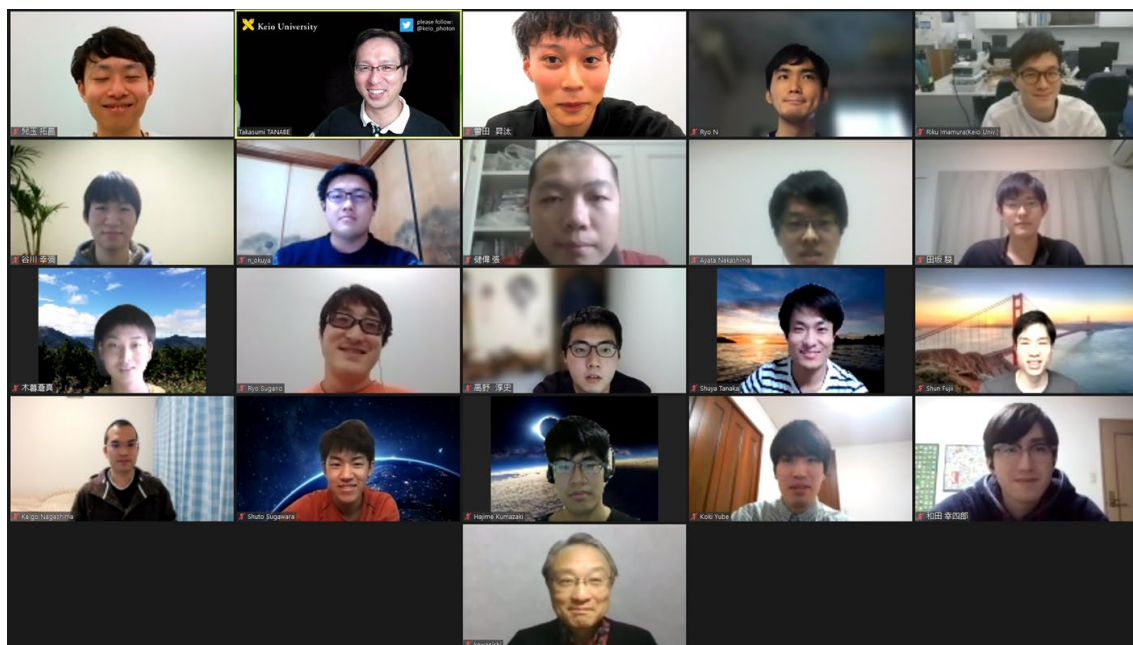


Keio University



2021 年度（令和 3 年度）

アニュアルレポート



慶應義塾大学

理工学部電気情報工学科

田邊フォトリック構造研究室

目次

* ごあいさつ	1
* 研究室メンバー一覧	2
* 研究活動報告	4
『製造誤差を用いたフットニク結晶分光器の開発』	
兒玉拓昌, 菅野凌	5
『結合共振器量子メモリによる集積型時間多重伝令付き単一光子源』	
遊部航希	7
『微小光共振器を用いた水素ガスセンサの低濃度下における性能に関する研究』	
奥屋 直	9
『ソリトンコム発生用 SiN リング共振器の設計及び光学測定』	
高野淳史	12
『Hot-wire CVD 法による堆積 SiN リング共振器の低損失化』	
曾田昇汰	15
『FPGA を用いた散逸性カーソリトンの発生の自動化に向けた制御動作の検討』	
菅原漱人, 熊崎基	17
『逆テーパ構造を用いた Si 導波路と SiN 導波路の接合に関する研究』	
西端 諒	19
『散逸性カーソリトンを用いた時分割多重通信』	
谷川幸彌, 田坂駿, 川西悟基	21
『マイクロコムにおけるデチューニングとノイズの測定』	
木暮 蒼真	24
『MgF ₂ 微小光共振器によるマイクロコムを用いた WDM 伝送』	
田坂駿, 谷川幸彌	26
『ピエゾアクチュエータを結合した結晶共振器によるソリトンコムの発生』	
和田幸四郎	28
『微小光共振器を用いたモード同期レーザの開発に向けた利得と可飽和吸収に関する研究』	
長島圭吾	30
『可飽和吸収効果によるパーフェクトソリトンクリスタル発生』	
中島綾太	33
『結合共振器モデルの数値解析』	
建柚毅	35
* 資料の部	37
論文・会議発表	38
学位論文題目	41

ごあいさつ

皆さまには、慶應義塾大学理工学部電気情報工学科田邊フォトリック構造研究室の研究・教育活動に、日頃より多大なご支援とご関心をお寄せ頂きまして、感謝申し上げます。

2021 年度も、COVID-19 の流行により、研究活動や学生同士の交流に多くの制約がある一年となりました。オンラインでのミーティングや学会発表にも慣れてきましたが、研究者同士が直接顔を合わせ、議論する機会の大切さを改めて感じています。特に学生にとっては、自分の研究を発表するだけでなく、他の研究者の発表を聞き、様々な考え方に触れることが重要です。そこで、8 月には集積光コム研究交流会と慶應光関連研究室交流会をオンラインで開催しました。ポスター発表や懇親会を通じて、研究室や所属機関の枠を越えて学生同士が交流できる機会を設けました。制約がある中でも、こうした工夫を続けていきたいと考えています。



研究面では、NEDO のプロジェクトが新たに採択され、光コム光源の開発とその集積に関する研究を開始しました。微小光共振器から生まれる多波長の光を、省電力な光通信に利用するため、光源そのものの研究に加え、シリコンフォトニクス素子との集積にも取り組んでいます。また、フォトリック結晶分光器の研究が採択されました。微小な構造で光を制御するという研究室の基盤を大切にしながら、通信や計測技術へと研究を広げています。こうした研究を進められるのも、共同研究先の皆さまのご協力と、学生たちの日々の取り組みがあってこそ感謝しております。

本報告書では、2021 年度に取り組んだ具体的な研究成果について報告いたします。本レポートは学生が主体となって作成しており、極力彼らの原文のまま掲載することを心がけております。手作りの報告書となりますが、ぜひともご高覧頂きたく存じます。私どもの活動にご関心を持たれましたら、ご連絡頂けましたら幸いに存じます。今後とも、ご支援のほどよろしくお願い申し上げます。

2022 年 3 月

慶應義塾大学理工学部電気情報工学科
教授 田邊孝純

研究室メンバー一覧

教授

田邊孝純

特任教授

川西悟基

技術職員

熊崎 基

秘書

新木 亜月

博士課程

今村陸

慶應義塾大学大学院在学

修士 2 年生:第 8 期生(2019 年度卒業生)

田中 脩矢

慶應義塾大学大学院修了(2021/9)

曾田 昇汰

慶應義塾大学大学院修了

長島 圭吾

慶應義塾大学大学院修了

遊部 航希

慶應義塾大学大学院修了

和田 幸四郎

慶應義塾大学大学院修了

兒玉 拓昌

慶應義塾大学大学院修了

田坂 駿

慶應義塾大学大学院修了

修士 1 年生:第 9 期生(2020 年度卒業生)

張 健偉

慶應義塾大学大学院在学

木暮 蒼真

慶應義塾大学大学院在学

菅野 凌

慶應義塾大学大学院在学

菅原 漱人

慶應義塾大学大学院在学

中島 綾太

慶應義塾大学大学院在学

学部 4 年生:第 10 期生(2021 年度卒業生)

建 柚毅

慶應義塾大学卒業

谷川 幸彌

慶應義塾大学大学院進学

高野 淳史

慶應義塾大学大学院進学

西端 諒
奥屋 直

慶應義塾大学卒業
慶應義塾大学卒業

特別短期留学生(2021/9～)

David Moreno Gallego De La Sacristana

Valencia 大学 博士課程

研究活動報告

製造誤差を用いたフォトニック結晶分光器の開発

兒玉拓昌(M2) 菅野凌(M1)

製造誤差の影響は、素子サイズが小さくなるにしたがって非常に大きな影響が生まれる。フォトニック結晶において、製造誤差による影響はアンダーソン局在と呼ばれる現象として表れる。本研究では、フォトニック結晶の局在を利用することで、フォトニック結晶分光器の分解能を高めることに成功した。

キーワード：フォトニック結晶、分光器

1. 背景

フォトニック結晶は屈折率が周期的に変化する構造をもち、光の伝播の制御や光と物質の相互作用を促す性質から、応用研究が盛んに行われている。しかし、微小デバイスの宿命といえる製造誤差による影響はデバイスの性能を制限し、この克服はデバイスの商用化に向けた不可避の課題である。フォトニック結晶における製造誤差の影響は局在として表れることが知られ、局在のメカニズムは多数の先行研究をもって解き明かされた[1]。だが、製造誤差による局在の影響を低減させる手法は未だ存在せず、リソグラフィなどの製造法の改良が最善の手だと思われた。しかし近年、製造誤差を逆に利用した研究も行われるようになった。完全なランダム構造体を用いたランダムレーザ[2]や分光デバイス[3]の研究や、製造誤差による局在を電気光学変調に応用した研究[4]が登場し、これらのデバイスは製造誤差の影響を度外視、または応用することが出来るが、それらの研究も原理実証に留まっており、実用化には至っていない。

本研究も、内在的な製造誤差を生かす手段を考えている。フォトニック結晶における局在は波長依存性があり、局在の箇所は入力波長によって大きく変化する。我々はフォトニック結晶導波路(PCW)の製造誤差の影響を利用し、高分解能な分光デバイスを開発した。

2. 原理

本研究では、幅変化型フォトニック結晶導波路(PCW)という非常に単純な構造を用いた。図 1(a)に構造の概略図を示す。フォトニック結晶導波路の導波路幅が一定間隔で変化しており、モードギャップが各セクションで変化する。また構造ランダム性によって局所的に光が閉じ込められ、局在が生じる[図 1(b)]。図 1(c)にシミュレーション上で穴径に 2 nm の摂動を加えた場合の局在の様子を示す。また図 1(d)は実験により取得した画像データである。これらの画像から、局在の起こる箇所は入力波長により変化することが確認できる。したがって、単一波長入力の局在のパターンを事前に蓄積し、未知の局在パターンから入力スペクトルを再構築することが可能となる。

幅変化型 PCW の分光デバイスは、CMOS 互換プロセスの精度ゆえ、約 1.5 nm の分解能が限界となる。本研究では、局在パターンをスペクトル再構築に応

用し、分解能の向上を図った。

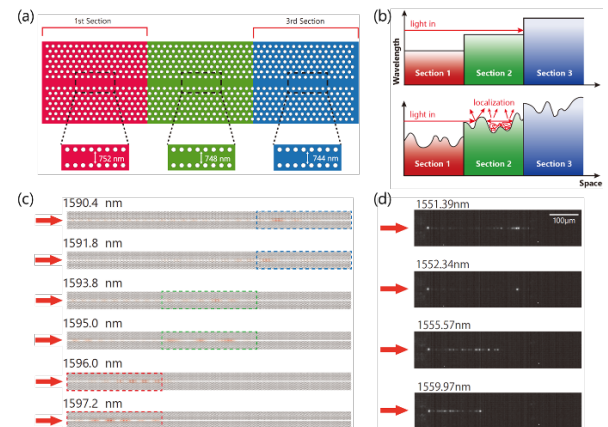


図 1 (a) 幅変化型 PCW. (b) 局在の発生メカニズム. (c) FDTD を用いたシミュレーション画像. 導波路幅は 764 nm, 759 nm, 754 nm と周期的に変化している. (d) 実験画像. スラブの上から IR カメラで取得した。

3. 機械学習によるスペクトル再構築

まずは機械学習を用いてスペクトル解析を行った。単一波長入力の局在パターンを学習データに用い、シミュレーションと実験のそれぞれで検証した。図 2(a)に機械学習のアルゴリズムの概略を示す。また、図 2(b)にシミュレーション画像を用いた結果を示す。波長帯域は 1596.6 nm ~ 1604.4 nm とし、波長クラスごとに 30 枚用意し、少しずつ時間をずらして取得した。学習後、分解能 0.2 nm において 97 % の正確性を記録した。また、図 2(c)は実験画像を用いた学習結果であり、波長帯域は 1584.8 nm ~ 1595.0 nm である。同じく分解能 0.2 nm において 98 % という高い正確性を確認した。

機械学習を用いて構造ランダム性に起因する局在パターンを学習することで、デバイスの構造で定まる分解能の限界を超えて性能を向上させることが出来た。しかし、機械学習によるスペクトル再構築の課題として、波長分解能の概算と多波長入力の解析の二つが挙げられた。これらの課題を解決するため、スペクトルの再構築機構として、新たに最適化アルゴリズムを採用し、多波長入力のスペクトル解析を行った。

4. 多波長入力のスペクトル再構築

4.1. 波長分解能の概算

分解能の概算には、スペクトル相関係数(SCF)を用

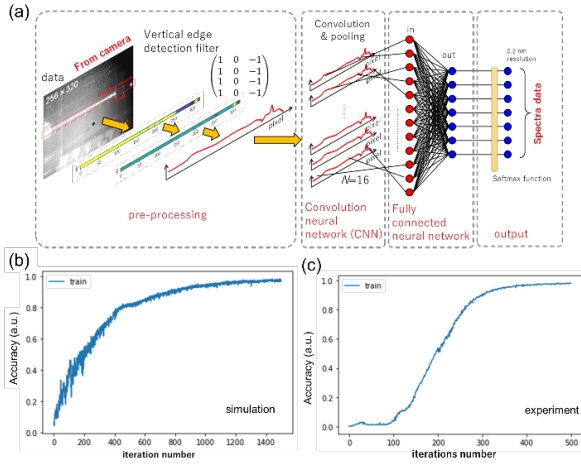


図 2 (a) 機械学習アルゴリズムの概略図. (b) シミュレーション画像を用いた学習結果. (c) 実験データを用いて解析を行った結果.

いた. SCFは次式で表される.

$$C(\Delta\lambda) = \frac{\langle I(\lambda, x)I(\lambda + \Delta\lambda, x) \rangle}{\langle I(\lambda, x) \rangle \langle I(\lambda + \Delta\lambda, x) \rangle} - 1$$

$I(\lambda, x)$ は波長 λ における x 番目の画素値であり, $\langle \dots \rangle$ は λ で平均を求める. 図3(a)にSCFの算出した結果を示す. 分解能はSCFの半値全幅で定義されるため, 0.08 nmと概算値を求めることが出来た.

複数波長の強度分布 $\vec{I}_{\text{multi}}$ は, 単一波長入力の強度分布 $\vec{I}_{\lambda_i}$ ($i = 0 \sim n$)の線形結合で表現されるため,

$$\vec{I}_{\text{multi}} = \sum_{i=1}^n s_i \vec{I}_{\lambda_i} = \vec{T} \vec{S}$$

と表記される. ここで, $\vec{S} = [s_1, s_2, \dots, s_n]$ はスペクトルをサンプリングして求めた, 入力光に含まれる各波長の強度を表す. 波長帯域を1535 nm ~ 1555 nmとし, 導波路上の画素値のデータを遷移行列 $\vec{T}$ に蓄積する. 図3(b)は遷移行列 $\vec{T}$ に対応する. 多波長スペクトルの再構築結果を図3(c,d)に示す.

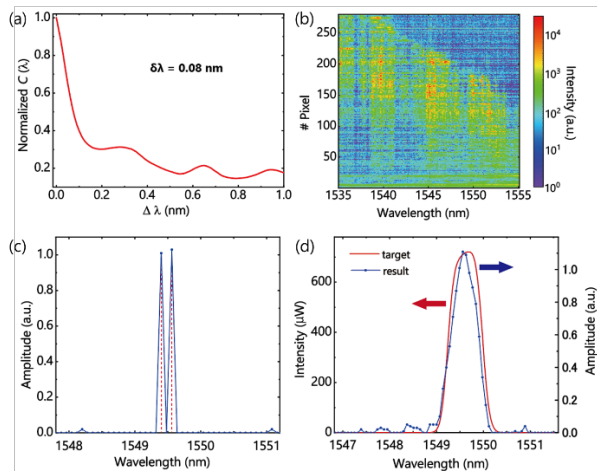


図3 (a) SCFによる分解能の概算. (b) 遷移行列 $\vec{T}$. (c) 二波長1549.40 nmと1549.56 nmの再構築結果. (d) 多波長入力の再構築結果. 半値全幅は0.75 nm.

図3(c)は0.16 nmだけ離れた二波長入力の再構築

結果であり, 図3(d)はより複雑な多波長入力の再構築結果を表す. 赤線は入力光をビームスプリッタで分波し, スペアナで計測した参照スペクトルである. これらの結果から, 波長帯域20 nmにおいて分解能0.08 nmでのスペクトルの再構築が確認できた.

5. まとめ

幅変化型フォトニック結晶導波路の分光器の分解能は, 製造プロセスの精度によって制限され, その値はおおよそ1.5 nmであった. そこで, 局在パターンを利用し, 分解能を0.08 nmまで高め, 製造誤差を分解能の向上に利用する応用例を実証した. 展望としては, 多波長入力のスペクトル再構築を機械学習を用いて進めることと考えられる.

参考文献

- [1] P. D. García, G. Kiršanskė, A. Javadi, S. Stobbe, and P. Lodahl. Phys. Rev. B **96**, 144201 (2017).
- [2] J. Liu, P. D. Garcia, S. Ek, N. Gregersen, T. Suhr, M. Schubert, J. Mørk, S. Stobbe, P. Lodahl. Nat. Nanotechnology, **9**, 285–289 (2014).
- [3] B. Redding, S. F. Liew, R. Sarma, H. Cao. Nat. Photonics, **7**, 746–751 (2013).
- [4] Y. Ooka, N. A. B. Daud, T. Tetsumoto, T. Tanabe. Opt. Express, **24**, 10, 11199–11207 (2016).

結合共振器量子メモリによる集積型時間多重伝令付き単一光子源

遊部航希(M2)

伝令付き単一光子源は単一光子の忠実度と生成確率にトレードオフの関係がある．時間多重化という手法を用いるとトレードオフを克服できることが知られているが，集積型ではこの手法に必要な低損失な量子メモリが実現されていない．本研究では，微小光結合共振器を用いた光子のメモリによる時間多重化単一光子源の要素技術開発を行った．

キーワード：伝令付き単一光子源，時間多重化，結合共振器，動的 Q 値変調

1. 背景

単一光子光源は光子を用いた量子計算や量子情報通信などの量子情報技術に必要な要素である．実用的な量子光源には室温動作可能・通信波長帯での発光などの条件が求められており，これらを満たす可能性のある伝令付き単一光子光源という方式の研究が盛んである．伝令付き単一光子光源は四光波混合(FWM)や自発的パラメトリック下方変換

(SPDC)などの非線形光学効果により量子もつれ状態にある光子対を生成し，片方を検出，もう片方を単一光子として放出する方式である．しかし，非線形光学効果に基づく光子対の生成は確率的であるため，単一光子の生成確率と忠実度にトレードオフが存在する．時間多重化という手法を用いるとこのトレードオフを克服できることがバルク光学系で実証されている[1]．応用可能性の観点から光源の集積化が求められているが，集積型では低損失な可変遅延線が実現されていないため，時間多重化が適用されていない．

本研究では，微小光共振器の結合共振器の動的 Q 値変調[2]を利用した低損失な可変遅延線を用いて，集積型の伝令付き単一光子光源の時間多重化を実現することを目的とする．今年度は動的 Q 値変調と伝令付き単一光子の生成の要素技術開発について報告する．

2. エッジトロイド共振器の高 Q 値化

本研究では共振器同士を結合する都合上，シリカトロイド共振器を基板の端に作製する必要がある，これをエッジトロイド共振器と呼ぶ．エッジトロイド共振器の作製工程を図1に示す．

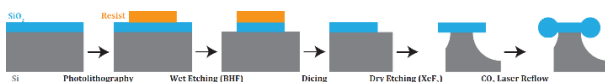


図1：エッジトロイド共振器の作製工程

通常のトロイド共振器の作製工程の他に，エッジトロイド共振器ではダイシングの工程が加わる．ダイシング後のシリコン基板に対して XeF_2 エッチングを行うと，バルク側とエッジ側でシリコンが非対称なことに起因して，エッジ側のエッチング量が増加する．非対称なシリコンポストを持つシリカディスク共振器に対して CO_2 レーザーリフローを行っても，ポスト形状に起因してシリカトロイドも非対称になり

るため，低 Q 値の原因となることが分かった．そこで対称なシリコンポストを作製するために，ダイシング後の2枚の基板を互いに切断面を向かい合わせた状態でエッチングを行った．これにより，エッジ側とバルク側のシリコン量の勾配が緩やかになり，対称なエッチングを達成した．改善前と後のシリコンポスト形状を図2に示す．改善前のエッジトロイド共振器の Q 値は $10^4 - 10^5$ 程度であったが，改善後の Q 値は 10^7 程度まで向上した．

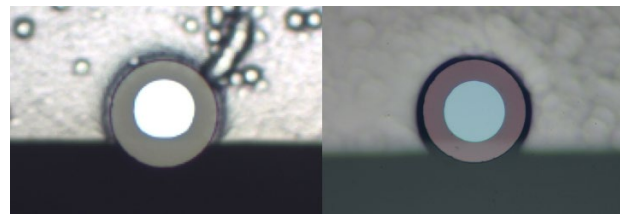


図2：ダイシングの影響による非対称なエッチング(左)と改善後の対称なエッチング(右)

3. 光カー効果による共振周波数制御

結合共振器の Q 値を動的に制御するためには，光カー効果による屈折率変化を利用して共振器の共振周波数をシフトさせる必要がある．信号光の出力を制御光の入力によって変化させる光スイッチの実験セットアップを図3に示す．

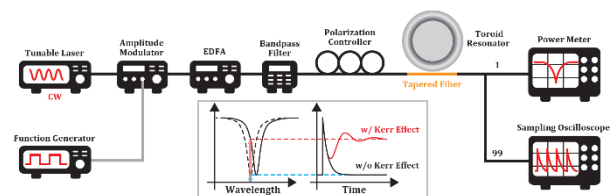


図3：光カー効果を用いた共振周波数シフトによる光スイッチの実験セットアップ．

最初の状態では信号光の周波数と共振周波数はズレているが，制御光による共振周波数シフトにより，信号光の周波数と共振周波数は一致し，共振器内に信号光が入力される．制御光の光強度によって共振周波数のシフト量が増加した結果を図4に示す．実験結果の周波数シフト量は，結合モード理論を用いた数値計算の結果から算出することが出来る．

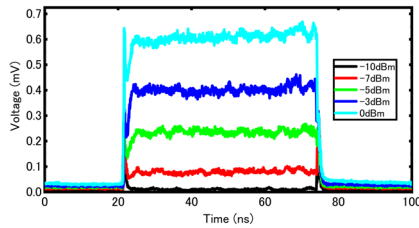


図 4：光カー効果を用いた共振周波数シフトによる光スイッチによる信号光出力強度変化。

4. SPDC による単一光子生成

本研究では SPDC を発生させる非線形結晶として Type-II の PPKTP 結晶を用いた。したがって、生成される光子対は直交する二つの偏光で生成される。励起波長は 780 nm であり、生成される光子対の波長は 1560 nm である。生成した光子対の片方に対し、Hanbury-Brown-Twiss の相関測定を行った。これは光源からの光をビームスプリッタで 50:50 で分岐してから検出し、二つの検出器の同時計数を測定するものである。図 5 に相関測定の結果を示す。横軸は二つの検出器の検出遅延時間差であり、0 付近での同時計数が多くっており、光子のバンチングが確認できた。SPDC で生成される光子対の片方は熱放射状態であるため、SPDC による光子対生成が確認できた。

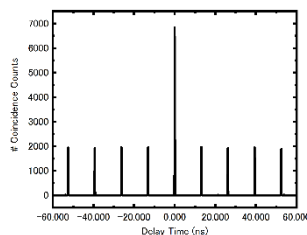


図 5：SPDC によって生成した光子対の片方の相関測定結果。

5. 結論及び今後の展望

前年度は結合共振器系の結合 Q 値を動的に変調することで、低損失な集積型の光子の可変遅延線として用いることが出来ることをシミュレーションで実証した。時空間多重化した伝令付き単一光子光源の確率計算モデルを構築し、可変遅延線のシミュレーションで得られた値を用いることで、集積型の伝令付き単一光子光源で達成できる性能を評価した。

今年度は時間多重化伝令付き単一光子光源の集積化に向けて要素技術の開発を行った。エッジトロイド共振器の高 Q 値化、動的 Q 値制御にむけた光カー効果による周波数シフト、伝令付き単一光子生成に向けた SPDC による光子対生成に取り組んだ。エッジトロイド共振器はエッチングの改善により Q 値を $10^2 - 10^3$ 程度向上させることに成功した。

今後の展望としては、動的 Q 値制御と伝令付き単一光子生成の要素技術として開発した光カー効果による周波数シフトと SPDC による光子対生成およびエッジトロイド共振器の結合共振器の系を統合する

ことで集積型の伝令付き単一光子源の時間多重化を行うことが第一である。

参考文献

- [1] F. Kaneda, P. G. Kwiat, Sci. Adv. **5**, eaaw8586 (2019)
- [2] W. Yoshiki, Y. Honda, T. Tetsumoto, K. Furusawa, N. Sekine, and T. Tanabe, Sci Rep **7** 10688 (2017).

微小光共振器を用いた水素ガスセンサの 低濃度下における性能に関する研究

奥屋 直 (B4)

水素ガスは、有望な次世代エネルギーとして現在注目を集めている。しかしながら水素ガスは無色・無臭であり、また大気中における濃度が 4~75% の場合爆発する危険性があるため、実用的な応用には危険を伴う。この問題の解決として期待されるのが高感度水素センサの実現である。本研究では微小光共振器を用いた熱伝導式センサの実現に向け、複数の微小光共振器の熱解析をシミュレーションし、その性能の比較検討を行った。

キーワード: 微小光共振器, 水素ガスセンサ

1. 背景

水素ガスは、有望な次世代エネルギーとして現在注目を集めている。その理由としては、燃焼効率が低いことや燃焼時に二酸化炭素を排出しないこと等が挙げられる。しかしながら水素ガスは無色・無臭であり、また大気中における濃度が 4~75% の場合爆発する危険性があるため、実用的な応用には危険を伴う。この問題の解決として期待されるのが高感度水素センサの実現である。

現在実用化に至っている水素ガスセンサは電気回路が水素ガス中に露出しているため、スパークによる爆発の危険性がある。^[1]しかし、微小光共振器を用いることで電気回路が水素ガス中に露出していない安全なセンサを作成することが出来る。しかしながら、微小光共振器を用いた温度センサは実用化されているが、微小光共振器を用いたガスセンサは実用化には至っていない。^[2]

本研究では温度センサの原理を利用した微小光共振器を用いた水素ガスセンサの実用化を目指す。そのためにいくつかの微小光共振器の水素ガスセンサとしての性能をシミュレーションにより比較し、特に低濃度下において最適な共振器を示すことを目的とする。使用する微小光共振器のモデルは、シリカトロイド(SiO₂ toroid)共振器、シリコン 1 次元フォトニック結晶(Si 1DPhC)共振器、シリコン 2 次元フォトニック結晶(Si 2DPhC)共振器、シリカ 1 次元フォトニック結晶(SiO₂ 1DPhC)共振器の 4 種類である。

2. 原理

本研究では水素ガスの熱伝導率の高さを利用してセンシングを行う。微小光共振器は光吸収により熱が生じ、共振波長が変化する。この時生じる熱は周囲のガスに放散するため、共振器の温度は周囲のガスの熱伝導率に依存する。ガスの伝導率から測定対象の濃度が分かるため、共振波長の変化量を測定することによりセンシングを行う。

シリカを素材とする共振器の熱吸収による発熱量は次式で表される。^[3]

$$q_{in} = \eta P_{in} Q \frac{\alpha_{abs} \lambda_0}{2\pi n} \quad (1)$$

ここで η は結合効率、 P_{in} は入力光のパワー、 Q は共振器の Q 値、 α_{abs} は吸収係数、 λ_0 は共振波長をそれ

ぞれ表す。^[4]

シリコンを素材とする共振器の吸収による発熱は線形吸収と 2 光子吸収により表されるが、線形吸収による発熱は 2 光子吸収による発熱に比べ無視できるほど小さい。したがって発熱量は次式で表される。

$$q_{in} = P_{in} + 2 \left\{ \frac{n\pi^2 V_{eff}}{\beta \lambda_0^2 Q^2} - \sqrt{\left(\frac{n\pi^2 V_{eff}}{\beta \lambda_0^2 Q^2} \right)^2 - \frac{n\pi^2 V_{eff}}{\beta \lambda_0^2 Q^2} P_{in}} \right\} \quad (2)$$

ここで、 V_{eff} は共振器の実効体積、 β は 2 光子吸収係数をそれぞれ表す。

発熱量を計算したのち COMSOL を用いて、水素濃度と共振器温度の関係をシミュレーションにより調査する。

温度変化による共振波長のシフト量は次式で表される。

$$\Delta\lambda = \lambda_0 \frac{1}{n} \frac{dn}{dT} \Delta T(t) \quad (3)$$

ここで $\Delta T(t)$ は温度変化量、 $\frac{dn}{dT}$ は TO 係数である。

センサー感度は共振波長の線幅に対する共振波長のシフト量により評価される。そのため、(3)式を共振波長の線幅 $\delta\lambda$ により割った次式を用いてセンサー感度の評価を行う。

$$\Delta\lambda' = \frac{\Delta\lambda}{\delta\lambda} \quad (4)$$

3. シミュレーション

光共振器の熱解析シミュレーションを COMSOL Multiphysics を用いて行った。空間次元を 3D、フィジックスを伝熱(固体)、スタディタイプを定常解析とした。

本研究では 4 種類のモデルに対して熱解析を行った。Fig. 1 にシミュレーションに用いた SiO₂ 1DPhC 共振器のモデルを示す。このようにモデルは気体の入った立方体の中心に設置される。立方体のすべての面は 300K で一定とし、初期温度は一様に 300K とした。これらの条件は他のモデルにおいても同様である。

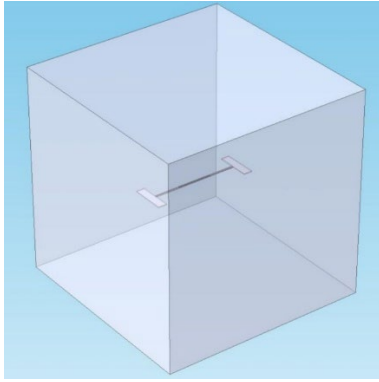


Fig. 1: Simulation model (SiO2 1DPhC)

Fig. 2 は(a)に Si 1DPhC 共振器モデルを, (b)に Si 2DPhC 共振器モデルを, (c)に SiO2 toroid 共振器モデルを, (d)に SiO2 1DPhC 共振器モデルを示す. 2DPhC は空孔間隔 420nm, 気孔半径 115.5nm, スラブ厚さ 210nm である. また, 光を閉じ込める領域の両側にある空孔は半径を 63nm に縮小し, 元の位置より外側に 32nm シフトさせた. ^[5] SiO2 トロイドの土台の材料はシリコンであり, 上部の素材はシリカである.

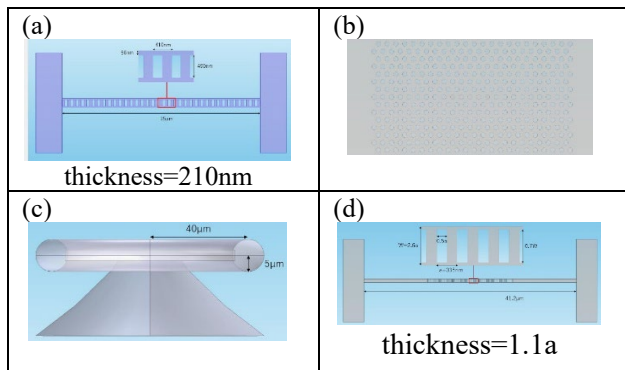


Fig. 2: (a)Si 1DPhC resonator's model モデル. (b)Si 2DPhC resonator's model. (c)SiO2 toroid resonator's model. (d)SiO2 1DPhC resonator's model.

本研究では共振器に光を入射し続け, 定常状態に達した後の共振器の温度を計測した. 立方体内にある気体は水素と空気の混合気体に設定し, 水素濃度 0~100%の範囲において熱解析を行った.

4.結果

Fig. 3 に水素濃度 0%の場合における, 定常状態での各共振器の温度分布を示す.

(a)に Si 1DPhC 共振器の温度分布を, (b)に Si 2DPhC 共振器の温度分布を, (c)に SiO2 toroid 共振器の温度分布を, (d)に SiO2 1DPhC 共振器の温度分布を示す. (b)は横から見た図となっている.

空気中にも熱が伝わっていることから, 周囲の気体の熱伝導率が共振器の温度分布にも影響を与えることがわかる.

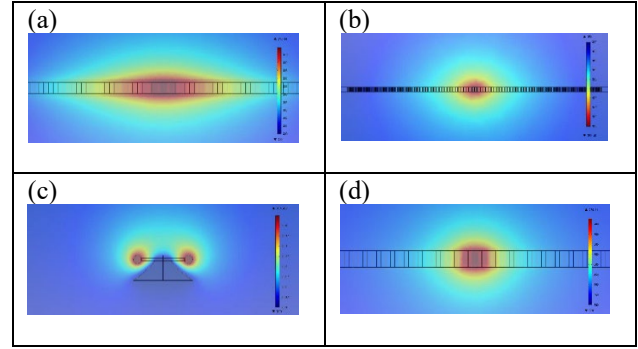


Fig. 3: Temperature distribution(a)Si 1DPhC resonator, (b)Si 2DPhC resonator, (c)SiO2 toroid resonator, (d)SiO2 1DPhC resonator.

Fig. 4 に共振波長の変化量と水素濃度の関係を各共振器の共振波長の線幅で割ることにより規格化したグラフを示す. (a)に水素濃度範囲を 0~100%とした図を, (b)に水素濃度範囲を 0~10%とした図を示す. 入力光のパワーは水素濃度 100%における変化量が約 250 となるように共振器ごとに設定した.

半値半幅の波長シフトを検出可能であると仮定する. ^[6] この場合, 線幅に対するシフト量が 0.5 変化した場合の水素濃度の変化量がセンサの分解能であり, グラフが急峻となるほどセンサー感度は高くなる. したがって, 低濃度下においてはシリカを材料とする共振器の感度が高いことが分かる. 水素濃度が 5%以下である場合, SiO2 toroid 共振器は 0.063%の分解能を, SiO2 1D PhC 共振器は 0.062%の分解能を示す.

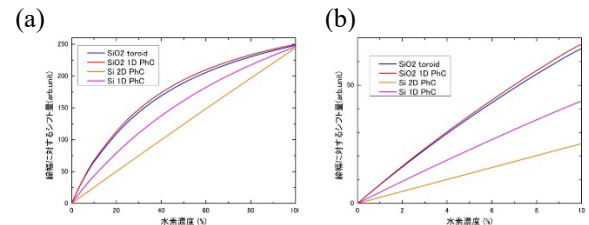

 Fig. 4: Hydrogen concentration - $\frac{\Delta\lambda}{\delta\lambda}$
Hydrogen concentration's range (a)1~100% (b)1~10%

Fig. 5 に入力光が 0.02mW である場合における各共振器の線幅に対する波長シフト量と水素濃度の関係を示す. (a)に水素濃度範囲を 0~100%とした図を, (b)に水素濃度範囲を 0~10%とした図を示す.

Fig. 5 から, Si 1D PhC 共振器が他の共振器に比べ 10^4 以上高い感度を示すことが分かる. 水素濃度が 5%以下である場合では 0.13%の分解能を示す. これは線形吸収効率に比べ 2 光子吸収効率が高いことに起因していると考えられる. また, Si 2D PhC と Si 1D PhC に大きな差がある原因として, 2 次元結晶に比べ 1 次元結晶の表面積は大きくガスの影響を受けやすいためであると考えられる.

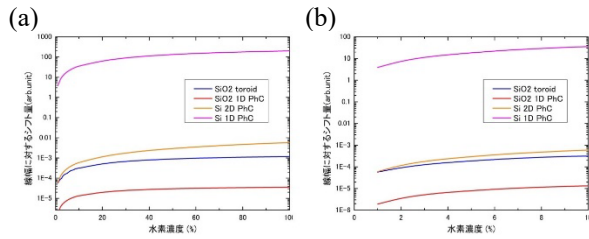


Fig. 5: Hydrogen concentration – $\frac{\Delta\lambda}{\delta\lambda}$
Hydrogen concentration's range (a)1~100% (b)1~10%
($P_{in} = 0.02 \text{ mW}$)

5. 結論

微小光共振器を用いた水素センサの実現を目指し、シリカトロイド共振器、シリカ 1DPhC 共振器、シリコン 1DPhC 共振器、シリコン 2DPhC 共振器の 4 種類のモデルに対し熱解析を行った。

シミュレーション結果より低濃度下におけるセンサー感度は消費電力を考慮しない場合ではシリカを素材とする共振器が優れているが、消費電力を考慮する場合ではシリコン 1DPhC 共振器が優れていることが分かった。シリコン 1DPhC は入力光のパワーが 0.02mW である場合に 0.13%の水素濃度変化が検出可能である。

参考文献

- [1] T. Hübert, L. Boon-Brett, G. Black and U. Banach, "Hydrogen sensors – A review," *Sensors and Actuators B: Chemical* **157** (2), pp. 329, 2011.
- [2] Xiangyi Xu, Weijian Chen, Guangming Zhao, Yihang Li, Chenyang Lu and Lan Yang, "Wireless whispering-gallery-mode sensor for thermal sensing and aerial mapping," *Light: Science & Applications* **7** (62), 2018.
- [3] Tal Carmon, Lan Yang, and Kerry J. Vahala, "Dynamical thermal behavior and thermal self-stability of microcavities," *Opt. Express* **12**, pp. 4742-4750, 2004.
- [4] Yuki Taguchi, Yasushi Takahashi, Yoshiya Sato, Takashi Asano, and Susumu Noda, "Statistical studies of photonic heterostructure nanocavities with an average Q factor of three million," *Opt. Express* **19**, pp. 11916-11921, 2011
- [5] Fushimi A, Taniyama H, Kuramochi E, Notomi M, Tanabe T., "Fast calculation of the quality factor for two-dimensional photonic crystal slab nanocavities," *Opt Express*. 22 (19), pp. 23349-23359, 2014 Sep 22.
- [6] Nebiyu A. Yebo, Petra Lommens, Zeger Hens, and Roel Baets, "An integrated optic ethanol vapor sensor based on a silicon-on-insulator microring resonator coated with a porous ZnO film," *Opt. Express* **18**, pp. 11859-11866, 2010.

付録

ポリスチレンを材料とする微小球光共振器 (Polystyrene sphere)の水素ガスセンサとしての性能に関してシミュレーションを行った。Fig.6 に微小球光共振器のモデルと熱源を示す。Fig.6 の青みがかった部分を熱源とした。

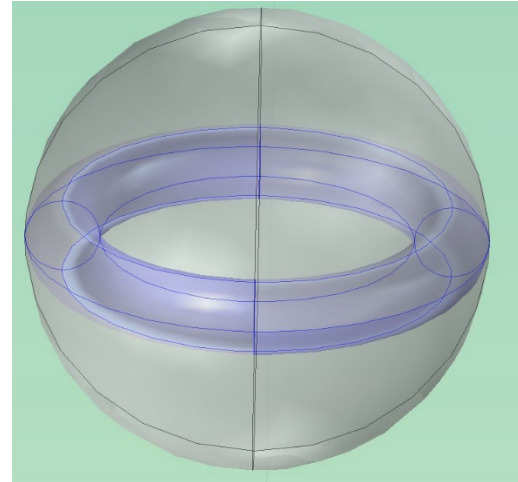


Fig. 6: microsphere resonator

水素濃度 100%における線幅に対する共振波長シフト量が約 250 になるように発熱量を設定した際の結果を Fig.7 に示す。(a)に水素濃度範囲を 0~100%とした図を、(b)に水素濃度範囲を 0~10%とした図を示す。Fig.7 から低濃度下における感度は微小球光共振器が最も優れていることが分かる。このとき水素濃度 5%以下では 0.032%の分解能を示す。低濃度下における感度が高い理由として、ポリスチレンの熱伝導率が空気と水素の間であることにより、周囲に水素が無い場合においては周囲のガスよりも共振器内に優先的に熱が伝わるが、周囲に水素がある場合においては共振器内よりも周囲のガスに優先的に熱が伝わるためであると考えられる。

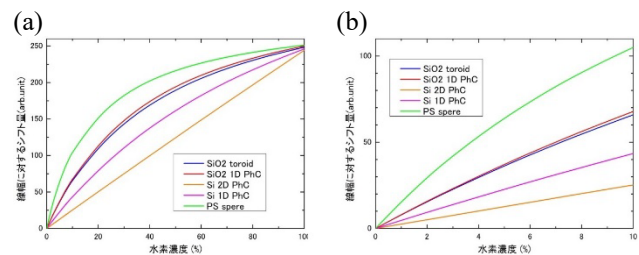


Fig. 7: Hydrogen concentration – $\frac{\Delta\lambda}{\delta\lambda}$
Hydrogen concentration's range (a)1~100% (b)1~10%

ソリトンコム発生用 SiN リング共振器の設計及び光学測定

高野淳史(B4)

微小光共振器を用いて光を閉じ込め効率的に四光波混合を引き起こすことでマイクロコムが発生する．さらにデチューニング(ポンプ光と共振周波数の差)を緻密に制御することで位相同期されたソリトンコムが発生する．本研究ではソリトンコム発生可能な SiN リング共振器の設計の検討及び光学測定を行った．

キーワード：微小光共振器，マイクロコム，ソリトンコム，SiN(シリコンナイトライド)

1. 序論

光共振器は特定の共振周波数において光を閉じ込めて蓄積するデバイスである．フィードバックを取り入れた光発信系として考えられ，光は漏れ出すことなく系内を繰り返し反射しながら巡回する．

WGM(Whispering Gallery Mode)共振器は円状の構造を持ち，式(1)で表される波長 λ を満たす光波が閉じ込められる．

$$2\pi R = \lambda \cdot l \quad (l = 1, 2, 3, \dots) \quad (1)$$

屈折率 n の材料を用いた WGM 共振器の隣り合うモード間の周波数間隔を表す自由スペクトル領域(FSR: Free Spectral Range)は次のように表すことができる．

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

微小光共振器の場合，非常に小さな半径 R を持つため GHz や THz といったオーダーの FSR を容易に作り出すことができる．

共振器の光を閉じ込める性能を表す値として Q 値がある． Q 値は次のように定義される．

$$Q = \omega_0 \frac{\text{共振器内に蓄えられるエネルギー}}{\text{単位時間あたりに損失するエネルギー}} \quad (3)$$

光周波数コムとは時間領域ではパルス列として，周波数領域では等間隔に並んだスペクトルを持つ光のことである．

光周波数コムの生成方法としてはチタンサファイアレーザやファイバレーザなどのモードロックレーザを使用する手法や，電気光学変調器を用いた手法がある．2007 年に微小光共振器を用いた光周波数コムが発表され，マイクロコムと呼ばれるようになった．

マイクロコムの発生には分散設計が重要である．分散を考慮に入れない場合には共振モードの間隔は一定であるが，実際の共振器は分散を持つため FSR は波長依存性を有する．マイクロコムの発生には基本的には異常分散が必要である．

位相同期されたソリトンコムは，共振器の異常分散特性によるパルス拡大，及び自己位相変調によるパルス圧縮によるパルス形状の釣り合い，そしてパラメトリック利得及び共振器内での損失によるパワーの釣り合いの二つが平衡する場合に実現される．

2. 微小共振器について

微小共振器の種類として， MgF_2 や CaF_2 などのロッドを手作業で削り出して共振器を形成する結晶共振器，シリカ基盤をエッチングして CO_2 レーザでリフローすることでできるシリカトロイド共振器[1]などがある．

本研究では SiN(シリコンナイトライド)微小共振器を使用する．SiN 共振器の Q 値は MgF_2 結晶($\sim 10^9$)やシリカトロイド($\sim 10^8$)と比べると低いが，CMOS プロセスを用いてチップ集積化が可能である．また通信波長帯での損失も小さく，大きな非線形性をもつため，今やフォトンクスに欠かせない材料となっている[2]．

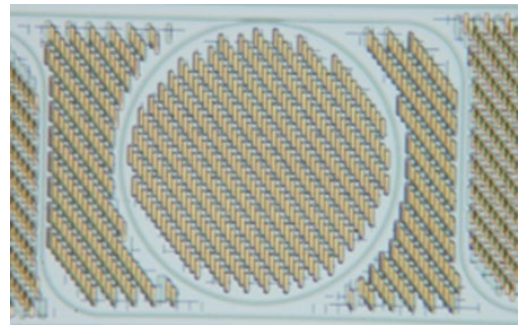


図 1 : SiN リング共振器の電子顕微鏡画像

SiN リング共振器の作製は Ligentc MPW run と呼ばれるファウンドリに依頼した．これは SiN 層が Si 基板上に SiN 膜に作成する場合，熱膨張係数差から自発的クラック発生が顕著に見られ，作製が非常に困難なためである．

SiN リング共振器のギャップ(共振器とバス導波路との距離)の大きさによって結合が変化する．結合が変化することによってソリトンコムの発生に関係する Q 値や透過率が変化する．

3. 測定手順

図 2 に測定セットアップを示す．波長可変レーザを用いてチップ上に集積させた共振器に -10 dBm の光を入力させ，パワーメータで出力光強度を測定する．波長を 1550 nm $\sim$ 1600 nm $\sim$ 6 nm/s の速さでスイープさせ，DAQ で波長とパワーのデータを一元管理すると図 3(a)のような透過スペクトルが得られる．得られた透過スペクトルに見られる下に伸びた棒はディップと呼ばれ，拡大すると図 3(b)のようになる．このディップに対しローレンツフィッティングを行い，半値幅 $\Delta\lambda$ と共振波長 λ_0 を用いると

$$Q_{\text{load}} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \quad (4)$$

より Q 値を求めることができる．ここで Q_{load} は材料による吸収や導波路との結合損失を含む，測定によって得られる Q 値である．

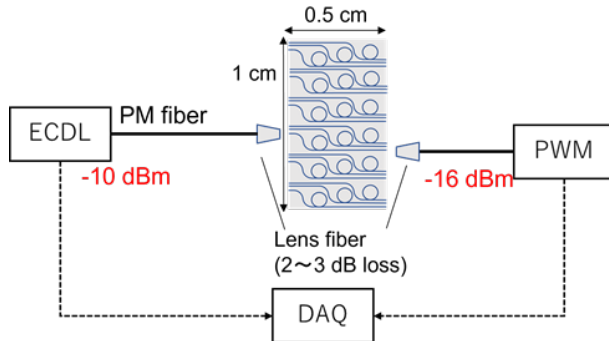


図2：測定セットアップ

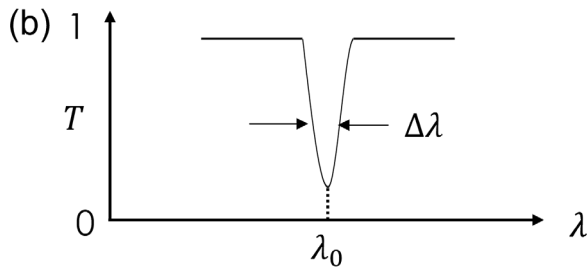
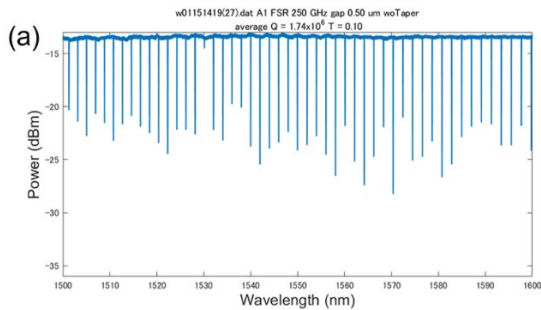


図3：(a)透過スペクトル (b)ローレンツフィッティングのイラスト図

透過スペクトルのピーク間隔は分散がない場合，FSR と一致する．分散がある場合はピーク間隔が少しずつずれていくため，このずれを2次関数でフィッティングすることで分散を求めることができる．

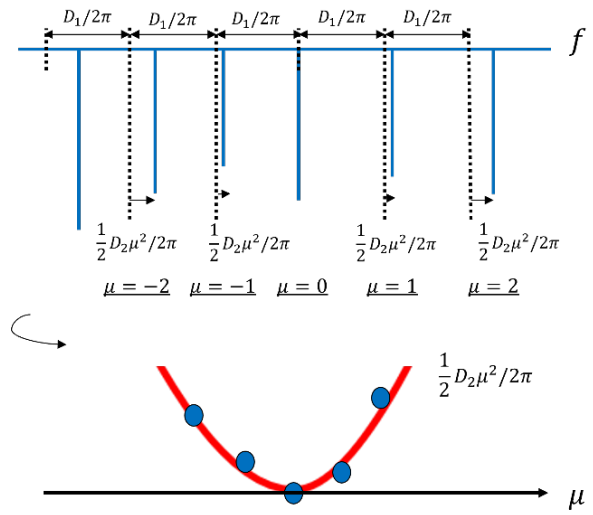


図4：分散測定

4. 測定結果

図5に2021年に作製したチップの光学測定の結果を示す．(a)は透過率，(b)は Q 値の測定結果である．FSRは250 GHzでリング導波路幅は1.6 μm ，バス導波路幅とギャップを振った．

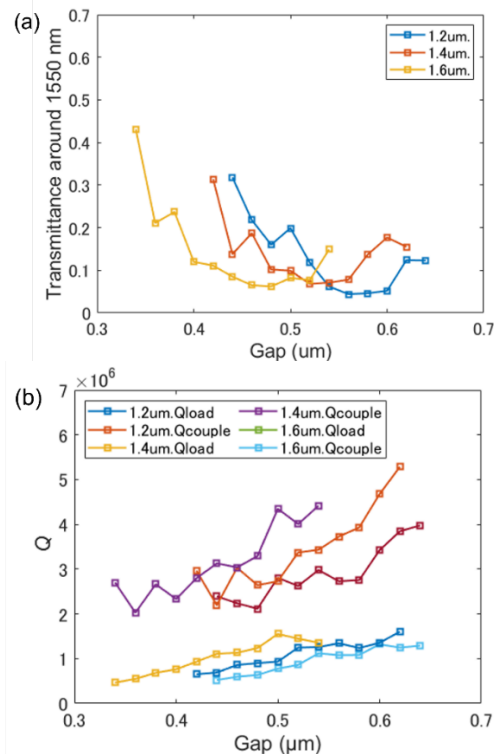


図5：(a)透過率の測定結果 (b) Q 値の測定結果

Q 値と透過率を対比すると，透過率が最も低い結合状態であるクリティカルカップリングから多少ギャップを大きくしたアンダーカップリングに近づいた箇所で最も Q 値が高くなっていることがわかる．ソリトンコンの発生には高い Q 値及び低い透過率が必要であるため，クリティカルカップリングから多少アンダーカップリングに近づいた箇所を含むよう共振器を設計する必要がある．バス導波路幅に関し

ではクリティカルから多少アンダーカップリングに近づいたギャップでの Q 値が他と比べて高いことや、先行研究においてリング導波路とバス導波路を同一としている点を踏まえ、設計ではバス導波路を $1.6\ \mu\text{m}$ に固定することとする。

バス導波路幅は 2021 年のチップの評価結果を踏まえ、2022 年に作製したチップのデザインの検討を行った。バス導波路幅は $1.6\ \mu\text{m}$ とし、今回はリング導波路幅を振りその影響を評価することとした。図 6 に測定結果を示す。

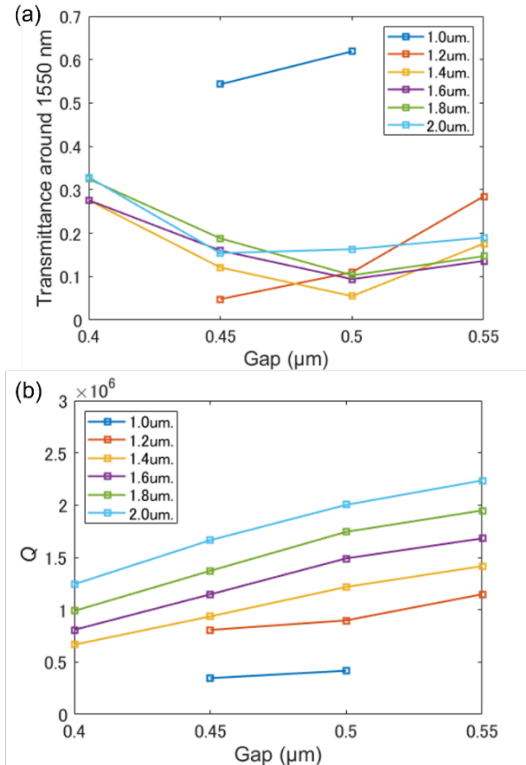


図 6 : (a)透過率の測定結果 (b) Q 値の測定結果

2021 年チップの測定結果と同様にギャップ $0.5\ \mu\text{m}$ でクリティカルカップリングとなった。図 6(b)から、リング導波路幅の増加に伴い Q 値の増大する様子がみられるが、これはリング導波路幅の増加が実質的なギャップの増加によるものだと考えられる。

最後に 2022 年作製のチップ A1 に含まれる FSR が $250\ \text{GHz}$ においてリング導波路幅 $1.2\ \mu\text{m}$ の共振器の分散測定の結果を図 7 に示す。

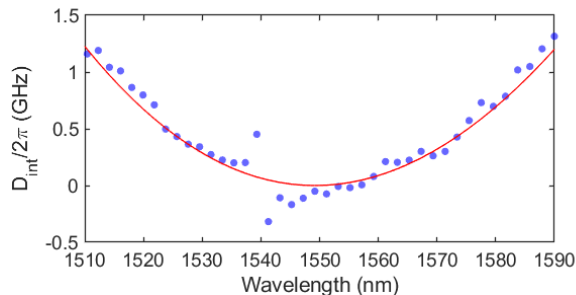


図 7 : 分散測定結果

分散は $D = 81.0\ \text{ps/km/nm}$ と求めることができ、理論値の $D = 83.6\ \text{ps/km/nm}$ と近い値を得た。これは $D > 0$ の異常分散であり、ソリトンコンの発生に適す

る。しかしながら、 $1540\ \text{nm}$ にモード分散が見られ、これはソリトンコンの発生を阻害する恐れがある。

5. 結論

SiN リング共振器のギャップと結合の関係を調べ、ソリトンコンの発生に最適なギャップを見つけ、同じデザインの共振器であれば最適なギャップが一致することがわかった。分散測定から理論値に近い異常分散を持つことがわかった。一部の共振器ではモード結合が見られた。

参考文献

- [1] 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).
- [2] Ikeda, K., Saperstein, R. E., Alic, N. and Fainman, Y., "Thermal and Kerr non linear properties of plasma-deposited silicon nitride/silicon dioxide waveguides." *Opt. Express* **16**, 12987–12994 (2008).

Hot-wire CVD 法による堆積 SiN リング共振器の低損失化

曾田昇汰(M2)

本研究では低温堆積法である Hot-Wire CVD 法で堆積させた SiN を用いて作製したリング共振器の低損失化に向けた研究を行い、水素結合基の吸収損失の大きい C-band 帯で 5.0×10^5 を超える Q 値を達成し、さらにマイクロシムの発生も観測した。

キーワード：微小光共振器、マイクロシム、窒化シリコン

1. 背景

窒化シリコン (SiN) は広いバンドギャップを持っているため、非常に幅広い波長帯域で透明である (470nm~6.7 μ m) ことから通信波長帯域での二光子吸収の影響を受けないこと、半導体 CMOS プロセスで作製が可能 (CMOS 互換性) であること、通信波長帯域で光ファイバ (シリカ) のおよそ 50 倍という非常に高い非線形性係数を持つという特徴を持っているため[1]、マイクロシム発生プラットフォームとして非常に注目を集めている材料である。しかし SiN は光通信波長帯において正常分散であるため、異常分散を得るには、SiO₂ をクラッドとして 700 nm 以上の膜厚が必要となる。SiN の熱膨張係数は基板の母材である Si よりも大きいので、CVD 法などを用いて高温 (~750 °C) 堆積した SiN 膜では常温において大きな引っ張り応力がかかり、歩留まりを悪化させる原因になってしまう。加えて将来的な集積化を考慮すると膜堆積には 400 °C 以下が好ましいが、低温堆積法では膜中に残留する N-H (~3400 cm⁻¹) や Si-H 結合基 (~2200 cm⁻¹) に由来する赤外振動モードの倍音吸収による損失が問題となる[2]。本報告では Hot-wire CVD 法で成膜した厚膜 SiN 膜 (~750 nm) を用いてリング共振器を作製し、光学特性を評価したので報告する。

2. 基本的な作製方法

熱酸化膜付き Si 基板上に SiH₄ : 2.1 sccm, NH₃ : 80 sccm, 圧力 4 Pa, 基板温度 400°C, タングステンワイヤの投入電力 600 W, 堆積速度は 5.6 nm/min で屈折率~2.02(632.8 nm)、膜厚 750 nm の SiN を堆積させた。その後ネガ型レジストを塗布し、EB リソグラフィにてパターン描画をし、ドライエッチング (CHF₃/Ar を 30s の後 SF₆/O₂ をおよそ 5min30s) を行った後オーバークラッド層としてシリカを 2 μ m 堆積した。

3. 低損失化に向けた取り組み

①マイクロマスクの低減

導波路付近には図 1(a)のようにマイクロマスクが存在しており、光散乱損失源となっている可能性がある。このマイクロマスクはレジストが現像時に崩れて飛散したことが原因であると考えられる。そのため、マイクロマスクを減少させるために (i) エッチング前に酸素プラズマアッシング, (ii) EB ベースドス量増加およびレジストベイク温度減少をそれぞれ行った。図 1(b) (i) の結果からアッシングを

行うことで Q 値が減少することが分かる。これはアッシング過程においてレジスト表面の濡れ性(親水性)が向上してしまい、レジストに通常よりも多量の H₂O が付着することで、1 段目の DE(CHF₃/Ar エッチング)での反応副生成物の量増加しパターン表面に、側壁粗さの増加を招いてしまったことが考えられる。図 1 (b)(ii)を見ると長波長側の Q 値が向上していることが分かる。この理由は、EB 描画時のベースドス量を増加させるとレジストに照射される電子線の電荷が増加するためにより感光し現像の必要時間が増加し最表面の浸食がなくなったことに加えベイク温度が低いほど分子架橋が形成されにくく、レジストの不均一性が少ないことによりマイクロマスクが減少したためであると考えられる。

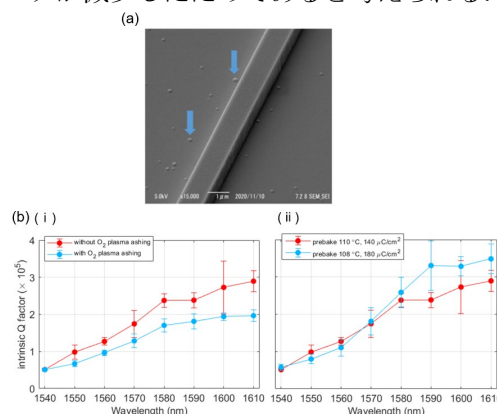


図 1 : (a) SiN 導波路の SEM 画像. (b) (i) または(ii)を導入したデバイスの広域波長の平均 Q 値.

②表面粗さ低減

CMP (Chemical Mechanical Polishing) 研磨を導入することで SiN 導波路の表面粗さを低減し、Q 値が向上可能かを検討した。図 2(a) の Q 値データを見ると、ほとんど Q 値が変わらず製造誤差によって若干 Q 値が下がっているだけであった。そこで AFM (原子間力顕微鏡) で表面粗さを測定し (図 2(b)) 表面粗さによる Q 値を計算したところ表 1 のような結果であった。この結果から表面粗さは現状の Q 値の抑制源となっていないことが分かる。

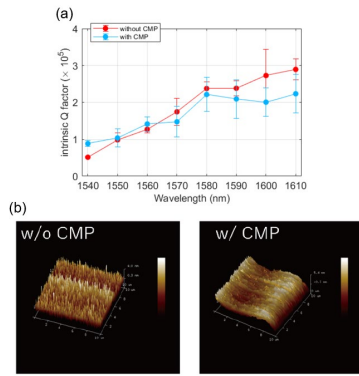


図 2 : (a) CMP を導入したデバイスの広域波長の平均 Q 値. (b) AFM のトポグラフィ.

表 1 : 研磨の有無に対する表面粗さによる Q 値

Sample	RMS (σ (nm))	Correlation length (L_c (μ m))	Loss (dB/cm)	Q factor
without CMP	0.8875	0.2893	0.25	1.5×10^6
With CMP	1.158	24.13	0.015	2.5×10^7

③残留水素結合基の低減

上記の結果で短波長側の Q 値が特に変化していなかったことから膜内残留水素結合基による吸収損失が支配的であると考えた. そこでエッチング後に窒素環境下, 1050°C でアニールを行った. アニール時間ごとの Q 値を図 3 に示す. この結果を見ると, 波長による Q 値の差がなくなったことから 3 時間で十分に水素結合基による吸収は十分に低減できていると言え, 時間が多くなると熱ダメージによる微細な欠陥が導波路に発生し Q 値が低下する可能性があると言える. 3 時間のアニールを行った共振器は高いもので 5×10^5 を超える Q 値が得られた.

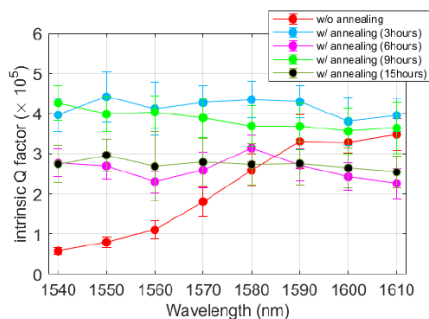


図 3 : アニールを導入したデバイスの広域波長の平均 Q 値

4. 結論と今後の展望

Hot-wire CVD 法で成膜した厚膜 SiN 膜 (750 nm) を用いて, CMOS 互換性のあるプロセスによって, 光リング共振器を作製した. 光通信波長帯において FSR ~ 400 GHz, $Q_{\text{int}} > 5 \times 10^5$ が観測できた. そして作製した共振器を用いてマイクロコムの発生も観測できた (図 4). この時 100 mW 入力では (a) primary comb の状態, 500 mW 以上の入力では (b) フラットトップな MI コムの状態が観測できた.

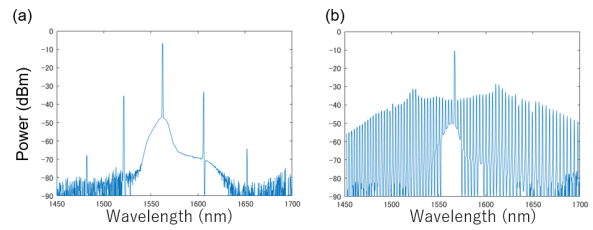


図 4 : (a) 100 mW, (b) 500 mW 入力した際のマイクロコム.

この共振器でソリトンコムが発生可能かを [3] を基に検討すると, Q 値に対する群速度分散の異常分散性が不十分であると結論付けられる. そのため今後の展望としては, さらなる共振器 Q 値の向上のために導波路側壁粗さ低減に向けたドライエッチング最適化, よりマイクロマスクを低減させるための EB ベースドース量とレジストベイク温度の最適化, リングと導波路間の気泡削減のためにオーバーラッド層堆積の最適化が必要となると考えられる. また, Q 値の向上とは別に SiN 膜の堆積時の組成比を最適化させるかリング形状を変化させることで共振器の分散をより強い異常分散とする必要があると結論付けられる.

参考文献

- [1] M. H. P. Pfeiffer, C. Herkommer, J. Liu, T. Morais, M. Zervas, M. Geiselmann, and T. J. Kippenberg, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics 24, 1–11 (2018).
- [2] W. A. Lanford, and M. J. Rand, J. Appl. Phys. 49, 2474–2477 (1978).
- [3] Shun Fujii, Shuya Tanaka, Tamiki Ohtsuka, Soma Kogure, Koshiro Wada, Hajime Kumazaki, Shun Tasaka, Yosuke Hashimoto, Yuta Kobayashi, Tomohiro Araki, Kentaro Furusawa, Norihiko Sekine, Satoki Kawanishi and Takasumi Tanabe, Opt. Express 30, 1351–1364 (2022)

FPGA を用いた散逸性カーソリトンの発生自動化に向けた制御動作の検討

菅原 漱人(M1), 熊崎 基

散逸性カーソリトンはその安定性や広い帯域から様々な報告がなされている。応用実験を効率的に行うためには散逸性カーソリトンを手軽に発生させる必要がある。本報告では、散逸性カーソリトンの発生を容易にするために FPGA を用いた自動化を目標に、FPGA の動作の検討を行ったことを報告する。

キーワード：FPGA, 散逸性カーソリトンコム, 微小光共振器

1. 背景

微小共振器における散逸性カーソリトン(以下、ソリトンコム)[1]は、位相同期などの高い安定性や広い帯域、共振器の小ささに起因する繰り返し周波数の高さなど様々な優れた特性を持っている。この特性から、波長分割多重通信 [2]や LiDAR 用の光源 [3]など応用についても多種多様なものが考えられている。しかし、ソリトンコムが発生する瞬間に共振器内部のパワーが減少してしまうため、共振器が急激に冷やされてソリトンコムが消えてしまう。この特性から、ソリトンコムの安定した発生には内部パワーを補償するための所定の手順が必要であることが課題である。発生の手順は大きく二つの手順に分けることができる。ソリトンコムの発生と発生したソリトンコムの安定化である。ソリトンコムの発生手法はいくつかの方法が考えられている。代表的な発生方法としては、ポンプ光を素早くスイープすることによってソリトンコムが発生するまでの共振器の温度変化を抑えるファストスキャンと呼ばれる方法 [1]や 2 つのレーザを用いてソリトンコム発生時の内部パワーの変動を補償する方法 [4]などが報告されている。本研究では主にファストスキャンの方法を用いてソリトンコムの発生を行っている。ソリトンコムはポンプ光の波長と共振周波数との差を表すデチューニングの変動が大きいとすぐに消滅してしまうため、ソリトンコム発生後はデチューニングの安定化が必要になる。デチューニングの安定化は Pound-Drever-Hall (PDH) 法 [5]という方法で達成される。ソリトンコム発生時のモード図を図 1 に示す。

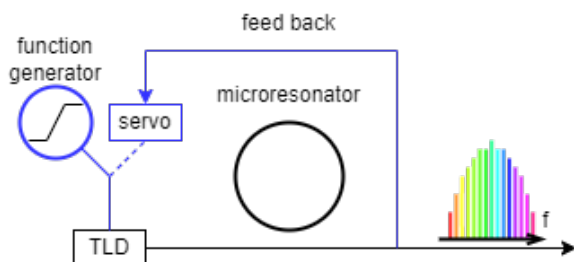


図 1 ソリトンコム発生時のモード図。まずファンクションジェネレータによってレーザをスイープしたのちに信号を切り替えて安定化させる。TLD: tunable laser diode.

現状の課題として、発生と安定化が別々に行われているという点が挙げられる。これにより、それぞれの操作を手作業でつなげることが必要になる。つまり、ソリトンコムの発生を確認し、ソリトンコムが消える前に安定化をしなければならない。この方法では狙ったソリトンコムを発生させるのに手間がかかる。そこで、field-programmable gate array (FPGA) という、自由に設計できるデジタル回路のチップを用いて、2 つの処理を自動化することを目指した。信号発生機能と制御器の機能を一つの機器に集約することで、ソリトンコムの発生を自動的に検知して安定化状態にすぐに移行することが可能となり、ソリトンコム発生の手間を軽減することができる。

2. 使用した機器

本研究では redpitaya 社が製造・販売している STEMLab 125-14 という機器を使用した(図 2)。FPGA はデジタル回路であるため、フィードバック制御に必要なアナログ入出力のためにアナログデジタルコンバータ(analog-to-digital converter: ADC)とデジタルアナログコンバータ(digital-to-analog converter: DAC)がそれぞれ必要となる。STEMLab 125-14 は FPGA と同基板上に DAC と ADC が搭載されており、購入してすぐにアナログ制御器として使用することができる。搭載しているチップは Xilinx 社製 Zynq 7010 を搭載している。このチップは FPGA とプロセッサが 1 つにまとめられており、プロセッサ上で動作する Linux を経由することで FPGA を制御することが可能となっている。ADC は Analog devices 社製の LTC2145-14 を搭載している。チャンネルは 2 つあり、電圧のレンジは ± 1 V で分解能は 14 bits である。DAC は Analog devices 社製の AD9767 を搭載している。こちらも 2 チャンネルで電圧のレンジは ± 1 V、分解能は 14 bits である。

3. 動作確認

基板全体の動作確認を行うため、STEMLab-125-14 に付属するソフトウェアを用いて sin 波の出力を行った。出力波形を図 2 に示す。出力はチャンネル 1 の

みで行ったが、チャンネル 2 から同様の波形が出力されていることが確認でき、2 つのチャンネル間でのクロストークがあることが分かった。このクロストークは同時に出力をした際に双方の波形がゆがむ程度大きいので、この基板上において実質的に使用できるチャンネルは 1 つに制限される。

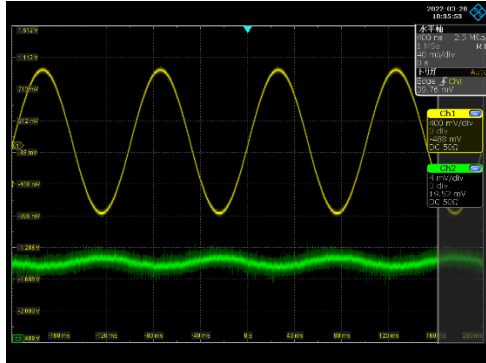


図 2 STEMLab-125-14 の出力波形。黄色と緑の波形がそれぞれ チャンネル 1, チャンネル 2 の出力波形を表す。

4. PID 制御

図 3 (a) の回路を用いて FPGA を用いた PID 制御の動作確認を行った。PID 制御のプログラムはオープンソースのプロジェクトである PyRPL [6]を用いた。このソフトウェアはオシロスコープやネットワークアナライザ、フィードバック制御など多数の機能を利用することができる。制御の確認として、外部入力信号と FPGA の出力を加算回路によって合成しエラー信号として利用した。入力信号にステップ信号を入力して制御対象のエラーシグナルがどのように変動するかを確かめた。PID 制御におけるパラメータは次のとおりである。P = $-24/(1024)$, I = -53 (64 μ s), D = -57 (7.5 ns)。測定結果を図 3 の(b), (c)に示す。制御をオフにしている状態ではエラーシグナルは入力信号と同様の動きをしているが、制御をオンにした状態ではエラーシグナルが一定値になるように動き、フィードバック制御が確認できた。

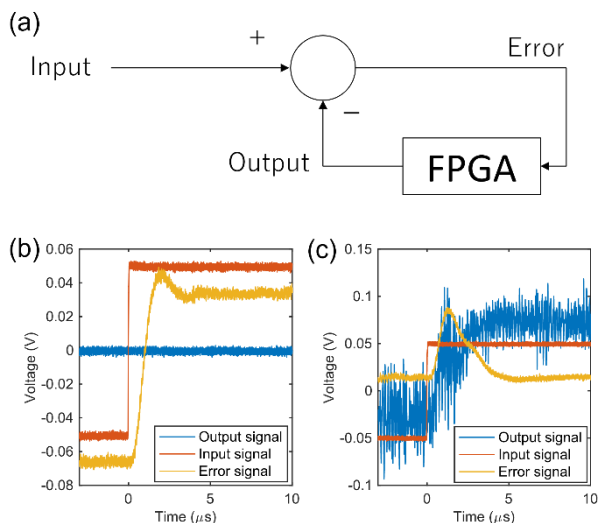


図 3 (a) PID 制御動作確認の模式図。 (b) フィードバック制御なしでの各信号の挙動。 (c) フィードバック制御ありでの各信号の挙動。

参考文献

- [1] T. Herr, V. Brasch, J. D. Jost, C. Y. Wang, N. M. Kondratiev, M. L. Gorodetsky, and T. J. Kippenberg, *Nature Photonics* **8**, 145–152 (2014).
- [2] 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, *Nature* **546**, 274–279 (2017).
- [3] 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, *Science* **359**, 887–891 (2018).
- [4] S. Zhang, J. M. Silver, L. Del Bino, F. Copie, M. T. M. Woodley, G. N. Ghalanos, A. Ø. Svela, N. Moroney, and P. Del’Haye, *Optica* **6**, 206 (2019).
- [5] R. W. P. Drever, J. L. Hall, F. V. Kowalski, J. Hough, G. M. Ford, A. J. Munley, and H. Ward, *Appl. Phys. B* **31**, 97–105 (1983).
- [6] L. Neuhaus and S. Deleglise, <https://pyrpl.readthedocs.io/en/latest/>.

逆テーパ構造を用いた Si 導波路と SiN 導波路の接合に関する研究

西端 諒 (B4)

SiN 微小光共振器を用いた Si 光集積回路の実現には、異種材料からなる光周波数コム光源とチップの接合が不可欠であるが、既存の接合法を用いて光周波数コム光源を十分高い効率で導波することは難しい。本研究では、高効率な光周波数コム光源の伝搬が可能となる異種材料の接合法として逆テーパ構造を検討すると同時に、微小導波路の解析法について比較検討を行った。

キーワード: Si 導波路, SiN 導波路, 逆テーパ構造, BPM, FEM, FDTD 法

1. 背景

現在シリコンフォトニクスにおいてシリコンナイトライド(SiN)を用いた微小光共振器が光周波数コム光源として注目を集めている。この微小光共振器を光周波数コム光源として使用する際、光集積回路上で SiN 導波路と Si 導波路を接合する必要があるが、異なる材料を用いた導波路間では導波路の幅や厚み、導波光のモード形状が異なり、接合部での屈折率差も大きくなるため、単純にそれらを繋ぎ合わせるだけでは十分な接合効率が得られない。したがって、接合時には効率の良い構造を用いることが求められる。既存の接合法として Photonic Wire Bonding^[1]や Multilayer^[2]といった方法が存在するが、光周波数コムの持つ高いパワーや、導波路の膜厚の関係上、SiN 微小光共振器を用いる光集積回路での使用には適さない。そこで、導波路幅が徐々に狭くなるテーパ構造を用いて導波光のモード形状や実効屈折率を操作し接合効率を高めることが可能な、逆テーパ構造について、複数の解析法を用い検討を行った(Fig. 1)。逆テーパ構造は比較的単純な構造のため作成が容易であり、SiN 微小光共振器を用いた Si 光集積回路上で使用可能である。

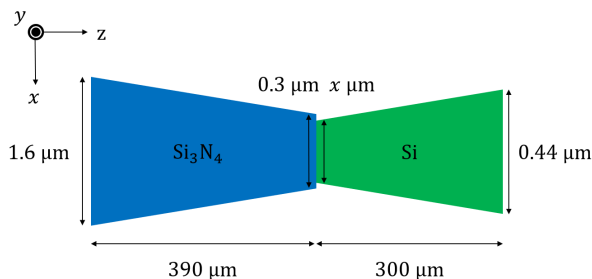


Fig. 1. シミュレーションに使用したモデル。
(SiN 導波路厚: 0.8 μm , Si 導波路厚: 0.22 μm)

2. シミュレーション

本研究では導波路端面のモード解析と、光波伝搬解析についてシミュレーションを行った。進行波に対する導波路のモード形状や実効屈折率はマクスウェル方程式や境界条件を用いて記述可能だが、解析解を求めることはできない。このため、近似解を求めるための様々な方法が存在する。シミュレーションでは導波路端面のモード解析に三層スラブ近似、有限要素法(FEM)を、光波伝搬解析に時間領域差分(FDTD)法を用いた。

三層スラブ近似計算には MATLAB を、FEM, FDTD 法の計算には Rsoft を使用した。モード解析では導波路幅を変化させた際の実効屈折率、TE0 モードの形状を求め、光波伝搬のシミュレーションでは Fig. 1 に示したモデルを用いて接合部の Si 導波路幅を変化させた際の結合効率を求めた。また、FDTD 法は計算量が多いため接合部から z 方向に $\pm 10 \mu\text{m}$ 離れた領域をシミュレーション領域とし、入射光には FEM より求めた TE0 モードを用いた。

3. シミュレーション結果

三層スラブ近似、FEM から算出した Si/SiN 導波路における実効屈折率と導波路幅の関係を Fig. 2 に示す。

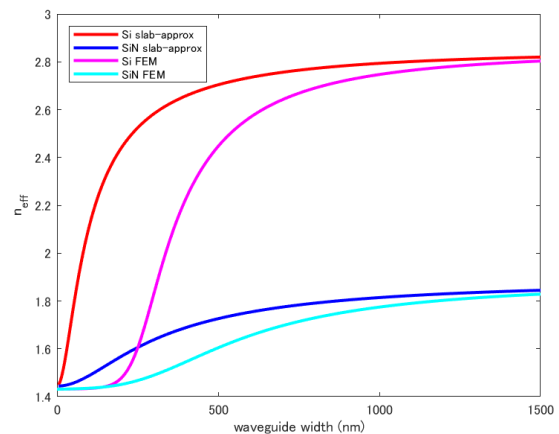


Fig. 2. 実効屈折率と導波路幅の関係

FDTD 法を用いて求めた結合効率、FEM を用いて求めた端面モードの重なり、FEM を用いて求めた Si/SiN 導波路における実効屈折率と、Si 導波路幅の関係を Fig. 3 に示す。結合効率は Si 導波路幅が 200 nm となる際、最大値 0.967 をとった。

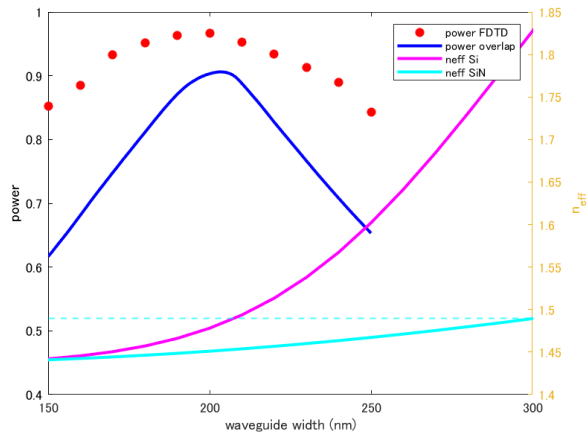


Fig. 3. 結合効率, モード重なり, 実効屈折率と Si 導波路幅の関係(FDTD 法, FEM)

FEM を用いて求めた導波路端面での TE 基本モードが持つポインティングベクトルの様子を Fig. 4 に示す.

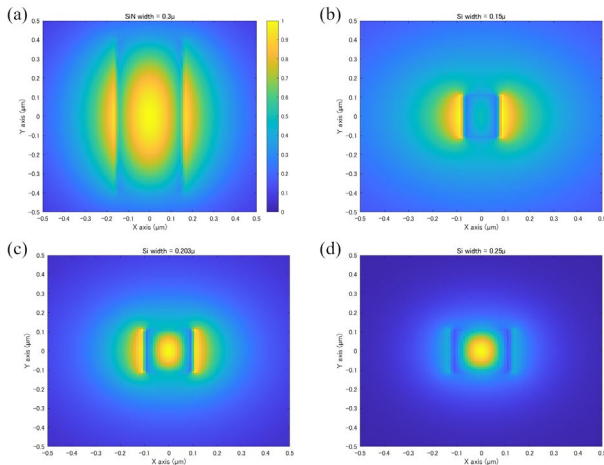


Fig. 4. TE0 モードの持つポインティングベクトル
(a). SiN 導波路(幅 300 nm), (b). Si 導波路(幅 150 nm),
(c). Si 導波路(幅 203 nm), (d). Si 導波路(幅 250 nm)

4. 考察

Fig. 2 では, 三層スラブ近似により得られた実効屈折率は導波路幅が十分大きい領域では FEM と変わらない値をとったが, 導波路幅が $1\ \mu\text{m}$ 以下の領域では大きく異なる結果を示した. これは, 三層スラブ近似では導波路内に光が十分閉じ込められていると仮定してモードを計算するが, 導波路幅が狭い場合基本モードは導波路外に主に存在する(Fig. 4)ため, 前提が満たされないことが主な原因と考えた.

Fig. 3 では, 結合効率が最大となる場合, 接合面での基本モードの重なりが最大となる場合, 及び接合面での実効屈折率が一致する場合のそれぞれにおける Si 導波路幅がほぼ一致した. モード形状や実効屈折率は導波路の屈折率に影響されるが, 導波路幅が狭い場合モードは導波路外(クラッド)に主に存在する(Fig. 4). 本研究で接合した導波路のクラッドはどちらも SiO_2 であり屈折率が変化しないため, 実効屈折率が一致する場合とモード重なりが最大となる場合

が一致し, 結果として光波伝搬効率が最大となる場合も一致したと考えた. また, FDTD 法より求めた結合効率は FEM で解析したモードの重なりと比べて常に高い値をとった. この違いから, 逆テーパ構造において結合する光は, 端面でモードが重なる光のみではないことが分かった. これは, 逆テーパ構造において Si 導波路幅が太くなるにつれて導波路のモードが変化するため, 端面では導波路のモード外に存在する光が, 導波につれて再結合することが原因だと考えた.

5. 結論

求めた実効屈折率とモードの結果より, 三層スラブ近似はモードが導波路外部にも存在する微小導波路の解析には不向きであることがわかった.

導波路幅が微小である際, 実効屈折率が一致する場合と, モードの重なりが最大となる場合は極めて近くなり, 結果として結合効率が最大となる構造もそれらと近いものとなることがわかった.

逆テーパ構造の光波伝搬シミュレーションより, 接合部で導波路外に染み出した光が導波する過程で再結合の様子が見られた.

したがって, 微小導波路の接合を解析する際, FEM を用い接合面での実効屈折率やモード形状が一致する構造を検討し, 次に結合効率が最大となるような構造について FDTD 法を用いて求めるという段階を経ることで, 効率よく正確な結果を得ることができると考えた.

参考文献

- [1] N. Lindenmann, *et. al.*, “Connecting Silicon Photonic Circuits to Multicore Fibers by Photonic Wire Bonding”, *J. Light. Technol.* **33**, 755-760 (2014).
- [2] W. D. Sacher, *et al*, “Tri-layer silicon nitride-on-silicon photonic platform for ultra-low-loss crossings and interlayer transitions”, *Opt. Express* **25**, 30862-30875 (2017)

散逸性カーソリトンを用いた時分割多重通信

谷川 幸彌 (B4) 田坂 駿 (M2) 川西 悟基

微小光共振器により発生するマイクロコムは様々な分野への応用が期待されている。マイクロコムをモード同期したパルスは散逸性カーソリトンと呼ばれ、低ノイズかつ GHz–THz の高い繰り返し周波数を持つため、特に応用が検討されている。報告者らはこの安定したパルス光源を時分割多重 (TDM) 通信に応用し、2 チャンネルの多重化を達成した。また多重化したパルス列から任意のチャンネルを選択して受信することが可能であることを明らかにした。

キーワード：微小光共振器，マイクロコム，散逸性カーソリトン，時分割多重通信

1. 序論

微小光共振器とは、光の共振を利用して光を閉じ込め蓄積する非常に小さなデバイスを指す。微小光共振器の 1 つにウィスパーリング・ギャラリー・モード (WGM: Whispering Gallery Mode) 共振器があり、円周が波長の整数倍と等しい場合、光が共振する。

微小光共振器を利用して光周波数コムを発生させることができる。光周波数コムは楕状に等間隔なスペクトルを持ち、時間領域では高繰り返し周波数を持つ光パルス列となる。微小光共振器によって発生する光周波数コムをマイクロコムと呼び、2007 年にその発生が初めて報告された[1]。マイクロコムをパルスとして発振させるためにはモード同期を行う必要があり、モード同期したマイクロコムを散逸性カーソリトン (DKS: Dissipative Kerr Soliton) またはソリトンコムと呼ぶ。レーザ波長を共振波長の短波長側から長波長側へ掃引することで DKS は発生する。DKS は測距[2]や分光[3]、光シンセサイザ[4]など様々な分野に応用される。

特に光通信への応用において、DKS は低ノイズかつ高精度な波長間隔を持つため、波長分割多重 (WDM: Wavelength Division Multiplexing) 通信への応用が有力である[5]が、GHz–THz の高繰り返しパルス光源として捉えると時分割多重 (TDM: Time Division Multiplexing) 通信への応用も考えられる。本研究では、フッ化マグネシウム微小光共振器を用いて散逸性カーソリトンが発生させ、2 チャンネルによる多重化を行った。

2. 散逸性カーソリトンの発生

散逸性カーソリトンを持続的に発生させるためには、レーザ波長を掃引しソリトンステップが観測できる領域においてレーザ波長をロックする必要がある。そのため位相変調器を用いてレーザ波長にサイドバンドを立て、サイドバンドを共振波長にロックすることによりレーザ波長をソリトン領域で安定化させる Pound-Drever-Hall 法と呼ばれる手法を用いた。Fig. 1 に MgF_2 微小光共振器を用いて発生させたソリトンコムのスペクトルを示す。繰り返し周波数は 9.6 GHz であり、スペクトルは sech^2 の包絡線を持つ。ソリトンコムに含まれる励起波長を Fiber Bragg Grating により除去し、励起波長を除いたコムを伝送に使用した。

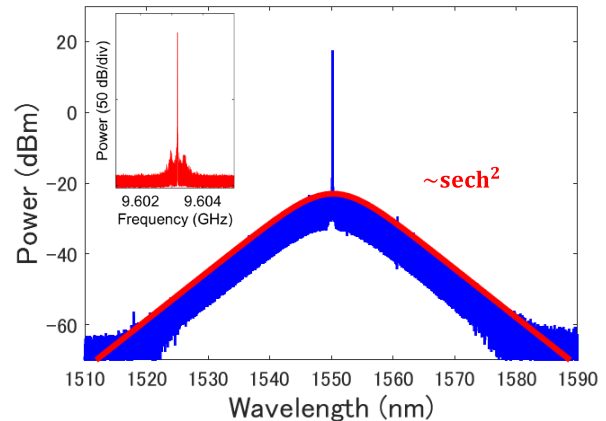


Fig. 1 シングルソリトンコムの光スペクトル。赤い線は sech^2 の包絡線フィッティング。挿入図は繰り返し周波数 9.6 GHz を表す RF スペクトル。

3. 外部入力によるクロック周波数の同期

TDM 通信を行う際、発生したソリトンコムと等しい繰り返し周波数による変復調および信号抽出を行う必要があるため、Fig. 2(a)に示す実験セットアップを構成しクロック周波数の同期を検証した。コムをトリガ用と観測用に分離し、トリガ用の信号を受光しパルスパターン発生器 (PPG: Pulse Pattern Generator) に入力した。PPG から出力された信号はエラーディテクタを介しサンプリングオシロスコープのトリガに入力した。観測用の信号は広帯域のフォトディテクタ (PD: Photo Detector) により受光しパルス波形を観測した。観測したパルス波形を Fig. 2(b)に示す。パルス間隔は 103.7 ps となり、これは繰り返し周波数 9.6 GHz に対応する。この結果から、ソリトンコムの繰り返し周波数を受信側で同期させることが可能であることが確認された。

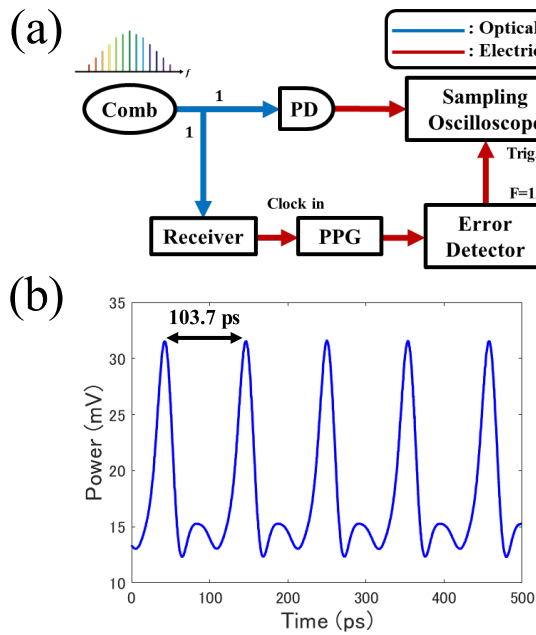


Fig. 2(a) 受信側にてクロック周波数の同期を行う実験セットアップ. PD: フォトディテクタ. PPG: パルスパターン発生器. (b) サンプリグオシロスコープで観測したソリトンコムのパルス波形. 繰り返し時間は 103.7 ps であり, 繰り返し周波数 9.6 GHz に相当する.

4. 無多重伝送結果

2 チャンネルの多重化を行う前段階として, ソリトンコムを分波・合波せずに変調し伝送する実験を行った. Fig. 3(a)に実験セットアップを示す. 先の実験と同様にコムをトリガ用と伝送用に分離し, 伝送用の信号をエルビウム添加ファイバ増幅器 (EDFA: Erbium-Doped Fiber Amplifier) により増幅し, 光遅延線 (Delay Line) にて遅延を調整したのち強度変調器で変調した. 強度変調するための信号は PPG から出力されたものを用いた. この際, コムの繰り返し周波数を PPG に入力することにより変調周波数の同期を行った. 変調した信号は 40 km の分散シフトファイバ (DSF: Dispersive-Shifted Fiber) を通過し受光されたのち, エラーディテクタにより符号誤り率 (BER: Bit Error Rate) を測定した. Fig. 3(b)に BER の測定結果を示す. 青いプロットが Back-to-back (B2B) を, 緑色のプロットが 40 km の伝送結果を示す. B2B および 40 km の双方においてエラーフリー (BER < 10^{-9}) が観測された. また 40 km の伝送においてパワーペナルティがほぼ観測されなかった. この結果より, 分散シフトファイバを用いることによりソリトンコムのパルス伝送が可能となることが確認できた.

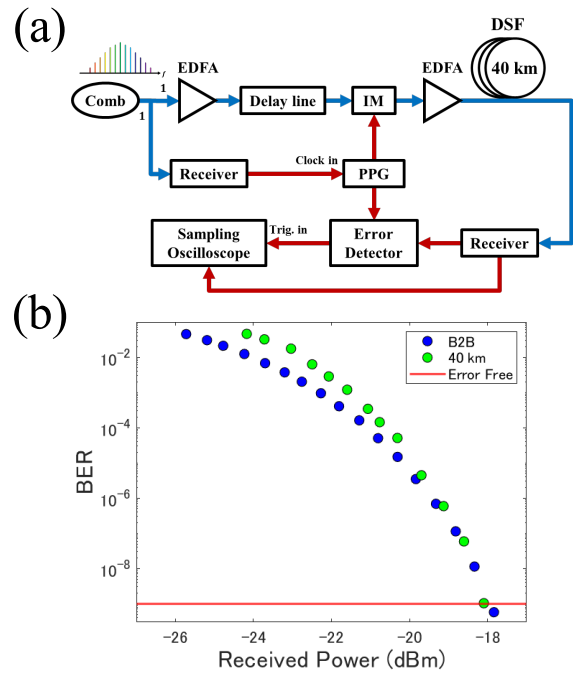


Fig. 3(a) ソリトンパルス信号の無多重伝送実験セットアップ. EDFA: エルビウム添加ファイバ増幅器. IM: 強度変調器. PPG: パルスパターン発生器. DSF: 分散シフトファイバ. (b) エラーディテクタによる BER 測定結果. 青のプロットは back-to-back, 緑のプロットは 40 km 伝送の結果をそれぞれ表している.

5. 2 チャンネルの多重化

Fig. 4(a)に 2 チャンネルの多重化を行う実験セットアップを示す. 伝送用に分離したソリトンコムを EDFA で増幅し, 3 dB カプラにより 2 チャンネルに分波した. 一方のチャンネルは変調を行わず, 他方のチャンネルのみ強度変調したのち, 再びカプラにより 2 チャンネルを合波した. Fig. 4(b)に多重化した波形の測定結果を示す. 振幅が大きい波形が無変調成分, 振幅が小さい波形が変調成分である. 無変調成分と変調成分が交互に並んでいる様子が分かる. 多重化したパルス列を強度変調器に入射させ, 光遅延線を調整することにより変調したチャンネルを選択し透過させた. チャンネル選択した信号を PD で受光したのちアイパターンを測定した. その結果を Fig. 4(c)に示す. 僅かに開いたアイが観測できたが, BER の測定が可能であるほどのアイパターンではなかった. アイの下側の波形は EDFA による ASE ノイズであると考えられる.

Kippenberg and C. Koos, Nature **546** 274–279 (2017).

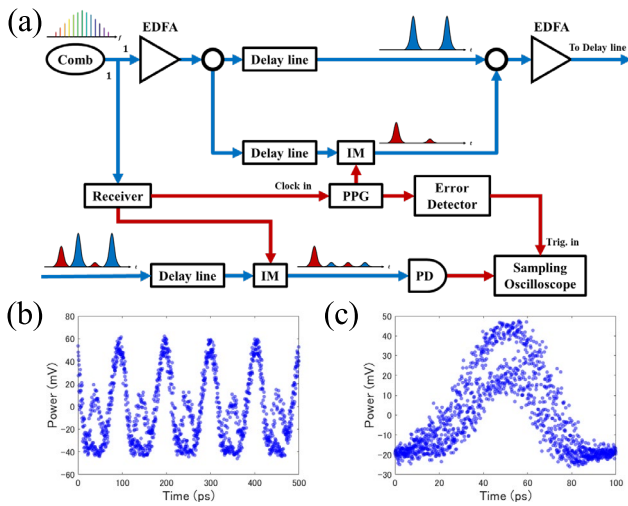


Fig. 4(a) 2 チャンネル多重化の実験セットアップ. EDFA: エルビウム添加ファイバ増幅器. IM: 強度変調器. PPG: パルスパターン発生器. PD: フォトディテクタ. (b) サンプリングオシロスコープで観測した無変調パルス列と変調パルス列の多重結果. (c) 強度変調器により変調したパルス列のチャンネルを選択し測定したアイパターン.

6. 結論

MgF₂ 微小光共振器を用いて繰り返し周波数 9.6 GHz のソリトンコムを発生させ、クロック周波数の同期およびエラーフリーの無多重伝送を達成した. また 2 チャンネルの多重化を行い任意のチャンネルを選択し受信することが可能であることを明らかにした. しかし, 2 チャンネル多重伝送において BER を測定するに値するアイパターンを観測することができなかったため, 今後はバンドパスフィルタの導入等ノイズを除去する検証を行う必要がある.

参考文献

- [1] P. Del’Haye, A. Schliesser, O. Arcizet, T. Wilken, R. Holzwarth and T. J. Kippenberg, Nature **450** 1214–1217 (2007).
- [2] 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, Science **359**, 887–891 (2018).
- [3] Q. Yang, M. Suh, K. Y. Yang, X. Yi, and K. J. Vahala, Science **354**, 600–603 (2016).
- [4] D. T. Spencer, T. Drake, T. C. Briles, J. Stone, L. C. Sinclair, C. Fredrick, Q. Li, D. Westly, B. R. Ilic, A. Bluestone, N. Volet, T. Komljenovic, L. Chang, S. H. Lee, D. Y. Oh, M. Suh, K. Y. Yang, M. H. P. Pfeiffer, T. J. Kippenberg, E. Norberg, L. Theogarajan, K. Vahala, N. R. Newbury, K. Srinivasan, J. E. Bowers, S. A. Diddams and S. B. Papp, Nature **557** 81–85 (2018).
- [5] 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.

マイクロコムにおけるデチューニングとノイズの測定

木暮 蒼真 (M1)

マイクロコムとは、高い Q 値を持つ微小光共振器に光を閉じ込め、連続的に四光波混合を起こすことで発生する光周波数コムのことを指す。共振器が小さいため、GHz から THz オーダーの非常に高い繰り返し周波数を持つ。共振波長とポンプ光の波長の差を表すデチューニングと呼ばれるパラメータによってマイクロコム状態は決定される。そこで、デチューニングの測定と、マイクロコムノイズを組み合わせて測定した。

キーワード：微小光共振器、マイクロコム、モジュレーションインスタビリティコム

1. 序論

光周波数コムとは、周波数領域でスペクトルが等間隔に並んでいるような光のことを指し、櫛(comb)のようなスペクトルを持つことからこう呼ばれている。従来の光周波数コムにはチタンサファイアモードロックレーザや、ファイバコム、電気光学変調コムなどがあるが、繰り返し周波数の低さ、小型化などに課題があった。しかし、2007 年には、微小光共振器内に光を閉じ込め連鎖的に四光波混合を引き起こし発生させるマイクロコムが登場した[1]。微小光共振器というプラットフォームを用いていることから、超小型、高繰り返し周波数というメリットを持つため、可能性を秘めた光源として研究が行われてきた。

マイクロコムには、チューリングパターンコム、モジュレーションインスタビリティ (Modulation instability; MI) コム、ソリトンコムなどいくつかの状態が存在し[2]、光源としての特性が大きく変化する。ソリトンコムは非常に低ノイズな光を多数得られるため、光通信、電気信号発生、デュアルコム分光など、多くの応用に用いられている。一方、ソリトンコムの平均パワーは入力パワーに限らず一定であり、高効率な発生が難しい。一方、MI コムはソリトンコムに比べて高ノイズではあるが、高効率な発生が可能である。田邊研究室では、そこに注目して、ソリトンコムと MI コムをそれぞれ光伝送用の光源として使い、実際に比較を行った研究結果を論文として報告した[3]。2 種類の MI コム(phase1, 2)を用意し、そこからコム線を切り出して伝送実験を行ったところ、MI コム phase1 ではソリトンコムと同程度のビットエラーレート(Bit error rate; BER)で伝送できたのに対して、MI コム phase2 では BER が 10^{-2} を下回らず、光源として向いていないことが判明した。

これらの MI コムの状態は、共振波長とポンプ光の波長の相対的な関係、いわゆるデチューニングに依存する。微小光共振器では、熱によって共振波長が長波長側へシフトするため、一般に共振波長の短波長側からポンプ光を入射する。このように、共振波長がポンプ光より長波長側に存在する状態のデチューニングを、ブルーデチューンと呼ぶ。この時、チューリングパターンコムや MI コムが発生する。さらにスイープを続けると、ポンプ光波長が共振波長を追い越したレッドデチューンと呼ばれる状態になり、ソリトンコムが発生する(図 1)。

前述の MI コム phase1 と 2 の違いは、このデチュー

ニングにあり、phase2 はデチューニングが小さく、より共振器内パワーが大きくなっている。そのため、より四光波混合が活発に発生し、ノイズが多く発生していると考えられる。しかし、具体的にどの程度のデチューニングであれば MI コムのノイズが問題にならないのか、実際に検証した研究は少ない。

そこで今回、マイクロコムのデチューニングを測定する手法と、ノイズの測定を組み合わせた実験を行ったので、ここに報告する。

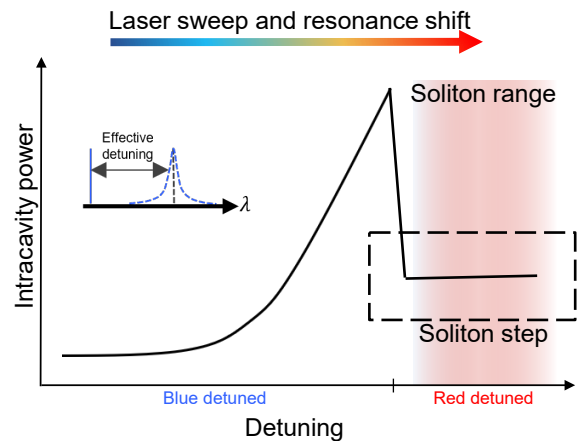


図 1：デチューニングと共振器内パワーの関係。ブルーデチューンではチューリングパターンコムやモジュレーションインスタビリティコムなどが発生し、レッドデチューンではソリトンコムなどが発生する。

2. デチューニング測定手法

まず初めに、デチューニングを測定する方法について紹介する。なお、「デチューニング」とは、熱によってシフトした共振波長と、ポンプ光の波長の差、いわゆる実効的デチューニング(Effective detuning)のことを指している。

デチューニングの測定方法はいくつか存在するが、ここではネットワークアナライザ(Network analyzer; NA)を用いた方法を用いる [4]。元々はソリトンコムの発生の確認と、そのデチューニングの測定のために開発された手法であるが、MI コムのデチューニングの測定にも応用が可能である。ここでその原理を簡単に説明したい。

簡略化したセットアップを図 2 に示す。ポンプ光は NA からの RF 信号によって位相変調された後、EDFA(Erbium doped fiber amplifier)によって増幅され、共振器に入射する。共振器からの透過光はフォトデ

イテクタ(Photo detector; PD)によって受光され、発生した電気信号を NA に入力する。

ポンプ光を $A \exp i\omega t$, NA からの RF 信号を $B \sin \Omega t$ とすると、位相変調されたポンプ光は $A \exp(i\omega t + B \sin \Omega t)$ となる。周波数領域では、ポンプ光から Ω だけ離れた両方にサイドバンドが立っている。この光をそのまま PD で受光したとしても、大きさが A^2 の直流成分しか発生しない。しかし、共振器を透過させた時、NA の出力周波数とデチューニングが一致すると、片方のサイドバンドが透過しなくなるため、もう一方のサイドバンドとポンプ光とのビートによる電気信号は最大となる。そのため、NA 上ではピークが観測される。つまり、NA 上で観測されるピークがデチューニングに対応している。なお、ソリトンコムが発生している時は、双安定性によって C -resonance と S -resonance と呼ばれる 2 個のピークが見られる。

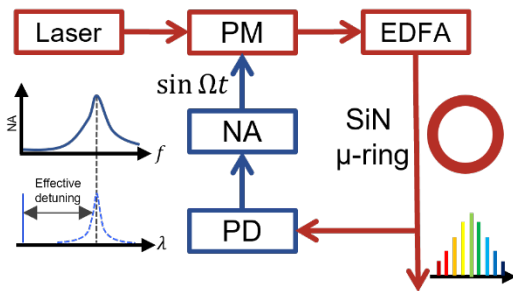


図 2 : ネットワークアナライザを用いたデチューニング測定の実験セットアップ。PM; Phase modulator, EDFA; Erbium doped fiber amplifier, NA; Network analyzer, PD; Photo detector.

3. マイクロコムの発生とデチューニング測定

今回、通信での応用を見据えてシリコンナイトライド共振器を用いた。共振器半径は $182 \mu\text{m}$, FSR 400 GHz で、導波路の厚みは 800 nm , 幅は $1.6 \mu\text{m}$ である。 Q 値は 1.5×10^6 であった(図 3)。

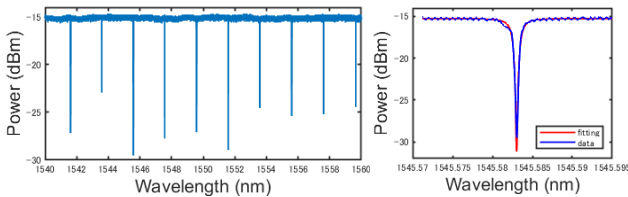


図 3 : 透過スペクトルとその拡大図。 Q 値は 1.5×10^6 であり、共振線幅でいうと、およそ 125 MHz となる。

デチューニング測定の結果と、発生したマイクロコムのスペクトルを図 4 に示す。デチューニングが小さくなるにつれ、MI コムが成長していく様子が見られる。

さらに、コム線の特徴を知るために、図 4 のマイクロコムから 1525 nm 付近のコム成分をバンドパスフィルターによって切り出し、ビートノイズと線幅の測定を行った。ここでいうビートノイズとは、コム線の強度の揺らぎのことを指す。同一縦モード内に、複数のコム線から四光波混合によって発生した光が存在することによって発生する。また、線幅測定には 2 km の遅延を与えた遅延自己ヘテロダイン法を用いた。結果を図 5 に示す。

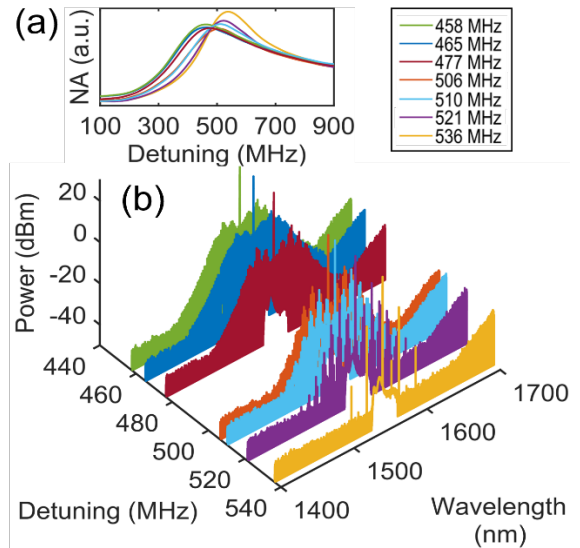


図 4 : (a) デチューニングの測定結果。(b) 発生したマイクロコムのスペクトル。デチューニングの大きさに応じてオフセットして表示している。

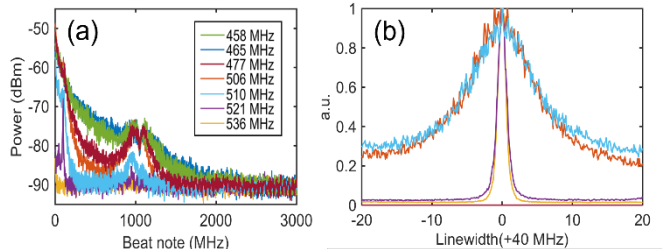


図 5 : (a) ビートノイズ測定結果。(b) 遅延自己ヘテロダイン法による線幅測定結果 (RBW: 1 MHz)。デチューニングが小さくなると、線幅は測定不可能なレベルで広がってしまう。

図 5(a)を見ると、デチューニングが 477 MHz と 506 MHz の時に、ビートノイズのフロアが上昇し始める。ここで、線幅の測定結果(図 5(b))を見ると、デチューニングが 506 MHz の時は線幅が 5 MHz 程度であるのに対して、 477 MHz では線幅が一気に広がっている。これらの結果から、今回の共振器ではデチューニングが 500 MHz より小さくなったあたりから、MI コムのノイズは大幅に悪化すると言えるだろう。

4. 結論

MI コムはデチューニングの大きさに応じて大きくノイズの特性が変わる。今回、ネットワークアナライザを用いたデチューニング測定とノイズを組み合わせ、デチューニングとノイズの測定を行った。今回の共振器では、デチューニングが 500 MHz より小さくなったあたりで、ノイズが急激に増加すると考えられる。

参考文献

- [1] P. Del'Haye, *et al.* Nature **450**, 1214 (2007).
- [2] T. Herr, *et al.* Nat. Phot. **8**, 145 (2014).
- [3] S. Fujii, *et al.* Opt. Express **30**, 1351-1364 (2022).
- [4] H. Guo, *et al.* Nat. phys. **13**, 94-103, (2017).

MgF₂ 微小光共振器によるマイクロコムを用いた WDM 伝送

田坂駿(M2) 谷川幸彌(B4)

微小光共振器を用いた光周波数コム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。その特徴を利用した様々な応用研究が報告されている。本研究では、MgF₂製の微小光共振器から発生させたマイクロコムに対して IM-DD 方式の WDM 伝送実験を行い、伝送特性を測定した。

キーワード：MgF₂、微小光共振器、WDM 伝送

1. 背景

光周波数コムは時間軸上では光パルス列となり、周波数軸上で厳密に等間隔に並んだ成分を有する光であり、いくつかの生成方法が存在する。微小光共振器が内部に強く光を閉じ込めることによって起こる非線形光学効果を生じる原理として得られる光周波数コムはマイクロコムという。微小光共振器によるマイクロコムは従来のモード同期レーザ等を利用する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、マイクロコムのモード同期[1]が実証されてから分光学[2]、光による検知と距離(LiDAR)[3]、惑星探査[4]等の様々な応用研究が報告されている。

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 WDM 伝送における応用研究も行われている。従来の WDM 伝送では多重化する数だけ光源が必要であったが、それをマイクロコムに置き換えることによって省電力化を図ることができる。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を用いた大容量な長距離伝送[5]を目標としているものであるが、データセンタ等の中距離伝送では低遅延性や信頼性、コストパフォーマンスが求められる。本研究では MgF₂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 MgF₂を共振器材料として選択し、中距離伝送での実用化に向けた MgF₂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 通信の実証実験を行い、伝送特性の測定を行った。

2. 実験方法

以下に実験の概略図を示す。本来、発生させたマイクロコムはフィードバック制御で安定化させる必要があるが、ここではその系を割愛する。

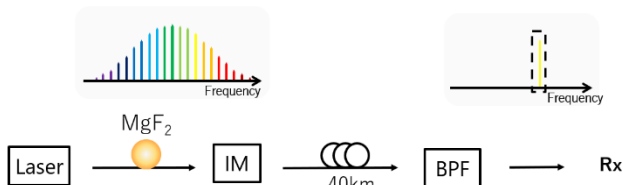


図1 実験概略図。マイクロコムを発生後に強度変調を施して 40 km 伝送させ、コム成分中から 1 本を切り出して受

光部で符号誤り(BER)とアイパターンを得る。BPF: バンドパスフィルタ。IM: 強度変調器。Rx: 受光部、トランシーバやエラー検出器が含まれる。

MgF₂微小光共振器により発生させたマイクロコムを WDM 伝送のキャリアとし EDFA(図中省略)で一旦増幅してから強度変調を施し、再び EDFA で増幅した後にファイバを 40 km 伝送させた。そして可変バンドパスフィルタの中心波長と帯域幅を調節して伝送したソリトンコムの成分の中から 1 本を切り出した後トランシーバで受光し、エラー検出器で符号誤り率(bit error rate; BER)を、サンプリングオシロスコープでアイパターンを取得した。BER の測定では、トランシーバの直前に可変アッテネータを設置して受光パワーを徐々に低くしていき、その都度で受光パワーと BER の値をモニターし、両者の関係を得た。また、BER 値が 10⁻⁹と以下となった時をエラーフリー伝送(優れた伝送特性)とした。

3. 実験結果

まず FSR が 9.6 GHz の MgF₂微小光共振器を用いて実験を行った。実験に利用したマイクロコムのスペクトルを以下に示す。

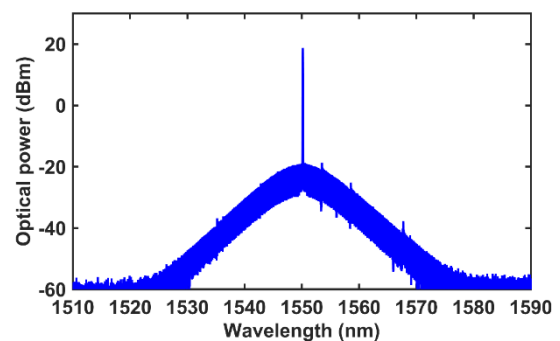


図2 FSR が 9.6 GHz の微小光共振器により発生させたマイクロコム。

波長 1,550 nm の光をポンプとして、C バンド全体をカバーするマイクロコムが得られた。なお、マイクロコムに強度変調を行う前に、ファイバブラッググレーティング(fiber Bragg grating; FBG)を用いてポンプ光のみを除去している。

波長 1550.330 nm のコム成分を切り出し、変調速度(ビットレート)を 7~10 Gbps の間で変化させたときの Back-to-back(40 km 伝送路を挟まず、変調光を直接受

光部に入力する)で測定した BER を次に示す。

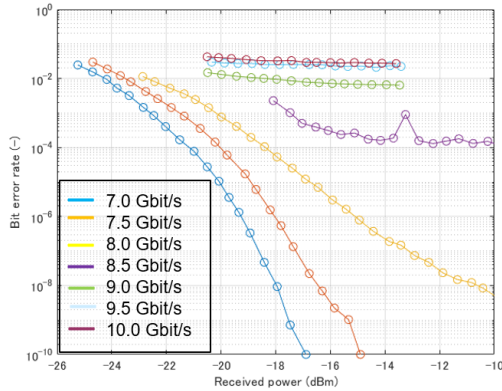


図3 FSR が 9.6 GHz の微小光共振器によるマイクロコムを異なる変調速度に変調して得られた Back-to-back の BER.

変調速度が 7.0 Gbps および 7.5 Gbps においてエラーフリー伝送を達成することができた。また、変調速度を大きくした際には隣接するコム線からのクロストークにより伝送特性が悪化した可能性が高いと考えられる。

次に FSR が 20.1 GHz の MgF_2 微小光共振器を用いて実験を行った。実験に利用したマイクロコムのスペクトルを以下に示す。

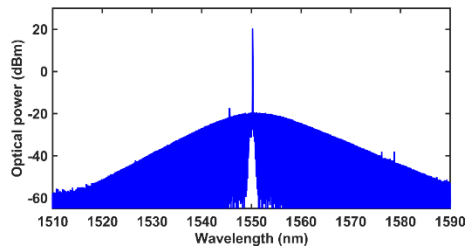


図4 FSR が 20.1 GHz の微小光共振器により発生させたマイクロコム。

変調速度(ビットレート)を 10 Gbps として、可変バンドパスフィルタの中心波長を動かして切り出すコム成分を変化させたときの BER とコム成分の波長 1548.020 nm において測定したアイパターンを次に示す。

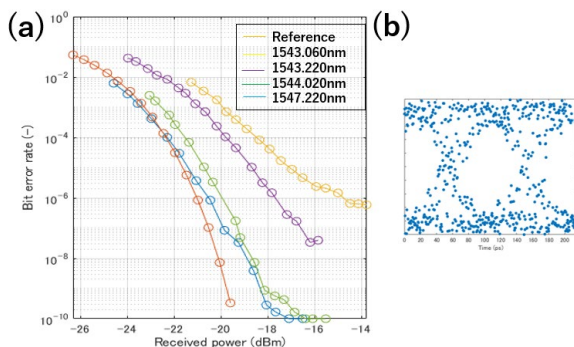


図5 (a) FSR が 20.1 GHz の微小光共振器によるマイクロコムを波長の異なるコム成分を切り出して得られた BER. 橙色で示した線は参照の為ポンプ光に対し Back-to-back で測定した BER である。(b) コム成分の波長

1548.020 nm において測定したアイパターン

図中青色で示した波長 1547.220 nm のコム成分を伝送した結果のように、複数の波長成分においてエラーフリー伝送を達成する事ができた。逆に、黄色で示した波長 1,543.060 nm のコム成分は BER が 10^{-6} 付近で止まっており、伝送特性が悪い事が分かる。伝送特性が悪化しエラーフリーを達成することができないコム成分は、コム成分のパワーが小さくなるポンプ波長から離れた波長成分と、ポンプ光の切り出しや ASE 雑音の影響を強く受けるポンプ波長に近い範囲において確認された。

4. 結論

FSR 9.6 GHz のマイクロコムではコム線1本あたりの変調速度 7 Gbps, FSR 20.1 GHz のマイクロコムではコム線1本あたりの変調速度 10 Gbps とした WDM 伝送においてエラーフリー伝送が達成された。それぞれコム線の間隔は 0.08 nm, 0.16 nm であることから、 MgF_2 微小光共振器による高密度でスペクトル効率の高い WDM 伝送の通信応用可能性を示すことができた。

参考文献

- [1] T. Herr et al., Nat. Photon. 8, 145-152 (2014).
- [2] M.-G. Suh et al., Science 354, 600-603 (2016).
- [3] P. Trocha et al., Science 359, 887-891 (2018).
- [4] M.-G. Suh et al., Nat. Photon. 13, 25-30 (2019).
- [5] P. Marin-Palomo et al., Nature 546, 274-279 (2017).

和田 幸四郎 (M2)

マイクロコムとは、微小光共振器を用いて発生させた、精密に等間隔な周波数スペクトルを持つ光周波数コム光源である。特にその各周波数成分が位相同期したものをソリトンコムと呼ぶ。通常ソリトンコムの発生のためには、可変周波数レーザを共振モードの高周波側から低周波数側に存在する特定の領域まで掃引する必要がある。本研究では、力学的周波数チューニングという手法を用いて、固定周波数レーザに対して共振モード自体を掃引し、ソリトンコムの発生を実現した。

キーワード: 微小光共振器, マイクロコム, ソリトンコム, 周波数チューニング

微小光共振器は、超高 Q 値かつ微小モード体積を有し、効率的に非線形光学効果を生じさせる光学素子である。特にマイクロコムの発生が注目されており、それは共振器に単一周波数光を入射した際に、四光波混合により発生する光コム光源である (Fig.1(a))。特にその各周波数成分が位相同期した状態をソリトンコムと呼び、繰り返し周波数が GHz ~ THz 帯域のパルスレーザとして様々な応用が期待されている [1]。

ソリトンコムの発生には様々なプラットフォームが存在するが、本研究では結晶共振器を用いた。というのも四光波混合の閾値は Q 値の二乗に反比例するため、理論的な Q 値が非常に高い結晶共振器を用いると、非常に低電力なソリトンコムの発生が期待できるためである。

またソリトンコムを発生する際に、共振器の共振モードに対して、その高周波側から低周波側に向かってレーザ周波数を掃引する必要がある。しかし実際の応用に向けたモジュール化を考えたとき、可変周波数レーザよりもフットプリントの小さい固定周波数レーザを用いた方が、原理的に不可能に思われる。そこで周波数チューニングという手法を用いる。

共振周波数は共振器の屈折率と構造に依存し、それらを連続的に変化させると共振周波数を掃引できる。共振器を温度制御すると、熱光学効果と熱膨張効果により屈折率と構造が変化する。しかし結晶共振器においては熱伝搬による遅延や、温度制御に係る消費電力が大きい。そのため力学的なアプローチを用いる必要がある。

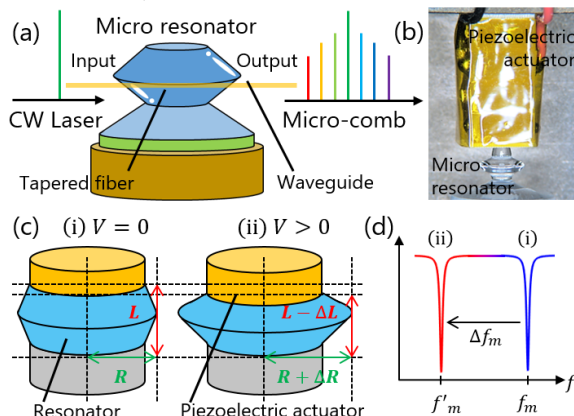


Fig.1 (a)マイクロコム発生概念図。 (b) piezoelectric actuator を結合した結晶共振器。 (c) 力学的周波数チューニング。 (d) 共振周波数のチューニング概念図。

共振器に外力を印加して構造制御すると、高速かつ低消費電力な共振周波数のチューニングが期待できる。例えば Fig.1(c) のように piezoelectric actuator を用いて共振器を潰すと、その構造が変化して Fig.1(d) のように共振周波数がチューニングされる。この手法は力学的周波数チューニングと呼ばれ [2]、ソリトンコムの低電力化、モジュール化に適当な手法である。

本研究では、piezoelectric actuator を結合したフッ化マグネシウム結晶共振器をプラットフォームとして、力学的周波数チューニングによるソリトンコムの発生を行った。

まず力学的周波数チューニングの実証実験を行った。そのセットアップを Fig.2(a) に示す。Fig.1(b) に示すように piezoelectric actuator を結合した結晶共振器に対して、テーパーファイバを介して光を結合する。このとき piezoelectric actuator に対して正弦波状電圧を印加した結果、Fig.2(b) に示すような共振モードの透過波形が得られた。レーザの周波数追跡用の MZI による干渉波形が見えないことから、固定周波数レーザに対する共振モード掃引による透過波形であることが明らかである。

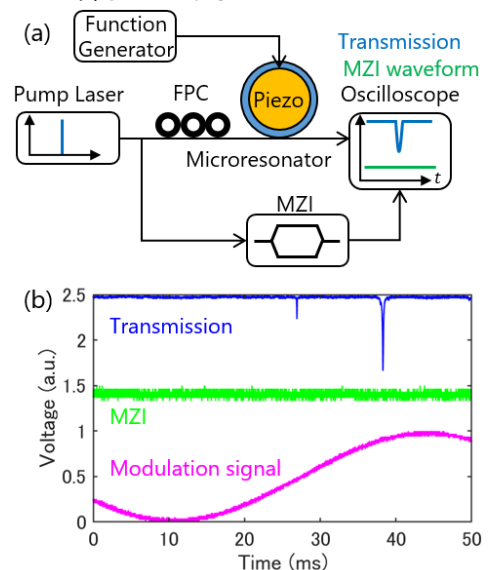


Fig.2 (a) 力学的周波数チューニングのセットアップ。FPC: ファイバ偏波コントローラ。MZI: マッハツェンダ干渉計。 (b) 共振周波数のチューニングによる共振モードの透過波形取得結果。

3. ソリトンコムの発生

続いて力学的周波数チューニングによるソリトンコムの発生を行った。そのセットアップを Fig.3(a)に示す。EDFA により十分な強度に増幅された固定周波数レーザを共振器に入射し、ピエゾアクチュエータに対して三角波状電圧を印加した結果、Fig.3(b)に示すような波形が得られた。これはソリトンステップと呼ばれる特徴的な波形である。赤く色づけられている範囲(Soliton regime)において共振モードの掃引を停止すると、ソリトンコムを取得することができる。またこの際の共振周波数のチューニング効率は、Fig.3(c)に示すように 20 MHz/V 程度であり、高々数 V の電圧印加によってソリトンコムを発生できる。

ソリトンステップにおける Soliton regime において共振モードの周波数掃引を停止した結果、ソリトンコムが得られた。その周波数スペクトルを Fig.3(d)に、RF スペクトルを Fig.3(e)に示す。ソリトンコムはフィードバックフリーで数分程度持続し、その繰り返し周波数は 15.55 GHz であった。

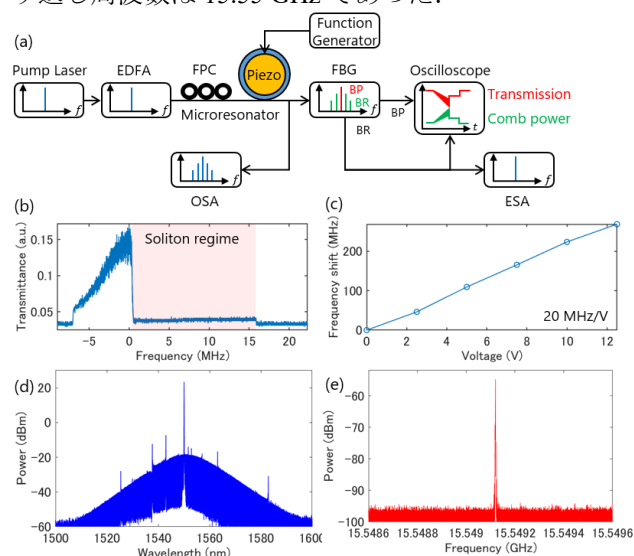


Fig.3 (a)力学的周波数チューニングによるソリトンコム発生のセットアップ。EDFA：エルビウム添加ファイバ増幅器。FPC：ファイバ偏波コントローラ。FBG：ファイバブラッググレーティング。(b)ソリトンステップ。(c)共振モードのチューニング効率。(d)発生したソリトンコムの周波数スペクトルと、(e)RF スペクトル。

5. 結論

本研究では、ピエゾアクチュエータを結合した結晶共振器を用いて、力学的周波数チューニングによるソリトンコムの発生を達成した。

本研究は科研費（JP19H00873）の助成を受けたものである

参考文献

- [1] T. Herr, et al, Nat. Phot. 8, 145-152 (2014)
- [2] J. Liu, et al, Nature 583, 385-390 (2020)
- [3] S. B. Papp, et al, Phys. Rev. X 3, 031003 (2013)

微小光共振器を用いたモード同期レーザの開発に向けた 利得と可飽和吸収に関する研究

長島圭吾(M2)

本研究では、微小光共振器に Er を添加することで自励発振を可能にし、CNT の可飽和吸収特性を用いてパルス化することにより、モード同期レーザの開発を目指す。そこで、Er 添加共振器の作製手法について明らかにし、CNT をコーティングした共振器の可飽和吸収特性の測定手法について検討を行った。

キーワード：微小光共振器，モード同期レーザ，可飽和吸収，Er 添加デバイス

1. 背景

モード同期レーザは多くの応用先が考えられており、光通信や分光、LiDAR など多岐にわたる。モード同期を実現させる方法にはいくつかの手法が存在し、これまでに固体レーザである Ti-sapphire を用いたもの[1]や、ファイバーレーザを用いたもの[2]が存在する。しかし、これらのモード同期レーザの欠点として、繰り返し周波数が数 100 MHz 程度と低いことが挙げられる。繰り返し周波数は共振器サイズに反比例することから、光を微小領域に閉じ込めることのできる微小光共振器を用いた受動モード同期レーザを開発することで、100 GHz を超えるような非常に高い繰り返し周波数を得られるのではないかと考えた。

そこで本研究は利得媒質に Er を添加し、1480 nm のポンプ光によって 1550 nm での自励発振を可能にし、カーボンナノチューブ (CNT) の特徴である強度の強い光を透過し、強度の低い光は吸収するという可飽和吸収特性によって受動的なモード同期を達成することを目標とする (Fig.1)。本研究室では、以前 Er を添加したシリカ膜を用いて共振器を作製し、1550 nm 付近での発振を観測している。ここでは新たに、共振器にゾルゲル法を用いて Er を添加する手法について述べる。また、可飽和吸収においては CNT を PDMS に混合し、トロイド共振器にコーティングすることで CNT の可飽和吸収特性も観測できている。しかし、現状観測された変調深さはモード同期に最適化されていないため、より小さな変調深さを測定する必要がある。ここでは、そのための測定手法の検討結果について述べる。

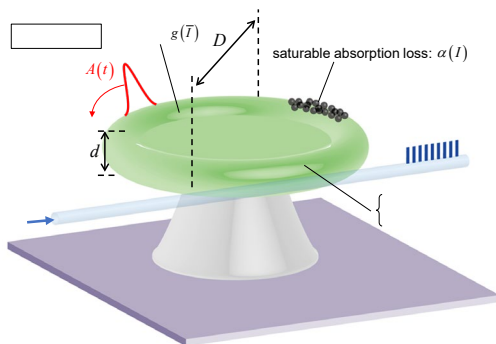


Fig.1 Er 添加微小光共振器と CNT による受動モード同期レーザのイメージ図。

2. Er 添加共振器

本研究室では、Er 添加シリカ膜をゾルゲル法によって作製し、そのシリカ膜にフォトリソグラフィ、BHF エッチング、XeF₂ エッチング、レーザーリフローをすることでトロイド共振器の作製を行った。作製した Er 添加トロイド共振器に 1480 nm のポンプ光を入れることで、1550 nm 付近での発振を観測した。その結果を Fig.2 に示す。赤で示したものが出発溶液の段階での Er 濃度が $1.7 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ であり、青で示したものは濃度が $0.85 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ の結果である。共振器の直径はどちらも 70 μm 程度であり、発振効率率はそれぞれ 1% と 0.6% となった。また、発振閾値はどちらも 5 μW 程度となっている。

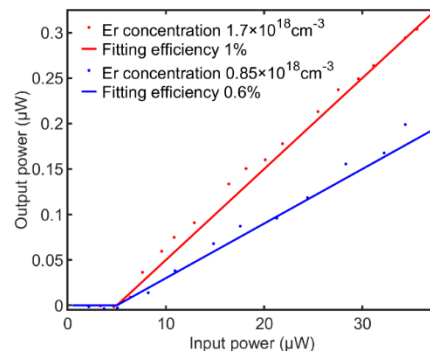


Fig.2 Er 添加共振器の発振効率。

しかし、製膜の際の実験環境の変化によって Fig.3 (a) のように均一な膜ができない問題が発生した。そのための改善策として、スピスコートの際の雰囲気を出発溶液の溶媒であるエタノールを気化させることによって調整し、Fig.3 (b) のように均一な膜を作製することに成功した。

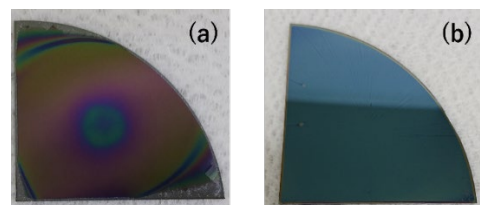


Fig.3 スピスコートの際の雰囲気の違いによる、Er 添加シリカ膜の表面の違い。

このように雰囲気調整することによって均一な膜の成膜に成功したが、共振器を形成するのに十分な厚さを得ることはできなかった。そのため、従来の熱酸化シリカ膜を用いてディスク共振器を作製し、その表面に均一な膜をコーティングすることで Er 添加共振器の作製を行った。この手法の場合には、出発溶液から Er の濃度を推定することができないが、先行研究のモデル[3]を用いて発振効率より実効的な添加された Er の濃度を推定することが可能となった。その発振効率と Er の濃度の関係を Fig.4 に示す。

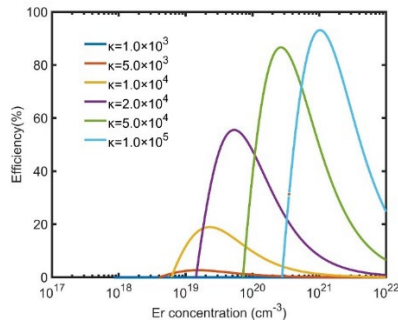


Fig.4 単位体積当たりの Er 濃度と発振効率の関係。

3. CNT の可飽和吸収特性

過去に本研究室では、CNT を PDMS に混合しトロイド共振器にコーティングすることによって可飽和吸収特性を観測した。その際の共振器一周当たりの変調深さは 3.2×10^{-3} であった。この結果と、Er 添加共振器の一周当たりの利得を考慮したシミュレーション結果を Fig.5 に示す。

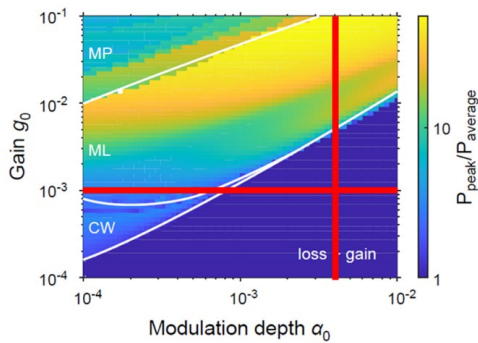


Fig.5 モード同期条件の解析結果。

このマップは横軸が共振器一周当たりの変調深さを表し、縦軸が共振器一周当たりの利得を表す。また、それぞれ赤で示したラインが、実験的に得られた利得と変調深さである。この結果を見ると、目標とするモード同期のエリア (ML) に到達するためのパラメータとして、変調深さを一桁程度小さくするとよいことがわかる。そのため、実験的により小さな変調深さを測定する必要がある。現状、一周当たりの変調深さは共振器の Q 値の変化を持って換算しているため、より小さな Q 値の変化を測定する必要がある。

ことが分かった。そこで、 Q 値をより正確に測定するために、共振器と結合するためのテーパファイバの揺れを抑えることと、共振器に入力するポンプ強度を安定化させることの 2 点を目標として、それぞれの課題に取り組んだ。

テーパファイバの揺れに関しては、テーパファイバの固定治具を変更するという手法をとった。これまで使用していた固定治具は、テーパファイバの固定部分の間隔が 115 mm だったのに対して、新たな治具の作製を行い、固定部分の間隔を 45 mm に小さくした。カップリングの安定性について定量的に評価するために、可飽和吸収体をコーティングしていないトロイドをテーパファイバに近づけ、同じ共振モードに対して波長を複数回スキャンし、そのばらつきを測定した。その結果を Fig.6 に示す。Fig.6 (c) の結果が複数回測定したばらつきを示すものであり、10 回のスキャンに対して外れ値が一つあるものの、およそ Q 値が 1.54×10^6 から 1.60×10^6 と 0.06×10^6 以内のばらつきに抑えられていることがわかる。この結果は一周当たりの変調深さに換算すると 2.1×10^{-5} 以上ならば測定が可能であると言える。

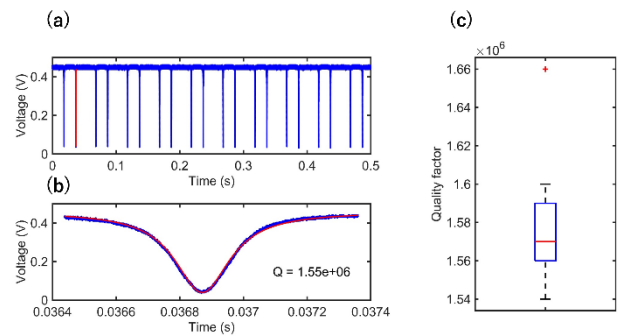


Fig.6 テーパファイバの固定治具変更後の、 Q 値のばらつき。

共振器に入力するポンプ強度の安定化に関しては、ポンプ光の波長を PDH ロック法を用いて共振波長と一致させることで従来の測定手法より安定化を図った。このように、ポンプ光の強度を安定化させたうえで、トロイド共振器に 0.03 mg/ml の濃度の CNT をコーティングし、その Q 値の変化を測定した結果を Fig.7 に示す。Fig.7 (a) が入力パワーを徐々に強くしながら測定したものであり、Fig.7 (b) が同じモードに対して入力パワーを徐々に弱くしながら測定したものである。

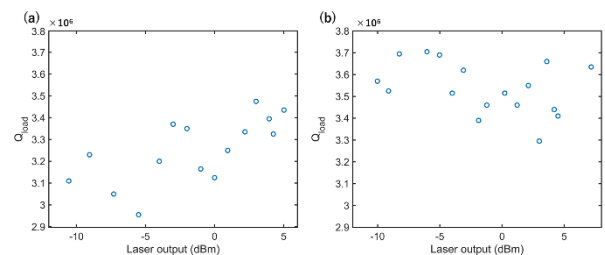


Fig.7 CNT をコーティングした共振器の入力パワーによる Q 値の変化。

この結果を見ると、入力パワーによって Q 値の変化は確認できるものの、同じ入力パワーの際に同じ Q 値となっていない。このことから今回の Q 値の変化は可飽和吸収以外の要因に起因していると考えられ、CNT の濃度が 0.03 mg/ml は可飽和吸収特性を得るのは難しく、可飽和吸収特性を得るためには、より濃度の濃い CNT が必要であると結論づけた。

参考文献

- [1] U. Keller, G. W. 'tHooft, W. H. Knox, and J. E. Cunningham, Opt. Lett. **16**, 1022–1024 (1991).
- [2] F. Wang, A. G. Rozhin, V. Scardaci, Z. Sun, F. Hennrich, I. H. White, W. I. Milne, and A. C. Ferrari, Nature Nanotechnology **3**, 738–742 (2008).
- [3] B. Min, T. J. Kippenberg, L. Yang, K. J. Vahala, J. Kalkman, and A. Polman, Phys. Rev. A **70**, 033803 (2004).

可飽和吸収効果によるパーフェクトソリトンクリスタル発生

中島綾太(M1)

微小光共振器に光を閉じ込めることで、連続光から散逸性カーソリトンと呼ばれるモード同期パルスを生成することができる。しかし、その生成する数や間隔は通常ランダムとなることが知られており、パワーや効率が低下する原因であった。本研究では可飽和吸収効果を加えることで、散逸性カーソリトンが等間隔に並び、応用に適した状態が実現できることを数値解析により明らかにした。

キーワード：散逸性カーソリトン，可飽和吸収，ソリトンクリスタル

1. 序論

微小光共振器は光を微小領域に閉じ込める素子であり、この素子へ入射する連続光の波長を短波長側から長波長側へ掃引することで、散逸性カーソリトンと呼ばれるモード同期パルスを生成することができる[1]。そのため、分光や光通信、距離計測など様々な分野での応用が期待されている。しかし連続光からソリトンへの変換過程において、カオスと呼ばれる波形が激しく乱れる状態を経由するため、通常マルチソリトンとなる。これは微小光共振器 1 周あたり複数個のソリトンが様々な間隔で存在している状態であり、スペクトルの干渉が発生してしまうため、応用上望ましくない。そのため、パーフェクトソリトンクリスタルと呼ばれる一定間隔に並ぶソリトン列を生成することを目指す研究が注目を集めている[2]。

本研究では、パーフェクトソリトンクリスタルを生成する新しいアプローチを提案する。図 1 に示すように、弱い光を多く吸収する可飽和吸収体を添加した微小光共振器を使用することで、複雑な実験セットアップを用意せずとも、パーフェクトソリトンクリスタルを実現することを目指した。計算モデルを構築し、数値解析した結果、可飽和吸収体を用いることで確実にパーフェクトソリトンクリスタルの生成が可能であることを発見した。さらに、入力パワーを調整することでパーフェクトソリトンクリスタルを構成するソリトンの数を切り替えることが可能であることを明らかにした。

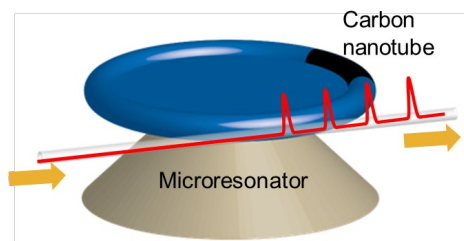


図1 可飽和吸収体を付与した微小光共振器の概念図。

2. 計算モデル

可飽和吸収体を付与した微小光共振器中を伝搬する光は、共振器の損失、可飽和吸収体の損失、デチューニング、分散、非線形光学効果、外部入力光の影響を考慮して、

$$T_r \frac{\partial E}{\partial t} = \left(-\frac{\alpha_{\text{tot}}}{2} - \frac{\alpha_{\text{SA}}}{1 + |E|^2/P_{\text{sat}}} - i\delta_0 - \frac{iL\beta_2}{2} \frac{\partial^2}{\partial \tau^2} + iL\gamma|E|^2 \right) E + \sqrt{\theta} E_{\text{in}} \quad (1)$$

に従って変動するとモデル化した。今回のシミュレーションでは、シリカのトロイド型の微小光共振器にカーボンナノチューブ(CNT)を付与することを仮定したため、その典型的なパラメータとして、光が共振器を1周する時間 T_r を 9.05 ps, 損失 α_{tot} を 2.2×10^{-4} , CNT の変調深さ q_0 を 4.0×10^{-3} , CNT の飽和パワー P_{sat} を 4.46 W, 共振器1周の長さ L を $600\pi \mu\text{m}$, 分散 β_2 を $-17.7 \text{ ps}^2/\text{km}$, 非線形光学定数 γ を $0.003 \text{ W}^{-1}\text{m}^{-1}$, 結合係数 θ を 5.5×10^{-5} , 入力パワー $|E_{\text{in}}|^2$ を 70 mW であると仮定した。そして、(1)式をスプリットステップフーリエ法により計算し、連続波からソリトンが発生する過程をシミュレーションした。

3. 結果

比較のため、まず可飽和吸収体を付与していない共振器でのソリトン発生を図2に示す。

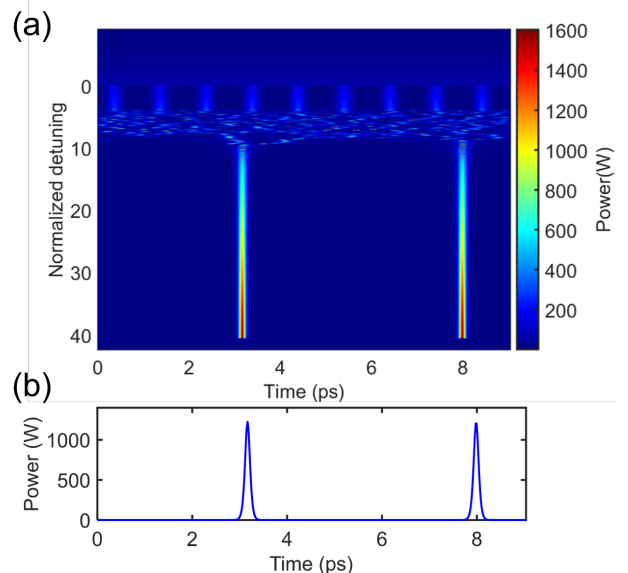


図2 (a) 可飽和吸収体が存在しない微小光共振器でソリトンが発生する様子。 (b) 共振器の中に形成したソリトン。

波長掃引に伴い、規格化デチューニング量 $\delta (= 2\delta_0/\alpha_{\text{tot}})$ が増加すると、まず初めにチューリングロールと呼ばれる周期的な波形が発生した。しかしその後、カオスな状態となり波形は激しく乱れた。そ

して掃引をさらに続け、ポンプ波長が共振器の共振波長を超えると、安定したソリトンが発生した。

一方、可飽和吸収体を付与した共振器では図 3 に示すように、図 2 とは大きく異なる挙動が観察された。チューリングロールが発生した後、カオスを経由せず、直接ソリトンが生成した。チューリングロールは 8 つのピークを持つ周期的な波形であったため、最終的なソリトンの数は 8 つとなった。つまり、可飽和吸収体を付与した場合、最終的に生成するソリトンの数はチューリングロールのピークと同じ数となるため、共振器の分散やポンプ光強度などを変えることで、最終的なソリトンの数を変更できることを示唆している。

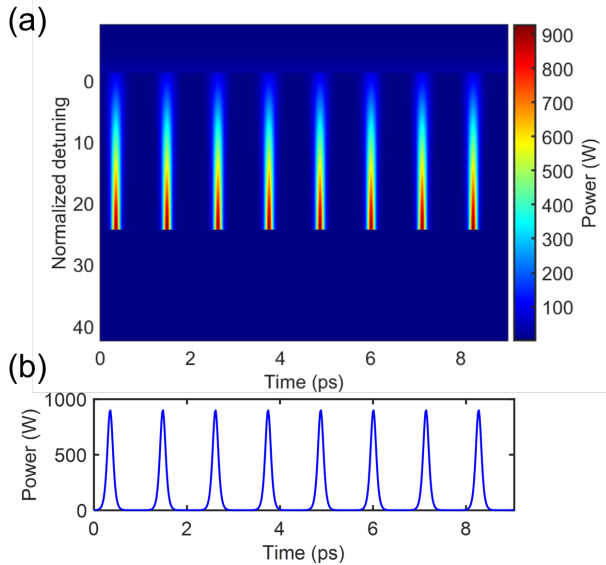


図 3 (a)可飽和吸収体が存在する微小光共振器でソリトンが発生する様子。(b)共振器の中に形成したソリトン。

可飽和吸収体による効果をより詳しく調査するため、一定のポンプパワー P_{in} で規格化デチューニングが δ になるまでの波長掃引を繰り返し行った。図 4 の各点 (δ, P_{in}) は、その際発生した波形のピークの数を示す。ソリトンが発生している状態ではピーク数はソリトン数と等しくなるが、カオス状態ではランダムな波形のピークの数であるため、その数は比較的大きくなった。また、計算途中でカオスを経過した場合、ピーク数は計算ごとに変化するため、モザイク模様が見られた。一方、カオスを経由しない場合、ピークの数は確定的となるため、その点付近は単色を示した。このようにして、ピーク数の情報から、カオスやパーフェクトソリトンクリスタル、通常のソリトンといった領域に分類することができた。

可飽和吸収体がない場合、赤線で示した実効デチューニング量が 0 となる線を超えた後、複数のソリトンがランダムに発生したことが分かる。一方、可飽和吸収体がある場合、損失量が増大するためソリトン形成に必要な入力パワーは増加するが、実効デチューニング量が 0 を超えた後も、チューリングロールのピーク数と同じ数のソリトンがそのまま維持される領域が存在する。その領域では、パワーの大きさに応じて、チューリングロールの数に変化す

るため、最終的なソリトンの数も段階的に変化している。ただし、入力パワーが大きい場合には、可飽和吸収効果による吸収が十分ではなくなるため、通常のソリトン発生と同じようにランダムな数のソリトンが発生した。

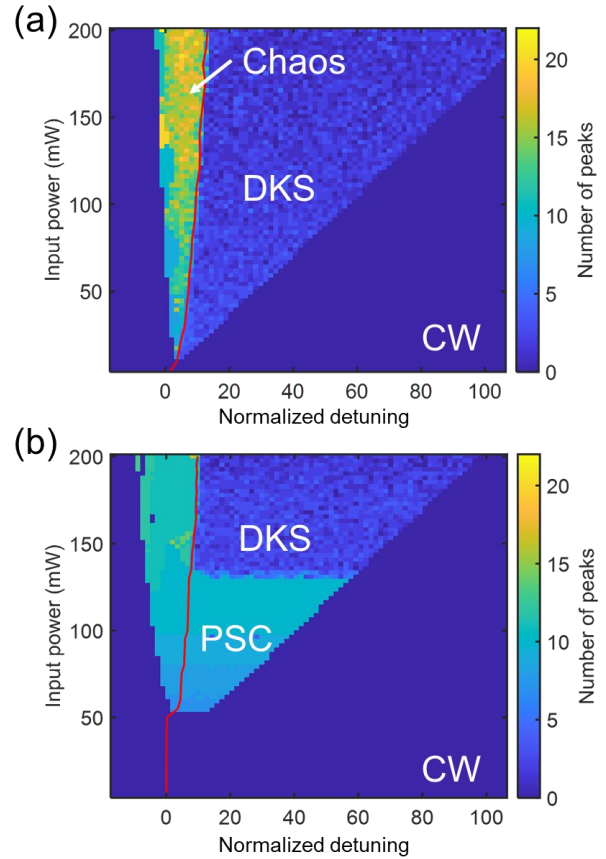


図 4 共振器内波形のピークの数。(a)可飽和吸収体を付与しない場合。(b)可飽和吸収体を付与する場合。PSC はパーフェクトソリトンクリスタル、DKS は散逸性カーソリトン、CW は連続光を表す。

4. 結論

本研究は、可飽和吸収体を付与した微小光共振器でのソリトン発生を調査した。弱い光を多く吸収し、強い光をあまり吸収しない特性を持つ可飽和吸収効果により、カオスを経由せずソリトンを発生させることが可能となり、パーフェクトソリトンクリスタルを形成することができることを明らかにした。そしてそれを構成するソリトンの数は、初期のチューリングロールの数に等しいため、入力光の強度や分散などを変えることで数を変えることができると考えられる。その結果、高効率、高出力、高繰り返しという応用に適した特性を持つレーザーの実現が期待できる。

参考文献

- [1] T. Herr, V. Brasch, J. D. Jost, C. Y. Wang, N. M. Kondratiev, M. L. Gorodetsky, and T. J. Kippenberg, Nat. Photonics **8** 145 (2014).
- [2] D. C. Cole, E. S. Lamb, P. Del'Haye, S. A. Diddams, and S. B. Papp, Nat. Photonics **11** 671 (2017).

結合共振器モデルの数値解析

建柚毅(B4)

モード同期レーザの開発に向けて、利得媒質及び可飽和吸収体を別々の共振器に付加し結合させた結合共振器モデルのモード同期条件を計算した。計算はスプリットステップフーリエ法によって解かれており、共振器間の結合を適切にすることによって、単一共振器の場合に比べて少ない利得量 ($g_0 = 3 \times 10^3$) でモードロックが可能であるとわかった。

キーワード：微小光共振器，結合共振器，モード同期，スプリットステップフーリエ法

1. 背景

微小光共振器は光を微小領域に閉じ込める素子であり、共振器に対し利得媒質や可飽和吸収体を付加することによるモード同期レーザが考案されている (図 1)。高 Q 値で達成することで省エネルギー化が可能であり、またシリコン基板上に作製可能であるため集積化の向上が期待されている。

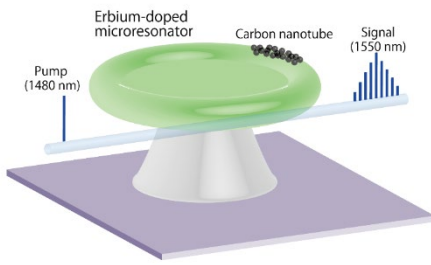


図 1. エルビウム添加, CNT 修飾をした微小光共振器の概略図。

しかし CNT 修飾などを行う工程でシリカトロイド共振器の性能は大きく落ち込んでしまう。本研究は図 1 に示したモデルとは異なり、利得媒質と可飽和吸収体を付加する共振器を別々にしたモデルを考え、その特性について単一共振器モデルとの比較を数値解析によって行った。

2. 計算モデル

媒質中の光の伝搬は非線形シュレディンガー方程式を解くことによってシミュレーションすることが可能である。利得媒質や可飽和吸収体の効果を考えた場合の微小光共振器内部の光の振る舞いは

$$\begin{aligned} Tr \frac{\partial}{\partial T} A(t, T) = & \left(-iL \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right. \\ & \left. + iL\gamma |A(t, T)|^2 \right) A(t, T) \quad (1) \\ & + [g_{Tr}(T) - \{l_{Tr} + \alpha_{Tr}(t, T)\}] A(t, T) \end{aligned}$$

と表される。ここで L は共振器長、 β_2 は分散、 γ は非線形光学定数 $g_{Tr}(T)$ は共振器一周当たりの利得、 l_{Tr} は共振器損失、 $\alpha_{Tr}(t, T)$ は可飽和吸収による損失である。計算は (1) 式をスプリットステップフーリエ法[1]によって解いている。

3. シミュレーション結果と考察

単一共振器モデルにおいて、共振器性能による光の振る舞いの変化について調査した。直径 $300 \mu\text{m}$ の微小光共振器に付与する利得媒質の量、可飽和吸収体の量を変化させ、モードロックに必要な条件を探した。結果を図 2 及び図 3 に示す。

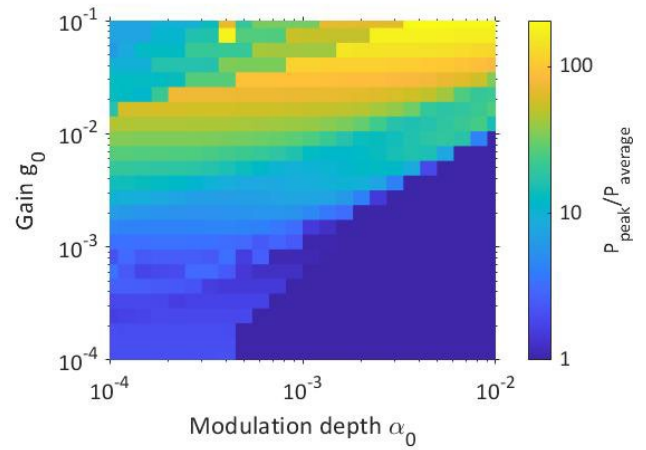


図 2. $Q = 10^8$ の場合のモード同期条件

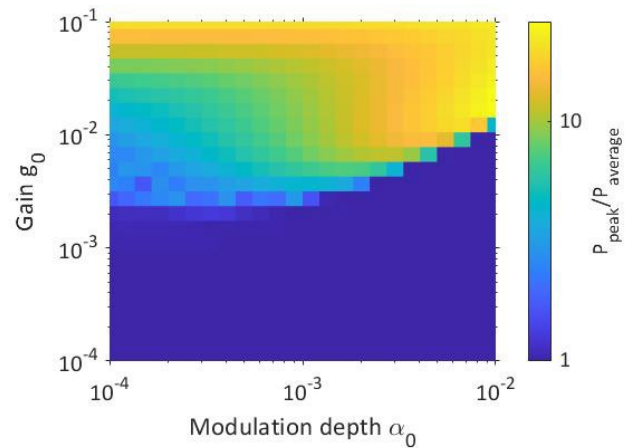


図 3. $Q = 5 \times 10^6$ の場合のモード同期条件

図 2 と図 3 を比べると、共振器性能の低い図 3 の条件の方がモード同期に必要な利得量が増え、パルスの鋭さを示す $P_{\text{peak}}/P_{\text{ave}}$ の値は小さくなっている。

続いて、結合共振器モデルにおいて共振器間の結合の強さを変化させていった場合の結果を示す。利得媒質を添加した共振器の Q 値は 10^8 とし、可飽和吸収体を修飾した共振器の Q 値は 5×10^6 とした。 Q_c を

10^6 , 3×10^7 , 10^8 とした際の結果を以下に示す。

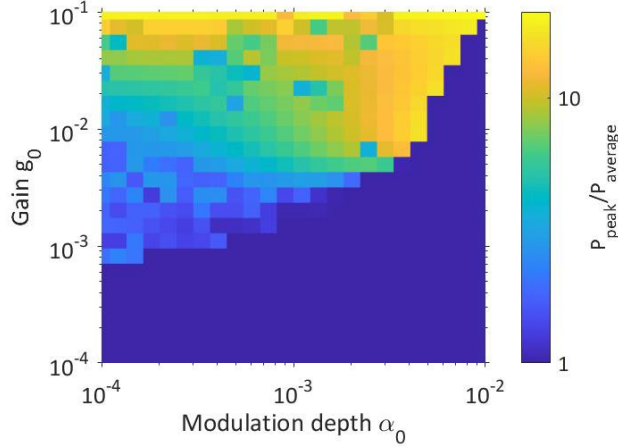


図 4. $Q_c = 10^6$ の場合のモード同期条件

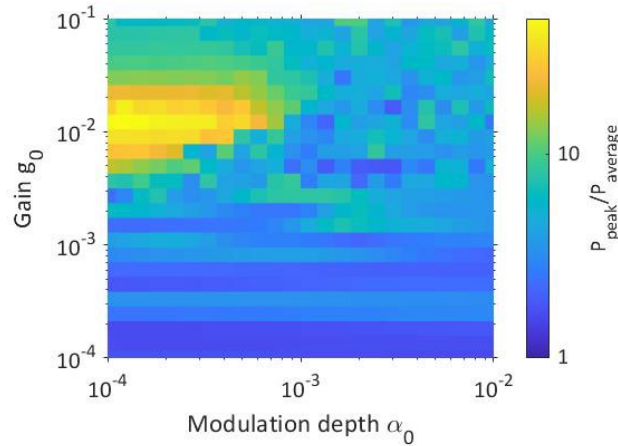


図 5. $Q_c = 5 \times 10^7$ の場合のモード同期条件

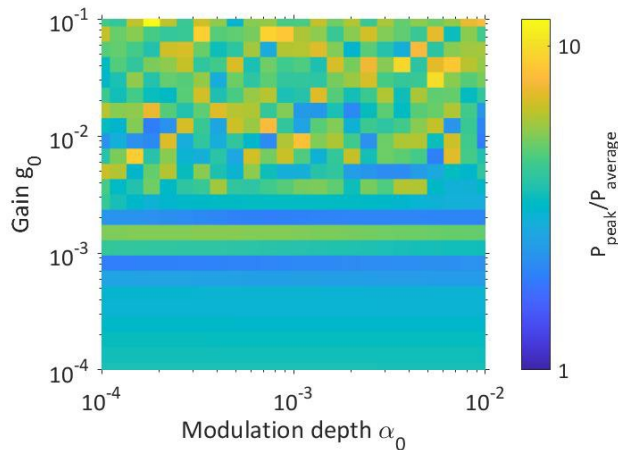


図 6. $Q_c = 10^8$ の場合のモード同期条件

図 2 及び図 4 より、共振器間の結合が強い場合単一共振器の場合と結果が殆ど同じになることがわかる。また図 4 から図 6 のように結合を弱めていくと、モード同期に必要な利得量は小さくなっていくが、結合が弱すぎる場合受動モード同期がされないことがわかる。結合の強さが $Q_c = 5 \times 10^7$ の場合、必要利得量が最も小さくなり、 $g_0 = 6 \times 10^{-3}$ 程度においてモードロックが可能であるとわかった。

さらに、可飽和吸収体の修飾量を二桁少なくした場合について、同様に解析を行った。結果を図 7 に示す。

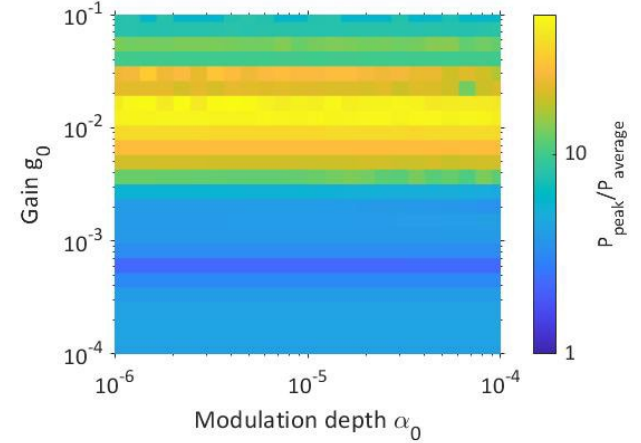


図 7. 可飽和吸収量を少なくした場合について。
 $Q_c = 5 \times 10^7$ の場合のモード同期条件

図 5 及び図 7 から、可飽和吸収量を減らすことでさらに少ない利得量でのモード同期が可能であることが分かった。 $\alpha_0 = 1 \times 10^{-6}$ のとき $g_0 = 4 \times 10^{-3}$ でのモード同期が確認された。

4. 結論

本研究は、小型モード同期レーザの開発に向けた結合共振器モデルについての研究であり、以下のことが確認された。

一つ目は、共振器間の共振器間の結合係数を適切に設定することにより単一共振器の場合に比べてモード同期に必要な利得量を少なくすることが可能となる点である。共振器間の結合が $Q_c = 10^8$ と弱い場合、CNT を付与した共振器へとほとんど光が入り込まず、過飽和吸収の効果が十分に発揮されずパルス化されない。また共振器間の結合が $Q_c = 10^6$ と非常に強い場合、光の多くが CNT 側へと入り込み、系全体の性能が CNT を付与した共振器のそれに偏向する。結合が $Q_c = 5 \times 10^7$ の場合、必要な最低利得が $g_0 = 6 \times 10^{-3}$ 程度においてモードロックが可能であるとわかった。

二つ目に、可飽和吸収量を一桁から二桁減らした場合に、より少ない利得量でモード同期が可能となり、 $\alpha_0 = 1 \times 10^{-6}$ のとき $g_0 = 4 \times 10^{-3}$ でのモード同期が確認された。

参考文献

- [1] Oleg V. Sinkin, Ronald Holzlohner, John Zweck, and Curtis R. Menyuk., OSA. **21** 1 (2003).

資料の部

論文・会議発表

(2021 年 4 月~2022 年 3 月)

【論文発表】

- [1] Y. Hayama, S. Fujii, T. Tanabe, and Y. Kakinuma, "Theoretical approach on the critical depth of cut of single crystal MgF_2 and application to a microcavity," Precision Engineering, Vol. 73, pp. 234-243 (2022).
- [2] T. S. L. P. Suzuki, A. Nakashima, K. Nagashima, R. Ishida, R. Imamura, S. Fujii, S. Y. Set, S. Yamashita, and T. Tanabe, "Design of a passively mode-locking whispering-gallery-mode microlaser," J. Opt. Soc. Amer. B, Vol. 38, No. 10, pp. 3172-3178 (2021). [arXiv:2106.06943 (2020)].

【国際会議発表】

- [1] T. Tanabe, "Ultrahigh-Q crystalline whispering gallery mode microcavity fabricated with mechanical machining," 6th International Workshop on Microcavities and Their Applications (WOMA 2022), Hong Kong (hybrid), Feb. 7-9 (2022). (invited)
- [2] S. Sugawara, S. Tanaka, S. Fujii, H. Kumazaki, S. Tasaka, S. Kawanishi, and T. Tanabe, "Optical transmission using Stokes light," International Symposium on Novel maTerials and quantum Technologies (ISNTT2021), S08-4, online, Dec. 14-17 (2021).
- [3] S. Kogure; T. Ohtsuka; S. Fujii; H. Kumazaki, K. Wada, Y. Hashimoto, Y. Kobayashi, T. Araki, K. Furusawa, N. Sekine, and T. Tanabe, "Comparison of microcomb-based light sources for optical data transmission," Frontiers in Optics + Laser Science (FiO/FS 2021), FM1B.1, online, Oct. 31-Nov. 4 (2021).
- [4] R. Imamura, K. Nagashima, and T. Tanabe, "Measurement of saturable absorption behavior of CNT/PDMS coated high-Q microcavity towards mode-locking of Er-doped laser," 11th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics (META2021), Warsaw, Jul. 20-23 (2021). (invited)
- [5] R. Imamura, A. Nakashima, K. Nagashima, T. S. L. P. Suzuki, R. Ishida, S. Fujii, and T. Tanabe, "Design of a Passively Mode-locked Microlaser with an Er-doped Microcavity and Carbon Nanotubes," Conference on Lasers and Electro-Optics - European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe - EQEC 2021), CF-4.6, online, Jun. 21-25 (2021).
- [6] S. Tanaka, S. Fujii, K. Wada, H. Kumazaki, S. Kogure, S. Tasaka, T. Ohtsuka, S. Kawanishi, and T. Tanabe, "Optical Data Transmission with a Dissipative Kerr Soliton in an Ultrahigh Q MgF_2 Microresonator," Conference on Lasers and Electro-Optics - European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe - EQEC 2021), CI-1.4, online, Jun. 21-25 (2021).
- [7] A. Nakashima, S. Fujii, R. Imamura, K. Nagashima, and T. Tanabe, "Stable formation of multiple solitons in an optical microresonator assisted by saturable absorption," CLEO:2021, SW4A.3, online, May 9-14 (2021).
- [8] S. Kogure, T. Ohtsuka, S. Fujii, H. Kumazaki, K. Wada, Y. Hashimoto, Y. Kobayashi, T. Araki, K. Furusawa, N.

- Sekine, and T. Tanabe, "Optical data transmission with a microresonator-based comb source," International Conference on Nano-photonics and Nano-optoelectronics (ICNN2021), ICNN-6-02, online, Apr. 19-21 (2021).
- [9] S. Tanaka, S. Fujii, K. Wada, H. Kumazaki, S. Kogure, S. Tasaka, T. Ohtsuka, S. Kawanishi, and T. Tanabe, "Optical data transmission with a dissipative Kerr soliton in an ultrahigh-Q MgF₂ microresonator," The 10th Advanced Lasers and Photon Sources (ALPS2021), ALPS-P-19, online, Apr. 19-21 (2021).
- [10] S. Sugawara, S. Tanaka, K. Wada, S. Fujii, H. Kumazaki, S. Tasaka, S. Sota, T. Ohtsuka, S. Kawanishi, and T. Tanabe, "Raman-comb-based wavelength source for optical communication," The 10th Advanced Lasers and Photon Sources (ALPS2021), ALPS-12-05, online, Apr. 19-21 (2021).
- A. Nakashima, S. Fujii, R. Imamura, K. Nagashima, and T. Tanabe, "Generation of multiple solitons with help from a saturable absorber," The 10th Advanced Lasers and Photon Sources (ALPS2021), ALPS-9-02, online, Apr. 19-21 (2021).

【国内会議発表】

- [1] 菅原漱人, 藤井瞬, 曾田昇汰, 田邊 孝純, 「シリカ WGM 微小共振器におけるラマンコムの変調性の評価」第 69 回応用物理学会春季学術講演会, 24a-D315-6, 青山学院大学相模原キャンパス(ハイブリッド), 2022 年 3 月 22 日~26 日.
- [2] 今村陸, 建柚毅, 藤井瞬, 中島綾太, 長島圭吾, 田邊孝純, 「利得と非線形吸収を有する微小光共振器結合系におけるモード同期動作」第 69 回応用物理学会春季学術講演会, 24a-D315-7, 青山学院大学相模原キャンパス(ハイブリッド), 2022 年 3 月 22 日~26 日.
- [3] 木暮蒼真, 藤井瞬, 熊崎基, 曾田昇汰, 橋本洋輔, 小林雄太, 荒木智宏, 田邊孝純, 「マイクロコムにおけるデチューニングとノイズの関係」第 69 回応用物理学会春季学術講演会, 22a-E303-1, 青山学院大学相模原キャンパス(ハイブリッド), 2022 年 3 月 22 日~26 日.
- [4] 曾田昇汰, 半田浩一郎, 田邊孝純, 鶴澤佳徳, 古澤健太郎, 関根徳彦, 「Hot-wire CVD 法を用いた SiN リング共振器によるパラメトリック発振の観測」第 69 回応用物理学会春季学術講演会, 22a-E303-2, 青山学院大学相模原キャンパス(ハイブリッド), 2022 年 3 月 22 日~26 日.
- [5] 谷川幸彌, 田坂駿, 和田幸四郎, 木暮蒼真, 田中脩矢, 藤井瞬, 熊崎基, 川西悟基, 田邊孝純, 「MgF₂ 微小光共振器による光周波数コムの変調分割多重通信への応用」第 69 回応用物理学会春季学術講演会, 22a-D215-9, 青山学院大学相模原キャンパス(ハイブリッド), 2022 年 3 月 22 日~26 日.
- [6] 兒玉拓昌, 菅野凌, H. Jocelyn, 金セイ基, 大塚実, 関三好, 横山信幸, 岡野誠, 田邊孝純, 「ランダムフットニック結晶導波路を用いた多波長解析」第 69 回応用物理学会春季学術講演会, 24a-E301-10, 青山学院大学相模原キャンパス(ハイブリッド), 2022 年 3 月 22 日~26 日.
- [7] 藤井瞬, 和田幸四郎, 木暮蒼真, 熊崎基, 柿沼康弘, 田邊孝純, 「高 Q 値微小光共振器による高繰返しソリトンマイクロコムの変調と精密制御」レーザー学会学術講演会第 42 回年次大会, B03-12p-II-04, オンライン開催, 2022 年 1 月 12 日~14 日.

- [8] 今村陸, 藤井瞬, 木暮蒼真, 田邊孝純, 「微小光共振器で生成する光周波数コム及び WGM レーザーの応用展開」 レーザー学会学術講演会第 42 会年次大会, E09-12a-V-01, オンライン開催, 2022 年 1 月 12 日～14 日. (招待講演)
- [9] 田邊孝純, 「SiN マイクロリング型コム発生器」 Photonic Device Workshop 2011, PDW-II(7), オンライン開催, 2021 年 11 月 4 日～5 日. (招待講演)
- [10] 曾田昇汰, 古澤健太郎, 関根徳彦, 田邊孝純, 「ソリトンマイクロコムからの 2 トーン信号発生用 オンチップ SiN リング共振器フィルタのチューニング特性評価」 第 82 回応用物理学会秋季学術講演会, 13a-N103-4, オンライン開催, 2021 年 9 月 10 日～13 日.
- [11] 田邊孝純, 「微小光共振器による光周波数コム光源の開発とその応用」 レーザ・量子エレクトロニクス(LQE)8 月研究会, LQE2021-1, オンライン開催, 2021 年 8 月 27 日. (招待講演)

【受賞など】

- [1] 2021 年 9 月 エレクトロニクスソサイエティ学生奨励賞 大塚 民貴
- [2] 2021 年 5 月 The 10th Advanced Lasers and Photon Sources, Best Student Award, Shuya Tanaka

学位論文題目

修士論文

遊部航希「時間多重伝令付き単一光子源の集積化に向けた結合共振器量子メモリに関する研究」

兒玉拓昌「ランダム性を含むフットニク結晶導波路を用いた多波長解析に関する研究」

曾田昇汰「周波数可変な THz 波発生用 2 トーン信号発生に向けた SiN リング共振器の作製」

和田幸四郎「ピエゾアクチュエータを結合した結晶共振器による周波数チューニングとソリトンコムの発生」

田坂駿「フッ化マグネシウム結晶共振器における波長分割多重通信への応用」

長島圭吾「微小光共振器を用いたモード同期レーザの開発に向けた利得と可飽和吸収に関する研究」

田中脩矢「フッ化マグネシウム微小光共振器による光周波数コムの高効率な波長多重光通信応用」

卒業論文

奥屋直「微小光共振器を用いた水素ガスセンサの低濃度下における性能に関する研究」

高野淳史「ソリトンコム発生用 SiN リング共振器の設計と光学評価」

建柚毅「利得と可飽和吸収を有する 微小光共振器結合系におけるモードロック動作」

谷川幸彌「フッ化マグネシウム微小光共振器を用いた光周波数コムと大容量光通信への応用」

西端諒「逆テーパ構造を用いた Si 導波路と SiN 導波路の接合に関する研究」