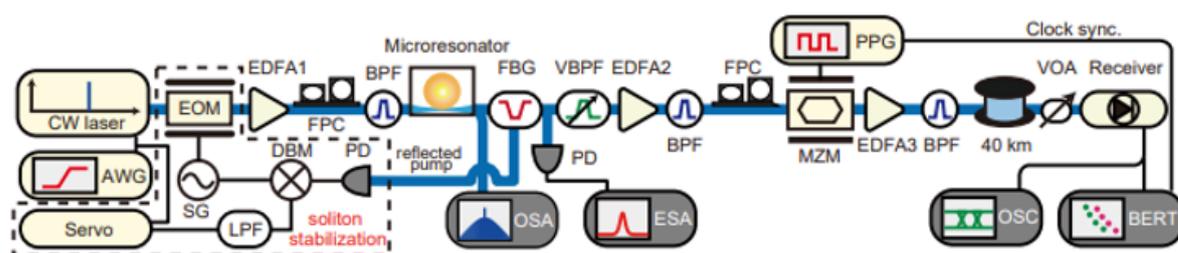


Fig. 4.3. Illustration of experimental setup for soliton microcomb transmission. [S. Fujii, S. Tanaka, T. Ohtsuka, S. Kogure, K. Wada, H. Kumazaki, S. Tasaka, Y. Hashimoto, Y. Kobayashi, T. Araki, K. Furusawa, N. Sekine, S. Kawanishi, and T. Tanabe, “Dissipative Kerr soliton microcombs for FEC-free optical communications over 100 channels” Optics Express Vol. 30, Issue 2, 1351-1364 (2022).]

基本的な手順は、コム線の切り出し、変調、伝送、受光である。ソリトンは発生した後にファイバブラッググレーティングを用いて励起レーザ光を取り出す。次にバンドパスフィルタ (Alnair Labs; CVF-300CL) を用いて 0.080 nm の帯域幅でコム線一本を切り出し、これをキャリアとして使用する。コム線を増幅後、パルスパターンジェネレータ (pulse pattern generator; PPG, Anritsu; MP1761C) から 10 Gbit/s の変調信号を印加した強度変調器によって、コム線を変調する。ただし強度変調器は偏波依存性を持つため、変調前にファイバ偏波コントローラによって増幅したコム線の偏波調整を行っている。変調されたコム線を増幅し、40 km の分散シフトファイバ (dispersion shift fiber; DSF) を伝搬する。伝送後はトランシーバで受光され、光電変換を行った後にサンプリングオシロスコープとエラーディテクタ (Anritsu; MP1762C) で伝送特性を測定する。サンプリングオシロスコープではアイパターンを取得し、エラーディテクタで BER を取得する。

BER の測定では、受光する直前に可変光減衰器 (variable optical attenuator; VOA, OZ optics; DA-100-SCU-1550-8/125-P-50) を用いて受光パワーを変化させる。このときの光パワーと BER を測定することにより BER 変化の曲線を取得する。

また 40 km の伝送だけではなく、伝送するキャリアを直接受光して測定する Back-to-back での実験も行っている。

4.2.2 コム線伝送の測定結果

ソリトンのコム線における伝送特性の測定結果を Fig.4.4. に示す。

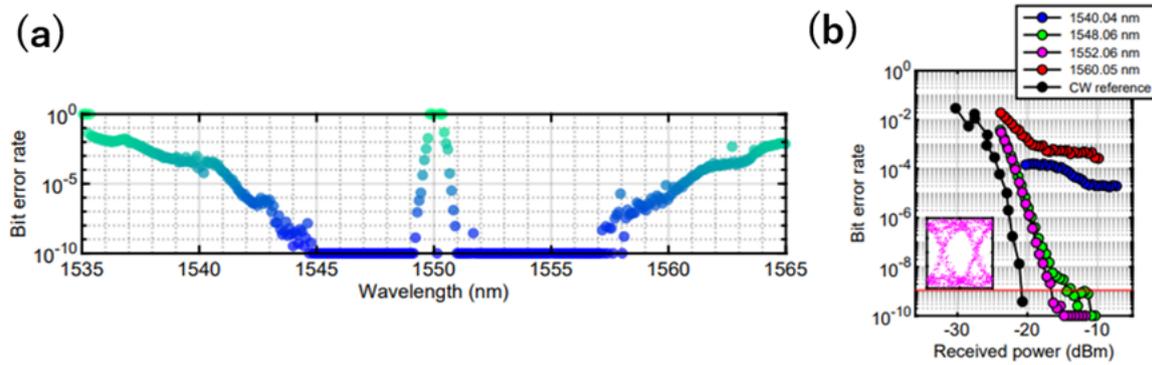


Fig. 4.4. (a) Bit error rate spectrum of a total of 386 lines covering the C-band, of which 145 lines exhibit error-free operation. The low BER lines in the vicinity of the pump are attributed to ASE noise caused by an EDFA (b) Bit error rate versus received power for four selected comb lines and a CW reference at 10 Gbit/s. [S. Fujii, S. Tanaka, T. Ohtsuka, S. Kogure, K. Wada, H. Kumazaki, S. Tasaka, Y. Hashimoto, Y. Kobayashi, T. Araki, K. Furusawa, N. Sekine, S. Kawanishi, and T. Tanabe, “Dissipative Kerr soliton microcombs for FEC-free optical communications over 100 channels” *Optics Express* Vol. 30, Issue 2, 1351-1364 (2022).]

図の (b) は選択したチャンネルの BER を示したものである。2つのコムライン (1548.06nm と 1552.06nm) はエラーフリー伝送を示しているが、他のコム線の BER は元の光パワーが弱いためにエラーフリーを達成することができていない。図の (a) は Cバンド全域の BER を示したものである。合計 145 キャリアでエラーフリーが達成されていることがわかる。この結果は、IM-DD 方式であっても WDM 伝送によって、最大 1.45Tbit/s の超大容量伝送を実現できる可能性が秘められていることを示す。

4.3 散逸性カーソリトンによる波長分割多重通信実験

4.3.1 波長分割多重通信の測定方法

コム線の伝送特性結果から、作製したフッ化マグネシウム結晶共振器によって発生させたソリトンコムが WDM 伝送のキャリアとして応用することができる可能性が示された。このため次はファイバに複数の波長を伝送する、ソリトンコムを用いた WDM 伝送の測定に移る。一般的な WDM 伝送では、各波長を変調した後、アレイ導波路回折格子 (Arrayed waveguide gratings; AWG) 等を用いて各波長成分を合波し、1本の光ファイバで伝送を行う。本研究では AWG が研究設備として欠けているため、コム全体を変調する方法で WDM 伝送の実証を行う。Fig.4.5. に使用した実験系を示す。

また 40 km の伝送だけではなく、伝送するキャリアを直接受光して測定する Back-to-back での実験も行っている。

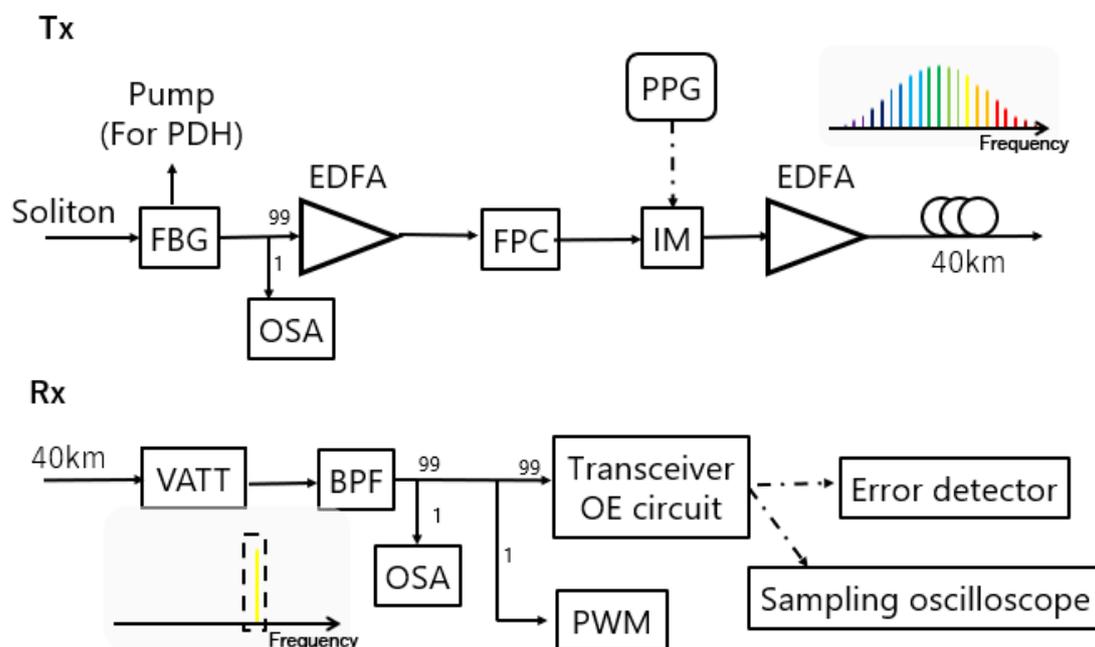


Fig. 4.5. Illustration of experimental Tx and Rx setup.

今回の WDM 伝送実験の手順は、変調、伝送、コム線の切り出し、受光となる。コム線の伝送実験においては切り出したコム線を変調し、伝送を行った。しかし今回の実験では強度変調器を使用し、ソリトン全体を一括で変調する。次に変調したソリトンを 40 km ファイバ伝送をする。伝送後はバンドパスフィルタを用いて切り出したコム線を受光し、サンプリングオシロスコープではアイパターンを、エラーディテクタでは BER を取得する。

4.3.2 波長分割多重通信実験 (FSR 9.6GHz)

本項では、第 2 章で作製したフッ化マグネシウム結晶共振器を用いて Back-to-back での実験を行った結果を示す。

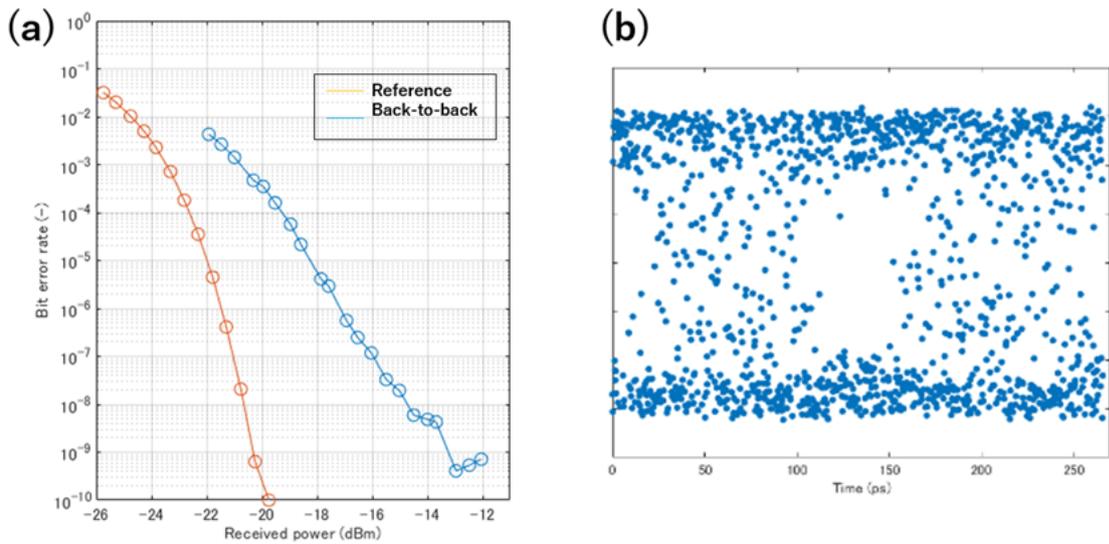


Fig. 4.6. (a) Bit error rate spectrum of versus received power for selected comb line and a CW reference at 7 Gbit/s. (b) Eye-pattern.

Fig.4.6. はソリトンを一括で 7 Gbit/s で変調した後にコム線 1 本を切り出し Back-to-back で伝送特性を測定した結果である。ソリトンを一括で変調し伝送後にコム線を切り出す方式に変更すると、前節と同様の 10 Gbit/s の変調では BER を取得することはできなかった。変調信号を 7 Gbit/s に変更した際には良特性の BER が取得され、エラーフリー伝送を達成した。しかしアイパターンの開き具合から性能の高い伝送は行えていないと考えられる。前節の伝送実験と比較し、考えられた 4 つの原因について述べる。原因の候補は光パワーの不足、変調後のコム線の切り出し、非線形光学効果、チャンネル間クロストークである。

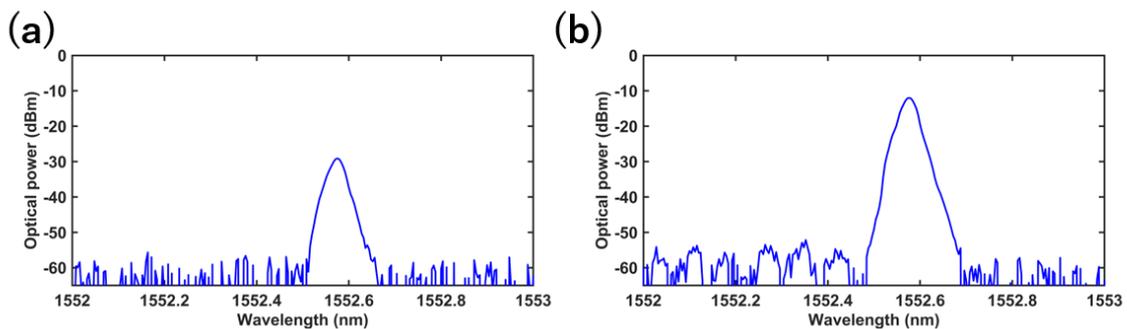


Fig. 4.7. (a) Observed WDM carrier of a comb line. (b) Observed WDM carrier of a comb line with a BPF of 0.8 mm bandwidth inserted before modulation.

今回の実験とコム線の伝送実験との実験系上の違いはバンドパスフィルタの位置である。Fig.4.7. の (b) はコム線伝送の際にコム線を切り出した位置に追加で帯域 0.80 nm のバンドパスフィルタを挟んだ場合の光スペクトルであり，(a) は同じ位置にバンドパスフィルタを挟んでいない場合の光スペクトルである。EDFA の利得が同じ条件では光パワーが約 17 dBm の違いが出ることが分かる。このことが原因でトランシーバでの受光パワーが不足する場合は伝送特性の低下の原因となりうる。前節のコム線の伝送実験では変調前にコム線の切り出しを行うため変調後にバンドパスフィルタは使用しない。一方で，本実験においては変調後にバンドパスフィルタでコム線の切り出しを行っている。このバンドパスフィルタの切り出しが原因である可能性も考えられる。

光パワーと変調後のコム線の切り出し，この2つの問題について調べるため，Fig.4.8. の実験系で実験を行った。

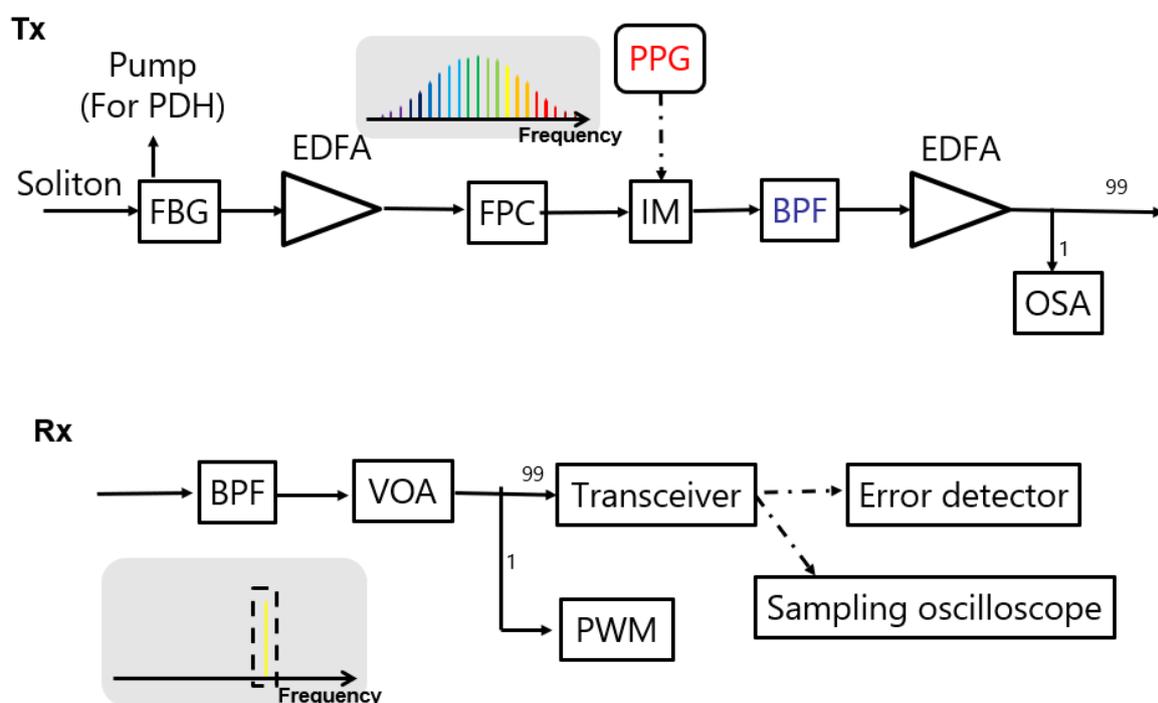


Fig. 4.8. Illustration of experimental Tx and Rx setup.

変調後に一度帯域幅 0.80 nm のバンドパスフィルタを挟むことによって，変調後の EDFA で十分な利得を得ることができるよう変更した。EDFA によって増幅後はコム線 1 本を切り出し，Back-to-back での伝送特性を測定した。この条件で PPG からの変調信号を 7 ~ 10 Gbit/s の間で変化させたときの BER の測定結果を Fig.4.9. に示す。

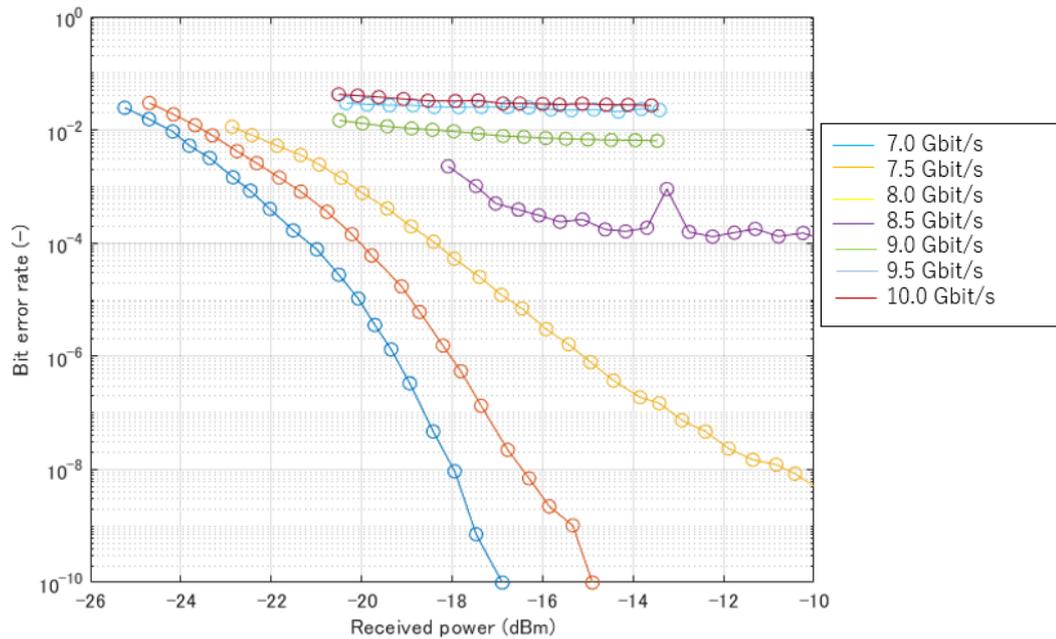


Fig. 4.9. Bit error rate spectrum of versus received power for selected comb line.

この BER の測定結果から変調速度を大きくすると BER が悪化することが観測された。そのため、伝送特性の悪化の原因が光パワーではないと考えられる。

次に CW レーザを変調した後にバンドパスフィルタを通した光を受光し伝送特性を測定することによって、変調信号に対するバンドパスフィルタの与える影響を調べた。レーザはソリトン発生に用いたファイバレーザを 1,550.330 nm の波長で使用した。10 Gbit/s で変調し、バンドパスフィルタの帯域幅 0.050,0.080,0.110 nm としたときの BER の測定結果を Fig.4.10. に示す。

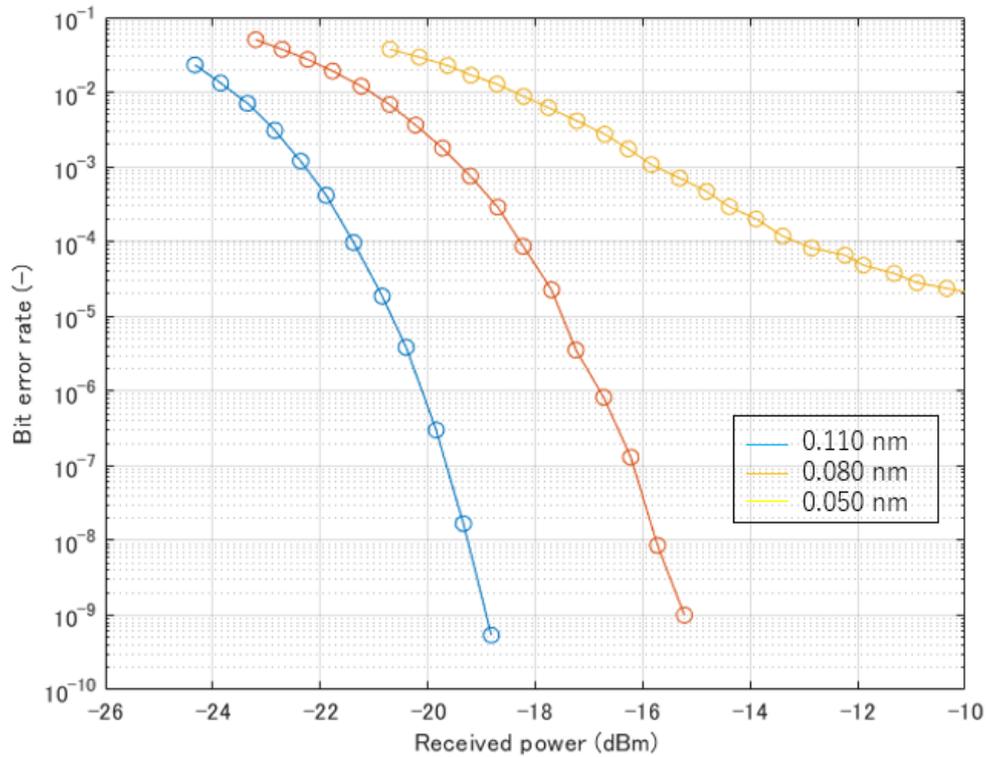


Fig. 4.10. Bit error rate spectrum of versus received power for a CW at 10Gbit/s.

ここではバンドフィルタの帯域幅を狭くすると伝送特性が悪化することが観測された。特に帯域幅が 0.05 nm の場合にはエラーフリーに達することができていない。この帯域幅 0.05 nm のときの変調速度を変化させた結果を Fig.4.11. に示す。

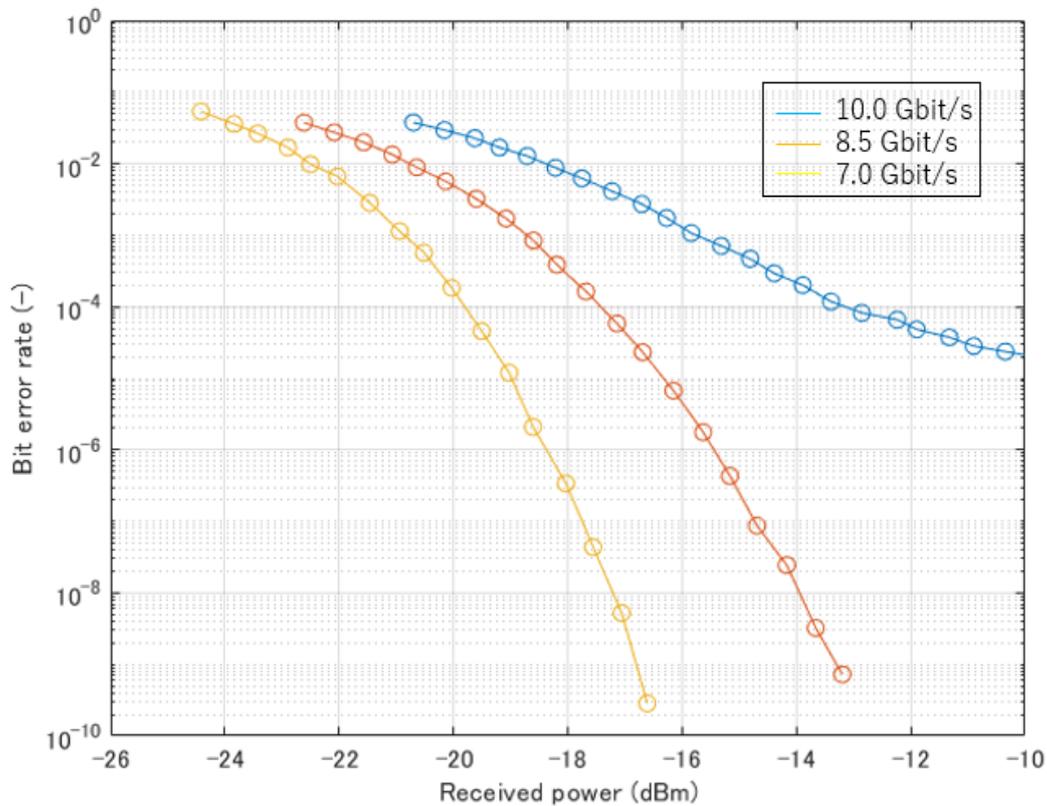


Fig. 4.11. Bit error rate spectrum of versus received power for a CW.

帯域幅 0.05 nm のバンドパスフィルタをとおしたとき、10 Gbit/s の変調では伝送特性の悪化が確認されたが、伝送速度を小さくすることによって伝送特性が改善していることがわかる。この結果はマイクロコムを一括変調した後にバンドパスフィルタによってコム線を切り出したときの結果と似通っている。

バンドパスフィルタが変調信号に与える影響について簡易的な計算を行った。Fig.4.12. は (a) が 10 Gbit/s の矩形波であり、(b) で矩形波のフーリエ変換を行っている。(c) で 10 GHz 以内の成分だけ取り出しており、(d) は切り出した成分の逆フーリエ変換を行っている。

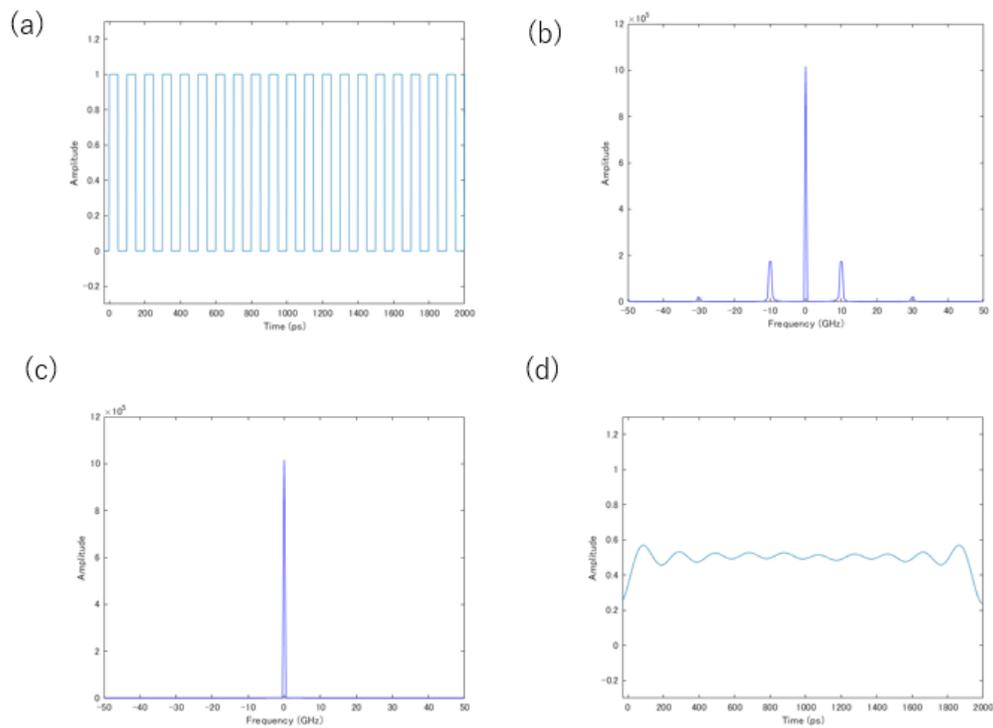


Fig.4.12. (a)10 Gbit/s square wave. (b)Result of Fourier Transform. (c)Result of cutting out at 10 GHz. (d)Inverse Fourier Transform Result

(c) の過程において高調波成分を除去してしまうために、(d) の波形は元の矩形波から歪みが生じることがわかる。(c) の過程で切り出す範囲を 10 GHz とした場合と 20 GHz にした場合の比較結果を Fig.4.13. に示す。

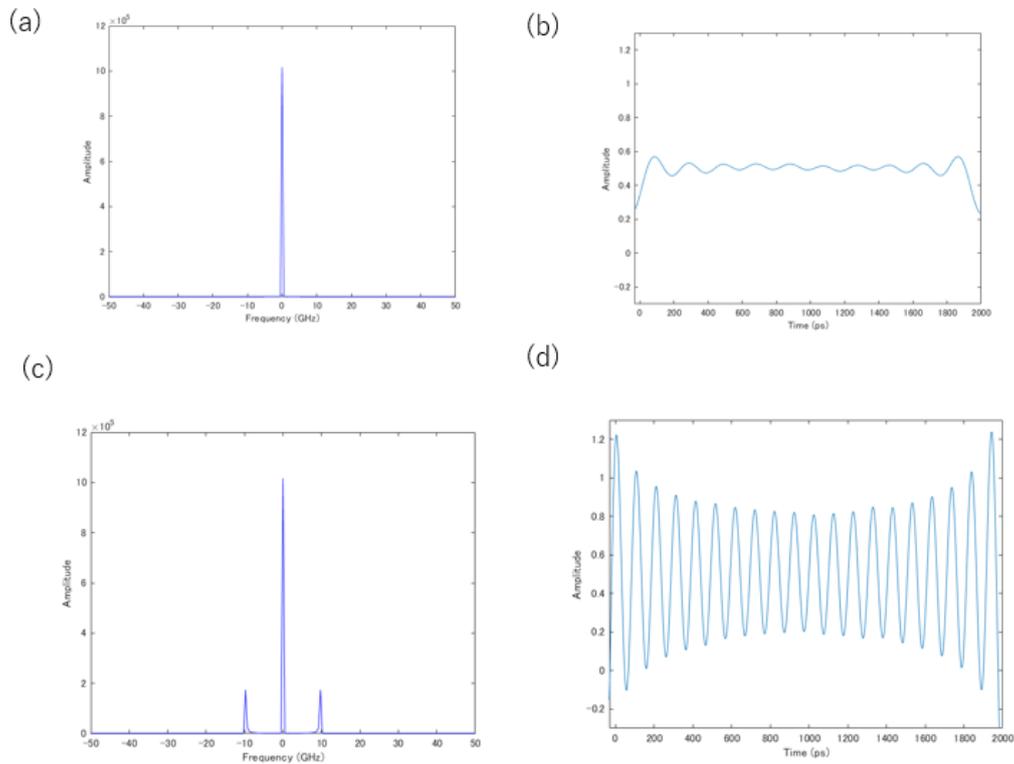


Fig. 4.13. (a)Result of cutting out at 10 GHz. (b)Inverse Fourier Transform Result of cutting out at 10 GHz. (c)Result of cutting out at 20 GHz. (d)Inverse Fourier Transform Result of cutting out at 20 GHz.

この図から狭い帯域で成分を切り出した場合に波形の歪みが大きくなることが確認された。これらの実験と計算の結果から変調後にコム線を切り出すために用いたバンドパスフィルタが伝送特性の悪化原因となりうる。

次に他の 2 つの想定される原因について考察する。非線形光学効果は強い光を入射した際に光と物質が相互作用することで起こる現象であり、ファイバ伝送時の光パワーを変化させることによってファイバ伝送時における非線形光学効果の影響の有無を調べる。使用したソリトンはコム線の間隔が 0.0768 nm と非常に狭いものであったことから、チャンネル間のクロストークが発生した可能性は十分に考えられる。チャンネル間クロストークの影響をなくするため、コム線間隔の広いソリトンを用いての検証を行った結果を次項で示す。

4.3.3 波長分割多重通信実験 (FSR 20GHz)

前項の原因解明のため、コム線の間隔の広いフッ化マグネシウム結晶共振器を新たに使用した。Fig.4.14. に本項で使用した共振器の画像、および伝送に用いたソリトンの光スペクトルと電気スペクトルを示す。

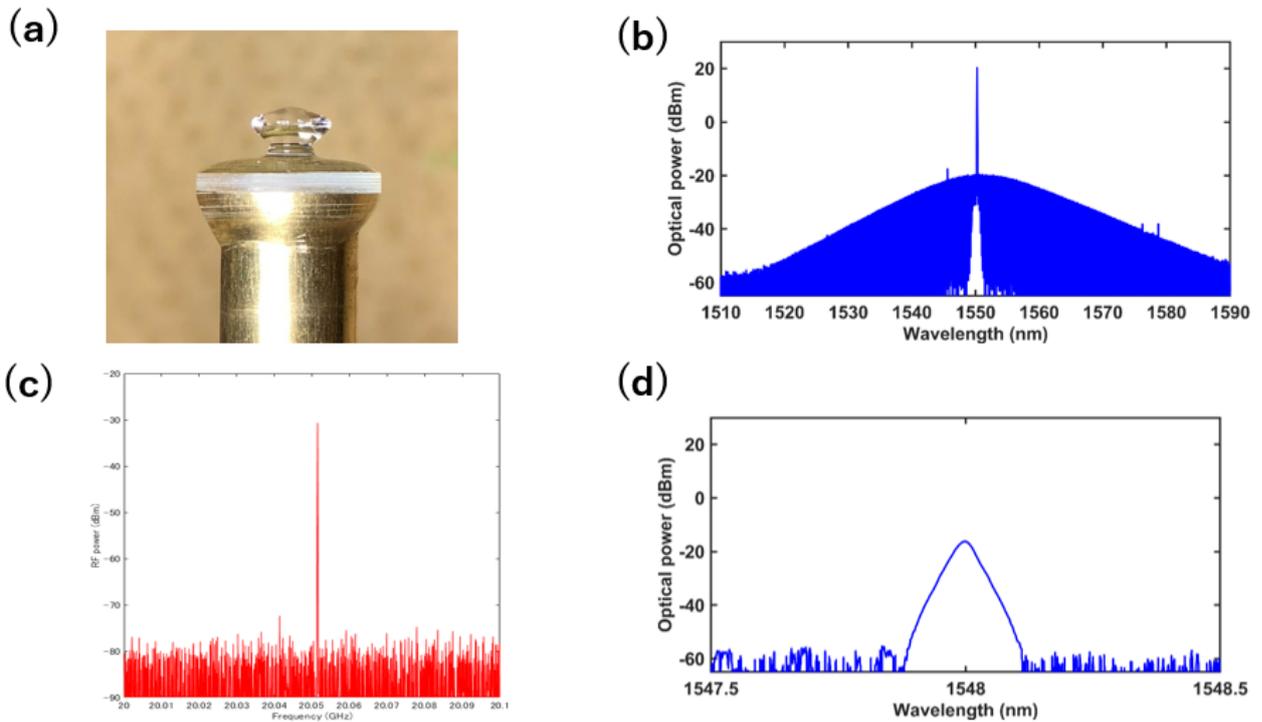


Fig. 4.14. (a): Used MgF₂ microresonator. (b): Optical soliton spectrum. (c): RF spectrum. (d) : Observed WDM carrier of a comb line.

ポンプ波長 1550.2340 nm, 共振器への入力光パワー 0.90 W, 信号発生器の周波数と振幅はそれぞれ 10.1 MHz, 3.00 dBm の条件でソリトン発生を行っている。電気スペクトルから FSR は 20.05 GHz であることが測定され, 共振器の直径は 3.44 mm となる。伝送後にバンドパスフィルタを用いて 0.150 nm の帯域幅で 1548.020 nm のコム線 1 本を切り出した。伝送実験の結果を Fig.4.15. に示す。

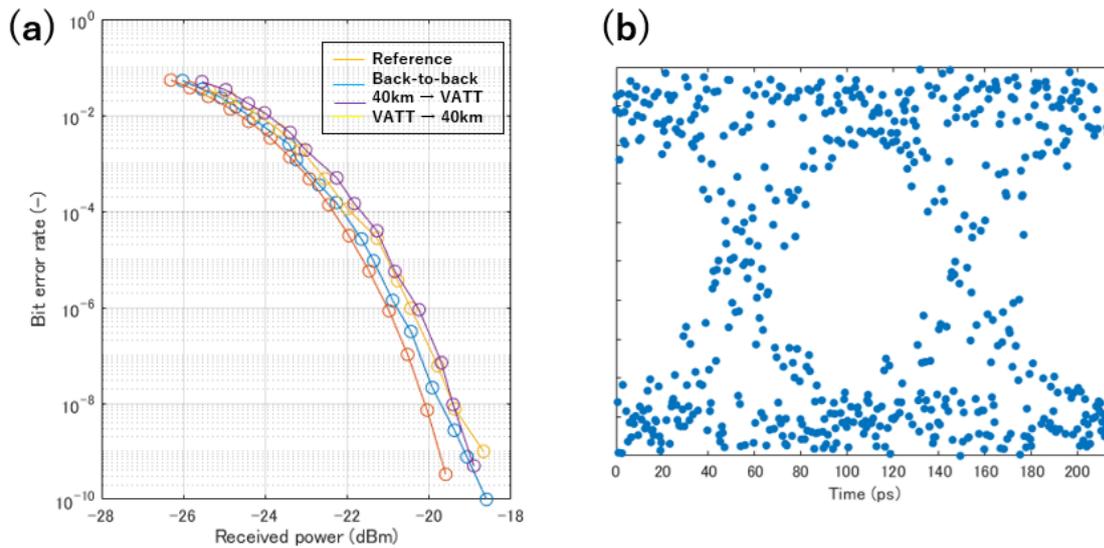


Fig. 4.15. (a) Bit error rate versus received power for three selected comb lines and a CW reference at 10 Gbit/s. (b) Eye-pattern.

コム線間隔の広いソリトンの伝送においては、ソリトンを一括で変調し、伝送後にコム線を切り出す方式であっても 10 Gbit/s の変調でエラーフリー伝送が達成された。アイパターンの開き具合からも伝送特性の良さを伺うことができる。このことから前項の実験において良い伝送特性を得ることができなかった原因としてチャンネル間のクロストークがあった可能性がある。

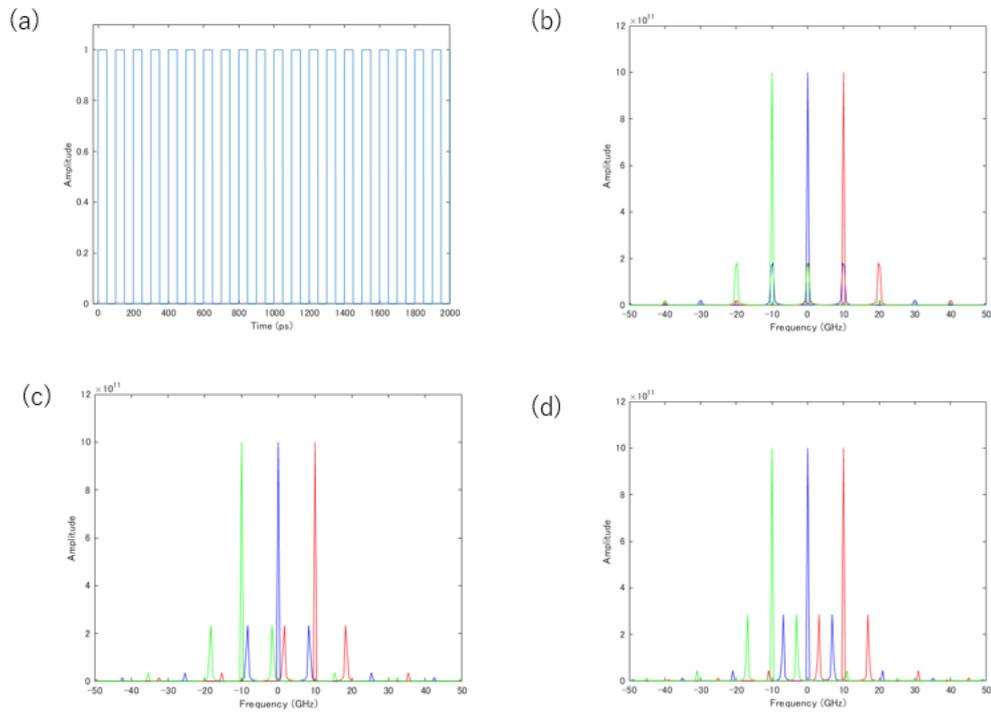


Fig. 4.16. (a) 10 Gbit/s square wave. (b) Result of displaying the Fourier transform of a 10 Gbit/s square wave together with adjacent channels spaced 10 GHz apart. (c) Result of displaying the Fourier transform of a 8.5 Gbit/s square wave together with adjacent channels spaced 10 GHz apart. (d) Result of displaying the Fourier transform of a 10 Gbit/s square wave together with adjacent channels spaced 7 GHz apart.

Fig.4.16. は、矩形波をフーリエ変換し、10 GHz の間隔で隣接する場合の変調速度を変化させた結果である。この結果から隣接したチャンネルからのクロストークが起こる様子が観察され、変調速度を変化させたことによってそのクロストークの度合に違いがあることが分かる。

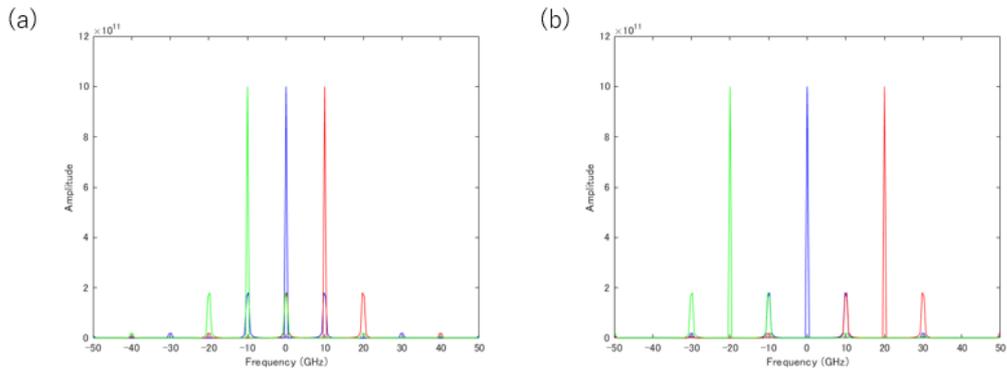


Fig.4.17. (a)Result of displaying the Fourier transform of a 10 Gbit/s square wave together with adjacent channels spaced 10 GHz apart. (b)Result of displaying the Fourier transform of a 10 Gbit/s square wave together with adjacent channels spaced 20 GHz apart.

Fig.4.17. は、矩形波をフーリエ変換し、隣接する周波数間隔を変化させた結果である。この結果から隣接したチャンネルからのクロストークが起こる様子が観察され、チャンネル間の間隔が狭いときクロストークの度合に大きくなることが伺える。

非線形光学効果の評価

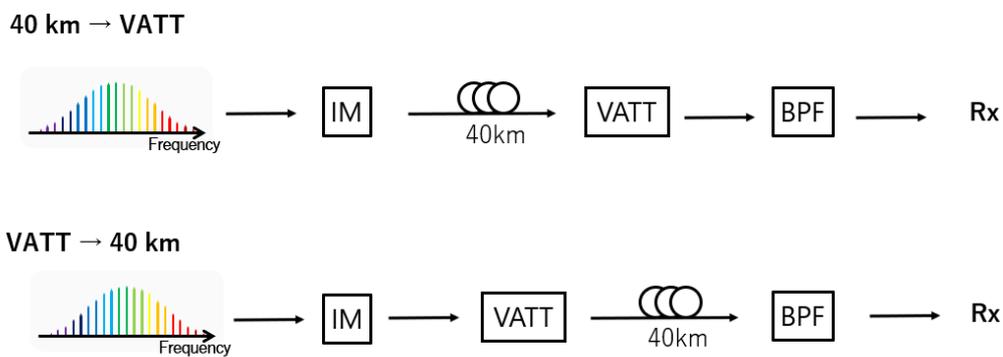


Fig. 4.18. Illustration of two experiments with different VATT positions.

次にファイバ伝送時の光パワーを変化させた場合の影響を調べる。Fig.4.18. は非線形光学効果の影響を調べるため行った実験の概念図である。受光直前に可変光減衰器を使用

する従来の方法と、ファイバ伝送前に可変光減衰器を使用する方法の2つの伝送特性を比較することにより、ファイバ伝送時における非線形光学効果の影響の有無を調べた。測定結果から、40km 伝送時の光パワーを変化させても BER に変化は見られないことから、前項の実験において良い伝送特性を得ることができなかった原因は非線形光学効果ではないと考えられる。

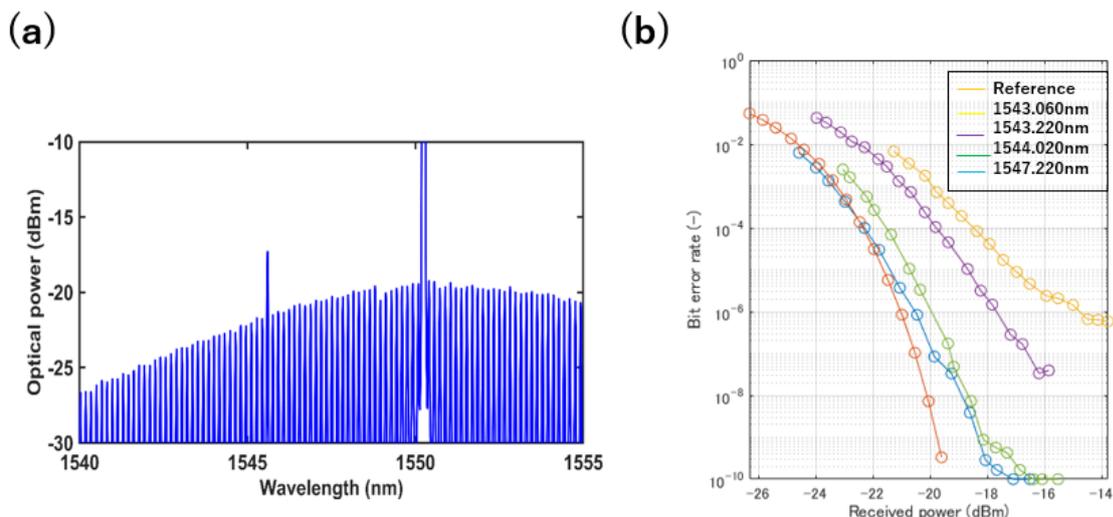


Fig. 4.19. (a)Optical soliton spectrum (b) Bit error rate versus received power for four selected comb lines and a CW reference at 10 Gbit/s.

Fig.4.19. はバンドパスフィルタを用いて切り出すコム線の波長を変えたときの伝送特性を測定した。中心付近と比べコム線の光パワーが低い 1543.060 nm のコム線では、受光パワーを高くしても BER の低下率が低くなることが分かる。これはコム線の測定時と同じ現象である。またこの測定の結果、1546.740 nm ~ 1548.180 nm の 10 本と、1543.380 nm, 1548.180 nm, 1551.070 nm, 1556.550 nm の 4 本の合計 14 本のコム線においてエラーフリーな伝送が達成されたことが確認された。10 Gbit/s の変調で伝送実験を行っていることから、これらのコム線を多重化すると 140 Gbit/s の伝送容量となる。今回の実験ではすべてのコム線の伝送特性を測定はしていない。しかし仮に 1543.380 ~ 1548.180 nm, 1551.070 ~ 1556.550 nm の区間で全てのコム線がエラーフリーであったと仮定すると、その本数は 64 本であり、総伝送容量は 640 Gbit/s を期待できる。この値はデータセンタ間の伝送において十分な伝送容量である。この伝送におけるエラーフリー本数の合計は今後の調査対象となる。

第5章

結論

微小光共振器によるソリトンコムはその特徴から様々な応用研究が報告されており，光通信においてもその応用が期待されている．先行研究ではデジタル・コヒーレント通信によって長距離伝送におけるマイクロコムを用いた大容量通信に向けた実証を行っている．一方 IM-DD 方式の通信応用に向けたマイクロコムの応用研究は少なく，その低遅延性を確保した上でシンプルで大容量な伝送が可能となれば大きな応用可能性がある．本研究では，フッ化マグネシウム結晶共振器を作製し，作製した微小光共振器によるマイクロコムを用いた IM-DD 方式の WDM 伝送を行い，伝送特性の評価を行った。

フッ化マグネシウム結晶共振器による散逸性カーソリトンの発生と安定化

フッ化マグネシウム結晶を材料として微小光共振器を切削・研磨することによって作製した．作製した微小光共振器による散逸性カーソリトンの発生と Pound - Drever - Hall 周波数安定化法による安定化を確認した．共振器の FSR は 9.6 GHz であり，作製目標に対して 3.97 % の精度で作製したことになる．

伝送実験と伝送特性の評価

コム線の伝送ではエラーフリーな伝送が確かめられ，WDM 伝送可能と考えられていた FSR 9.6 GHz のフッ化マグネシウム結晶共振器による散逸性カーソリトンは多波長の伝送では 7 Gbit/s でエラーフリー伝送が達成され，10 Gbit/s ではエラーフリーな伝送を達成することはできなかった．その原因は，切り出したバンドパスフィルタが帯域幅が狭く変調信号の歪みが生じた可能性や，チャンネル間が密であるためにクロストークが生じたことが予想される．しかし，FSR 20 GHz のフッ化マグネシウム結晶共振器による散逸性カーソリトンによってエラーフリーな伝送が達成された．その周波数間隔は 9.6 GHz と比較すると約 2 倍であるが，このコム線の間隔も非常に高密度であり，高いスペクトル効率を得ることができる．この FSR 20 GHz のフッ化マグネシウム結晶共振器は，複数のコム線でエラーフリーとなったことから光通信光源のデバイスとして応用可能性があることが確かめられた．

今後の展望

FSR 9.6 GHz の共振器において，変調後のバンドパスフィルタとチャンネル間のクロストークが起きた可能性があることを説明した．追加の検証としてこの共振器で WDM 伝送を行うことが可能であるか，もし不可能であった場合にはその原因を明らかにする必要がある．

またエラーフリーな伝送を達成した FSR 20 GHz の共振器による散逸性カーソリトンのエラーフリーとなるコム線の本数を測定し，総伝送容量の調べることや，キャンパス内のネットワークにおける伝送実験を行うことが挙げられる．

参考文献

- [1] T. J. Kippenberg, S. M. Spillane, and K. J. Vahala, “Kerr-nonlinearity optical parametric oscillation in an ultrahigh-Q toroid microcavity,” *Physical Review Letters* **93**, 083904 (2004).
- [2] A. B. Matsko, A. A. Savchenkov, D. Strekalov, V. S. Ilchenko, and L. Maleki, “Optical hyperparametric oscillations in a whispering-gallery-mode resonator: Threshold and phase diffusion,” *Physical Review A* **71** (2005).
- [3] H. Guo, M. Karpov, E. Lucas, A. Kordts, M. H. P. Pfeiffer, V. Brasch, G. Lihachev, V. E. Lobanov, M. L. Gorodetsky, and T. J. Kippenberg, “Universal dynamics and deterministic switching of dissipative Kerr solitons in optical microresonators,” *Nature Physics* **13**, 94–102 (2016).
- [4] X. Yi, Q.-F. Yang, K. Y. Yang, M.-G. Suh, and K. Vahala, “Soliton frequency comb at microwave rates in a high-Q silica microresonator,” *Optica* **2**, 1078 (2015).
- [5] T. Herr, V. Brasch, J. D. Jost, I. Mirgorodskiy, G. Lihachev, M. L. Gorodetsky, and T. J. Kippenberg, “Mode spectrum and temporal soliton formation in optical microresonators,” *Physical Review Letters* **113** (2014).
- [6] I. S. Grudinin, N. Yu, and L. Maleki, “Generation of optical frequency combs with a CaF₂ resonator,” *Optics Letters* **34**, 878–880 (2009).
- [7] M. J. Dodge, “Refractive properties of magnesium fluoride,” *Applied Optics* **23**, 1980–1985 (1984).
- [8] S. Fujii, Y. Hayama, K. Imamura, H. Kumazaki, Y. Kakinuma, and T. Tanabe, “All-precision-machining fabrication of ultrahigh-q crystalline optical microresonators,” *Optica* **7**, 694 (2020).
- [9] P. Del’Haye, A. Schliesser, O. Arcizet, T. Wilken, R. Holzwarth, and T. J. Kippenberg, “Optical frequency comb generation from a monolithic microresonator,” *Nature* **450**, 1214–1217 (2007).
- [10] T. Udem, J. Reichert, R. Holzwarth, and T. W. Hänsch, “Accurate measurement of large optical frequency differences with a mode-locked laser,” **24**, 881–883.
- [11] 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 mode-locked

- lasers and direct optical frequency synthesis,” **288**, 635–639.
- [12] T. J. Kippenberg, R. Holzwarth, and S. A. Diddams, “Microresonator-based optical frequency combs,” *Science* **332**, 555–559 (2011).
- [13] T. J. Kippenberg, A. L. Gaeta, M. Lipson, and M. L. Gorodetsky, “Dissipative Kerr solitons in optical microresonators,” *Science* **361** (2018).
- [14] T. Herr, V. Brasch, J. D. Jost, C. Y. Wang, N. M. Kondratiev, M. L. Gorodetsky, and T. J. Kippenberg, “Temporal solitons in optical microresonators,” *Nature Photonics* **8**, 145–152 (2013).
- [15] M.-G. Suh, X. Yi, Y.-H. Lai, S. Leifer, I. S. Grudinin, G. Vasisht, E. C. Martin, M. P. Fitzgerald, G. Doppmann, J. Wang, D. Mawet, S. B. Papp, S. A. Diddams, C. Beichman, and K. Vahala, “Searching for exoplanets using a microresonator astrocomb,” *Nature Photonics* **13**, 25–30 (2018).
- [16] P. Trocha, M. Karpov, D. Ganin, M. H. P. Pfeiffer, A. Kordts, S. Wolf, J. Krockenberger, P. Marin-Palomo, C. Weimann, S. Randel, W. Freude, T. J. Kippenberg, and C. Koos, “Ultrafast optical ranging using microresonator soliton frequency combs,” *Science* **359**, 887–891 (2018).
- [17] M.-G. Suh, C. Y. Wang, C. Johnson, and K. J. Vahala, “Directly pumped 10 ghz microcomb modules from low-power diode lasers,” *Optics Letters* **44**, 1841 (2019).
- [18] D. J. Richardson, J. M. Fini, and L. E. Nelson, “Space-division multiplexing in optical fibres,” **7**, 354–362.
- [19] J. S. Levy, K. Saha, Y. Okawachi, M. A. Foster, A. L. Gaeta, and M. Lipson, “High-performance silicon-nitride-based multiple-wavelength source,” *IEEE Photonics Technology Letters* **24**, 1375–1377 (2012).
- [20] J. Pfeifle, V. Brasch, M. Laueremann, Y. Yu, D. Wegner, T. Herr, K. Hartinger, P. Schindler, J. Li, D. Hillerkuss, R. Schmogrow, C. Weimann, R. Holzwarth, W. Freude, J. Leuthold, T. J. Kippenberg, and C. Koos, “Coherent terabit communications with microresonator Kerr frequency combs,” *Nature Photonics* **8**, 375–380 (2014).
- [21] B. Corcoran, M. Tan, X. Xu, A. Boes, J. Wu, T. G. Nguyen, S. T. Chu, B. E. Little, R. Morandotti, A. Mitchell, and D. J. Moss, “Ultra-dense optical data transmission over standard fibre with a single chip source,” *Nature Communications* **11** (2020).

-
- [22] P. Marin-Palomo, J. N. Kemal, M. Karpov, A. Kordts, J. Pfeifle, M. H. P. Pfeiffer, P. Trocha, S. Wolf, V. Brasch, M. H. Anderson, R. Rosenberger, K. Vijayan, W. Freude, T. J. Kippenberg, and C. Koos, “Microresonator-based solitons for massively parallel coherent optical communications,” *Nature* **546**, 274–279 (2017).
- [23] A. F. 端 l 旦 p, M. Mazur, A. Lorences-Riesgo, Ó. B. Helgason, P.-H. Wang, Y. Xuan, D. E. Leaird, M. Qi, P. A. Andrekson, A. M. Weiner, and V. Torres-Company, “High-order coherent communications using mode-locked dark-pulse kerr combs from microresonators,” *Nature Communications* **9** (2018).
- [24] L. A. Lugiato, F. Prati, M. L. Gorodetsky, and T. J. Kippenberg, “From the Lugiato-Lefever equation to microresonator-based soliton Kerr frequency combs,” *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* **376**, 20180113 (2018).
- [25] E. D. Black, “An introduction to Pound–Drever–Hall laser frequency stabilization,” *American Journal of Physics* **69**, 79–87 (2001).