

2011 年度(平成 23 年度)
アニュアルレポート

慶應義塾大学 理工学部
田邊フォトリックナノ構造研究室



研究室メンバーの集合写真
2011 年 5 月 春のコロキウムにて

目次

ごあいさつ	1
研究室メンバー一覧	2
研究活動報告	
光カー効果による光双安定の解析	3
高透過率テーパ光ファイバの作製	6
レーザーフロー装置の構築とトロイド共振器のレーザーフロー	9
多角シリカトロイド微小光共振器の提案と作製	12
微小光共振器の測定システムの構築	15
レーザー溶融ペDESTAL法によるウィスパーリングギャラリーモード共振器の作製	17
資料の部	
論文・会議発表・特許申請	20
学位論文用紙	21
次世代研究プロジェクト	22
慶應光科学若手研究会	23

ごあいさつ



皆さまには、慶應義塾大学理工学部電子工学科・田邊フットニックナノ構造研究室の研究教育活動に、多大なご支援とご関心をお寄せいただきまして、心より感謝申し上げます。

当研究室は 2011 年度(平成 23 年度)に第 1 期生となる学生が配属され、研究室としての活動を本格的に開始いたしました。研究では、光を本質から理解し光の新たな利用方法を開拓し、特に「光を使って究極的な省エネを目指す」ことを目標と掲げた研究活動を推進します。教育では、研究活動を通じて「新しい仕組みを構築する力」を持った人材の育成に取り組みます。このように、研究室の活動は研究と教育を両輪としますが、本報告書では特に研究室の研究活動に特にスポットを当ててその成果を報告いたします。

本年度は、活気あふれる 4 名の学生の配属に恵まれました。彼らは、それぞれが研究の立ち上げに力を注ぎ、これから数年の間は研究室の研究活動を支えることになるであろう、クリーンルーム(Class 1000 仕様)や光学実験室の立ち上げ、及び計算機環境の構築等に取り組みました。それらの全般的な活動は当研究室のホームページにてご覧いただくこととし、本報告書ではいくつかの具体的な研究成果についてトピックスを絞って報告いたします。

立ち上げてまだ間もない若い研究室ではありますが、私どもの行っている研究にご関心を持たれましたら、ご連絡いただけましたら幸いに存じます。

2012 年 6 月
慶應義塾大学理工学部電子工学科
准教授 田邊孝純

研究室メンバー一覧

(氏名及び卒業後進路)

専任講師

田邊孝純

学部 4 年生：第 1 期生(2011 年度卒業生)

小川陽平

慶應義塾大学大学院進学

加藤拓巳

慶應義塾大学大学院進学

工藤寛史

慶應義塾大学大学院進学

吉岐航

慶應義塾大学大学院進学

(プライバシーの観点より就職先企業名の記載は致しません)

研究活動報告

光カー効果による光双安定の解析

吉岐航(B4)

本研究ではシリカトロイド微小光共振器において、光 Kerr 効果による光双安定を利用した光メモリが実現可能であるということ、有限要素法と結合モード理論を組み合わせた数値解析によって示す。本メモリは超高 Q 値を持つシリカトロイド微小光共振器と光 Kerr 効果を用いているため非常に低損失であり、通常の光信号処理だけではなく量子情報通信への応用も期待できる。

キーワード：シリカトロイド微小光共振器、光メモリ、光 Kerr 効果、結合モード理論、光双安定

1. はじめに

近年、光共振器作製に関する技術が飛躍的に向上しており、高 Q 値な光共振器を比較的容易に作製できるようになった。これにより、従来達成に非常に大きな駆動パワーを要していた光双安定現象が、高 Q 値な光共振器を用いることにより比較的lowパワーで達成できるようになってきた。

光共振器中の光双安定を用いた光双安定メモリは既に何件か発表されている[1-2]。ただし、それらのほとんどは熱光学(Thermo-optic: TO)効果やキャリアプラズマ効果を用いたものであり、光 Kerr 効果を用いた光双安定メモリは未だ実現されていない。

光 Kerr 効果は光の吸収過程を介さずに屈折率を変化させることができるので他の効果よりも消費エネルギーが小さい。しかしその一方で、屈折率変化量が小さいため扱いにくいという欠点もある。したがって光 Kerr 効果を利用するためには TO 効果やキャリアプラズマ効果を抑制する方法を用いる必要がある。そのひとつの方法として考えられるのが、バンドギャップが大きく吸収係数が小さい材料で作製された共振器を用いることである。バンドギャップが大きければキャリアを低減でき、吸収係数が小さければ熱の発生を抑制することができる。その条件にあてはまる材料の一例に、シリカが挙げられる。

そこで本研究ではシリカ材料を用いた光共振器であるシリカトロイド微小光共振器において光 Kerr 双安定メモリが実現可能であるということ、結合モード理論(Coupled mode theory: CMT)と有限要素法(Finite element method: FEM)を組み合わせた数値解析によって検討明らかにする。

2. 数値解析のモデル

まず、メモリの入出力を詳細に検討する為、非線形効果を考慮した解析の基本方程式を CMT に基づき導く。本解析では Fig. 1(a)に示すような 4 ポート系(1つの共振器をはさむように2つの導波路が隣接する系)における光メモリを解析することにする。これは、2 ポート系(1つの共振器に1つの導波路が隣接する系)では、Kerr 光双安定を得るのが難しいためである。CMT および SVE(Slow varying envelope)近似を用いると、共振器モードの時間的変化を記述する基本方程式は以下のように求められる。

$$\frac{dA(t)}{dt} = \left[j \frac{2\pi c}{n_0 + \Delta n} \left(\frac{1}{\lambda_0 + \delta\lambda} - \frac{1}{\lambda} \right) - \frac{1}{2\tau_{\text{tot}}} \right] A(t) + \sqrt{\frac{1}{\tau_{\text{coup1}}}} e^{j\theta} S_{\text{in}}(t) \quad (1)$$

ただし、 $S_{\text{in}}(t)$ は Fig. 1(a)に示す入力側の導波路モードの包絡線、 λ は入力波長、 λ_0 は共振周波数、 $\delta\lambda$ は屈折率変化による共振波長シフト量、 c は光速、 n_0 は屈折率、 Δn は非線形効果による屈折率変化である。 θ は共振器モードと入力側の導波路モードとの位相差であり、

$$\theta = 4\pi^2 (n_0 + \Delta n(t)) (R + r) \left(\frac{1}{\lambda_0 + \delta\lambda} - \frac{1}{\lambda} \right) \quad (2)$$

と表せる。ただし、Fig. 1(b)に示すように、 R はトロイド共振器のメジャー半径、 r はマイナー半径を表している。また、 τ_{tot} は共振器の全光子寿命であり、

$$\frac{1}{\tau_{\text{tot}}} = \frac{1}{\tau_{\text{abs}}} + \frac{1}{\tau_{\text{loss}}} + \frac{1}{\tau_{\text{coup1}}} + \frac{1}{\tau_{\text{coup2}}} \quad (3)$$

と定義されている。 τ_{abs} は吸収に関連する光子寿命、 τ_{loss} は吸収以外の損失に関連する光子寿命、 τ_{coup1} は入力側導波路との結合に関連する光子寿命、 τ_{coup2} は出力側導波路との結合に関連する光子寿命である (Fig. 2(a))。式(1)-(3)を用いると、上下の導波路からの出力モードの包絡線 $S_{\text{out1}}(t)$ 及び $S_{\text{out2}}(t)$ は、

$$S_{\text{out1}}(t) = e^{-j\beta d} \left[S_{\text{in}}(t) - \sqrt{\frac{1}{\tau_{\text{coup1}}}} e^{-j\theta} A(t) \right] \quad (4a)$$

$$S_{\text{out2}}(t) = e^{-j\beta d} \sqrt{\frac{1}{\tau_{\text{coup2}}}} e^{-j\theta} A(t) \quad (4b)$$

と表現出来る。ただし、 β は導波路の伝搬定数、 d は導波路の長さである。

次に、非線形効果による共振器内の屈折率変化のモデル化を行う。これは式(1)の $\delta\lambda$ を求めるために必要なステップである。共振器内では一般的にキャリアプラズマ効果及び TO 効果、Kerr 効果による屈折率変化が生じるが、キャリアプラズマ効果はシリカの大きなバンドギャップに抑制されてほとんど生じないので無視することができる。一般的にはトロイド共振器内に蓄えられた光エネルギーは、ウィスパーリングギャラリー(WG: Whispering Gallery)モード分布に従って分布する。それ故に、光エネルギーの空間的な分布を考慮して TO 効果による屈折率変化 $\Delta n_{\text{TO}}(x, y, t)$ 及び光 Kerr 効果による屈折率変化

$\Delta n_{\text{Kerr}}(x, y, t)$ を求めると,

$$\Delta n_{\text{TO}}(x, y, t) = n C_{\text{TO}} \{ T(x, y, t) - 300 \} \quad (5a)$$

$$\Delta n_{\text{Kerr}}(x, y, t) = \frac{2n_2 c}{n} \cdot \frac{U_p(t)}{2\pi R} \tilde{I}(x, y) \quad (5b)$$

という式が導かれる. ただし $T(x, y, t)$ は 2 次元断面における温度分布, C_{TO} は熱光学係数, n_2 は非線形屈折率, $U_p(t) = |A(t)|^2$ は共振器内に蓄えられている光エネルギー, $\tilde{I}(x, y)$ は FEM[4] によって求めたトロイド断面における正規化された WG モードの強度分布である (形状は Fig. 1(b) に示す通りである). また, 温度分布 $T(x, y, t)$ も FEM (COMSOL Multiphysics) によって求めることが可能である. 式(5a) (5b) を用いて屈折率変化 $\Delta n = \Delta n_{\text{Kerr}} + \Delta n_{\text{TO}}$ を求めることで, 共振波長シフト $\delta\lambda = (\lambda_0/n_0)\Delta n$ を得ることができる. すると式(1)(2)を逐次的に解くことが可能となるので, 光メモリの非線形な応答を求めることができる.

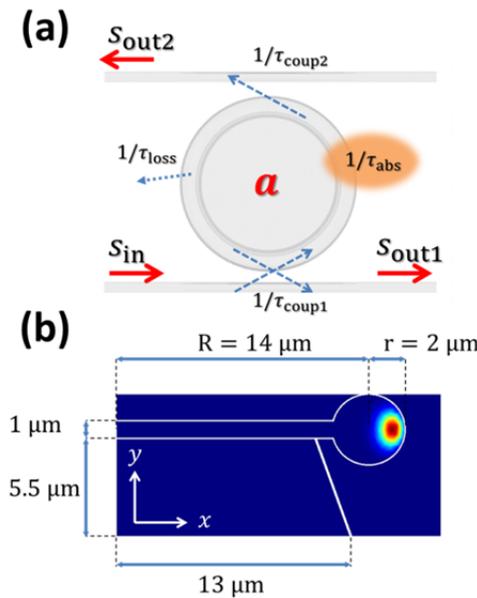


Fig. 1 : (a) Cavity structure used for numerical analysis. (b) Mode intensity profile of toroid microcavity [4].

3. 光子寿命の設定

本節では, 本解析で用いた光子寿命の値について言及しておく. シリカの通信波長帯 (1550 nm) における材料吸収は極めて小さいが ($\alpha = 0.2$ dB/km), シリカトロイド微小光共振器においては, 共振器表面に形成される水分子の層や付着物による吸収が材料吸収よりも遥かに高くなるということが知られている. そして Q 値はこれらの吸収損失によって制限される. したがって, 現実的なケースを想定するためには, Q 値が吸収によって制限される状況を $\tau_{\text{int}} \approx \tau_{\text{abs}} = 323$ ns ($Q_{\text{int}} = 4 \times 10^8$ に対応[5]) と設定することによって得る必要がある. ただし, $Q_{\text{int}} = \omega\tau_{\text{int}} = (\tau_{\text{abs}}^{-1} + \tau_{\text{loss}}^{-1})^{-1}$ は共振器の固有 Q 値である.

一般的には, TO 効果は光 Kerr 効果よりも遥かに大きいので, ある一定時間が経過した後は, 光 Kerr

効果は TO 効果によって無効化されてしまう. しかし一方で応答は極めて遅いので, 熱が蓄積してしまう前にメモリ動作を終えることができれば, 光 Kerr 効果をメモリに利用することができる. 共振器内に光が流入したり逆に共振器外へ流出したりする速度は共振器の全光子寿命 τ_{tot} によって決まるので, 小さな τ_{tot} をトロイド共振器のような超高 Q 値共振器で得る必要がある. 固有光子寿命 τ_{int} は共振器の構造と材料によって決まる定数であるので, 我々は小さな τ_{tot} を得るために, τ_{coup1} 及び τ_{coup2} を調整することにした. ただし, クリティカルカップリングの条件を得るために, $\tau_{\text{coup1}}^{-1} = \tau_{\text{int}}^{-1} + \tau_{\text{coup2}}^{-1}$ の関係式が常に成り立つようにした.

4. 解析結果

初めに, 屈折率変化 $\Delta n_{\text{TO}}(x, y, t)$, $\Delta n_{\text{Kerr}}(x, y, t)$ の時間的変化を観察するために矩形波を入力として与えた. 異なる τ_{coup2} における結果を Fig. 2 に示す. この図が示すのは, 3 つ全てのケースにおいて, 約 2.3 μs 経過後に TO 効果が光 Kerr 効果を上回るということである. この数値は, TO 効果の影響を受けずに光 Kerr 効果によってメモリ動作を行うことのできる最大時間を表している. さらに Fig. 2 から光共振器内にエネルギーが蓄積される速度が, 用いる τ_{coup2} によって異なるということを知る. 蓄積に要する時間は $\tau_{\text{coup2}} = \tau_{\text{int}}/100$ の時最小となるので, Δn_{Kerr} が平坦な領域に達するのが最も早くなる. これは光 Kerr 効果として用いることのできる "Kerr memory usable" (Fig. 2 中に示す) が最も長くなるということを意味する. それ故に, "Kerr memory usable" を最大化するためには, 出来るだけ小さな τ_{coup2} を用いることが必要であるのが分かる.

最後に, Fig. 3 に異なる τ_{coup2} において光メモリ動作させた時の出力パワーを示す. 上下の導波路からの出力パワー $P_{\text{out1}} = |S_{\text{out1}}|^2$ 及び $P_{\text{out2}} = |S_{\text{out2}}|^2$ の応答速度は全光子寿命 τ_{tot} に依存するので, 横軸の t は τ_{tot} により正規化してある. Fig. 3 中の $\tau_{\text{coup2}} = \tau_{\text{int}}/10$ 及び τ_{int} の条件ではリセットパルスが有効に働いておらず, メモリ動作を得ることが出来ていない. もし Fig. 2 に示す "Kerr memory usable" の領域内でこのシステムを用いることが出来ているならば, 光子寿命 τ_{tot} 以上の時間幅を持つリセットパルスによって状態をリセットすることが可能であるはずだが, τ_{coup2} が大きな条件ではシステムの応答が遅くなるため, メモリ動作を終える前に相当量の熱が蓄積されてしまう. 熱が一度蓄積されるとその緩和速度の遅さにより, リセットパルス程度の短い時間幅では Δn_{TO} を緩和させることができない.

その一方で, $\tau_{\text{coup2}} \leq \tau_{\text{int}}/100$ の条件では, システムのセットとリセットが正常に行われており, 光 Kerr 双安定メモリとして動作していることが分

かる. その際のメモリ保持時間は約 500 ns, 駆動
 パワーは 7.3 mW である. しかしながらこの条件で
 も完全に TO 効果をキャンセルすることは出来な
 いので, メモリ保持時間には上限が存在する. こ
 の上限を超えると, 蓄積された熱の影響により
 P_{out1} は自然に ON から OFF へとスイッチしてしま
 う (P_{out2} では逆の動作が同様に生じる).

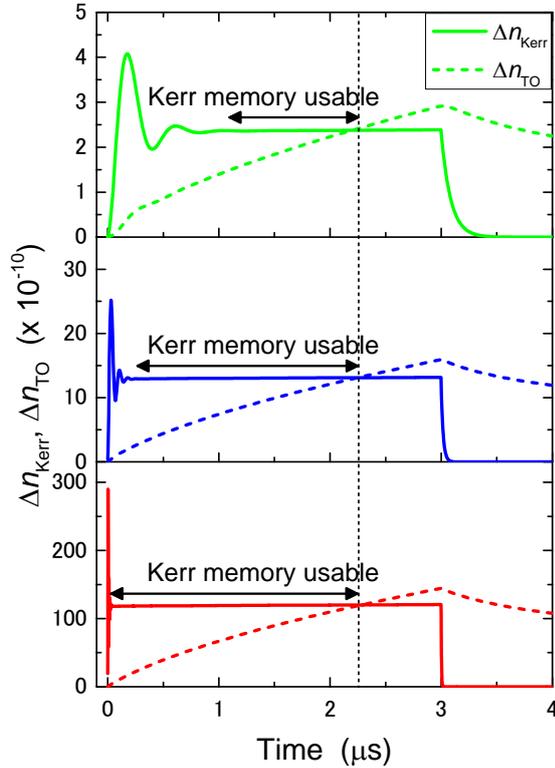


Fig.2: Δn_{Kerr} and Δn_{TO} (broken line) vs. time for
 different τ_{coup2} . The detuning δ is 27 fm (corresponds to
 $\sqrt{3}$ FWHM).

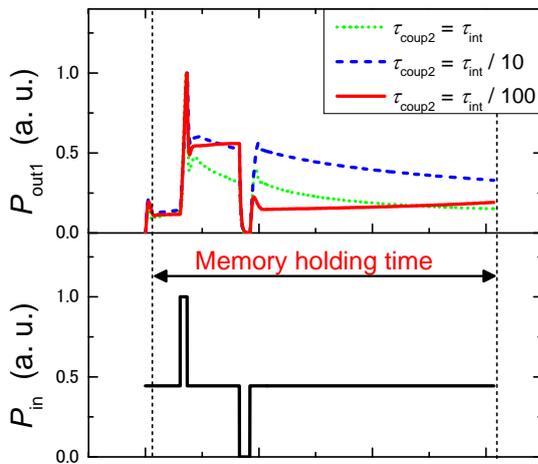


Fig. 3: Optical memory operation, when δ is $\sqrt{3}$ FWHM.
 The input power of the drive light is 2 μ W, 80 μ W and 7.3 mW,
 when τ_{coup2} is τ_{int} , $\tau_{int}/10$ and $\tau_{int}/100$, respectively. The

horizontal axis is normalized with the photon lifetime τ_{tot} .

5. 結論

本研究では, CMT と FEM を組み合わせることによ
 ってシリカトロイド微小光共振器中で生じる非線
 形光学効果の厳密なモデル化を行った. それにより,
 導波路—共振器間の結合を調整することにより光
 Kerr 双安定メモリが実現可能であるという明快な理
 解を得られた. その際のメモリ保持時間は約 500 ns
 であった. 駆動パワーは 7.3 mW と他のメモリ素子と
 比較すると大きい, 消費されるエネルギーは極めて
 小さい. これは他のメモリで用いられている TO 効
 果やキャリアプラズマ効果が光子を吸収するのに対
 して, 本メモリで用いた光 Kerr 効果は光子吸収を伴
 わないためである. さらに, シリカトロイド微小光
 共振器の極めて高い Q 値により, 共振器外へ散乱す
 るエネルギー損失は非常に小さくなる. これらの特
 長を踏まえると, 本メモリは量子信号処理のような
 低損失が求められる分野への応用に適していると思
 えられる.

参考文献

- [1] T. Tanabe, M. Notomi, S. Mitsugi, A. Shinya, and E. Kuramochi, *Appl. Phys. Lett.* **87**, 151112 (2005).
- [2] V. Almeida and M. Lipson, *Opt. Lett.* **29**, 2387–2389 (2004).
- [3] C. Manolatou, M. Khan, S. Fan, P. Villeneuve, H. Haus, and J. Joannopoulos, *IEEE J. Quantum Electron.* **35**, 1322–1331 (1999).
- [4] M. Oxborrow, *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **55**, 1209–1218 (2007).
- [5] T. Kippenberg, S. Spillane, and K. Vahala, *Appl. Phys. Lett.* **85**, 6113–6115 (2004).

高透過率テーパ光ファイバの作製

小川陽平(B4)

微小光共振器の光学測定には、光を入出力するためのテーパ光ファイバが不可欠である。本研究では、十分なエバネッセント光を得られるテーパ光ファイバの作製条件を解明するため、シミュレーション及び実作製を行い、70%の透過率を保ちながら、最大で 20 dB の光がしみ出すテーパファイバの作製条件を明らかにした。

キーワード：テーパ光ファイバ、光導波路、エバネッセント

1. テーパ光ファイバとは

近年、光を微小領域に閉じ込める素子である、微小光共振器の研究が急速に発展してきている。微小光共振器の光学特性値として、光の閉じ込め度を表す Q 値という指標がよく用いられる。 Q 値を測定するためには微小光共振器に光を導入する必要があるが、微小光共振器は通常全反射を用いて光を閉じ込めるため、レーザを直接照射しても光を励振できない。そこで、エバネッセント光を用いる必要がある。テーパ光ファイバは、このエバネッセント光を簡単に得られる素子として注目されている。

テーパ光ファイバの模式図を Fig. 1 に示す。シングルモード光ファイバ(SMF)の一部を熱しながら左右に引張ることで、加熱部分の直径を $1 \mu\text{m}$ 程度に細くすることができる。今回用いる波長 $1.55 \mu\text{m}$ 程度の太さであるため、伝搬光の一部がエバネッセント光としてしみ出す。この部分に光学素子を接近させることで、光を導入することができる。

本研究では、テーパ光ファイバの太さと光の漏れ出しについてまずシミュレーションを行い、最適な太さを求めた後に実際に作製を試みた。



Fig. 1. Schematic illustration of tapered fiber.

2. 形状および伝搬、しみだしの検討

テーパ光ファイバを実際に作製するにあたり、テーパ形状が必要となる。本研究では、次の手順により特定の位置におけるテーパファイバの太さを得た。

まず、Fig. 2 で表される特定の熱せられる領域を考えたとき、ある状態 k から単位時間 t 経過後の状態 $k+1$ へと変化したとき、体積が一定であるならば(1)式が成立する。

$$\pi r_k^2 L = \pi (r_k + \Delta r) (L + \Delta l) \quad (1)$$

(1)式を整理すると、

$$r_{k+1} = r_k + \Delta r = r_k \sqrt{\frac{L}{L + \Delta l}} \quad (2)$$

ここで、加熱範囲を一定範囲に固定することを考えているため、半径 r_k 、長さ $\Delta l/2$ の円柱が次々と形成されることとなる。(2)式を繰り返し適用することに

より、Fig. 3 のようなテーパ形状が得られる。実際には連続時間で行うため、図 1 のようになめらかな形状となることは明らかである。後述する作製装置の制約より、引張速度 $v = 240 \mu\text{m/s}$ 、加熱範囲 $L = 3 \text{ mm}$ 、1 ステップ時間を $t = 0.1 \text{ s/step}$ とすると、 $\Delta l = t \times v = 24 \mu\text{m/step}$ と表せる。図 4 に示すように、後述する作製法により実際に作製した実測点と比較すると、 $L = 3 \text{ mm}$ とすればよいことが分かった。ゆえに、以後はこの図の青線で示される関係を基にして、必要な太さのテーパを得るための引き時間を求めることにした。

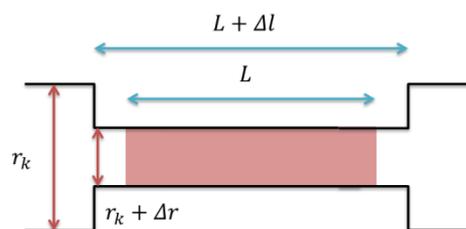


Fig. 2. Heated region of tapered fiber. Radius and length change is described.

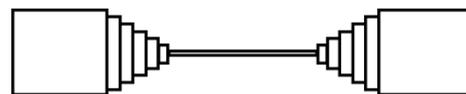


Fig. 3. Image of tapered fiber made by eq. (2).

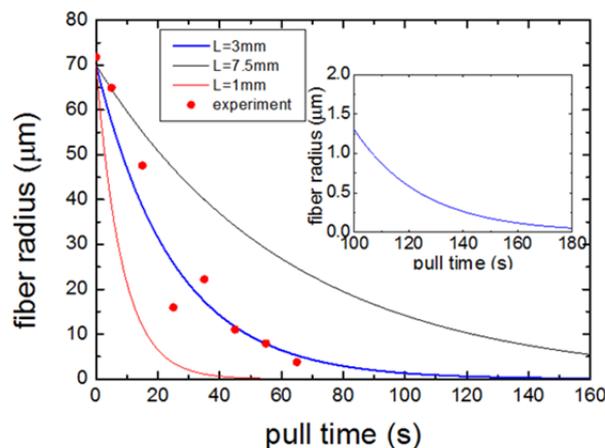


Fig. 4. Minimum radius of optical tapered fiber versus pulled time.

上記の計算で得られた形状に対してモード伝搬解析を行った。解析には RSoft Beamprop を用いた。Fig.

5 は伝搬に伴う光のファイバ内外の強度を表している。これより、直径 600 nm のとき、最大で 40% の光がしみ出すことが分かった。微小光共振器に導入する光の量としては十分であるため、直径 600 nm を目標として作製することとした。

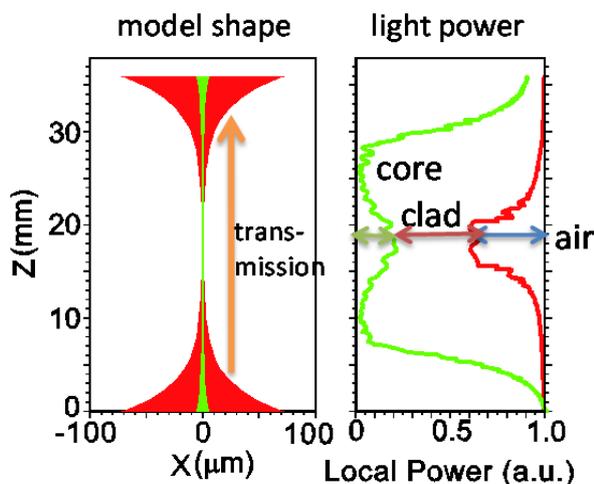


Fig. 5. Left: Simulated tapered fiber shape. Right: Propagated length versus light mode power.

3. 加熱温度の検討

テーパ光ファイバを作製するにあたって、ファイバを加工する温度は重要な要因である。そこで、ファイバの原料であるガラスの加工点を調べ、ガスバーナーとして利用する LP ガスと酸素ガスの流量と混合比を調べた。

文献によると、光ファイバの材料である石英ガラスの作業温度は 1900~2100 K である[1,2]。この温度の燃焼炎を発生させるには、LP ガスと酸素ガスの mol 比を 2.8:5 とすればよい[3]。この mol 比では LP ガスは燃焼により CO, CO₂ へと変化し、煤が発生しない。今回用いた装置では、LP ガス圧を 0.0686 MPa、酸素ガス圧を 0.1 MPa としているので、流量比に直すと 7:10 となる。本研究ではこの比をバーナーの流量比として採用した。

4. テーパ光ファイバの作製

Fig. 6 に、今回テーパ光ファイバを作製した装置を示す。Fig. 7 は動作模式図である。中央にあるバーナーで光ファイバを熱しながら、左右に一定速度で引張ることでテーパを作製する。

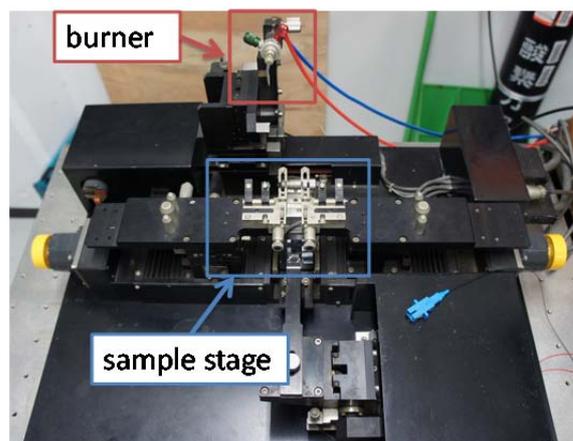


Fig. 6. Equipment of making optical tapered fiber.

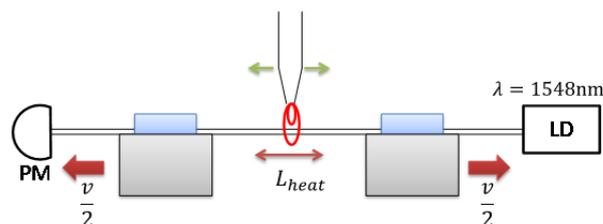


Fig. 7. Making method.

レーザを入射し、パワーメータで観測しながらテーパ光ファイバの作製を行った。ガスは 3. で検討したように、LP ガス圧を 0.0686 MPa、流量を 14 ml/min、酸素ガス圧を 0.1 MPa、流量を 20 ml/min とした。引張速度 $v = 240 \mu\text{m/s}$ としたとき、直径 600 nm のテーパ光ファイバを得るためには、図 4 に表される関係より $t = 150 \text{ s}$ だけ引張ればよい。この条件でテーパファイバを作製するときの 1550 nm の光の透過パワーの強度変化を Fig. 8 に示す。これより、先述の条件においてファイバは安定して伸張されており、透過率の低下は 2 dB 程度であることが読み取れる。

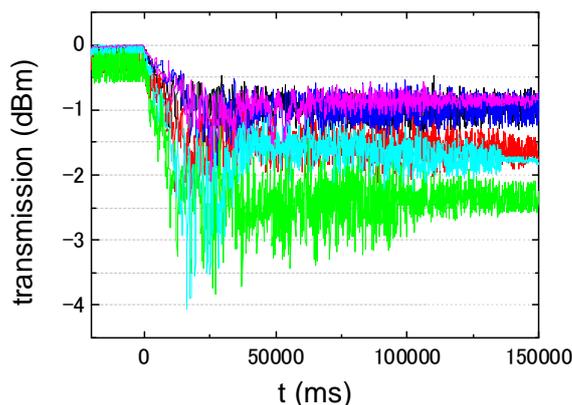


Fig. 8. Transmission power when pulling fiber. Input wavelength is $\lambda = 1550 \text{ nm}$.

実際に作製したテーパ光ファイバをスライドガラスに接触させた際のスペクトル変化を Fig. 9 に示す。接触すると 10 dB の透過率低下が観測されたため、光はテーパファイバ外へ十分しみだしていると考えられる。

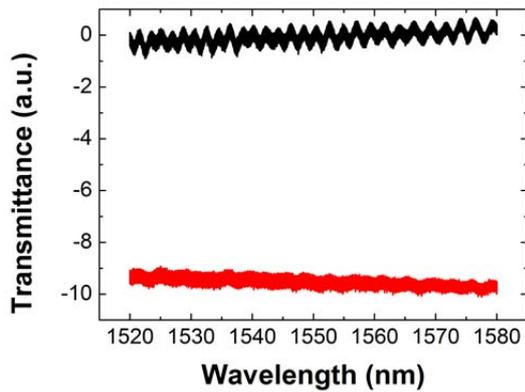


Fig. 9. Spectrum of tapered fiber. Black: Nothing touched to tapered fiber. Red: Slide glass touched.

5. まとめ

本研究では、微小光共振器の光学測定を効率よく行うためのテーパ光ファイバの作製条件を明らかにし、作製したテーパファイバの光学特性を調べた。

6. 参考文献

- [1] 作花済夫, “ガラス科学の基礎と応用,” 内田老鶴圃 (1997)
- [2] D. G. Holloway, 大井喜久夫 訳, “ガラスの物理,” 共立出版 (1977)
- [3] 周善寺清隆, 福岡県工業技術センター研究報告 **18**, 25 (2008)

レーザーリフロー装置の構築とトロイド共振器のレーザーリフロー

吉岐航(B4) 加藤拓巳(B4)

本研究では、シリカトロイド微小光共振器作製プロセスの工程の1つであるレーザーリフローを施す実験装置の構築を行った。さらに、クリーンルームで製造されたディスク状共振器にリフロープロセスを施すことにより、実際に共振器を試作することにも成功した。共振器作製プロセスの立ち上げが本年度で完了したことにより、来年度以降は共振器の応用研究が可能となる。

キーワード：シリカトロイド微小光共振器，レーザーリフロー，CO₂レーザー

1. はじめに

近年の光共振器作製技術の向上により、高 Q 値な光共振器を容易に作製できるようになった。高 Q 値共振器では共振器内部に光を強く閉じ込めることができるので、光-物質間の相互作用が生じやすくなる。そのため、高 Q 値な光共振器を用いれば、様々な非線形光学効果を効率的に利用することが可能となる。

シリカトロイド微小光共振器は2003年にK. Vahalaのグループによって発表された共振器である[1]。その特長は Q 値の高さであり、 $Q = 2.1 \times 10^8$ という値が報告されている[2]。これはシリコンマイクロリング型共振器($Q = 1.43 \times 10^5$)[3]やフォトニック結晶型共振器($Q = 1.2 \times 10^6$)[4]といった共振器と比較すると非常に高い値である。またシリカトロイド微小光共振器にはシリコン基板上に作製できるという利点もある。 Q 値で比較するならば微小球共振器[5]の方が優れているが、集積化性能はシリカトロイド共振器の方が遥かに高いため応用の幅は広い。応用分野はレーザーやセンサー、cQEDなど多岐に渡る。

本研究では、来年度以降にシリカトロイド微小光共振器の応用研究を行うことを見据え、シリカトロイド微小光共振器の作製プロセスの一工程であるレーザーリフローを施す系を構築することを目指す。シリカトロイド微小光共振器の作製法自体は既に確立されている。しかし来年度以降シリカトロイド微小光共振器を応用した研究を行うためには、共振器作製技術を本研究によって立ち上げることが必要不可欠である。

2. シリカトロイド微小光共振器の作製プロセス

まずは、シリカトロイド微小光共振器の作製プロセスについて説明する。模式図をFig. 1に示す。まずリソグラフィによってSOI (Silicon-on-insulator)基板上に円形のSiO₂パターンを作製する(Fig. 1左上)。その後XeF₂によるドライエッチングを用いてSiのみを選択的にエッチングするとFig. 1右上のように、Siの柱の上にSiO₂の円盤が乗ったディスク状構造が出来上がる。この状態でも既に光共振器としての機能は示すのだが、ここからさらに Q 値を上げるためにレーザーリフロープロセスを施す。レーザーリフロープロセスとは、ディスク共振器上部からCO₂レーザーを照射することによってSiO₂ディスクの外縁部だけを選択的に溶解させる工程である。レーザーリフローによってディスク外縁部のみが溶解するとFig. 1下のよ

うに外縁部が丸まった、シリカトロイド微小光共振器が形成される。

レーザーリフローによってシリカの外縁部のみが溶解するのは1. CO₂レーザー波長帯においてシリカの方がシリコンよりも遥かに吸収が大きい2. シリコンの方がシリカよりも大きな熱伝導性を持つ、ためである。CO₂レーザー照射すると、その波長帯におけるシリカの吸収係数は大きいため、シリカ中において大きな熱が発生する。シリカディスクの中心部の熱は熱伝導性の高いシリコンと接触しているため基板の方へ効率よく逃げるが、ディスク外縁部は周りを空気に囲まれているため熱的に孤立しており、非常に高温となる。その結果、シリカの外縁部だけ融点に達するので、外縁部のみが融解し丸みを帯びた形状に変形するのである。

この共振器に光を入射する時にはテーパ光ファイバを、基板と平行にシリカ外縁部に1 μ m程度まで近づける。するとテーパから漏れ出したエバネッセント光が丸まったドーナツ状の部分に入射し、その中を光がループする。このループが本共振器の光閉じ込めの原理である。シリコンマイクロリング型共振器やフォトニック結晶型共振器はエッチングによって作製されるため共振器表面にnmオーダーの凹凸が残ってしまうが、シリカトロイド微小光共振器はエッチング後にレーザーリフローによって溶解されるため、表面張力によって共振器表面が非常に滑らかになる。表面が滑らかだと凹凸がある場合に比べて表面散乱が非常に小さくなるため、共振器の Q 値は高くなる。したがってシリカトロイド微小光共振器で高 Q 値を得る際には、レーザーリフロープロセスは非常に重要な工程である。

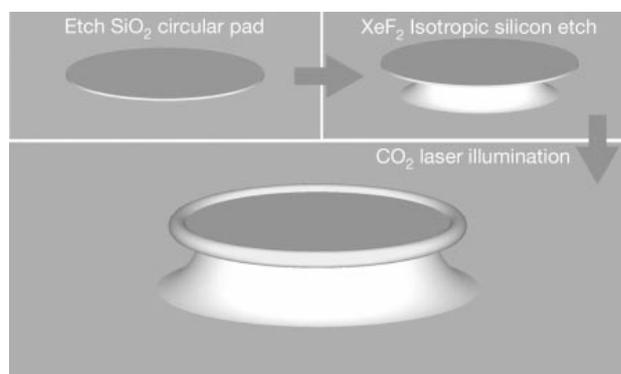


Fig. 1 : Flow diagram illustrating the process used to fabricate silica toroid microcavities[1].

3. レーザリフロー装置の構築

次に、実際に構築したレーザリフロー装置の構造について説明を加えていく。

装置の構成の模式図を Fig. 2 に示す。前述の通り、レーザ光源にはCO₂レーザを用いた。CO₂レーザの波長は約10.6 μmであるので肉眼で観察ことはできないが、CO₂レーザ光と光路が一致するように780 nm帯のレーザ(以下、アライメント光と呼ぶ)が設置されている。そのため、この光を用いて光学系の調整を行うことができる。また、CO₂レーザに接続されたファンクションジェネレータによって、レーザ光を任意の周波数(< 15 kHz)に変調することができる。

レーザから発せられた光は、まず可変アッテネータを通過して任意のパワーまで減光される。次にミラーによって持ち上げられた後、ビームスプリッタ、レンズを通過してSiチップ上に集光される。ディスク状構造の直径は約100 μmであるので、集光されたスポットと構造とを一致させるためには高精度に位置合わせを行えるステージが必要である。そこで我々はxy軸に100 nm、z軸方向には10 nmの分解能を持つ自動ステージを用いた。

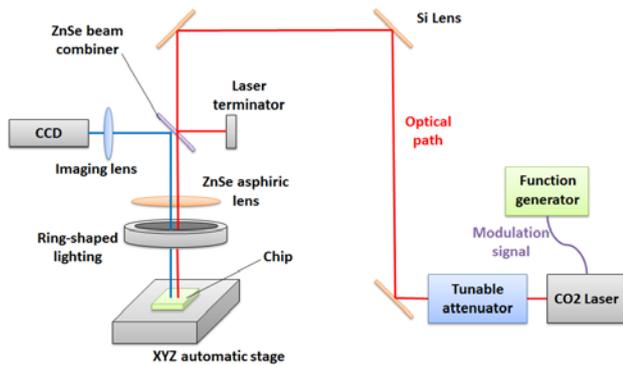


Fig. 2 : Experimental set-up of the reflow process.

集光スポットとディスク状構造が一致していることの確認には、Fig. 2の左に示すようなカメラ観察系を用いることにした。また観察用の照明にはリング型の照明を用いた。このような構成にすることによって、チップ表面におけるアライメントレーザ及び照明の反射光を捉えることができるため、良好な像を得られる。実際に観察できる像を Fig. 3(a)に示す。このように画面上にてアライメント光の集光スポットとディスク共振器を観察しながら、これらの位置が一致するように自動ステージを操作する。

レーザリフロー装置の光路に関する説明は以上だが、作製に使用するCO₂レーザは非常にハイパワーなのでチップ面における散乱光すら危険である。このような理由から、散乱光を遮断するためチップが乗せられるステージをアルミの箱で囲うことにした。その様子を Fig. 3(b)に示す。このような構成にすることには、安全性を高める他に、気密性を向上させるという狙いもある。空气中でリフロープロセスを行うとシリカトロイド共振器表面に-OH基が付着してしまいQ値が低下することが知られている[2]。この

点を踏まえ、我々は将来的には窒素雰囲気にてリフローを行うことを検討している。そのため我々は気密性を高める構成とすることにした。

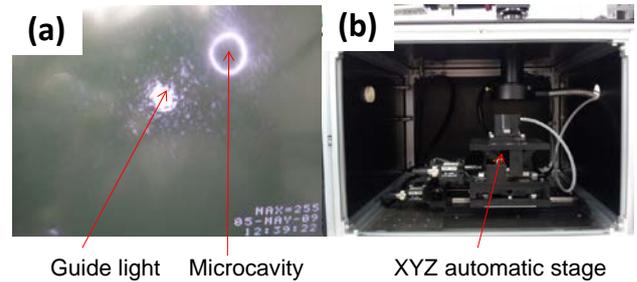


Fig. 3 : (a) An image captured by CCD. (b) XYZ automatic stage in the aluminum box.

4. シリカトロイド微小光共振器の試作

次に、シリカトロイド微小光共振器の試作結果について説明する。Fig. 4(a)にリフロー前のディスク状構造の電子顕微鏡画像を示す。このディスク状構造はHF:HNO₃:CH₃COOH =3:5:3の割合で混ぜ合わせた液により30秒間のウェットエッチングを行ったものであり、直径94.8 μmである。この構造にリフロープロセスを施した後の構造の電子顕微鏡画像を Fig. 4(b)示す。照射したCO₂レーザのパワーは8 W(スポットサイズから算出できるパワー密度は42.5 GW/m²)で、照射時間は0.75 msである。リフロー前とリフロー後と比較すると、外縁部が収縮し円環状となっていることが確認できる。この変化は画像から測定できる直径からも確認することができる。リフロー前の直径が94.8 μmだったのに対し、リフロー後の直径は84.4 μmと減少している。これらの結果より、シリカトロイド微小光共振器の試作に成功したと結論付けることができる。

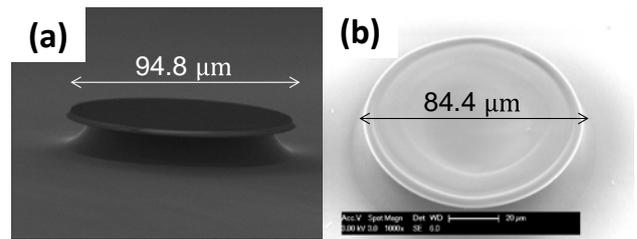


Fig. 4 : (a) A disk-shaped structure. (b) A silica toroid microcavity.

5. 課題・検討

レーザリフロー装置の構築及びシリカトロイド微小光共振器の試作はともに完了したが、それに伴って新たな課題も見つかった。課題としてまず挙げられるのは、現状のリフロー装置の再現性の低さである。前述の通りCO₂レーザ光は直接観察することが出来ないため、アライメント光の集光スポットを用い

てディスク状構造との位置合わせを行っている。しかし、CO₂レーザ光とアライメント光の間にはμmオーダーの僅かなずれが存在する。ディスク状構造は直径が100 μmと非常に小さいため、その僅かなずれにより、CO₂レーザがディスクの中央に当たらないという状況が起こり得る。そのため、リフローを施すごとにスポットの当たる位置が微妙に変化してしまうので、再現性が低下するという問題が生じている。

また現状では空气中でリフローを行っているために、シリカトロイド共振器表面に-OH基や微粒子等が付着してQ値がリミットされてしまうという課題もある。作製した共振器のQ値を測定したところ、 $Q \approx 10^5$ 程度であり、先行研究において報告されているQ値と比較すると極めて低い。この点については、窒素雰囲気中でリフローを行うなど、今後改善していく必要がある。

6. 結論

我々は本研究において、シリカトロイド微小光共振器のレーザリフローに用いる装置を構築した。さらに、実際にディスク状構造にレーザリフローを施すことにより、シリカトロイド微小光共振器の試作にも成功した。本研究の目的はシリカトロイド微小光共振器の内製技術の確立にあり、その点では、目標を十分に達成できたものと考えられる。来年度以降はレーザリフロープロセスの精度向上に努めると共に、作製したシリカトロイド微小光共振器を用いてその応用研究に取り組んでいきたい。

参考文献

- [1] D. Armani, T. Kippenberg, S. Spillane, and K. Vahala, *Nature* **421**, 925–928 (2003).
- [2] E. Ostby, PhD thesis, California Institute of Technology (2009).
- [3] Q. Xu, P. Dong, and M. Lipson, *Nat. Phys.* **3**, 406–410 (2007)
- [4] T. Tanabe, M. Notomi, E. Kuramochi, A. Shinya, and H. Taniyama, *Nat. Photonics* **1**, 49–52 (2007).
- [5] D. Vernooy, V. Ilchenko, H. Mabuchi, E. Streed, and H. Kimble, *Opt. lett.* **23**, 4 (1998)

多角シリカトロイド微小光共振器の提案と作製

加藤拓巳(B4) 吉岐航(B4)

本研究では、従来のシリカトロイド微小光共振器とは異なった形状、多角形状化を提案し、その作製手順の開発、性能の評価をおこなった。従来の XeF₂ ガスではなく、KOH ウェットエッチングを犠牲層エッチングとして用いることで多角形状を作る事に成功した。また 2D-FDTD を用いてその性能を解析・評価した。

キーワード：微小光共振器，半導体プロセス，レーザーリフロー，多角形状，2D-FDTD

1. はじめに

シリカトロイド微小光共振器は Q 値が非常に高い光デバイスである。 Q 値が高いことから、微粒子センサ[1]・非線形光学現象を利用した光コム[2]・光不安定メモリ[3]などの応用が研究されているが、未だに実用化の目途は立っていないのが現状である。実用化を妨げている原因の一つは、共振器に光を入出力する方法にある。シリカトロイドは、ウィスパリングギャラリモード(WGM)共振器と呼ばれ、全反射のみで光を閉じ込めている。そのため、光の入出力には、エヴァネッセント光を利用するテーパファイバが用いられる。これは非常に細くした光ファイバであり、その扱いには繊細さが求められる。さらに共振器とファイバとの距離を微小制御(1 μm 程度)する必要があり、その制御も困難なものである。この共振器-ファイバのカップリングの問題を解決するのが本研究の目的である。

カップリングの問題は、微小光共振器ではよく生じる問題である。それを解決した例として、シリコンマイクロリングの例が挙げられる[4]。これは、共振器の形状をレーストラック型にすることで、カップリングの作用長を長くして、より安定した動作を期待している。シリカトロイドも形状を変化させることでカップリングの問題を解決できるかもしれないが、今まで考えられてこなかった。本研究では、シリカトロイドの作製工程を見直し、形状を変化させることはできるか。そしてそれによってカップリングの問題を解決できるのかについて調べた。

2. シリカトロイド微小光共振器の作製方法

2.1 原理

シリカトロイド微小光共振器の作製方法は、2003年に発表された論文に詳しい[5]。具体的な手順としては、

1. シリコン基板上にシリコン熱酸化膜を成長させる。
 2. フォトリソグラフィによって円形マスクパターンを転写する。
 3. XeF₂ ガスドライエッチングによるシリコン犠牲層エッチングをおこない、シリカディスク形状にする。
 4. CO₂ レーザによって、シリカディスクの外縁部を溶融・固化させてシリカトロイド形状とする。
- の4つの工程によって作製される(Fig. 1)。

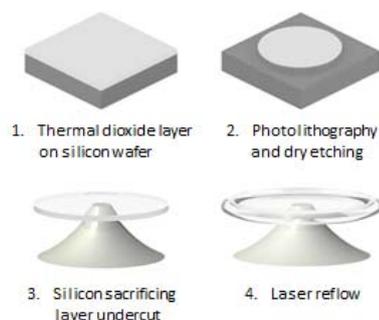


Fig. 1 : Fabrication process of a silica toroidal microcavity.

ここで、重要なのはシリカディスクを支えるシリコンポスト部の形状が、シリカトロイドの形状に影響しているという事である。CO₂ レーザによって発生したシリカ部の熱は、シリコンポストを通して放散する。従って、シリカディスク上の熱分布はシリコンポストの形状を転写した形となると予想される。ここに着目し、シリコンポストの形状を変化させることで、シリカトロイドの形状を操作することを狙った。

2.2 実験

シリコンポストの形状を決定するのは、作製工程の中の犠牲層エッチングである。従来は XeF₂ ガスを用いていた。これはシリコンを等方的にエッチングするため、円形状のシリコンポストが作製されていた。本研究では、XeF₂ ガスによるドライエッチングに代えて、フッ硝酸、KOH を用いたウェットエッチングを提案した。

(1) XeF₂ ドライエッチング

XeF₂ ガスを用いた犠牲層エッチングは、シリカトロイド微小光共振器を作製するにあたって、広く用いられている。フォトリソグラフィまで終えた基板に対して、XeF₂ エッチングをしたものを Fig. 2 に示す。

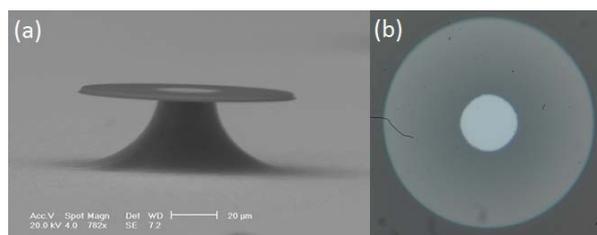
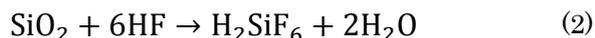
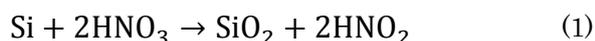


Fig. 2 : XeF₂ gas dry etching. (a) SEM image. (b) optical microscope image of a disk cavity with a circular silicon post, fabricated using XeF₂ isotropic etching.

(2) フッ硝酸ウェットエッチング

フッ硝酸とは、ふっ化水素酸(HF)、硝酸(HNO₃)を混合させた溶液であり、酢酸(CH₃COOH)を加える場合もある。フッ硝酸は、シリコンを等方的にエッチングする溶液として知られているが、今まで、シリカトロイドの作製に対して使用された例はなかった。単純に、フッ硝酸溶液が XeF₂ ガスに比べて安価であり、実験設備も簡易で済むため、これを利用できれば低コストでシリカトロイドが作製できる。しかしこの反応を化学式として考えると



という反応系であり、シリコンを酸化し、シリカをふっ化水素酸によって溶かしていることが分かる。しかし、本実験を考えると、犠牲層エッチングの後に、シリカディスクが上部に残っている必要がある。このため、シリコンと熱酸化成長シリカ膜のエッチングレートが鍵となっていると考えられた。溶液の濃度は適切と考えられた HF:HNO₃:CH₃COOH=3:5:3 で実験をおこなった。実験結果を Fig. 3 に示す。

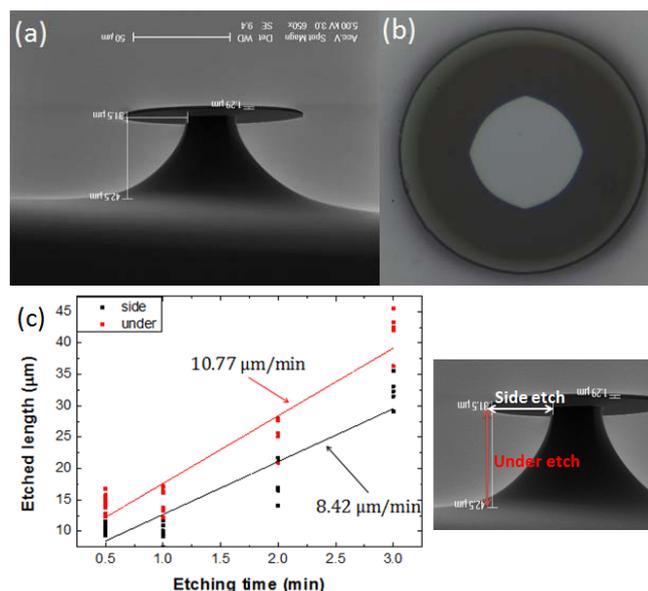


Fig. 3 : HNA wet etching: HF(49%):HNO₃(70%):CH₃COOH(99%)=3:5:3. (a) SEM image (etching time 3 min.). (b) Optical microscope image of a disk cavity with a circular silicon post, fabricated using HNA isotropic etching (etching time 3 min.). (c) Experimental results of HNA(3:5:3) etching.

(3) KOH ウェットエッチング

KOH(水酸化カリウム)は、シリコンを結晶面に対して別々に削る異方性を示すことで知られている。異方性を示すエッチング溶液は、KOH の他にも、TMAH(水酸化テトラメチルアンモニウム水溶液)やEDP(エチレンジアミンピロカテコール)があるが、本研究では、KOH を代表として用いた。KOH ウェットエッチングをしたものを Fig. 4 に示す

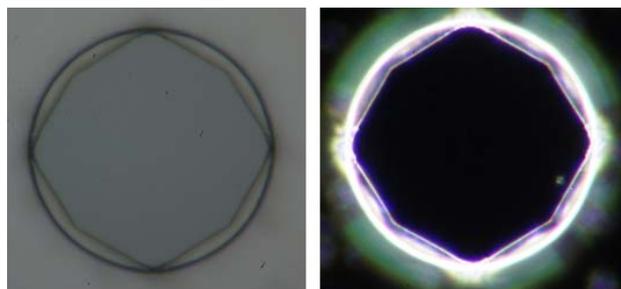


Fig. 4 : KOH wet etching. Optical microscope image of a disk cavity with a polygonal silicon post, fabricated using KOH anisotropic etching (4 hour 30 min.).

2.3 多角形状化の実現

2.2 の実験結果から、シリカトロイド微小光共振器を多角形状化することが可能であることが考察された。KOH ウェットエッチングのみでは、シリコンポストは 8 角形状になるが、水平方向のエッチングがあまり進まないため、そのままではシリカトロイドにすることができない。ゆえに、等方性エッチングと異方性エッチングを組み合わせることで犠牲層エッチングを進めつつ、8 角形状のシリコンポストが作製できると考えた。エッチング結果と、さらにレーザーフローを施したものを Fig. 5 に示す。

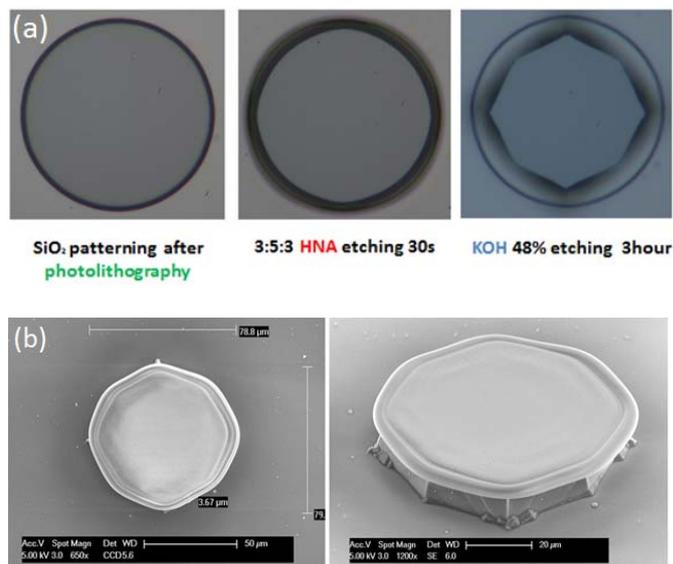


Fig. 5 : Fabrication of a polygonal silica toroidal microcavity. (a) optical microscope image of a disk cavity, fabricating octagonal silicon post. (b) SEM image of a fabricated octagonal toroidal cavity after the laser reflow. The toroid diameter is about 80 μm. A 12-W CO₂ laser is irradiated for 1.5 ms. The focus lens has a focal length of 38.1 mm.

本研究では、8 角形状のシリカトロイドを作製することができた。また、マスクパターンや、使用する異方性エッチャントの選び方によっては、6 角形状や 4 角形状も実現すると考えられる。

3. 多角シリカトロイドの性能評価

多角形状の微小光共振器を研究した例として、シリコンディスクの例がある[5][6]。しかしながら、シリカトロイドにそのまま置き換えることはできないため、2D-FDTD(Meep)を用いて、性能の評価をおこなった。多角形の代表として8角形のシリカトロイドと、円形のシリカトロイドのシミュレーションをおこない、比較をおこなった。

3.1 導波路接続無しの場合の各形状の評価

まずは、カップリングを考えない場合の共振モードについてシミュレーションをおこなった。その結果を Fig. 6 に示す。(a)は円形のシリカトロイドを想定してシミュレートしたもので、その共振モードはWGMである。光の減衰もほとんどなく、この結果から $Q > 10^7$ であることが計算された。(b)は8角形の共振器であるが、その共振はおおむねWGMである。この Q 値は $Q = 3.8 \times 10^6$ と計算されたが、より正確に計算した場合には、 $Q = 8.0 \times 10^6$ とさらに高い値が求められた。

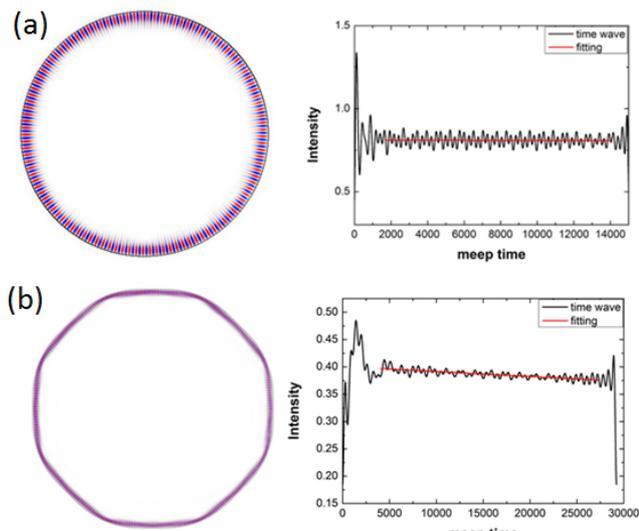


Fig. 6: Calculated H_z field profile of a circle (a) and an octagonal toroidal microcavity (b) by 2D-FDTD (left). Temporal decayed waveforms are shown on the right panels.

8角形の方は、 Q 値では劣っているが、その共振モードの分布が特徴的である。Fig. 7を見ると光のしみ出しの程度が角の部分と辺の部分で異なっている。シリカトロイド微小光共振器は、エヴァネッセント光を介して、光の入出力をおこなうので、光のしみ出しの程度はそのカップリングの強さに直結する。ここから、8角形共振器は、結合に対して、接触させる場所を選ぶことで、自由度をもたせられる可能性があることが分かる。

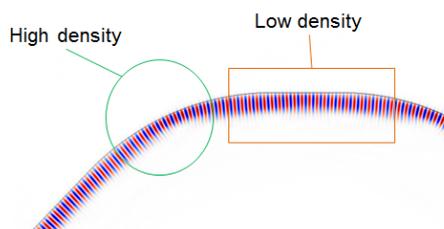


Fig. 7: The contrast of the degree of light seeping between at a corner and a side of the octagonal cavity.

3.2 導波路接続有りの時の各形状の評価

カップリングを考えた場合についてシミュレーションをおこなった。導波路には $1 \mu\text{m}$ のテーパファイバを想定した。その結果を Fig. 8 に示す。なお8角形共振器は、アプローチさせる箇所によってカップリングが変化すると考えられたため、直線部分と角部分の2パターンを想定した。結合係数は、結合モード理論に従って求めた[7]。

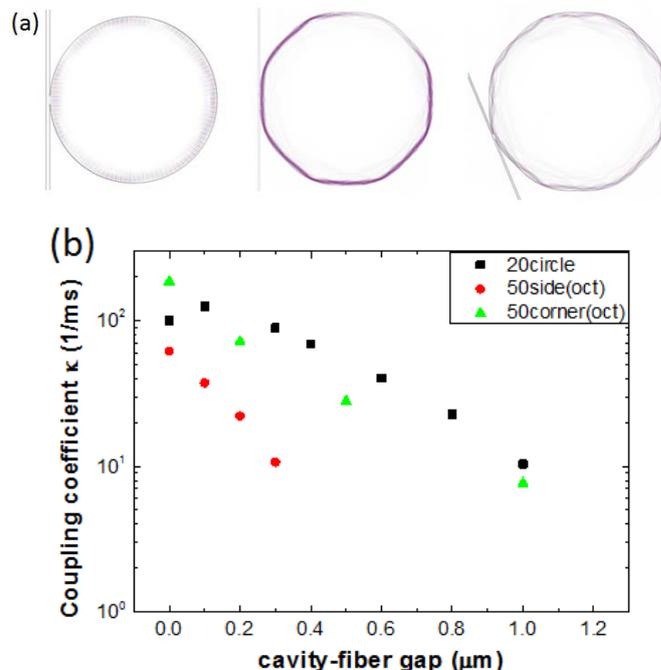


Fig. 8: (a) H_z field profile of a circle / an octagonal toroidal microcavity with tapered fiber. (b) Coupling coefficient vs. gap (square : $r = 20$ circular, circle: $r = 50$, $d = 10$ octagonal side, triangle: $r = 50$, $d = 10$ octagonal corner).

この結果から、共振器の形状によって、カップリングを変化させることができることが分かる。積極的にカップリングさせたい場合は角部分に、カップリングを抑えたい場合は直線部分にファイバを近づけるといった自由度が持てることを明らかにした。

参考文献

- [1] A. M. Armani, R. P. Kulkarni, S. E. Fraser, R. C. Flagan and K. J. Vahala, *Science* **317**, 783 (2007).
- [2] P. Del'Haye, A. Schliesser, O. Arcizet, T. Wilken, R. Holzwarth and T. J. Kippenberg, *Nature* **450**, 1214 (2007)
- [3] 吉岐航, 田邊研究室アニュアルレポート (2011)
- [4] F. Xia, L. Sekaric, M. O'Boyle and Y. Vlasov, *Appl. Phys. Lett.* **89**, 041122 (2006)
- [5] C. Li and A. W. Poon, *Opt. Lett.* **30**, 546 (2005)
- [6] C. Li, L. Zhou, S. Zheng and A. W. Poon, *IEEE J. Quant. Elec.* **12**, 1438 (2006)
- [7] B. E. Little, J. P. Laine and H. A. Haus, *J. Light. Tech.* **17**, 704 (1999)

微小光共振器の測定システムの構築

小川陽平(B4) 工藤寛史(B4)

微小光共振器の光学測定を行うためには、共振器の微細制御や、連動して動作するカメラによる観察が必要となる。微小光共振器を測定するためのシステムの設計と構築を行ったので報告する。

キーワード：光学測定、テーパ光ファイバ、微細制御

1. 微小光共振器の光学特性値

微小光共振器は光を内部に閉じ込める素子のことである。光の閉じ込め度を Q 値という値で表す。この Q 値を測定するためには、エバネッセント光を微小光共振器に入射する必要がある。このとき、光を導入する導波路と共振器の距離が非常に重要となる [1]。本研究では、導波路の微小制御を行い、共振器に効率よく光を入射するための調芯装置を構築し、実際に光学測定を行った。

2. 調芯系の設計

まず、図 1 に示される系を設計した。中央にあるサンプルステージには x, y 方向 10 nm 精度の自動ステージを、テーパ光ファイバを固定するステージには z 方向 10 nm 精度の自動ステージを用いることとした。微小光共振器にテーパ光ファイバを近づけるためには 2 方向からの観察が必要である。また入力する光は 1550 nm の光であるため、近赤外光 (IR) カメラが必要となる。そこで、主な観察対象がシリカトロイド共振器であることを踏まえ、IR カメラで上方向から観察して位置を合わせ、横方向からは CCD カメラで観察しながらテーパと共振器の高さを合わせる構成とした。

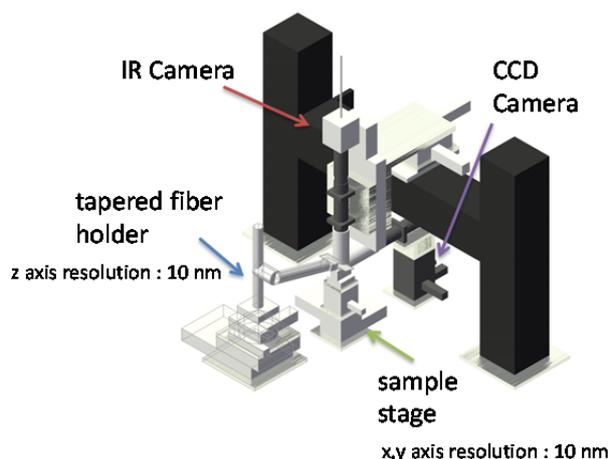


Fig. 1. Image of fiber-taper coupling setup.

3. 調芯系の構築

構築した調芯系を Fig. 2 に示す。実際に測定を行う上で様々な問題が生じたため、設計した系からはさらに改良を行っている。まず、系全体の振動を除去するため、全体を 0.5 Hz 以上の振動を除去する除振台上に設置した。さらに、実験を行ったところテー

パファイバが風で非常に大きく揺れてしまうので、全体を防風フードで覆った。テーパファイバホルダは観察の都合上、設計時から 90 度ずらした位置とした。



Fig. 2. Photograph of fiber-taper coupling setup.

4. テーパ光ファイバの固定

測定に用いるテーパ光ファイバを本測定系で利用するためには、固定するためのジグが必要となる。本測定系では図 3 に示される 2 つの固定方法について検討を行った。

図 3(a)のように直線的に固定する方法の利点は、固定が簡単で取り扱いが楽という点である。しかし、直線でしかアプローチできないためサンプルを一直線に並べる工夫が必要となる。また、後述する曲げ固定よりもジグが大きくなる欠点がある。

一方、図 3(b)のように曲線的に固定する方法は、点でのアプローチが可能であるため、サンプル形状に制約が少ないことが大きな利点である。また、曲げることにより光がテーパ光ファイバの曲げた外側に多く局在し、微弱な入力光でも光学測定が可能になることが期待される。しかし、安定した形状に固定することが難しく、また上下方向へのしなりが大きくなるため振動に弱いと考えられる。

本測定系ではどちらのジグも試行したが、サンプル形状の問題への対処を別途考案することとし、直

線固定のジグを利用することとした。

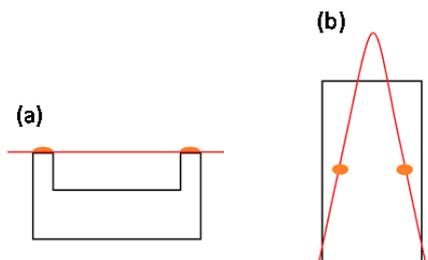


Fig. 3. Settle method to jig. (a) Straight method. (b) Curve method.

5. 微小球共振器の測定

3.で構築した測定装置を用いて、微小球共振器の光学測定を行った。まず切断した光ファイバの先端をCO₂レーザーで熱して溶解させ、Fig. 4に示される直径300 μm程度の微小球共振器を作製した。この共振器にテーパ光ファイバを接触させ、光学測定を行ったところ、図5のスペクトルが得られ、Q値は $Q = 5 \times 10^5$ となった。これより、構築した系で 10^6 程度のQ値であれば測定可能であることが分かった。研究室における測定対象であるシリカトロイド微小光共振器のQ値は 10^8 程度と非常に高いため、更なる改良が必要である。



Fig. 4. Tapered fiber touching to the microsphere. Diameter of fiber is about 2 μm and diameter of microsphere is about 300 μm.

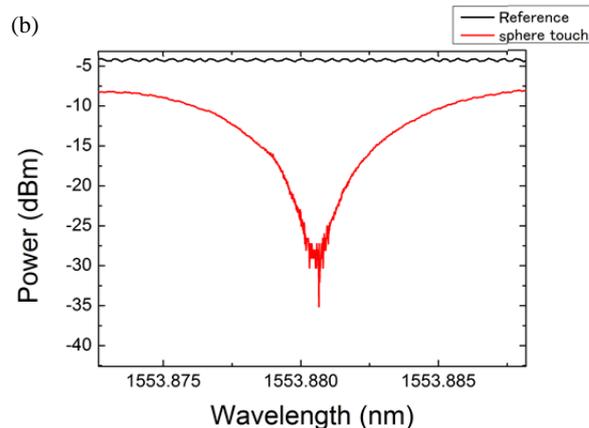
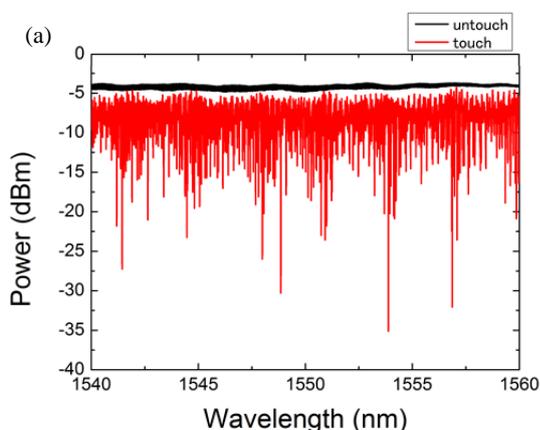


Fig. 5. (a) Transmission of tapered fiber touched to microsphere. (b) Zoomed dip at $\lambda = 1553.881$ nm. Loaded Q-factor is $Q = 5 \times 10^5$.

6. まとめ

本研究では、テーパ光ファイバを用いた光学測定系の設計、構築を行った。構築した系で微小球共振器の測定を行い、 $Q = 5 \times 10^5$ を得た。今後、更なる改良を行い、さらに高いQ値の測定を行えるようにする予定である。

参考文献

[1] S.M. Spillane, T. J. Kippenberg, O. J. Painter and K. J. Vahala, *Phys. Rev. Lett.* **91**, 043902 (2003)

レーザ溶融ペDESTAL法による ウィスパリングギャラリーモード共振器の作製

工藤 寛史(B4) 小川 陽平(B4)

今回私たちは結晶材料を用いたウィスパリングギャラリーモード共振器の作製を、従来の超精密加工による手法ではなく、レーザ溶融ペDESTAL法と呼ばれる結晶成長手法を用いて行なった。結果として、 $Q=350$ の共振器の作製に成功した。また、共振器は結晶成長速度とレーザの出力を変化させることで、その形状を操作することができることが分かった。

キーワード：結晶成長、ウィスパリングギャラリーモード、レーザ溶融ペDESTAL法

1. 概要

レーザ溶融ペDESTAL法はチョクラルスキー法を応用した結晶成長技術であり、ファイバレーザを作製する目的で開発された。[1]そのため、チョクラルスキー法とは違い、結晶を細く、均一に成長させる目的で発展してきた。そして、作業工程もチョクラルスキー法とは違い坩堝ではなく、結晶材料のロッドをCO₂レーザやYAGレーザで溶解することによって作製する。この際に成長させる結晶の直径はEq. 1に示すように種結晶の引き上げ速度、母材の供給速度の比と元の母材の直径によって制御することができる。[2]

$$\frac{d_2}{d_1} = \frac{\sqrt{v_1}}{\sqrt{v_2}} \quad (1)$$

d_1 : 母材の直径

d_2 : 種結晶の直径

v_1 : 母材の速度

v_2 : 種結晶の速度

今回の共振器を、母材と種結晶の速度比を途中で変化させ、ファイバの一部に膨らみをつけることによって作製した。

2. 実験方法

以下には3種類の実験方法の手順について説明する。

1. レーザ出力・速度の結晶成長条件の特定。
2. 1:3の速度比時間 τ による形状の変化。
3. CO₂レーザの出力 P による形状の変化。
4. 共振器の光学測定

1. 結晶成長条件の特定

- (ア) CO₂レーザが集光する点に直径425 μ mの母材をセットする。
- (イ) CO₂レーザでサファイアファイバの母材の先端を溶かす。
- (ウ) 種結晶を下げ、母材の溶解部分に接触させる。
- (エ) 母材を0.12 mm/min, 種結晶を0.72 mm/minの速度で上方向に引き上げる。

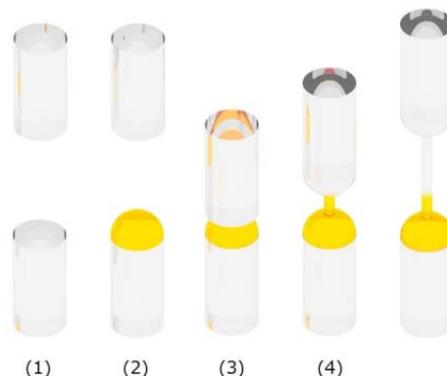
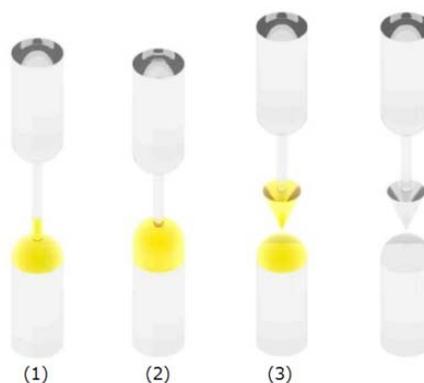


Fig. 1: The fabrication process of a crystal fiber by a laser heated pedestal growth method.

2. 母材と種結晶の速度比を変える。(1:6 \rightarrow 1:3 (1:3のときの継続時間を τ とする。))
 - (ア) 実験方法1-(エ)までと同じ。
 - (イ) 種結晶の速度を0.36 mm/minに減速する。この作業を行う時間を τ とする。
 - (ウ) 種結晶の運動は停止させたまま、下軸のみを



0.12 mm/minの速度で引き下げる。

Fig. 2: Modified laser heated pedestal growth for whispering gallery mode cavity fabrication.

3. CO₂レーザの出力を変える。

- (ア) 実験方法1-(エ)までと同じ。
- (イ) 母材の速度を0.24 mm/minに上げ、種結晶の速度を0.12 mm/minに下げて、上方向に引き上げる。この時の $\tau=100$ secで一定とする。
- (ウ) 上下軸の運動を停止させ、CO₂レーザのパワーを上げる。この時のレーザ出力を P とする。
- (エ) 種結晶の運動を停止させたまま、下軸のみを

0.12 mm/min の速度で引き上げる。

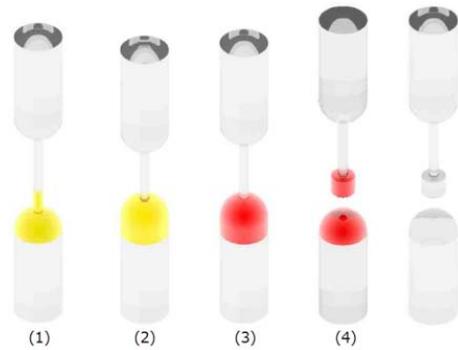


Fig. 3: The fabrication process of a whispering gallery mode cavity when laser power is changed during the process.

4. 光学測定

作製した共振器を以下の Fig. 3 のように、テーパファイバを近づけ、共振器に接触している時と、接触していない時の出力を比較することによって、共振器の Q 値を測定した。

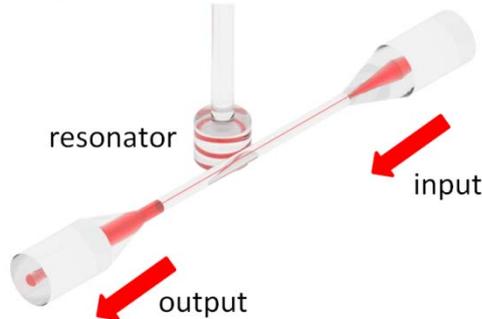


Fig. 4: Schematic illustration of the tapered-fiber optical measurement setup.

3. 実験結果

1. 結晶成長条件

実験方法 1 の手順に従い、結晶成長の条件を求めた。母材と種結晶の速度比=1:6, 母材の直径 425 μm の条件で行なったため, Eq. 1 より成長するファイバは理論的には直径173 μm となる。この時, CO_2 レーザの強度と両軸の速度を変化させ, 安定して結晶が成長する条件を割り出した。この際, 以下の5段階評価の基準を設けて分析を行なった。

- very good : 数分間, 正常に結晶成長する。5 分間成長部分と母材とが離れない。
- good : 数分間は正常に成長するが, 5 分以内に成長する部分が細くなり, 母材と離れてしまう。
- average : 正常に成長せず, 成長すると同時に成長部分が細くなり, 母材と離れてしまう。
- poor : 成長部分に欠陥が現れるが, 結晶成長は行うことができた。
- very poor : 成長が行われなかった。

結果はFig. 5のようになった。この結果から, Fig. 5 の青色の線に囲まれた部分が比較的安定して結晶が成長することが分かった。そのため, 共振器作

製は緑色の矢印の条件で行なった。

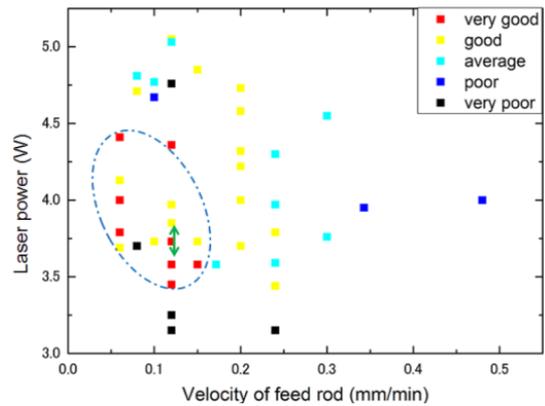


Fig. 5: Crystal growth conditions at different rod-speed and power.

2. 軸の速度比による形状変化

実験方法 2 より τ と共振器形状の変化は Fig. 6 のようになった。また, Fig. 7 には共振器のアスペクト比, 共振器長, 共振器幅の依存性を示す。

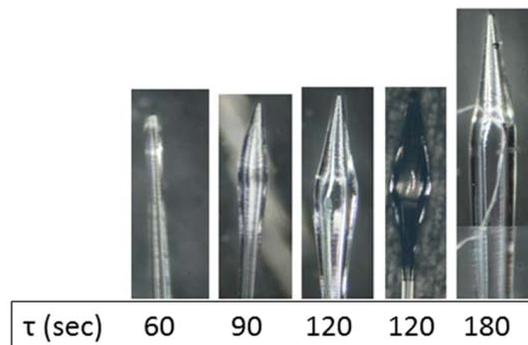


Fig. 6: Fabricated microcavities with different τ 's.

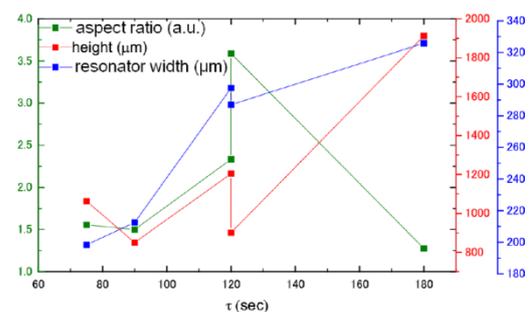


Fig. 7: The aspect ratio, the length and the width of the fabricated microcavities with different τ 's.

3. CO_2 レーザの出力による形状変化

実験方法 3 より P と共振器形状の変化は Fig. 8 のようになった。また, Fig. 9 には共振器のアスペクト比, 共振器長と共振器幅の依存性を示す。

謝辞

本成果は日本電信電話株式会社 NTT 物性科学基礎研究所 横尾篤氏との共同研究によるものである。

参考文献

- [1] A. Yokoo, S. Tomaru, I. Yokohama, H. Itoh, and T. Kaino, "A new growth method for long rod like organic nonlinear optical crystals with phase-matched direction" *J. Cryst. Growth* **156** 279-284 (1995)
- [2] M. M. Fejer, J. L. Nightingale, G. A. Magal, and R. L. Byer, "Laser-heated miniature pedestal growth apparatus," *Rev. Sci. Instrum.* **55**, 11 (1984)

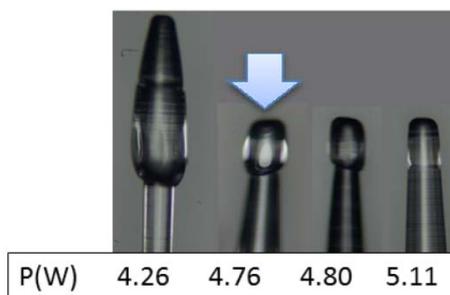


Fig. 8: Fabricated microcavities with different P 's.

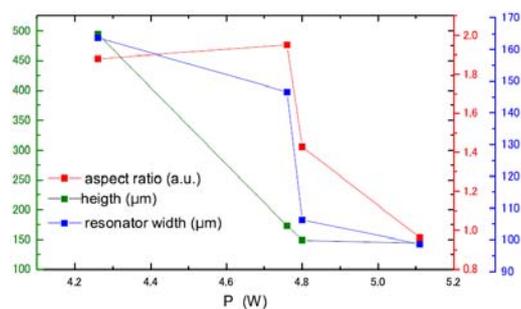


Fig. 9: Aspect ratio, the length and the width of the fabricated microcavities at different P 's.

4. 光学測定結果

実験方法 4 の手順で Fig. 8 の矢印で示す共振器の光学測定を行った結果, Fig. 10 に示す結果を得た. この結果より $Q = 350$ と算出された.

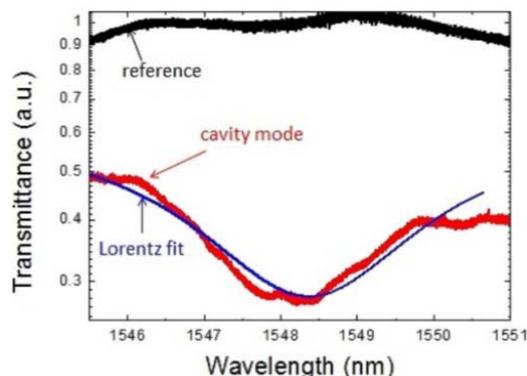


Fig. 10: Transmittance spectrum measured with tapered fiber setup.

4. 考察

以上の結果から, τ のみを変化させた場合, $\tau = 120$ sec をピークにアスペクト比は減少すると考えられる. また, CO_2 レーザの出力を変化させると, 共振器の体積は減少することが確認できたが, 同時にアスペクト比も減少する. つまり, この方法では体積とアスペクト比はトレードオフの関係にあることがわかる. 最後に, テーパーファイバを用いた光学測定によって, $Q = 350$ が確認できた. この結果から, 今回の結晶成長を用いた共振器作製法が作製法として有用であることが実証された. 今後の課題としては, 測定系の改善と共振器形状の対称性の向上, 体積の縮減などが挙げられる.

資料の部

論文・会議発表・特許申請・その他

(2011 年 4 月～2012 年 3 月)

【論文発表】

- [1] A. Yokoo, T. Tanabe, E. Kuramochi, and M. Notomi, "Ultrahigh-Q nanocavities written with a nanoprobe," *Nano Lett.* Vol. 11, No. 9, pp. 3634-3642 (2011).
- [2] M. Notomi, A. Shinya, K. Nozaki, T. Tanabe, S. Matsuo, E. Kuramochi, T. Sato, H. Taniyama and H. Sumikura, "Low power nanophotonic devices based on photonic crystals towards dense photonic network on chip," *IET Circuits, Devices & Systems*, Vol. 5, No. 2, pp. 84-93 (2011).

【国際会議発表】

- [1] K. Nozaki, T. Tanabe, A. Shinya, S. Matsuo, T. Sato, Y. Kawaguchi, H. Taniyama, and M. Notomi, "Photonic crystal nanocavities toward low-power on-chip nanophotonic devices," *IQEC/CLEO Pacific Rim*, 4630-IT-5, Sydney, August (2011).

【国内会議発表】

- [1] 工藤寛史, 小川陽平, 田邊孝純, 横尾篤「結晶成長を利用したウィスパーリングギャラリーモード共振器作製の検討」第 59 回応用物理学関係連合講演会, 17p-GP1-9, 早稲田大学, 平成 22 年 3 月 15 日～18 日.
- [2] 吉岐航, 田邊孝純「シリカトロイド微小光共振器における Kerr 双安定メモリの解析」第 59 回応用物理学関係連合講演会, 17p-F4-16, 早稲田大学, 平成 22 年 3 月 15 日～18 日.
- [3] 加藤拓巳, 吉岐航, 小川陽平, 田邊孝純「角形シリカトロイド微小光共振器の作製と性能評価」第 59 回応用物理学関係連合講演会, 17p-F4-17, 早稲田大学, 平成 22 年 3 月 15 日～18 日.

【特許申請】

- [1] 加藤拓巳, 吉岐航, 田邊孝純, 「シリカトロイド型光共振器及びシリカトロイド型光共振器の製造方法」特願 2012-41565 (出願日: 2012/02/28)

【その他】

- 2011 年 4 月 20 日 田邊孝純「文部科学大臣表彰 若手科学者賞」
2011 年 6 月 18 日 田邊孝純「第 24 回安藤博記念学術奨励賞」

学位論文要旨

卒論研究

小川陽平 「テーパ光ファイバによる微小光共振器の光学測定」

加藤拓巳 「シリカトロイド微小光共振器の多角形状化の提案とその作製に関する研究」

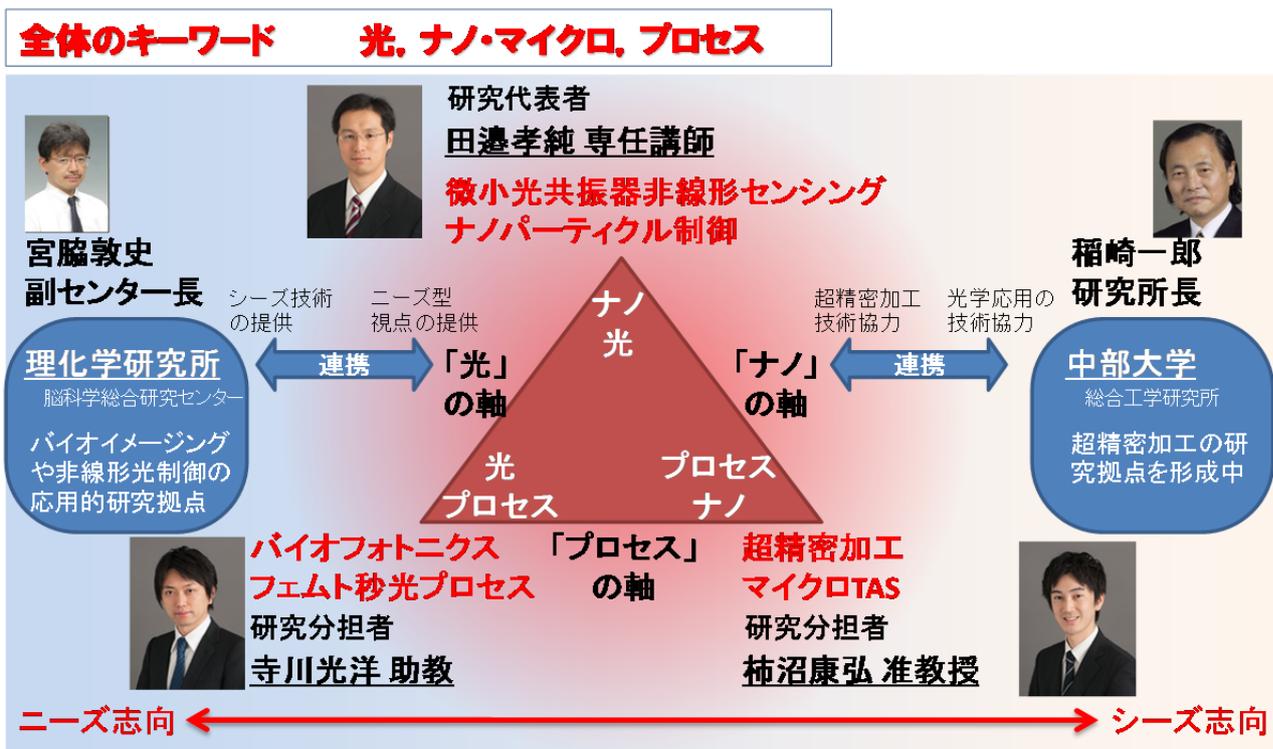
工藤寛史 「レーザ溶融ペDESTAL法を用いたウィスパーリングギャラリーモード共振器の作製に関する研究」

吉岐航 「シリカトロイド微小光共振器における光カー効果を用いた双安定メモリに関する研究」

慶應義塾大学次世代研究プロジェクト 推進プログラム

「拡張ナノ空間プロセッシングによる高度光利用の創出」

2011 年度に「拡張ナノ空間プロセッシングによる高度光利用の創出」の課題がミニ COE 型研究課題として採択されました。光技術，超精密加工技術，バイオフォトニクスを高度に連携し，微小光共振器を中心として拡張ナノ空間光利用という新しい領域の開拓を目指す研究です。



2011 年度活動記録：

7月27日(水) 研究プロジェクトキックオフミーティング

研究目標の確認

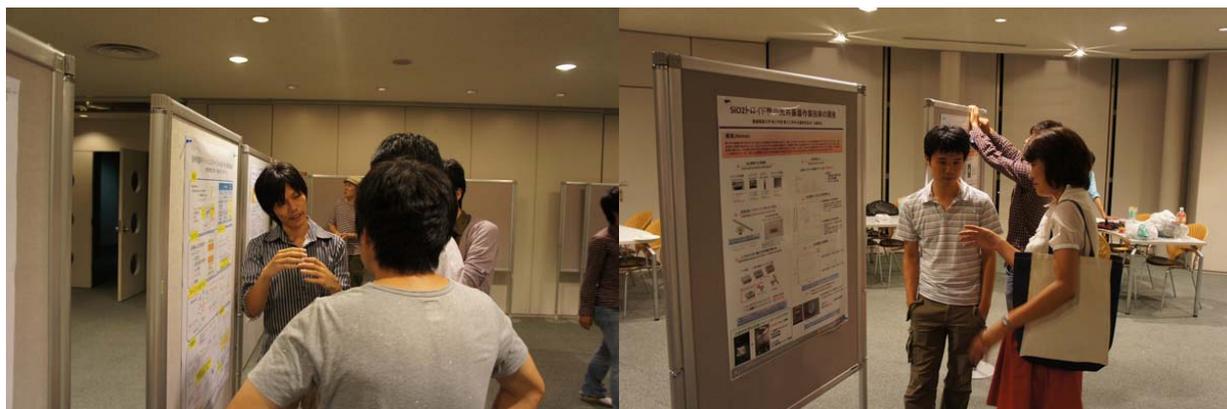
慶應3研究室による合同研究会

11月30日(水) 慶應3研究室による研究交流会(ラボツアー)

3月27日(火) 2011年度次世代研究プロジェクト報告会

慶應光科学若手交流会

慶應義塾大学理工学部において光科学関連研究を実施している若手教員による研究室の交流会を実施しました。田口研(SD)・早瀬研(物情)・山本研(物情)・渡邊研(物理)・寺川研(電子)・田邊研(電子) (順不同)の 6 研究室交流による研究会を実施しました。



開催記録：

日時：9月16日(金) 15:30～

場所：ディスカッションルーム7 (14-217) (ポスターは新棟7階フォーラム)

タイトル：慶應光科学若手交流会

15:30 はじめに(田邊)

15:35 山本研究室(I科 量子光学)

15:50 渡邊研究室(B科 光物性)

16:05 早瀬研究室(I科 量子光エレクトロニクス)

16:20 休憩(10分)

16:30 田邊研究室(E科 光エレクトロニクス)

16:45 田口研究室(SD科 光MEMS)

17:00 寺川研究室(E科 バイオフォトニクス)

17:15 学生の自己紹介と研究紹介ショートプレゼン(約1分×19件+PC交替時間=25分)

17:45 教室移動・会場設営等

17:50～18:50 学生によるポスター発表&交流会@新棟7階フォーラム