

2012年度（平成24年度） アニュアルレポート



慶應義塾大学工学部電子工学科

田邊フォトリック構造研究室

2012年11月 矢上キャンパスにて

目次

| | |
|--|----|
| ごあいさつ | 1 |
| 研究室メンバー一覧 | 2 |
| 研究活動報告 | 3 |
| ウイスパリングギャラリーモード共振器における Kerr 双安定メモリ実現に要する条件の解明 | 4 |
| 結晶成長による WGM 微小光共振器作製の形状制御 | 7 |
| レーザーフロー系の改良とレーザー追加照射による シリカトロイド微小光共振器の共振波長制御 | 10 |
| シリカ微小光共振器上への細胞培養の検討 | 13 |
| 多角形状トロイド微小光共振器のテーパ光ファイバとの結合 | 16 |
| シリカプロセスの立上げとシリカトロイド微小光共振器作製 | 19 |
| シリカ微小球共振器を用いた超純水の汚染評価に関する検討 | 22 |
| 2次元フォトニック結晶共振器における高 Q 値化のための 最適モード分布の探索に関する研究 | 25 |
| 資料の部 | 28 |
| 論文・会議発表 | 29 |
| 学位論文題目 | 31 |
| 第 13 回慶應科学技術展 | 32 |

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、日頃より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 2012 年度に 2 年目を迎え、学生数も、修士 1 年生が 4 名、学部 4 年生が 6 名、合計 10 名となりました。修士の学生の内の 2 名は、博士課程教育リーディングプログラムオールラウンド型の RA として採用され、研究室で取り組んでいる専門性の高い研究のみでなく、グローバルな視点や俯瞰力等を養っております。他の学生も研究室の教育目標である「新しい仕組みを構築する力」を身につけるべく切磋琢磨しており、指導教員としても今後の活躍が楽しみです。一方、研究室としては引き続き、光を本質から理解し光の新たな利用方法を開拓するため研究活動を推進しております。

本年度は、初年度に取り組んだ装置や環境の立上げ、プログラムの構築に一定のめどが付き、取り組んでいる実験や理論も研究らしくなってきました。いくつかのテーマの中でも、多角トロイド微小光共振器の実験的成果や微小光共振器における光非線形の解析においては、それぞれ専門誌へ発表し、米国光学会が選ぶ月間注目発表にも取り上げられました。

本報告書では、2012 年度に取り組んだこうした具体的な研究成果についていくつかトピックスを絞って報告いたします。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です。

2013 年 8 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

准教授

田邊孝純

修士 1 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在学 |
| 加藤拓巳 | 慶應義塾大学大学院在学 |
| | リーディング大学院プログラム RA(2012/4～現在) |
| 工藤寛史 | 慶應義塾大学大学院在学 |
| 吉岐航 | 慶應義塾大学大学院在学 |
| | リーディング大学院プログラム RA(2012/10～現在) |

学部 4 年生:第 2 期生(2012 年度卒業生)

| | |
|------|-------------|
| 石川花帆 | 慶應義塾大学卒業 就職 |
| 齊藤龍介 | 慶應義塾大学大学院進学 |
| 鈴木良 | 慶應義塾大学大学院進学 |
| 鐵本智大 | 慶應義塾大学大学院進学 |
| 西村治郎 | 慶應義塾大学大学院進学 |
| 伏見亮大 | 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

ウィスパーリングギャラリーモード共振器における Kerr 双安定メモリ実現に要する条件の解明

吉岐 航(M1)

本レポートでは、熱が存在する環境下において、ウィスパーリングギャラリーモード共振器を用いて光 Kerr 双安定メモリを実現するためには、side-couple 型ではなく Add-drop 型の構成が必要であるということの数値解析を用いて明らかにする。

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

1. 序論

近年の高 Q 値作製技術の向上により、極めて低いパワーで光双安定現象を得られるようになってきた [1, 2]. このような背景を踏まえ、以前私は add-drop 型のウィスパーリングギャラリーモード(Whispering gallery mode: WGM)共振器において、仮に熱の効果が存在しても、適切に導波路と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ことを示した [3]. しかしながら、この研究では定性的に光 Kerr 双安定の実現に要する条件は示したものの、定量的な条件については説明されていなかった。

従って本レポートでは、光 Kerr 双安定メモリについて詳細な数値解析を行うことにより、熱の効果の存在下で実現するために必要な条件を定量的に示す。その結果、光双安定を得るためには一般的な side-couple 系でなく、add-drop 系が必要であるということが分かった。本研究の成果は、光 Kerr 双安定メモリを得る際に大変有益なものである。

2. 数値解析モデル

本章では、解析に用いた数値モデルについて説明する。私はシリカトロイド微小光共振器で構成された side-couple 系(Fig. 1(a))及び add-drop 系(Fig. 1(b))における非線形な応答を解析するため、結合モード理論(Coupled Mode Theory: CMT) [5]をベースとした支配方程式を構築した。

$$P_{in} = \tau_{coup1} \left[\delta\omega(\Delta n)^2 + \frac{1}{4\tau_{loaded}^2} \right] U_{cavity} \quad (1)$$

$$P_{out} = \tau_{coup1} [\delta\omega(\Delta n)^2 + \left(\frac{1}{2\tau_{loaded}} - \frac{1}{\tau_{coup1}} \right)^2] U_{cavity} \quad (2)$$

$$\delta\omega = 2\pi c \left[\frac{1}{\lambda_0(1+\Delta n/n_0)} - \frac{1}{\lambda} \right] \quad (3)$$

ただし、 U_{cavity} , P_{in} , P_{out} , c , λ_0 , λ , n_0 , τ_{loaded} and Δn は共振器内光エネルギー、入力パワー、高速、共振器共振波長、入力波長、共振器屈折率、全光子寿命、屈折率変化である。全光子寿命 τ_{loaded} は $\tau_{loaded}^{-1} = \tau_{int}^{-1} + \tau_{coup1}^{-1} + \tau_{coup2}^{-1}$ で表され、 τ_{int} は共振器固有の光子寿命、 τ_{coup1} 及び τ_{coup2} は導波路との結合に関連する光子寿命である。屈折率変化は Δn は Kerr 効果及び TO 効果による屈折率変化によって表され、 $\Delta n =$

$\Delta n_{Kerr} + \Delta n_{TO}$ である。式(1)-(3)は add-drop 系を表現する式だが、 τ_{coup2} を無限大とすることにより、side-couple 系も表現することができる。

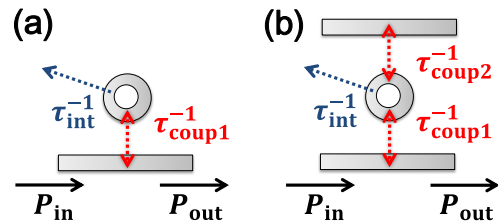


Fig. 1: (a) side-couple 系及び (b) add-drop 系の数値モデル。

超高 Q 値共振器において Kerr 双安定メモリを得るためには、 τ_{coup1} を十分に小さく(共振器-導波路間の結合を強く)しなければならない。これは、TO 効果が支配的となる前に、Kerr 効果によるメモリ動作を完了させる必要があるからである [3]. しかしながら、side-couple 系(Fig. 1(a))において τ_{coup1} を小さくすることは、クリティカルカップリングの条件 ($\tau_{int}^{-1} = \tau_{coup1}^{-1}$) が得られなくなることを意味するので、共振器の透過スペクトル上のディップがほとんど観測することになる。その結果、たとえ共振器中エネルギーが双安定現象を示していたとしても、出力パワーにおいては上準位と下準位のコントラストがほとんど 0 になってしまい、双安定現象を観察することができなくなる。その一方で add-drop 系(Fig. 1(b))では、 τ_{coup1} を小さくしても τ_{coup2} を調整することによりクリティカルカップリングの条件 ($\tau_{coup1}^{-1} = \tau_{int}^{-1} + \tau_{coup2}^{-1}$) を満たすことができるので、出力パワーにおける 2 準位間のコントラストが大きくなり、双安定の観察が可能である。つまり、add-drop 系の使用が Kerr 双安定メモリ実現のキーポイントである。この定性的な推測を定量的に確かめるための方法について説明する。この推測を確かめるために必要なのは、出力パワーのコントラスト、及び熱の影響の大きさであるので、以下ではそれらを求める方法について説明する。

まずは出力パワーの 2 準位間のコントラストについてである。コントラストの大きさは導波路-共振器間の結合 (τ_{coup1} and τ_{coup2}) 及び入力波長デチューニングの大きさ $\delta\lambda = \lambda - \lambda_0$ に依存するので、様々な τ_{coup1} 及び $\delta\lambda$ について、式(1)-(3)を用いて熱が存在し

ない理想状態下の出力パワーコントラストの大きさを計算する。計算から求まる光エネルギー U_{cavity} と出力パワー P_{out} における光双安定の一例を Fig. 2(a) と (b) 内の青線に示す。Fig. 2(b) より出力パワーのコントラスト $P_{\text{out}}^{\text{cont}} = (P_{\text{out}}^{\text{high}} - P_{\text{out}}^{\text{low}}) / P_{\text{out}}^{\text{high}}$ を定義する。この解析を様々な τ_{coup1} 及び $\delta\lambda$ に対して繰り返し行うことにより、各条件における $P_{\text{out}}^{\text{cont}}(\tau_{\text{coup1}}, \delta\lambda)$ を求める。

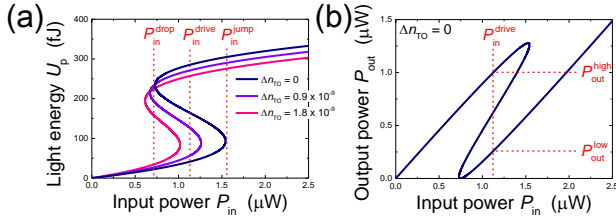


Fig. 2: side-couple 系における (a) 光エネルギー U_p 及び出力パワー P_{out} の光双安定. ただし, $\tau_{\text{coup1}} = \tau_{\text{int}} = 329$ ns 及び $\delta\lambda = 1.7 \times \Delta\lambda_{\text{FWHM}} = 13$ fm とした.

次に TO 効果による影響について解析する。一般的には TO 効果により光 Kerr 双安定メモリの実現が難しくなるので、ここでは光 Kerr 双安定メモリの実現には最大でどの程度の TO 効果が許容できるのか、とメモリ動作経てどの程度の TO 効果が誘起されるのか、について解析する。まずは前者についてである。シリカトroid微小光共振器中ではキャリアプラズマ効果は生じないので、TO 効果及び Kerr 効果による屈折率変化のみを考慮すれば十分である。熱を考慮しない理想的な状態では、常に Δn が Δn_{Kerr} と等しくなるので、Fig. 2(a) に青線で示したような理想的な Kerr 双安定が得られる。このカーブよりメモリを動作させるために必要なデータである、駆動パワー $P_{\text{in}}^{\text{drive}} = (P_{\text{in}}^{\text{jump}} + P_{\text{in}}^{\text{drop}}) / 2$ を得ることができる。メモリ動作の初めのうちは熱の溜まりが少ないので、理想的な双安定にしたがったメモリ動作が行われると考えられる。しかしながら、ある一定時間が経過すると熱の蓄積により、 Δn_{TO} が極めて大きくなる。その結果 Fig. 2(a) に示した曲線は徐々に青から紫、ピンクの曲線へと変形していく。最終的にはこの変形により駆動パワー $P_{\text{in}}^{\text{drive}}$ 上に存在する準位が一つだけとなる。一般的にメモリ動作中に駆動パワー $P_{\text{in}}^{\text{drive}}$ を調整することは可能なので、この状態では Δn_{TO} が大きい状態では Kerr 双安定メモリが得られなくなることが分かる。これが熱の存在下で Kerr 双安定を得ることが難しい最大の理由である。これらの理解を踏まえ、Kerr 双安定メモリを得ることができる最大の TO 効果による屈折率変化 $\Delta n_{\text{TO}}^{\text{max}}$ を式(1)-(3)から計算することにする。 $\Delta n_{\text{TO}}^{\text{max}}$ の意味するところは、 Δn_{TO} が $\Delta n_{\text{TO}}^{\text{max}}$ より小さい間は、Kerr 双安定メモリを得ることができるということである。

最後に、実際のメモリ動作を経て誘起される TO 効果の大きさを求める。前述のように私が光 Kerr 双安定を利用できるのは $\Delta n_{\text{TO}} \leq \Delta n_{\text{TO}}^{\text{max}}$ となっている間だけである。これはメモリ動作終了時の TO 効果の大きさ $\Delta n_{\text{TO}}^{\text{end}}$ が $\Delta n_{\text{TO}}^{\text{max}}$ より小さければ、その Kerr 双安定メモリを実現可能であるということを示す。従

って、Ref. [3] に示した方法に類似した過渡的な CMT を用いることにより、 $\Delta n_{\text{TO}}^{\text{end}}$ を様々な τ_{coup1} 及び $\delta\lambda$ について求めることにする。解析に用いた入力光波形は Fig. 3 に示す通りである。強調したいのが、時間軸が全光子寿命 ($\tau_{\text{loaded}}(\tau_{\text{coup1}})$) によって正規化されている点である。これは共振器の応答速度が共振器の全光子寿命に依存するためである。私の解析では $(a, b, c) = (20, 15, 25)$ (Fig. 3) とし、セットパルスとリセットパルスの時間幅をそれぞれ 5 とした。

各 τ_{coup1} と $\delta\lambda$ について求めた $P_{\text{out}}^{\text{cont}}$, $\Delta n_{\text{TO}}^{\text{end}}$ 及び $\Delta n_{\text{TO}}^{\text{max}}$ を検討することにより、熱の存在下で Kerr 双安定メモリを得るための条件を明らかにする。

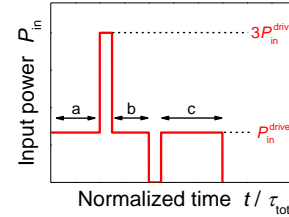


Fig. 3: 過渡解析に用いた入力信号波形. 時間は全光子寿命 τ_{loaded} によって正規化されており、セットパルスのパワーは $3P_{\text{in}}^{\text{drive}}$ である。

3. 結果及び考察

2 章で解析した side-couple 系及び add-drop 系の結果を Fig. Fig. 4(a) 及び (b) に示す。カラーマップは各 τ_{coup1} 及び $\delta\lambda$ における正規化されたコントラスト $P_{\text{out}}^{\text{cont}}$ を表している。また、Fig. Fig. 4(b) ではクリティカルカップリング条件が満たされるように τ_{coup2} を適切に調整してある。 τ_{coup1} が小さい時、Fig. 4(a) ではコントラストが極めて小さくなっているのに対し、Fig. 4(b) ではコントラスト $P_{\text{out}}^{\text{cont}}$ の大きさが維持されている。これは前述の通り、クリティカルカップリングが維持されていることによる。

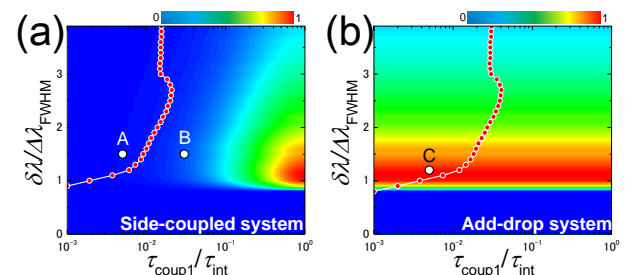


Fig. 4: 様々な τ_{coup1} 及び $\delta\lambda$ における $P_{\text{out}}^{\text{cont}}$. (a) side-couple 系, (b) は add-drop 系である. X 軸及び Y 軸は τ_{coup1} と $\delta\lambda$ を表すが、それぞれが τ_{int} 及び共振の半値全幅 $\Delta\lambda_{\text{FWHM}}$ によって正規化されている。ただし、点“A”, “B”, “C”はそれぞれ、 $(\tau_{\text{coup1}} / \tau_{\text{int}}, \delta\lambda / \Delta\lambda_{\text{FWHM}}) = (0.005, 1.5)$, $(0.03, 1.5)$, $(0.005, 1.2)$ の条件に配置されている。

カラーマップ上の赤い点列は $\Delta n_{\text{TO}}^{\text{end}}$ と $\Delta n_{\text{TO}}^{\text{max}}$ が等しくなる点を表している。メモリ駆動に要する時間は τ_{coup1} (i.e. τ_{loaded}) が小さいほど短くなるので、 τ_{coup1} が小さい場合メモリ動作終了時の TO 効果の大きさ $\Delta n_{\text{TO}}^{\text{end}}$ も小さくなる。よって点列の左側では

$\Delta n_{\text{TO}}^{\text{end}}$ が $\Delta n_{\text{TO}}^{\text{max}}$ よりも小さくなるので、Kerr 効果メモリに利用することができる。しかしながら、side-couple 系(Fig. Fig. 4(a))では、 τ_{coup1} が小さいと前述のように $P_{\text{out}}^{\text{cont}}$ もほとんど 0 になってしまい、光双安定現象を出力において観察することはできなくなる。従って side-couple 系では光 Kerr 双安定メモリを実現することはできないということが分かる。しかしその一方で、add-drop 系(Fig. Fig. 4(b))における同じ領域では十分に $P_{\text{out}}^{\text{cont}}$ が大きくなっている。これは、add-drop 系であれば TO 効果の存在下でも Kerr 双安定メモリが利用可能であるということを示している。

Fig. 4 から得た理解が本当に正しいのかどうか確かめるため、いくつかの条件に対して CMT による時間解析により、実際のメモリ応答を計算した。Fig. 5(a)-(c)は実際の Kerr メモリ動作を Fig. 4(a)中の点 A, B 及び Fig. 4(b)中の点 C おいて計算した結果である。点 A (Fig. 5(a))では U_{cavity} は双安定現象を示しているものの、 P_{out} は全く示していない。これは前述したように、クリティカルカップリングの条件が満たされていないためである。さらに点 B (Fig. 5(b))では U_{cavity} 及び P_{out} のどちらも熱の蓄積の影響により、メモリ動作を得ることができていない。しかしながら、点 C (Fig. 5(c))では U_{cavity} と P_{out} の双方が明らかにメモリ動作を示している。これは、この条件ではクリティカルカップリングが満たされていることに加え、熱がほとんど蓄積していないためである。これらの結果は Fig. Fig. 4 から得られた推察とよく一致している。従って、TO 効果の存在下で Kerr 双安定メモリの実現には add-drop 系の構成並びに τ_{coup1} の適切な調整が必要だと結論づけられる。

add-drop 系の使用と共振器-導波路間の強い結合が必要だという知見を得ることができた。さらに、Kerr 双安定を得るのに必要な結合の強さやチューニングの大きさについても明らかにした。これはシリカマイクロイド微小光共振器[4]に限らず、他の WGM 共振器[2]で光 Kerr 双安定メモリを実装する際にも非常に有用な情報である。

参考文献

- [1] M. Yanik, *et al.*, Appl. Phys. Lett. **83**, 2739–2741 (2003).
- [2] M. Pöllinger, *et al.*, Opt. Express **18**, 17764–17775 (2010).
- [3] W. Yoshiki and T. Tanabe, J. Opt. Soc. Am. B **29**, 3335–3343 (2012).
- [4] D. Armani, *et al.*, Nature **421**, 925–928 (2003).
- [5] C. Manolatou, *et al.*, IEEE J. Quantum Electron. **35**, 1322–1331 (1999).

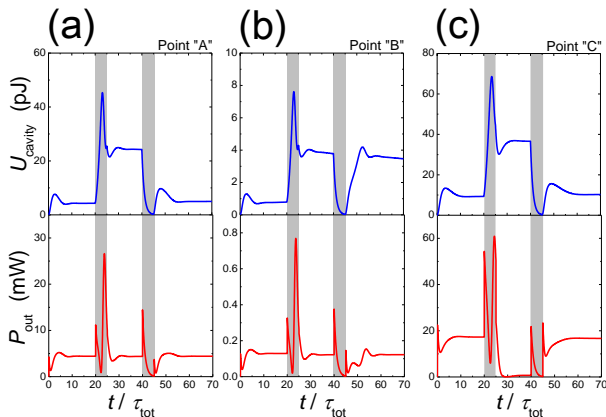


Fig. 5: Fig. 4 の(a)A点(b)B点(c)C点におけるメモリ動作。青と赤の実線はそれぞれ光エネルギーと出力パワーを示す。また、グレーで示した領域はセット/リセットパルスが印加されていることを示している。

4. 結論

本研究において、私は side-couple 系及び add-drop 系における Kerr 双安定メモリに関する詳細な解析を行った。その結果、TO 効果

の存在下で Kerr 双安定メモリを実現するには、

結晶成長による WGM 微小光共振器作製の形状制御

工藤 寛史(M1) 鈴木 良(B4)

結晶成長を用いた Whispering gallery mode (WGM)共振器の作製では、結晶性の影響によって断面形状が多角形となる。今回、一度種結晶に熱を加えることでその形状を円形状とすることが可能となった。また、多角形の曲率半径が Q 値に与える影響について 2D FDTD 法によって解析を行い、円形に近いほどその Q 値が高いことを示した。さらに円形状の共振器で $Q = 16,000$ 、六角形状の共振器で $Q = 8,500$ という光学測定結果を得た。上記したシミュレーション結果と同様の、形状が円形に近い方がより高い Q 値を得ることができることを実験的に明らかにした。

キーワード：結晶成長、ウィスパーリングギャラリーモード、レーザ溶融ペダスタル法

1. 概要

レーザ溶融ペダスタル法 (LHPG 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。結晶ファイバは Fig. 1 にある手順で作製される。まず、母材を用意し、 CO_2 レーザもしくは YAG レーザを用いて、母材を溶かす。その部分に対して、上から垂直に種結晶を接触させ、母材と種結晶の両方を引き上げる。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によって制御することができる。[2] ここまでが一般的に用いられている LHPG 法の作製手順である。その後、種結晶の速度を落とし成長させ、最後に引き抜くことによって、一部分にのみ膨らみを作製することが可能となる。この膨らみ部分に光を励振させる。ここで、種結晶の引き上げ速度を v_1 、母材の供給速度を v_2 、共振器作製時（低速モード）の種結晶の引き上げ速度を v_1' 、共振器作製時の引き上げ時間を τ [sec] とする。

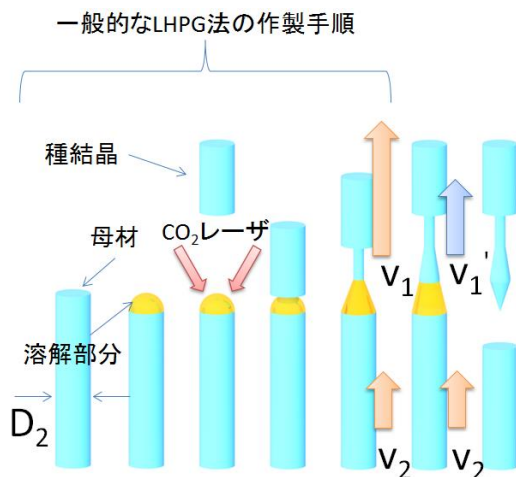


Fig. 1 結晶成長を用いた Whispering Gallery Mode 微小光共振器の作製手順。

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

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

2. 作製結果

今回は $v_1 = 12 \mu\text{m}/\text{sec}$, $v_2 = 2 \mu\text{m}/\text{sec}$, $v_1' = 6 \mu\text{m}/\text{sec}$, $\tau = 90 \text{ sec}$ として、作製を行なった。

Fig. 2 は LHPG 法を用いて上記の条件で作製された共振器である。この共振器に対して、有限要素法を用いて解析を行うことによって、光が共振器内に閉じ込める性能があることがわかった。また、Eq. 2 からその共振器が持つモード体積を求めることができる。結果として、この共振器は、 $1.28 \times 10^{-2} \text{ mm}^3$ のモード体積の中に光を閉じ込めることがわかった。

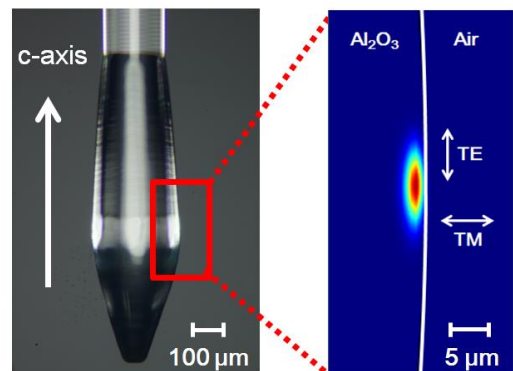


Fig. 2 LHPG 法を用いて作製された共振器とその形状に対するモードプロファイル。ここでのモードプロファイルは、TE モードのポインティングベクトルを表している。

$$V_{\text{mode}} = \frac{\iiint_{h,s} \varepsilon |\mathbf{E}|^2 dV}{\max[\varepsilon |\mathbf{E}|^2]} \quad (2)$$

ε : 誘電率

3. 断面形状の曲率半径に対する Q 値の依存

レーザ溶融ペダスタル法を用いた微小光共振器の作製方法では、断面形状が結晶性の影響で Fig. 3 のように多角形となることがわかっている。

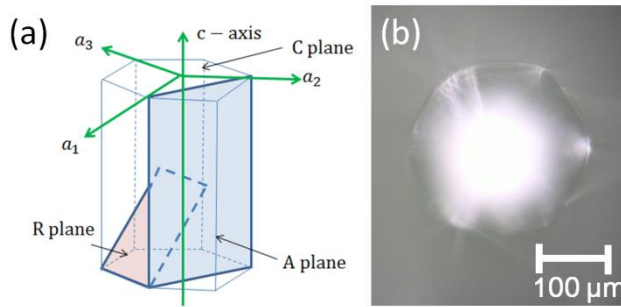


Fig. 3 (a) サファイアの結晶構造. (b) LHPG 法を用いて作製した WGM 共振器の断面図.

光を共振器周辺で全反射させながら閉じ込める Whispering Gallery Mode (WGM) モードにおいて、この曲率は Q 値を下げる要因の一つとなることが考えられる。まず、曲率半径が Q 値にどれだけの影響を与えるかについて、Fig. 4 の左上の挿入図のモデルに対して、2次元 FDTD 法によって解析を行ったところ、Fig. 4 のような結果となった。この結果より、多角形共振器の曲率が小さくなればなるほど、 Q 値が低くなることがわかった。

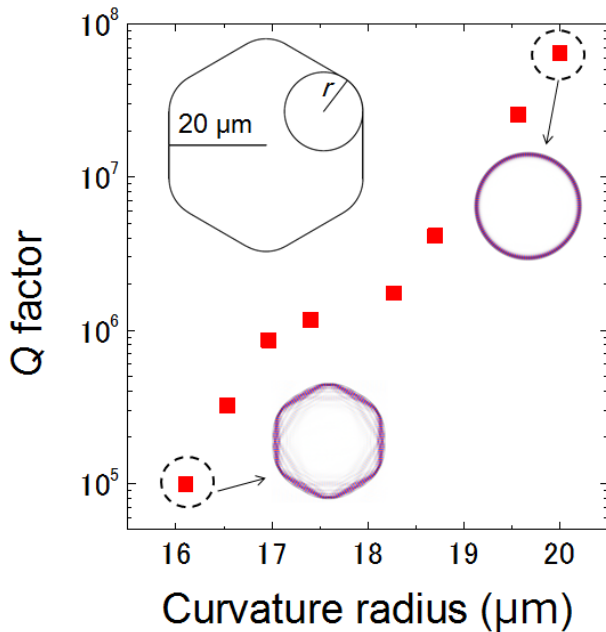


Fig. 4 六角形状の曲率半径に対する Q 値. 左上挿入図は、2次元 FDTD に用いたモデル. その他は、各曲率半径に対応するモードプロファイル.

4. 断面形状の制御

通常の作製では、3 章でも紹介したように、断面形状が六角形状になってしまう。ここで、LHPG 法を用いて結晶成長を行う前に、Fig. 5(a) のように一度 CO₂ レーザによって熱した後に結晶成長を行うことによって、その断面形状を制御することができることがわかった。この手法をプリヒーティング法と呼ぶ。ここで、Fig. 5(b) にあるように種結晶を熱する部分 L をパラメータとしてとり、断面形状の変化を見た。

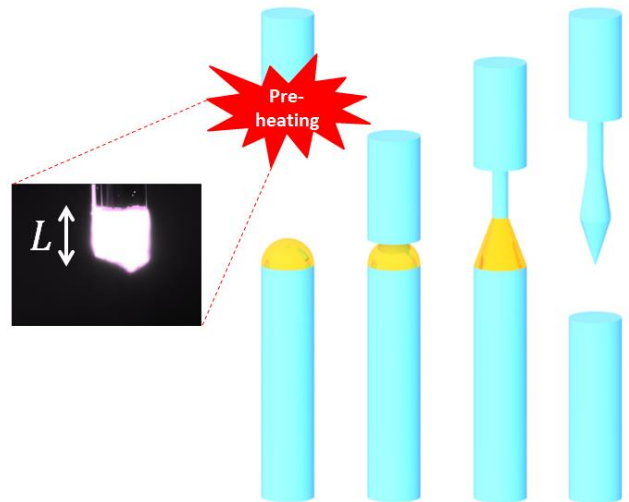


Fig. 5 プリヒーティング法の作製手順. 挿入図は、種結晶を結晶成長を行う前に、熱している様子を CCD カメラで撮影したイメージ図である。

Fig. 6(a) はプリヒーティング法を用いることによる、断面形状の変化を見たものである。この結果から、六角形状から円形状まで変化させることができることがわかる。しかし、 L が 0.80 mm 以上の場合、クラックが現れ、断面形状が歪むことも確認することができた。また、六角形状と円形状の時の結晶性を比較したところ、円形状では六角形状には見られない高次の結晶面が現れており、その結晶面が歪んでいることも確認することができた。

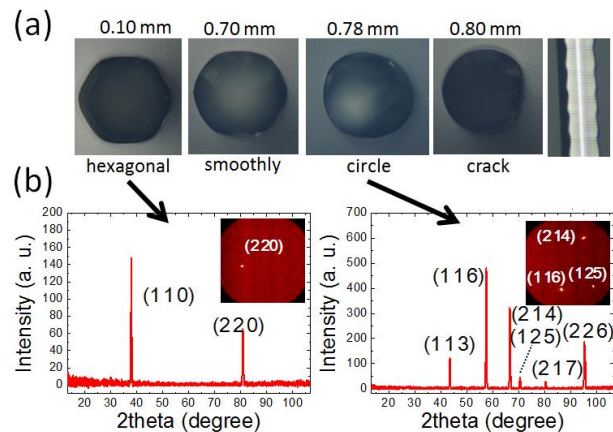


Fig. 6 (a) プリヒーティング法において、異なる L での断面図の変化. 加熱する領域が大きくなるほど、丸みを帯びていくことがわかる。また、 $L = 0.80$ mm ではクラックが結晶ロッドに発生し、断面形状も歪んでいることがわかる。(b) c 軸に対して、 $L = 0.10$ mm と 0.80 mm の時の、XRD の結果.

5. 円形状による Q 値の向上

4 章で述べたプリヒーティング法を用いることによって得られた、六角形状と円形状の WGM 微小光共振器の光学測定結果を比較したものが、Fig. 7 となる。ここでは、六角形状の $Q = 8,500$ という結果に対して、円形状では $Q = 16,000$ という結果を得ることができた。この結果より、実験的にも六角形状に比べ円形状の方が Q 値に対して優位性を持っているこ

とがわかった.

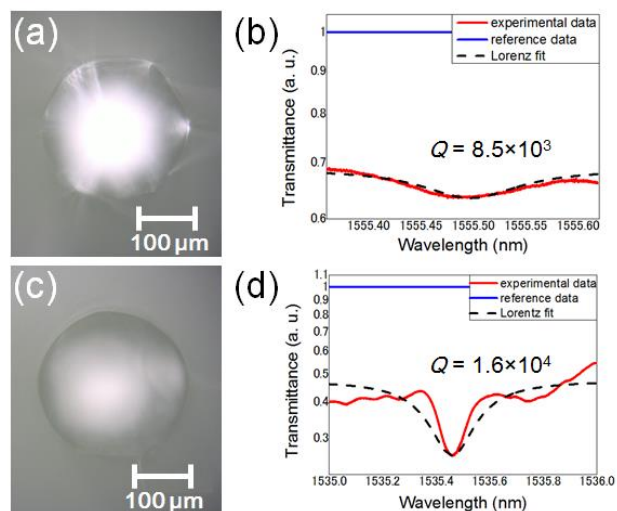


Fig. 7 (a) 断面が六角形状の共振器. (b) 六角形状の共振器に対する光学測定結果. (c) 断面が円形状の共振器. (d) 円形状の共振器に対する光学測定結果.

6. 結論

レーザ溶融ペDESTAL法を応用して作製された WGM 微小光共振器の形状から $1.28 \times 10^{-2} \text{ mm}^3$ のモード体積で光が閉じ込めることができることを示した. また, 六角形状の曲率半径が Q 値に与える方法に関しても, 2次元 FDTD 法を用いて解析を行い, 円形状に近いほど Q 値が高いことを示した. そして, プリヒーティング法を用いて, 共振器の断面を六角形状から円形状に制御することができることを示した. 最後に, 六角形状と円形状を持つ共振器に対して, テーパーファイバを用いた光学測定を行うことで, 円形状を持つ共振器の方がその Q 値が高いことを示した.

謝辞

本研究を進めるにあたり, 日本電信電話株式会社 NTT 物性科学基礎研究所 横尾篤氏に感謝しています.

参考文献

- [1] A. Yokoo, S. Tomaru, I. Yokohama, H. Itoh, 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).

レーザーリフロー系の改良とレーザー追加照射によるシリカトロイド微小光共振器の共振波長制御

石川花帆(B4) 吉岐航(M1)

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改良を行った。さらに、リフロープロセスを応用してポストプロセスによる波長制御を行った。シリカトロイド微小光共振器作製後に CO₂ レーザを追加照射し、形状を変化させることで共振波長が短波長側へ約 100 pm 程度シフトすることを確認した。

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，波長制御

1. はじめに

微小光共振器とは、光内部に閉じ込めることのできる微小な素子である。共振器の性能は Q 値というパラメータで示されている。高 Q 値の共振器では、非常に小さな入力光パワーでも多くの光エネルギーを共振器内に閉じ込めることができる。

シリカトロイド微小光共振器は 2003 年に K. J. Vahala のグループが提案・作製した共振器である[1]。その特長は Q 値の高さであり、 $Q = 1.25 \times 10^8$ という値が報告されている[1]。これはシリコンマイクロリング型共振器($Q = 1.43 \times 10^5$) [2]やフotonic結晶型共振器($Q = 1.2 \times 10^6$) [3]といった共振器と比較すると非常に高い値である。

微小光共振器は非常に高い Q 値を持つので Cavity Quantum Electrodynamics (QED) や Coupled Resonator Induced Transparency (CRIT) への応用が期待されている。これらへ応用するためには共振波長の制御が重要である。Cavity QED では、高 Q 値共振器の共振波長と単一原子の波長を完全に一致させなければならないし、CRIT では 3 準位系を実現するために共振器の共振波長を正確に調整する必要がある。しかし、微小光共振器の作製時に誤差が存在するので、共振器の共振波長は設計とは異なってしまうという問題があった。

この問題点を解決するために、一般的には共振波長チューニングが用いられているが、高 Q 値な光共振器において波長チューニングを行った例はないそこで本研究では、シリカトロイド微小光共振器にレーザーリフロープロセスを再度施すことによる共振波長制御について検討を行った。またその前段階として Q 値の高いシリカトロイド微小光共振器を作製するために従来のレーザーリフロー系を改良したのでその点についても説明する。

2. 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、シリコン基板上に数 μm の厚さで成長させた酸化膜に対しフォトリソグラフィを施し、シリカ膜を円形にパターニングする。(Fig. 1: 左上)。その後 XeF₂ に

よるドライエッチングによってシリカ膜の下部にあるシリコン基板を選択的に等方性エッチングする。(Fig. 1: 右上)。最後に、ディスク上部から CO₂ レーザを照射すると Si と SiO₂ の熱伝導性と吸収係数の違いによりシリカディスクの外縁部だけ溶解し、その後表面張力によって滑らかに凝固してキノコ状の構造ができあがる。このレーザー照射の過程を「レーザーリフロープロセス」と呼ぶが、これはトロイド共振器の Q 値を高める上で非常に重要なプロセスである。

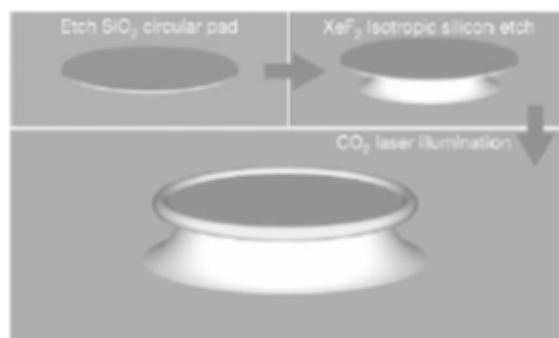


Fig. 1: シリカトロイド微小光共振器の作製工程[1].

3. レーザリフロー装置の改良

次に、レーザーリフロー装置の改良について説明する。Fig. 2 に示すのは従来の系で作製したシリカトロイド微小光共振器である。従来の系で作製すると、シリカトロイド微小光共振器の形状が楕円状になってしまい、この形状が原因で Q 値は最大でも 10^5 程度しか得ることができなかった。

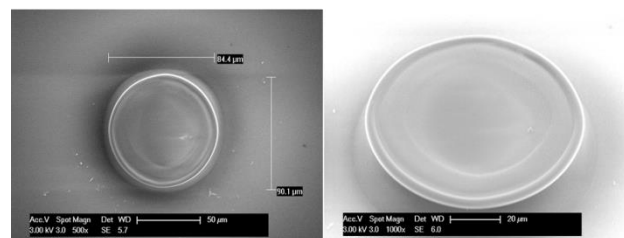


Fig. 2: リフロー系改造前に作製したシリカトロイド微小光共振器の電子顕微鏡写真

この歪みの原因はディスクのサイズに対してビー

ムスポットサイズが小さいことであると考えられた。この問題点を解決するため、リフロー系のレンズを焦点距離の長いものに変えることにより、ビームスポットサイズを大きくした。概略図を Fig. 3 に示す。

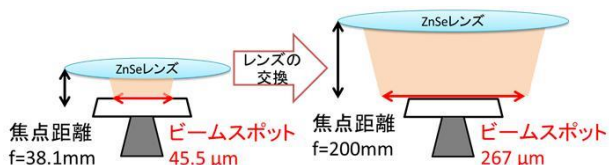


Fig. 3: レンズの交換によるビームスポット径の変化。

また、レンズに加えてカメラ観察系の改良も行った。従来の系では ZnSe レンズを対物レンズとしても兼用し、レンズの透過後にビームスプリッターを用いて分離していた。そのためカメラの解像度が低くなり、レーザのアライメントが難しいという問題点があった。そこで、観察系の対物レンズを焦点距離の長いものに変えることにより、対物レンズをビームスプリッターの後に設置し、レンズの共用を避けることにした。具体的には焦点距離 75 mm の可視光用の可視光用の対物レンズと焦点距離 400 mm の結像レンズを用いた。これにより画像が鮮明になり、位置合わせが容易になった。改良後のリフロー系の図を Fig.4 に示す。

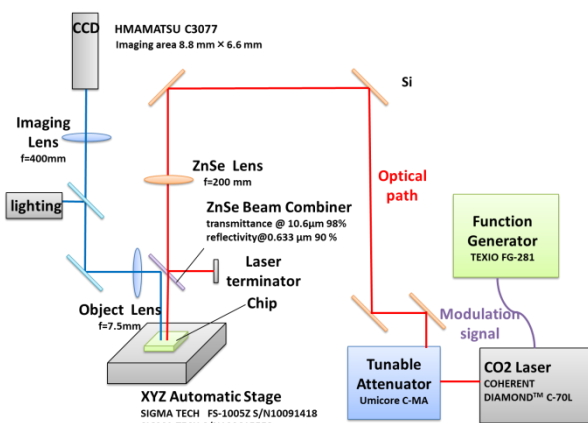


Fig. 4: レーザリフロー系の構成図。

改良したリフロー系で作製したシリカトロイド微小光共振器の SEM 画像を Fig. 5 に示す。リフロー条件は、レーザ照射パワーが 8 W(スポットサイズから求められるパワー密度は 104 MW/m²)で照射時間が 50 ms である。直径は 90.16 μm, SiO₂ 膜の厚みは 2.63 μm であった。Q 値を測定すると、1.61×10⁶ となった。参考文献[1]では Q 値 1.25×10⁸ と報告されているが、本実験では Q 値が 10⁶ 程度のトロイドしか作製できなかった。Q 値が低い原因として表面の汚れや凹凸による損失、表面に吸着した水分子による損失などが考えられる。今後の課題はリフロー条件のさらなる検討による表面状態の改善や N₂ パージ環境の構築による水分子による影響の除外である。

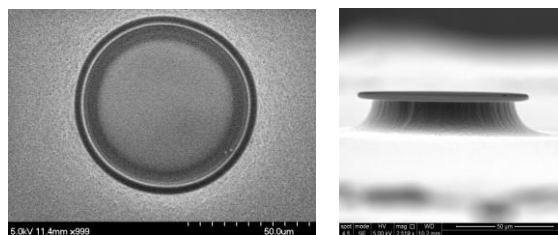


Fig.5: リフロー系改造後に作製したシリカトロイド微小光共振器の電子顕微鏡写真

4. ポストプロセスによる波長制御

共振波長制御はレーザリフロープロセスを応用して行う。シリカトロイド微小光共振器の共振波長は

$$m\lambda_m = 2n\pi R, m = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

のように表されるので、共振波長は屈折率と共振器サイズを変えることによりチューニング可能であるということがわかる。本研究では前述のリフロープロセスを再度行う(ポストプロセス)ことにより共振器をさらに収縮させ、共振波長の制御を試みる(Fig. 6)。

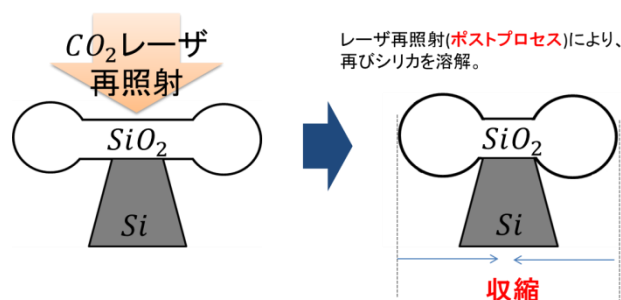


Fig. 6: レーザ追加照射前(左)と照射後(右)のシリカトロイド共振器の形状変化

次に、CO₂ レーザの追加照射による波長チューニングについて述べる。実験は以下の手順で行われた。

- 【1】 シリカトロイド微小光共振器を複数作製し、測定系にセットした。
- 【2】 水分子の吸着と、熱光学効果による波長シフトの影響を小さくするために、30 分程度時間が経ってから測定を開始した。テーパと共振器が結合せず、モードを見やすい位置で測定し、結合の深さを合わせるようにした。
- 【3】 測定を終えたら再びリフロー系に設置し、レーザを照射した。このとき、パワー以外の条件(照射時間, Z ステージ位置)は作成時条件と同じにした。また、1つの共振器は reference 用とし、追加照射をしなかった。
- 【4】 再び測定する。このとき、前回測定したものと結合の深さが一致するように調節した。
- 【5】 【2】 ~ 【3】 をパワー変えて繰り返した。

実際の実験では照射パワー 4 W(パワー密度 53.2 MW/m²), 照射時間 50 ms でトロイドを作製し、

+1 W, +2 W, ... +6 W と追加照射パワーを強めていった。これは、リフローによる溶解は、 SiO_2 が熱平衡状態に達するとそれ以上形状は変化しなくなるので[1], 同じパワーで再照射しても形状は変化しないと予想されたためである。

次に実験結果について示す。まず、+2 W (パワー密度 26.1 MW/m^2) を追加照射したものを Fig. 7 に示す。共振モードが照射前と照射後で大きく変わり、波長シフトを追うことができなくなっていることが分かる。スペクトルの一部を拡大して Q 値を測定すると、 7.3×10^5 だったものが追加照射すると Q 値は 1.3×10^6 と高くなった。

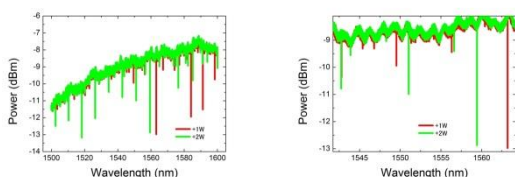


Fig. 7: 2W のレーザー追加照射後の共振スペクトル変化

+3 W (パワー密度 39.1 MW/m^2) 追加照射したときの結果を Fig. 8 に示す。短波長へ 86 pm のシフトが見られた。スペクトルの一部を拡大して Q 値を測定すると、 1.3×10^6 だったものが追加照射後は 1.0×10^6 へ下がった。

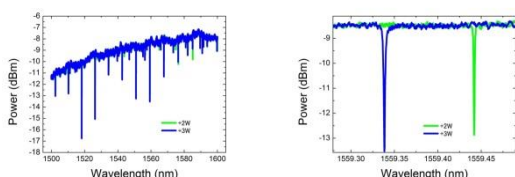


Fig. 8: 3W のレーザー追加照射後の共振スペクトル変化

+6 W (パワー密度 78.2 MW/m^2) 追加照射したときの結果を Fig. 9 に示す。これを見ると大きくモードが変化してしまっているように見える。スペクトルの一部を拡大して Q 値を測定すると、 6.7×10^5 から 6.2×10^4 とかなり低下した。

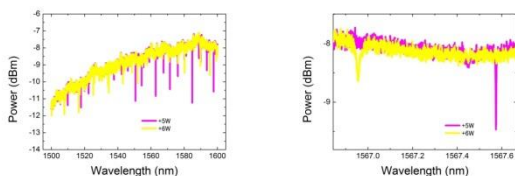


Fig. 9: 6W のレーザー追加照射後の共振スペクトル変化

最後に、結果について考察を加える。まず Fig. 7 の結果についてだが、モードが変化したように見えたのは、リフローを再度施すことにより表面が滑らかになり、再照射前には観察できなかったモードが観察できるようになったためだと考えられる。このように考えれば Q 値が向上したことも頷ける。次に Fig. 8 において本当に共振器サイズの変化によって波長シフトが生じているのかについて検討する。波長シフトの理由には再照射以外にも、水分子の付着による共振器サイズの変化、ファイバ-共振器間距離

の変化による実効屈折率の変化、TO 効果による屈折率の変化が考えられる。しかしながら実験により前者2つの効果は数 pm の波長変化しか誘起できないことが分かったため、考慮する必要はない。また TO 効果によって波長がシフトしたと考えると、共振器温度が短時間で 10K 程度上がったことになるので現実的ではない。したがって、観察された波長シフトはポストプロセスによるものだと考えることができる。最後に Fig. 9 の結果についてだが、リフローパワーよりも大きなパワーを再照射した時に共振モードが大きく変化するのは、大きく共振器サイズが変わったためだと考えられる。(1)式によれば、形状が $1 \mu\text{m}$ 変化すると、数十 nm 程の共振波長がシフトしてしまうので、共振波長シフトを追うことが難しくなる。また Q 値が減少しているのは、強いパワーで再照射することにより表面の凹凸が誘起されてしまったためだと考えられる。

5. 課題・結論

リフロー系を改造して、研究室の従来の系で作製したものよりも高 Q 値である 1.6×10^6 のシリカトroid微小光共振器を作製することができた。 Q 値が 10^6 で制限される要因は、空気中の埃や水分子の吸着や表面の微小な凹凸が考えられる。

ポストプロセス実験においては約 100 pm の短波長シフトに成功した。リフロー条件より強いパワーで照射すると、形状が変化しすぎて波長シフトを追うのは困難であるため、リフロー条件よりもやや低いパワーで波長シフトを行う方が適している。しかし、どれくらいのパワーで波長シフトが起きるのが制御できていないので、パワー条件の解明が課題である。

参考文献

- [1] D. Armani, T. Kippenberg, S. Spillane, and K. Vahala, "Ultra-high- Q toroid microcavity on a chip," *Nature* **421**, 925–928 (2003).
- [2] Q. Xu, P. Dong, and M. Lipson, "Breaking the delay-bandwidth," *Nat. Phys.* **3**, 406–410 (2007)
- [3] T. Tanabe, M. Notomi, E. Kuramochi, A. Shinya, and H. Taniyama, "Trapping and delaying photons for one nanosecond in an ultrasmall high- Q photonic-crystal nanocavity," *Nat. Photonics* **1**, 49–52 (2007).

シリカ微小光共振器上への細胞培養の検討

齊藤 龍介(B4)

本研究では細胞周期を微小光共振器を用いて解析することを目的としている。そのためにシリカ表面に細胞が接着するか、接着した後、細胞分裂が進行するかを検討した。NIH3T3 細胞をシリカ disk 共振器に播種し、適正に培養しても細胞分裂しなかったが追加で細胞を播種し、細胞密度を上げることで細胞分裂させることに成功した。

キーワード：シリカ微小共振器, NIH3T3 細胞, 細胞周期解析

1. はじめに

細胞周期とは、1つの細胞が分裂してから次の分裂が始まるまでの一周期のことである。細胞周期の中で順序正しく染色体が複製された後に等分配され、遺伝的に全く同じ組成からなる細胞のコピーが作られる。20世紀前半で division stage あるいは mitotic-phase(M 期)と呼ばれた分裂期と, resting stage あるいは interphase と呼ばれた休止期もしくは間期だけしか区別されていなかった細胞周期の過程であるが, Haward と Pele(1953 年)が DNA の合成が起こるのは間期のうちの中間期あたりの特定の時間であることを見出した。これによって DNA 合成前の G1(Gap1)期, 合成中の S(Synthesis)期, 合成後の G2(Gap2)期という3つの異なった位相が初めて認識され、「細胞周期」(cell cycle)という概念が成立した。

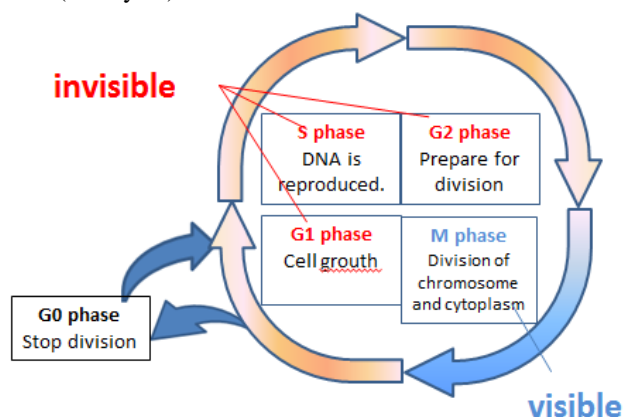


図1：細胞周期。M 期だけは光学顕微鏡で観察他の位相と区別することが容易であるが他の位相はそれぞれ区別することは出来ない。

近年になって細胞周期解析は目覚ましい発展を遂げ、細胞周期について分子レベルで実に様々なことがわかってきた。組織、器官、個体において細胞はさまざまな外的要因の影響を受けて細胞周期の進行、分化をしていることが明らかになってきたのである。しかし、発生や再生における形態形成、癌の浸潤や転移など様々な現象の中で細胞周期の進行がどのように影響するかはほとんどわかっていない。組織や器官、個体において各々の細胞で「いつ、どこで、どのように」細胞周期が制御されているのかを理解することは、基礎生物学も理解を深めるだけでなく、癌研究などの医療分野においても非常に重要な意味を持っている。

本研究では Fucci 技術など、従来蛍光タンパク質を用いて行われてきた細胞周期解析を非常に高感度な

センサとして応用できる高 Q 値シリカ微小光共振器を用いて解析することを目指す。蛍光タンパク質を用いた細胞周期解析ではウィルスベクターによる蛍光タンパク質遺伝子導入時や、蛍光タンパク質自身が細胞に与える二次的影響を無視することは出来ない。高 Q 値シリカトロイド共振器を用いて label free 細胞周期解析を行うことで他の影響を考えない解析を行うことが出来るため、細胞周期解析の指標となるツールの作製につながると期待できる。

2. 液中測定の見直し

実際に細胞周期を解析する際は、細胞を生存させたまま光学測定を行わなければならない。したがって細胞を培地中に入れたままにする必要があるが、通常、光ファイバは空気中測定に合わせて設計されているので吸収係数の高い水中での測定に合わせた光ファイバを設計しなおさなければならない。光の吸収を考えると直径が大きいほど損失が少なくなるが、微小シリカ共振器と共振させるためにはファイバ内の光のモードをシングルモードにしなければならない。階段屈折率円筒光ファイバのシングルモード条件は V パラメータを用いて

$$V = 2.405 \tag{1}$$

とあらわされ、ファイバの屈折率を $n_1 = 1.44$ 、水の屈折率を $n_2 = 1.33$ とすると、

$$V = 2k_0 n_1 a \sqrt{2\Delta} \tag{2}$$

であるから、水中におけるファイバのシングルモード条件は直径を $a \mu\text{m}$ とすると

$$a < 2.15 \tag{3}$$

となる。空気中のシングルモード条件は、空気中の屈折率 $n_2' = 1$ として

$$a < 1.14 \tag{4}$$

であるので、水中では吸収をおさえつつシングルモード条件を満たすことが出来る。直径が $2 \mu\text{m}$ 程度のファイバを作製するにはファイバの引き時間を調節して直径を制御する必要がある。図2はファイバ引き時間と直径の関係を表したグラフである。

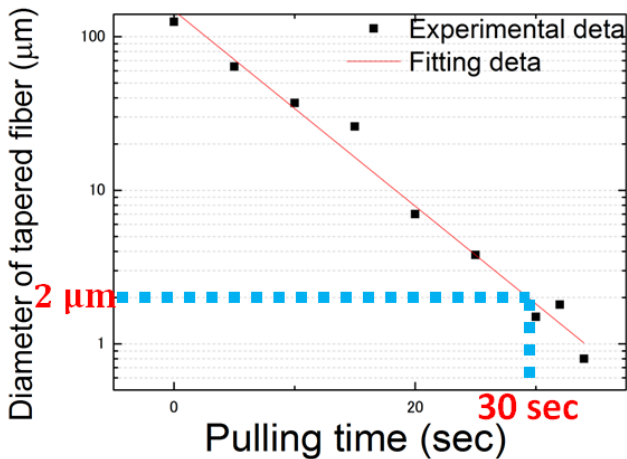


図 2：図より、およそ 30 秒ほどテーパファイバを引くと約 2 μm のファイバを作製することが出来ることがわかる。

この水中におけるシングルモード条件を満たしたファイバを実際に作製し、空気中と水中で透過率を測定した結果が図 3 である。

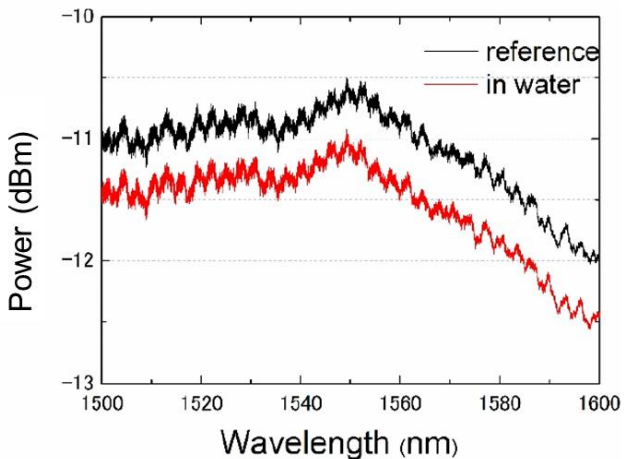


図 3：図より、水中測定に適したファイバはより大きい吸収損失を持つ水中において 0.5dBm ほどにまで透過率の減少を抑えることが出来た。

図 2 の条件で作成したファイバは、水中において水による吸収損失を 0.5dBm に抑えることが出来た。これは、光強度で表すと入射光 1 mW に対して出射光が 0.89 mW である計算になる。水中の損失を小さく抑えつつシングルモード条件を満たせるので、液中測定にはこのファイバが適しているといえる。

3. 共振器上の細胞播種実験

共振器に細胞を播種し、培養するために以下の手順をふんだ。

1. 多くのシリカ微小共振器を乗せた基板を作製し、エタノールに 15 分以上浸した後に紫外線を 20 分以上照射して滅菌処理を施した。
2. 6 cm の dish を用意し、その上にシリカ基板を置き
 DMEM 45ml
 PBS 5ml
 ペニシリン 1ml
 を配合した培地で dish 内を満たした。

3. 基板を置いた dish を
 CO₂ 濃度 5%
 温度 37°C
 湿度 100%
 に保ったインキュベータで培養した。
4. どの程度の割合で細胞が接着したかを調べた。

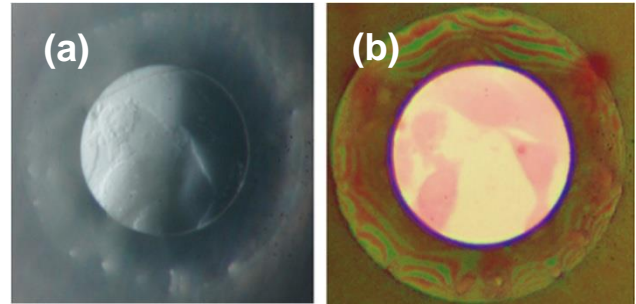


図 4：(a)は共振器に接着した細胞で、(b)はそれをエオジン染色液で染めた光学顕微鏡写真である。(a)と(b)の影が非常に良く一致していることがわかる。

表 1

| Microcavity | Number of microcavity | Microcavity with cells | The ratio |
|-------------|-----------------------|------------------------|-----------|
| Disk | 52 | 11 | 21.2 |
| Toroid | 51 | 2 | 3.92 |

(a)は播種実験を行った後の共振器であり、(b)の共振器は、この半透明な物体が本当に細胞であることを確かめるために、エオジン染色液で染色したものである。この写真により、確かにこの共振器上の半透明な物体が細胞であることが確認出来た。

表 1 のように、細胞は共振器上に接着しづらく、また共振器に細胞を接着しても、ほとんどが以下の図 5 のように単独で細胞が接着する。



図 5：共振器に接着した細胞の光学顕微鏡写真。細胞は共振器に接着したとしても、単独ではその後細胞分裂を起こすことはなかった。

NIH3T3 は接着依存の細胞であるので何かに接着させることが分裂の必要条件である。しかし、それは十分条件ではなく、細胞が単一に存在している場合も分裂を起こさない。したがって細胞分裂を誘発するべく、密度高く細胞を接着させるために次のような実験を行った。

4. 細胞分裂誘発実験

細胞は単独では分裂までに至らない。したがって

以下のような実験を行い、細胞接着密度を上げることで細胞分裂を誘発した。

1. 通常の細胞播種実験と同じようにシリカ微小共振器を滅菌し、その上に細胞を播種した。
2. インキュベータ内で 8 時間から 9 時間培養したところで dish を取り出して共振器への細胞の接着を観察したのち、もう一度細胞を播種した。
3. これを何度も繰り返し、密度高く接着した共振器を確認出来たら、未接着の細胞を取り除き、再び培地を入れて、インキュベータ内で培養した。

以上の手順によって細胞を密度高く接着させた共振器が図 6 の(a)であり、それを 24 時間以上培養し、細胞分裂を進行させたものが図 6 の(b)である。

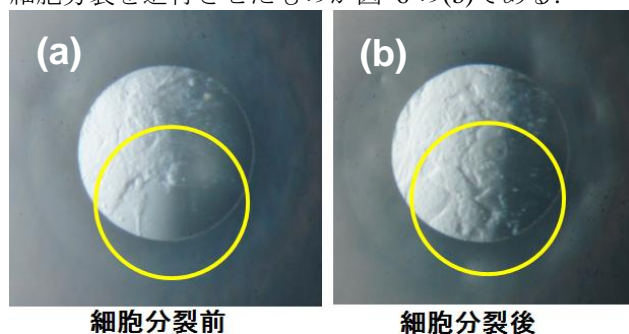


図 1 : (a)は追加播種を行い、多くの細胞を接着させることに成功した共振器で(b)はそれを 24 時間以上培養したものである。確かに細胞が増殖していることがわかる。

我々は disk 共振器上で細胞分裂を起こすことに成功した。細胞分裂を起こすためには何度も共振器上に播種し、細胞接着の密度を上げることが有効であることがわかった。

5. まとめ

本研究では細胞周期の label free 解析を目的とし、それに向けた微小光共振器上への細胞接着実験を行った。シリカトロイド微小光共振器よりも、シリカ disk 微小光共振器の方が接着する確率が高いので、この disk 共振器を用いて実験を行った。しかしこの Disk 共振器を用いても、一回の播種では接着する細胞の数が非常に少なく、いくら培養しても細胞分裂を確認することが出来なかった。そこで、幾度も共振器上に細胞を播種することによって細胞接着の密度を上げ、培養したところ共振器上で細胞分裂が進行する様子を確認することに成功した。今後は同じ実験を Q 値が高く、より高感度なセンシングが出来ると期待されるシリカトロイド微小光共振器を用いて行うことで、細胞周期の label free 解析に向けて研究を進めていきたい。

参考文献

[1] B. Alberts, A. Jhonson, J. Lewis, M. Raff, K. Roberts, and P. Walter. “Molecular Biology of THE CELL Fifth Edition” Newton Press. (2009) (アルバート他, 中村桂子, 松原謙一他(訳) “THE CELL 細胞の分子生物学

第5 版” ニュートンプレス) (2010).

[2] 國分泰雄, “光波工学” 協立出版株式会社, (1999).

[3] F. Vollmer and Stephen Arnold, “Whispering gallery mode biosensing: label-free detection down to single molecules” Nature Methods **5** 591-596 (2008).

[4] F. Vollmer, S. Arnold and D. Keng., “Single virus detection from the reactive shift of a whispering-gallery mode,” PNAS, **105**, 20701-20704 (2008).

多角形状トロイド微小光共振器のテーパ光ファイバとの結合

鈴木良(B4) 加藤拓巳(M1)

従来は円形であったシリカトロイド微小光共振器を多角形状化することで結合の安定性の向上について検討した。エッチングまたはフォトリソグラフィのプロセス条件を変えることで多角トロイド共振器を作製し、FDTD シミュレーションより得られた特性について実験的に確認した。また、導波路が接触した状態で $Q = 2.2 \times 10^4$ を達成した。

キーワード：シリカトロイド微小光共振器, 多角共振器, 近接場光

1. はじめに

近年、光の閉じ込め性能が高い(高 Q 値)微小光共振器が数多く提案されている[1]。特にシリカトロイド微小光共振器はその高 Q 値と高集積性から、非線形光学効果を利用した光周波数コム発生や Cavity-QED, バイオセンシング等への応用が期待されている[2]。シリカトロイド微小光共振器はテーパファイバからの近接場光を介して Whispering Gallery Mode を励振するが、その最適な結合状態(Critical Coupling)を得るためには共振器とテーパファイバの距離を $\text{sub-}\mu\text{m}$ オーダーで精密制御しなければならない。本研究では共振器を多角形状化することで辺と角の部分で共振モードを変化させ、外部光との結合の安定化を実現することを目的とする。そこで異方性エッチングまたはフォトリソグラフィを利用した 8 角形シリカトロイド微小光共振器の作製条件の検討、FDTD シミュレーションより得られた 8 角形共振器の特性の実験的な性能評価を行った。

2. 8 角形トロイド共振器の作製

2.1 異方性エッチングによる作製

シリカトロイド微小光共振器の作製は(1) フォトリソグラフィ, (2) シリコンエッチング, (3) レザリフローの 3 つのステップに分けられる[2]。図 1 はこのプロセスの(2)と(3)について示している。通常、円形トロイド共振器の作製では(2)において等方性エッチングである XeF_2 ガスのみを用いる。トロイド共振器の形状はこのプロセスにより決定するシリコンの柱の形状に依存することに着目し、本研究では異方性エッチングとなる KOH 水溶液を加えることで共振器を 8 角形状にした。

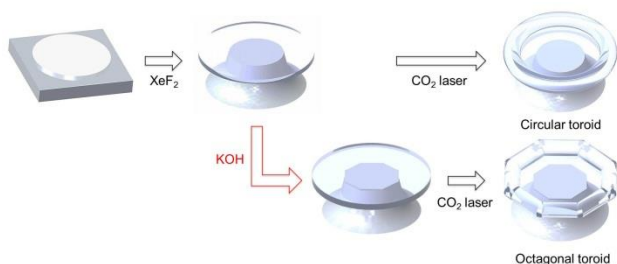


図 1：トロイド共振器の作製プロセス。通常のプロセスに KOH 水溶液の異方性エッチングを加えることで多角形状化を行った。

この等方性・異方性エッチングの最適な組み合わせを検討することで安定した作製条件を導いた。以上より作製された 8 角形トロイド共振器の光学顕微鏡写真と SEM 画像を図 2 に示す。本研究ではこの方法で作製した共振器を光学測定に用いた。

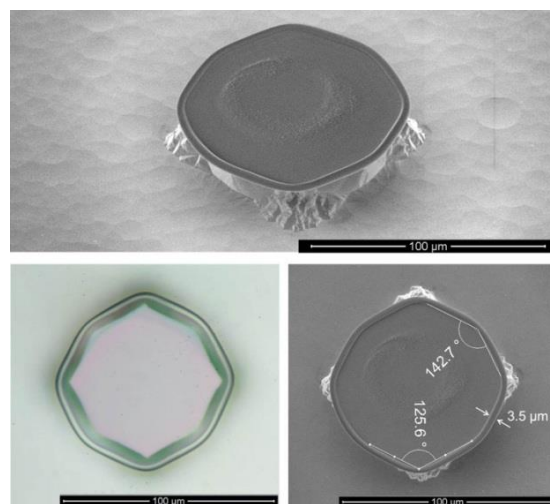


図 2：8 角形トロイド共振器の作製結果。この作製法による共振器を用いて光学特性評価を行った。

2.2 8 角形パターンニングによる作製

KOH 水溶液を用いた作製では異方性エッチングの特性より 8 角形以外の形状の作製が困難である。そのためフォトリソグラフィにより任意のシリカディスクを作製することで、トロイド共振器の形状を制御できるか検討した。ここで 8 角形ディスクを作製して等方性エッチングを行うと、図 3 (a) のように綺麗なシリコンの柱が形成された。レーザーリフローを施すと図 3 (b) のようにトロイド共振器が作製された。これより 8 角形以外の多角形状や楕円、サーキット型の形状の作製も可能であると考えられる。

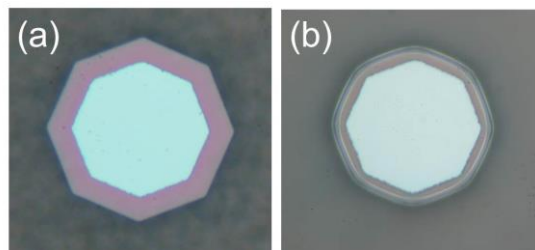


図 3：8 角形のシリカディスクから作製した (a) 等方性エッチング, (b) レザリフロー 後の 8 角形トロイド共振器。

3. 共振器とテーパファイバの結合

共振器への光の結合はテーパファイバという直径 $1\ \mu\text{m}$ 程度の細い光ファイバを用いて行われ、これを共振器に接近させることで近接場光より光が入力される。共振器はそれぞれ固有の Q 値を持つが、実効的な Q 値はこれにテーパファイバが接近することによって生じる結合損失を加味した値となり、

$$Q_{\text{load}}^{-1} = Q_{\text{unload}}^{-1} + Q_{\text{coup}}^{-1} \quad (1)$$

Q_{load} : 実効的な Q 値

Q_{unload} : 共振器固有の Q 値

Q_{coup} : 結合による生じる損失

と表せる。図4は共振器とテーパファイバを接近させていったとき(結合係数 κ が大きくなることに対応)の実効的な Q 値とテーパファイバ内を伝搬する共振波長の光の透過率 T の変化を示している。透過率 T を見るとある位置関係において $T=0$ となっており、この最も効率よく共振器に光が入力されている状態のことを **Critical Coupling** と呼ぶ[2]。円形トロイド共振器では **Critical Coupling** が生じる共振器とテーパファイバ間の距離は $100\ \text{nm}$ オーダーと考えられており、本研究では多角形状化により接触状態であっても **Critical Coupling** となることを目指す。

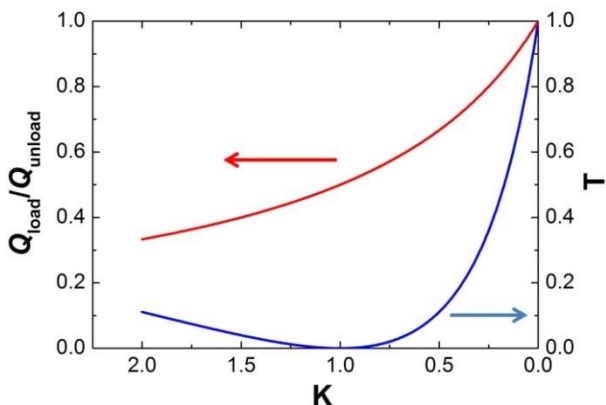


図4：結合係数 κ と実効的な Q 値 Q_{load} (赤線)，テーパファイバの透過率 T (青線)の関係。

4. FDTD シミュレーション

2D-FDTD を用いた 8 角形トロイド共振器のシミュレーション結果を図5に示す[4]。この共振モードを辺と角の部分で比較すると、辺の部分の方がより内側を光が伝搬していることがわかる。光の入出力は近接場光を介して行われており、辺の部分では光のしみ出しが小さいので角の部分に比べて結合度合いが小さくなることがわかった。また光の減衰曲線からその Q 値を計算すると $Q = 8.8 \times 10^6$ という値が得られた。

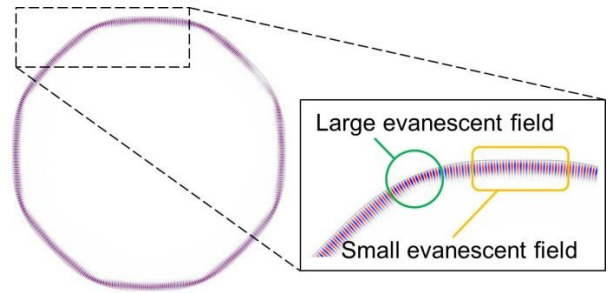


図5：FDTD を用いた 8 角形トロイド共振器内の共振モードのシミュレーション結果。角に比べて辺の部分では光が共振器の内側を伝搬しているため、表面付近の光の密度が小さくなっている。

5. 光学特性評価

作製した 8 角形トロイド共振器の光学特性評価を行った。測定は辺と角の部分に対する結合の 2 通りで行い、どちらにおいても同じ共振波長が得られたのでこの共振モードを用いて比較を行った。

まず **Critical Coupling** の位置を確認するために、共振器とテーパファイバの距離を $100\ \text{nm}$ ずつ接近させたときの透過率の変化を測定した。その結果を図6に示す。これより辺の部分への結合の方がより距離が小さい位置で **Critical Coupling** が生じていることがわかった。これはシミュレーション結果と同様の傾向を示しており、結合位置でカップリングが変化していることがわかった。

次に Q 値の測定を行った。本研究では接触状態における性能を高めることを目的としているため、テーパファイバと接触している状態(Gap distance $0\ \text{nm}$)の透過スペクトルのデータを図7に示す。印をつけた波長が比較に用いた共振モードである。その Q 値を比較すると辺の部分では $Q = 2.2 \times 10^4$ 、角の部分では $Q = 6.3 \times 10^3$ という結果が得られ、これもシミュレーションと同様の結果であった。

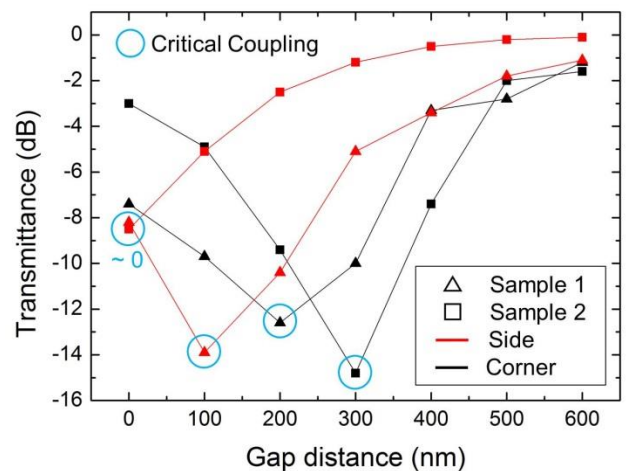


図6：共振器にテーパファイバを接近させたときの透過率の変化。辺と角に対する結合がそれぞれ赤，黒線で表されている。辺に対する結合の方がより共振器に近い位置で **critical coupling** が生じているのがわかる。

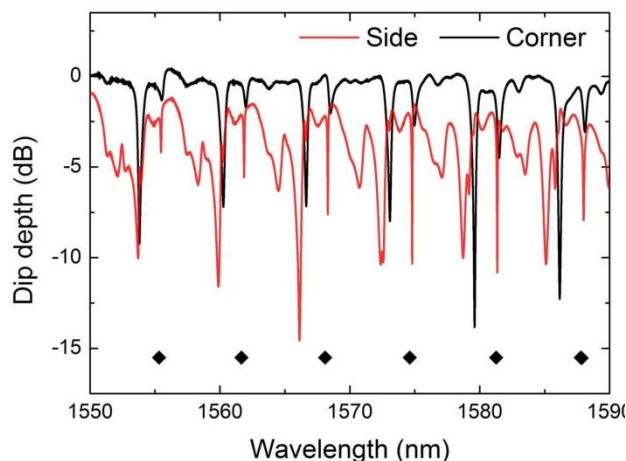


図 7：共振器にテーパファイバを接触させたときの透過スペクトル．辺と角に対する結合がそれぞれ赤，黒線で表されている．点は同じ共振モード(共振波長)を表しており，これにより比較を行った．

6. 結論

シリカトロイド微小光共振器の外部光との結合を安定化することを目的として共振器の多角形状化を行った．円形トロイド共振器の作製方法に KOH 水溶液の異方性エッチングを加えることで共振器を 8 角形状化した．この共振器の光学特性を評価すると，FDTD シミュレーションより確認されたように辺の部分では角の部分と比較して結合強度が小さくなることがわかった．その Q 値は辺の部分にテーパファイバを接触させた状態で 2.2×10^4 を達成した．またシリカディスクの形状を変化させることでトロイド共振器の形状を制御できることが確認できたため，8 角形に限らず他の多角形状や楕円，サーキット形状などの作製が可能であることを確認した．これから，より Q 値の高い構造の検討を行うことで高性能，かつ微小制御を取り除いた物理的に堅牢なアプリケーションの実現に近づくであろう．

参考文献

- [1] K. J. Vahala, Nature **424** 839-846 (2003)
- [2] D. K. Armani, T. J. Kippenberg, S. M. Spillane, and K. J. Vahala, Nature **421** 925-928 (2003).
- [3] M. Cai, O. Painter, and K. J. Vahala, Phys. Rev. Lett. **85** 74-77 (2000).
- [4] T. Kato, W. Yoshiki, R. Suzuki, and T. Tanabe, Appl. Phys. Lett. **101** 121101 (2012).

シリカプロセスの立上げとシリカトロイド微小光共振器作製

鐵本智大(B4)

シリカは通信波長帯で非常に低損失であり、光信号処理のために有用な材料であるが、デバイス作製には高度な微細加工技術の習熟が必要となる。本稿では、シリカディスクの作製及び、シリカトロイド微小光共振器の作製における技術的課題とその克服手法について紹介する。

キーワード：シリカ、フォトリソグラフィ、レーザ描画、微細加工

1. はじめに

シリカトロイド微小光共振器は Q 値の高さと On-chip で利用できる利便性から光スイッチやセンシング、オプトメカニクスなど多くの分野で用いられている。Fig. 1 にその作製プロセスを示す。プロセスは、フォトリソグラフィとエッチングによるシリカディスク作製、XeF₂ドライエッチングによる犠牲層エッチング、CO₂レーザリフローの3つの工程に分けられる。本稿ではシリカディスクの作製を目指す。まず、レーザ描画によってシリカディスクパターンが適切に配置されたフォトマスクを作製した。そして、フォトリソグラフィとドライエッチングによってシリカディスクを作製した。その過程で、シリカトロイド微小光共振器の作製における問題点が明らかとなり、対応策を講じたので紹介する。

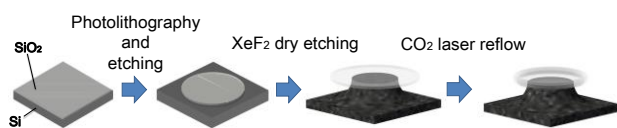


Fig. 1 : シリカトロイド微小光共振器の作製工程

2. レーザ描画によるフォトマスクの作製

レーザ描画によるフォトマスク作製の工程は主に以下の3つからなる。

1. AutoCAD によるマスクパターンの CAD データ作成。
2. レーザ描画。
3. 現像・エッチング。

マスクパターンの作成では、シリカトロイド微小光共振器の作製や光学測定がしやすいようなディスクの配置を考えた。従来使用していた基板のパターンはシリカディスクが密集しすぎていて、以下の3つの問題が発生していた。

1. ウエハをチップに分割する際にディスク構造を壊してしまう。
2. XeF₂エッチングでチップの内側と外側のディスクでシリコンが削れる量にムラが出る。
3. ファイバ固定方式で光学測定を行うため、チップの外側にある光共振器にしかテーパファイバを近づけることができず、光学測定を行うことができない光共振器があった。

これらの問題を解決するために、シリカディスクを一行に並べたものを一定間隔に配置したパターンを用いた (Fig. 2)。このパターンでは一行ずつシリカディスクをチップに分けることができ、エッチングムラや光学測定の問題も防ぐことができる。また、それぞれの列の上端と下端には CO₂レーザリフローの際にピント合わせや試し打ちに使うことができる角張った構造を置いた。多角形トロイド共振器を作製するための八角形のパターンやレーザ描画で作製できるフォトマスクの最小線幅を調べるための line and space のパターンも配置した。

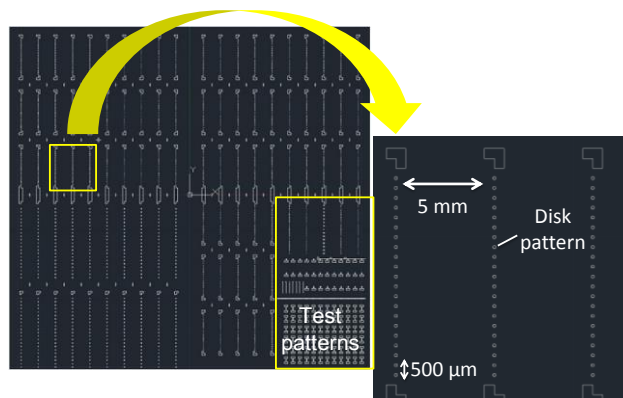


Fig. 2 : 作製したフォトマスクパターン

レーザ描画には HEIDELBERG INSTRUMENTS の DWL66fs を使用した。光源は 365 nm の Ar レーザである。ブランクマスクはクリーンサアフェイス技術の AZP 1350 が 540 nm で成膜されたものを使用した。作製したフォトマスクを Fig. 3 に示す。また、マスクパターンを光学顕微鏡で観察したものを Fig. 4 に示す。円形や八角形のディスクパターンは良好に作製できており、line and space は 1.5 μm までは良好に作製できた。

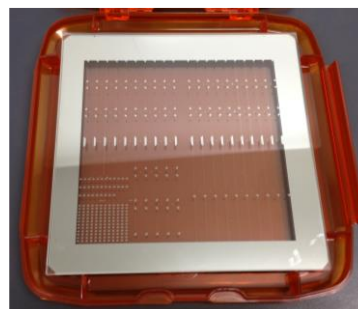


Fig. 3 : 作製したフォトマスク

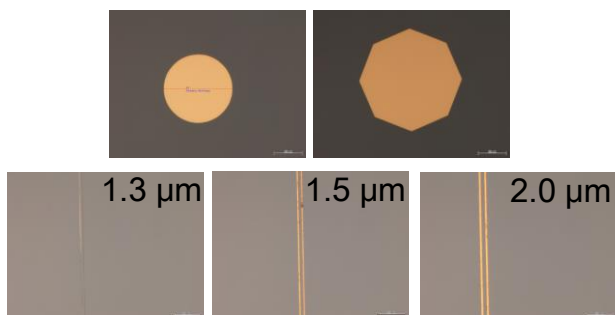


Fig. 4 : 作製したフォトマスクのパターン

3. フォトリソグラフィによるシリカディスクの作製

フォトリソグラフィは半導体製造のために発展した技術であり、微細加工や集積化の面で有利である。Fig. 5 に一連の工程を示す。工程は主に以下の6つからなる。

1. ウエハ表面の洗浄やレジストの密着性を高めるための疎水処理。
2. スピンコートによるレジスト塗布および加熱によるレジストの密着性向上処理。
3. 露光によるレジストの感光。
4. 現像液による感光したレジストの除去および加熱による残存レジストの密着性向上処理。
5. レジストパターンをマスクとしたエッチング
6. レジスト剥離

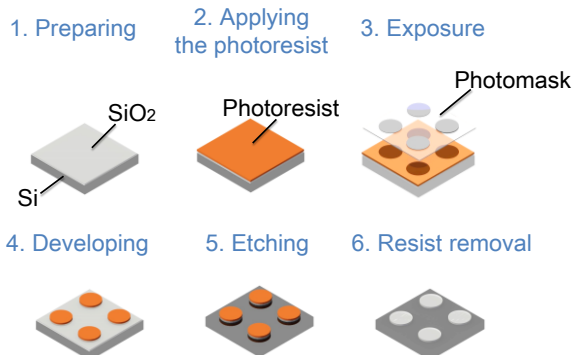


Fig. 5 : フォトリソグラフィを用いたシリカディスク作製

今回のプロセスではレジストは東京応化工業の OFPR 800LB を使用し、前処理、レジスト塗布、現像に SUSS MicroTec の Gamma を露光に MA6 を使用した。OFPR 800LB を 1.5 μm に成膜することを考え、成膜条件は Table. 1 のようにした。

Table. 1 : OFPR 800LB の成膜条件

| Processes | Contents |
|-----------------------|---|
| Dehydration baking | 110°C 5 min |
| Vapor priming of HMDS | 70°C 15 sec (with HMDS vapor) |
| | 70°C 60 sec |
| Spin coating | 300 rpm 3 sec |
| | 1000 rpm 30 sec |
| | 3000 rpm 2 sec |
| Pre-baking | 110°C 90 sec |
| Exposure | 16.43 mW / cm ² 2.5 sec |
| Developing | 20 rpm 5.5 sec (with TMAH) |
| | 0 rpm 45 sec |
| | 20 rpm 2 sec (Removing TMAH) |
| | 20 rpm 5.5 sec (with TMAH) |
| | 0 rpm 45 sec |
| | 20 rpm 5.5 sec (Removing TMAH) |
| | 20 rpm 5.5 sec (with TMAH) |
| Rinsing | 0 rpm 20 sec |
| | 1000 rpm, 15 sec (with hyperpure water) |
| | 1500 rpm 15 sec (with N ₂ blowing) |
| Post-baking | 1500 rpm 30 sec, 3000 rpm 2 sec |
| | 120°C 90 sec |

エッチングには ULVAC の NLD-570 を使用した。この装置は、エッチングチャンバー内の磁場を調整することによって、磁場が 0 になる点にプラズマを集中させることが出来るため、低圧で高密度なプラズマの生成が可能である。このため、コントラストが高い微細なエッチング加工が可能になっている。ただし、今回のプロセスではエッチング条件によっては、リムーバーによる洗浄や O₂ プラズマアッシングによるレジスト剥離処理を行っても、シリカディスクの端の部分を中心にレジストの残差が発生するという問題が起こった (Fig. 6)。この問題は、エッチングの際に発生する熱によるレジストの硬化が原因であると考え、エッチング条件の最適化を図った。最適化したエッチング条件を Table. 1 に示す。この条件を用いることで、エッチング後のレジスト剥離は AZ リムーバー700 による超音波洗浄で行うことができるようになった。

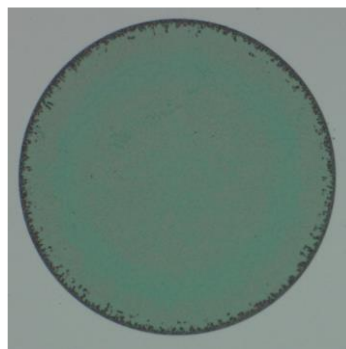


Fig. 6 レジストの残差があるシリカディスク

Table. 2 : エッチング条件

| | |
|---------------|--------------|
| Antenna power | 300 W |
| Bias power | 100 W |
| Etching gas | C3F8 10 sccm |
| Etching time | 330 sec |
| Etching rate | 190 nm / min |

以上の工程によりシリカディスクを作製した。作製したシリカディスクを Fig. 7 に示す。

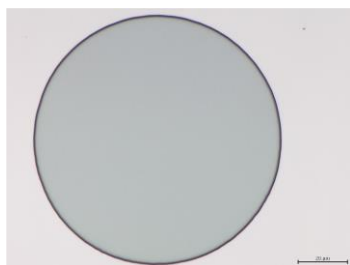


Fig. 7 : 作製したシリカディスク構造

4. シリカトロイド微小光共振器の作製と光学測定

作製したシリカディスクからシリカトロイド微小光共振器を作製した (Fig. 8)。また、この光共振器の透過スペクトル光強度の光学測定を行った。結果を Fig. 9 と Fig. 10 に示す。得られた Q 値は 1.3×10^6 であり、十分な高 Q 値が得られた。

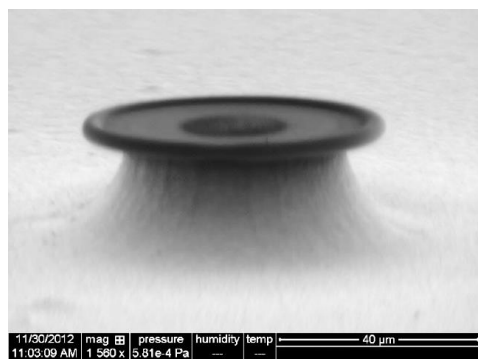


Fig. 8 : 作製したシリカトロイド微小光共振器

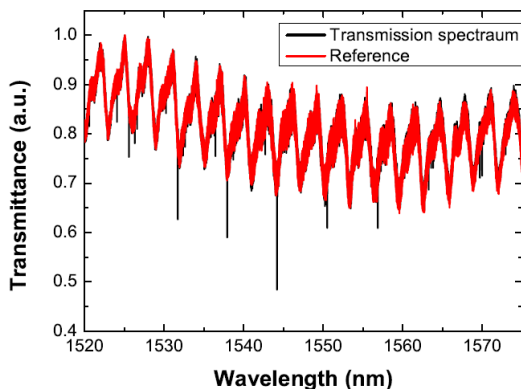


Fig. 9 : 作製したシリカトロイド微小光共振器の透過スペクトル強度の測定結果

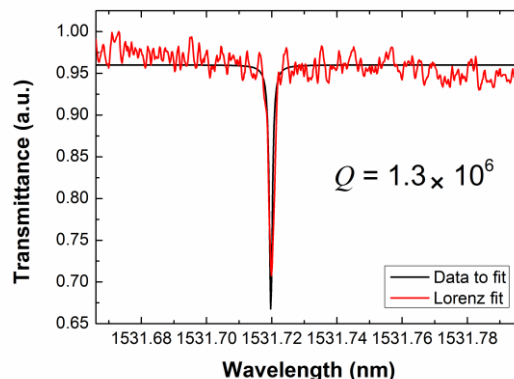


Fig. 10 : 作製したシリカトロイド微小光共振器のローレンツフィット

5. 結論

フォトリソグラフィを用いたシリカの加工を行い、シリカトロイド微小光共振器の作製をした。その過程で、エッチング条件によるレジストの残差の問題点を明らかにし、解決策を講じた。また、シリカディスクの配置を改良したフォトマスクを作製し、実験が行いやすいチップの作製ができるようにした。今回のプロセスでは最小線幅 $1.5 \mu\text{m}$ が得られた。サブマイクロオーダーの構造を作製するには電子線描画などの技術が必要になる。

6. 設備に関して

今回の実験は本塾の電気系共通実験室のクリーンルームの設備や 4 大学ナノ・マイクロファブリケーションコンソーシアムを通じて、川崎市の NANOBIC の設備を利用して行った。

参考文献

- [1] D. Armani, T. Kippenberg, S. Spillane, and K. Vahala, *Nature* **421**, 925-928 (2003).
- [2] 山口宗弘, 半導体の製造工程(南日本新聞開発センター, 2003).
- [3] 田邊功, 竹花洋一, 法元盛久, フォトマスク: 電子部品製造の基幹技術(東京電機大学出版局, 2011).

シリカ微小球共振器を用いた超純水の汚染評価に関する検討

西村治郎(B4)

本研究では、シリカ微小球共振器を用いて超純水の汚染評価に関する検討を行った。粒子付着によるシリカ微小球共振器のシフト量が超純水中のイオン含有量と相関があることを確認し、その原理を用いて超純水と市水の純度の違い、シリカとの反応の違いについて検討した。

キーワード：微小光共振器，センシング，波長シフト，超純水

1. はじめに

近年の光計測技術の向上により、物質の構造解析や物質同定、検出などがより高精度で行えるようになった。光を用いた計測では一般に物質と光の相互作用により行うため、デバイスのサイズと感度にトレードオフの関係があるという欠点を抱えている。これは光が物質中を透過するため、1つの光子は1回しか物質と相互作用できないことに起因する。この欠点を解決するものとして期待されているものに微小光共振器がある。微小光共振器は微小空間に光を閉じ込める素子であるため、1つの光子であっても何回も物質と相互作用が可能となり、デバイスのサイズを小さくし感度を向上させることが可能となる。先行研究例では 80 μm 程の非常に小さなシリカマイクロロイド共振器を用いて 5×10⁻¹⁸ mol/L のインターロイキン-2 (IL-2) の検出に成功している [1]。

本研究では微小光共振器を用いて小型かつ高感度な光センサーを作製することを目的とし、シリカ微小球共振器を用いて超純水の汚染評価に関する検討を行った。

2. 微小光共振器によるセンシング

微小光共振器では共振波長のシフト量を測定することで物質同定、検出を行う [2]。波長シフト量は光路長の変化量や誘電伝率の変化量に依存し、WGM 共振器の場合その関係は

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{\Delta R}{R_0} + \frac{\Delta n}{n_0} \quad (1)$$

によって表される。λ は波長、R は共振器の半径、n は屈折率を表している。(1)式より光路長の変化や誘電率の変化が大きい程、共振波長は大きくシフトすることがわかる。本研究で用いる超純水と市水では不純物の含有量に大きな違いがあるので、共振波長シフト量にも違いが生じることが期待される。本研究では共振波長シフト量により超純水の汚染度を評価する。

3. シリカ微小球共振器の作製

実験セットアップは Fig. 1 に示す通りである。CO₂ レーザを 2 枚のアキシコンレンズを用いることで、レーザ光の形状をドーナツ型にする。その後、2 枚の金ミラーを用いてシングルモード光ファイバの先端へと CO₂ レーザを集光する。CO₂ レーザを集光する

ことによりエネルギー密度が増加し、ファイバ先端を融解する。融解することで液体の表面張力が作用し Fig. 2(a)のようにファイバの先端のみが球状になり微小球共振器を得る。共振器のサイズは融解するファイバの径を変えることで大まかに制御することができ、Fig. 2(b)は CO₂ レーザで融解するファイバの径を小さくした場合の微小球共振器である。

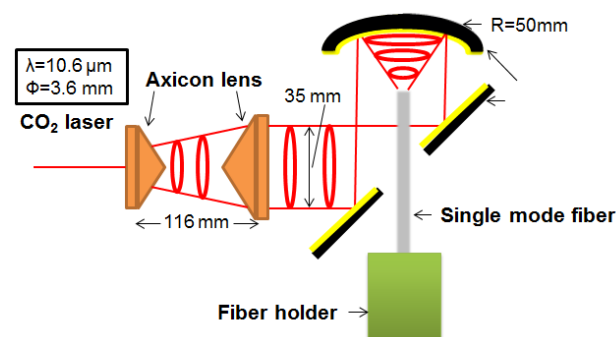


Fig. 1: シリカ微小球共振器作製の実験セットアップの概略図

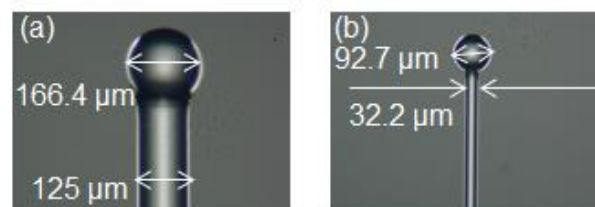


Fig. 2: シリカ微小球共振器の光学顕微鏡写真

4. シリカ微小球共振器による超純水の汚染評価

4.1. 超純水中における不純物の量とシフト量の関係の検討

(1) 実験方法

1. 作製した微小球共振器の透過スペクトルを測定した。
2. 微小球共振器を測定系から取り外し、超純水または 0.05 mol/L の塩化ナトリウム水溶液へと 5 分浸した。
3. 微小球共振器を液中から取り出し、5 分乾燥させた。
4. 微小球共振器の透過スペクトルを測定した。また、実験方法の概略図を Fig. 3 に示す。

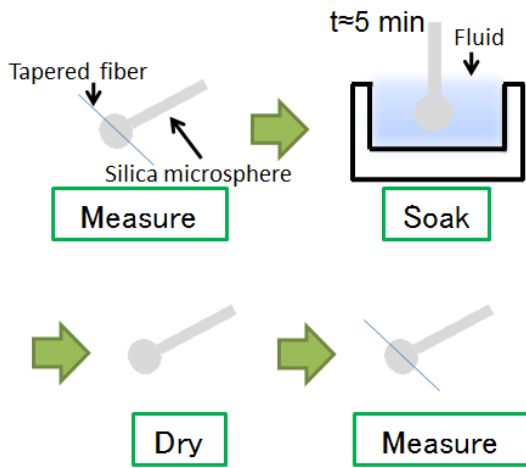


Fig. 3: 実験手順

(2)実験結果

超純水，塩化ナトリウム水溶液それぞれにおける共振スペクトルの変化をそれぞれ Fig. 4(a),(b)に示す. 結果より塩化ナトリウム水溶液に浸した場合の方が超純水の場合に比べて波長シフト量が大きいことがわかり，超純水中における不純物の量と波長シフトに相関があることがわかる.

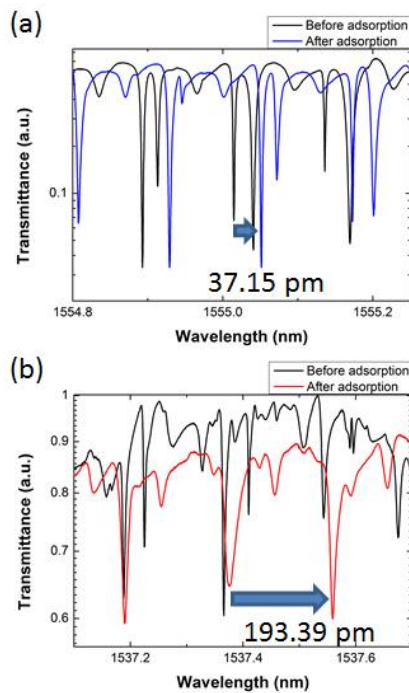


Fig. 4: (a) シリカ微小球共振器の共振スペクトル. 黒は作製直後を，青が超純水に浸けた直後をそれぞれ表している. (b) (a)と同様で，黒は作製直後を，赤は NaCl aq に浸した直後をそれぞれ表している.

4.2.超純水の汚染評価

(1)実験方法

1. 作製した微小球共振器の透過スペクトルを測定した.
2. 微小球共振器を測定系から取り外し，超純水または市水へと 5 分浸した.

3. 微小球共振器を液中から取り出し，5 分乾燥させた.
4. 微小球共振器の透過スペクトルを測定した.

(2)実験結果

超純水，塩化ナトリウム水溶液それぞれにおける共振スペクトルの変化をそれぞれ Fig. 5(a),(b)に示す. また，同様の実験を何度か行い得られた共振波長シフトをヒストグラムにまとめた. これを Fig. 6 に示す. 結果より，市水の場合であっても超純水とシフト量があまり変わらない結果がいくつか得られたため，以下で考察を行う.

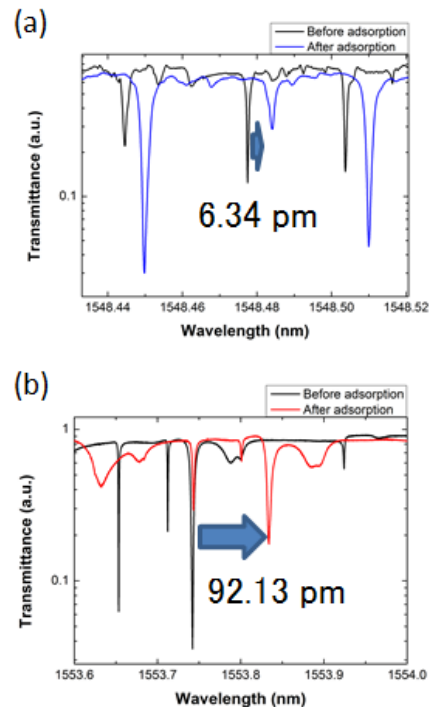


Fig. 5: (a) シリカ微小球共振器の共振スペクトル. 黒は作製直後を，青が超純水に浸けた直後をそれぞれ表している. (b) (a)と同様で，黒は作製直後を，赤は市水に浸した直後をそれぞれ表している.

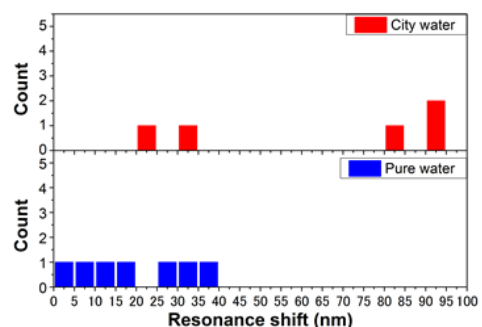


Fig. 6: 共振波長シフトのヒストグラム

(3)考察

超純水の場合，市水でシフト量が大きい場合，市水でシフト量が小さい場合のそれぞれに対して

$$Q_{ads}^{-1} = Q_{ori}^{-1} + Q_{abs}^{-1} \quad (2)$$

より共振器を液体に浸けることで、共振器表面に付着した粒子による光吸収 Q_{abs}^{-1} を求めた。ここで、 Q_{ads} は共振器を液体浸した後の Q 値、 Q_{ori} は作製直後の Q 値である。計算によると超純水の場合では Q_{abs} は 10^5 後半~ 10^6 後半、市水でシフト量が大きい場合は 10^5 前半、市水でシフト量が小さい場合は 10^6 後半~ 10^7 前半であったので以下の2つについて考察した。

1. 市水の場合シフト量と Q_{abs} の大きさに相関があるので、粒子の付着の度合いに差が生じたのではないか。
2. 超純水と市水でシフト量が同じ場合でも、 Q_{abs} に差があるのはシリカとの反応がそれぞれ異なるからではないか。

(a) 付着の違いについて

実験で得られた波長シフト $\Delta\lambda$ から

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{\Delta R}{R_0} \tag{3}$$

を用いて共振器の半径の増大分 ΔR に変換し、横軸を ΔR 、縦軸を Q_{abs}^{-1} のグラフ上にプロットし、Fig. 7 を得た。一般的に共振器表面に粒子が付着による半径の増大分と Q_{abs}^{-1} は比例関係が成り立つが、Fig. 7 より実験結果は比例関係が成り立っておらず、この結果より市水で波長シフトが小さい理由が粒子の付着の問題ではないことがわかる。この原因究明は今後の研究の課題である。

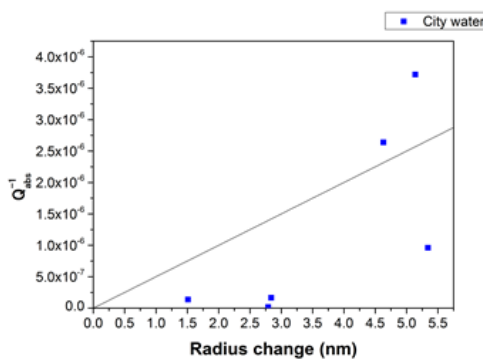


Fig. 7: 半径の増大と吸収損失の関係

(b) 超純水と市水のシリカとの反応の違いについて

超純水と市水のシリカとの反応の違いについて考察するため以下の実験を行った。

1. 作製した微小球共振器の透過スペクトルを測定した。
2. 微小球共振器を市水へと 5 分浸し、その後十分乾燥させたのち透過スペクトルを測定した。
3. 微小球共振器を超純水へと 5 分浸し、その後十分乾燥させたのち透過スペクトルを測定した。

実験結果として Fig. 8, Tab. 1 を得た。Fig. 8 は作製直後、市水に浸した後、超純水に浸した後の透過スペクトルであり、Tab. 1 はそれぞれの Q 値である。結果より共振波長は市水によって長波長へシフトするが、超純水によって短波長へ戻ることがわかり、 Q 値に関しては市水に浸けた後ではあまり低下しないのに対し、超純水に浸けると大きく低下することがわかる。このことから我々は超純水が微小球共振器

の成分であるシリカを $\text{SiO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Si}(\text{OH})_4$ の反応により溶解した可能性を考えている。これは超純水により短波長にシフトしたのは、市水によって共振器表面に付着した粒子が超純水により取り除かれたと同時に、溶解したことによる光路長の減少が原因で、超純水により Q 値が大きく低下したのはシリカを溶解したため共振器表面が荒くなったためだと考えられるからである。詳細は今後の検討事項である。

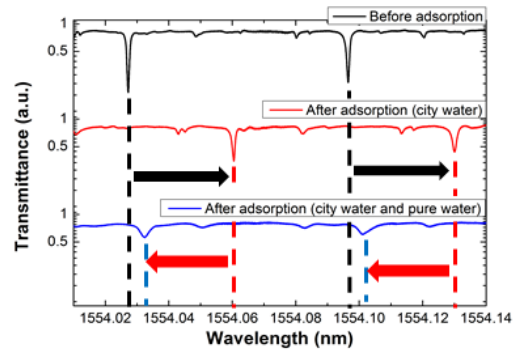


Fig. 8: シリカ微小球共振器の共振スペクトル。黒は作製直後、赤は市水に浸けた直後、後は超純水に浸けた直後をそれぞれ表している。

Tab. 1: Fig. 8 における Q 値

| State | Q-factor |
|--|--------------------|
| Before adsorption | 1.31×10^6 |
| After adsorption (city water) | 1.28×10^6 |
| After adsorption (city water and pure water) | 4.19×10^5 |

5. まとめ

本研究において我々は共振波長シフト量が超純水中のイオン(不純物)の量によって変化することを確認した。また超純水と市水ではシリカとの反応が異なり、超純水がシリカを溶解している可能性がある。超純水と市水を用いた超純水の汚染評価では市水において波長シフトが小さい場合が生じる原因を解明できておらず、これは今後の課題である。

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] F. Vollmer, S. Arnold, Nature Method **5** 591 (2008).

2次元フォトニック結晶共振器における高Q値化のための最適モード分布の探索に関する研究

伏見亮大(B4)

本研究では最適化アルゴリズムを用いて、2次元フォトニック結晶共振器の実空間のモード分布として最良とされているガウス分布より、波数空間におけるライトコーン内の成分が少なくなり、より高いQ/V値を実現することができる最適なモード分布を探索した。最適な分布として指数ベキ分布が得られた。

キーワード：フォトニック結晶，光微小共振器，最適化，モード分布

1. はじめに

フォトニック結晶はシリコン基板に作製され、設計において高い自由度を持っていることから光回路における素子として有望視されており、研究競争は激しく、また、日本において最も研究が盛んな光共振器でもある。しかしながら、フォトニック結晶共振器の高Q値化において、どのようなモード分布がよいかは経験的にガウス分布がよいとしかわかっておらず、その理論的な支えは少ない。

そこで、本研究では最適化アルゴリズムを用いて最適なモード分布を導きだし、経験的に得られたガウス分布との比較を行っていく。ガウス分布より最適な分布の探索、またはガウス分布が最適であることの裏付けを行い、さらなる高Q値化を目指すことのできる設計指針をうちたてることを目標とする。

2. 理論

2次元フォトニック結晶微小光共振器の面外放射は、共振器Q値を下げる主要な原因の一つである。共振器のモード分布を最適に設計し、空間フーリエ変換した波数空間におけるライトコーン(Light cone: LC)内の成分を最小にすれば、面外放射を抑え高Q値が得られることが理論的に示されている[1]。ただしLCは以下のようにあらわされる領域である。

$$|\mathbf{k}_\perp| < \omega_0/c \quad (1)$$

ここで、 \mathbf{k}_\perp は面内波数、 ω_0 は共振角周波数である。現在では共振器のモード形状はガウス分布が経験的に最良とされている[2]。LC内の成分を最小にするためにはsinc関数を持つ空間分布が最適であるが、窓関数(有限区間以外でゼロ値を取る関数)ではないため、実際に設計することができない。

本研究ではLC内の成分を評価値として最適化アルゴリズムを用いることで、最適なモード分布(窓関数)を探索する。一般的に共振器のQ値とモード体積(V)はトレードオフの関係にあるため、Vが一定になる条件で最適化を行った。また問題の簡略化のために共振器中の屈折率は一様とし、1次元問題を考えた。最適化アルゴリズムには焼きなまし法(Simulated Annealing: SA)を用いた。最適化アルゴリズムは初期

分布から徐々の分布を変化させ、評価値を最小化することを行うが、分布の分割した成分を移動させる方法と分布での各々のcosine波の振幅を変化させる方法を行った。本研究では前者をセル移動法、後者を振幅値移動法とした。

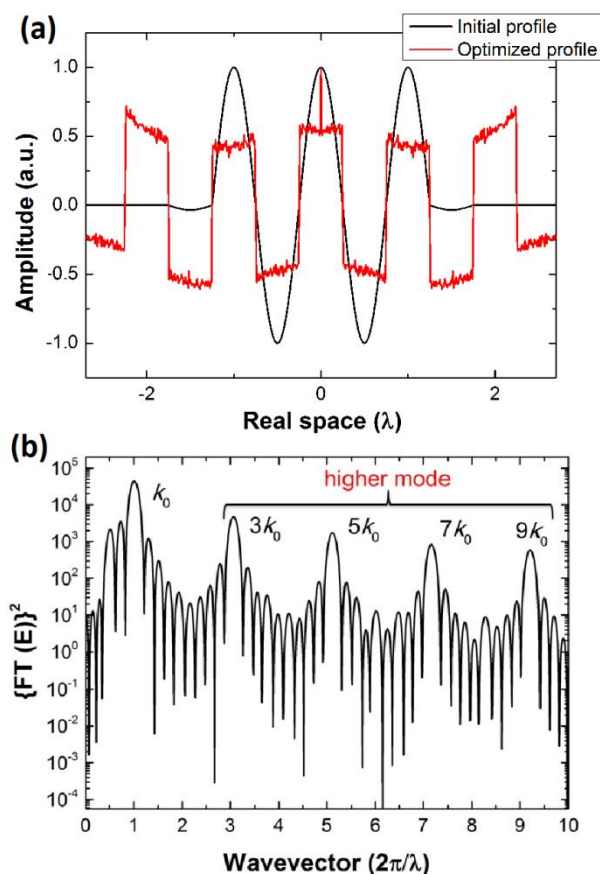


図1：(a) セル移動法の最適結果。黒線は初期分布、赤線は最適化後の分布である。(b) セル移動法による最適化後の分布の波数成分には高次のモードが多くふくまれている。

3. セル移動法

図1(a)は包絡線がrect関数である初期分布をセル移動法を用いて最適化した結果である。この結果は、slot共振器[3]が高Q/V共振器であることを示唆している。なお、搬送波がcosine波から矩形波に変化し

た理由は高次モードを禁制しなかったからである。本形状はガウス分布の評価値より小さくすることができ、ガウス分布より最適な分布が存在しえることを明らかにした。しかし、図 1(b) のように高い波数成分を持ってをり、実際の共振器を設計することは容易ではないので、ガウス分布周辺の最適解の探索を可能とするために振幅値移動法を用いた最適化を行った。

4. 振幅値移動法

図 2 は振幅値移動法を用いて最適化した結果である。これも初期分布を rect 関数とした。得られた結果はガウス分布と比較して中央に成分が寄り、外側がすぼんだ形状になっている。この分布形状は初期分布をガウス分布としたときも同じ最適結果になった。この分布はガウス分布よりも評価値が 3 桁も低くなった。この最適分布の結果を模す分布として、指数べき分布を提案した。

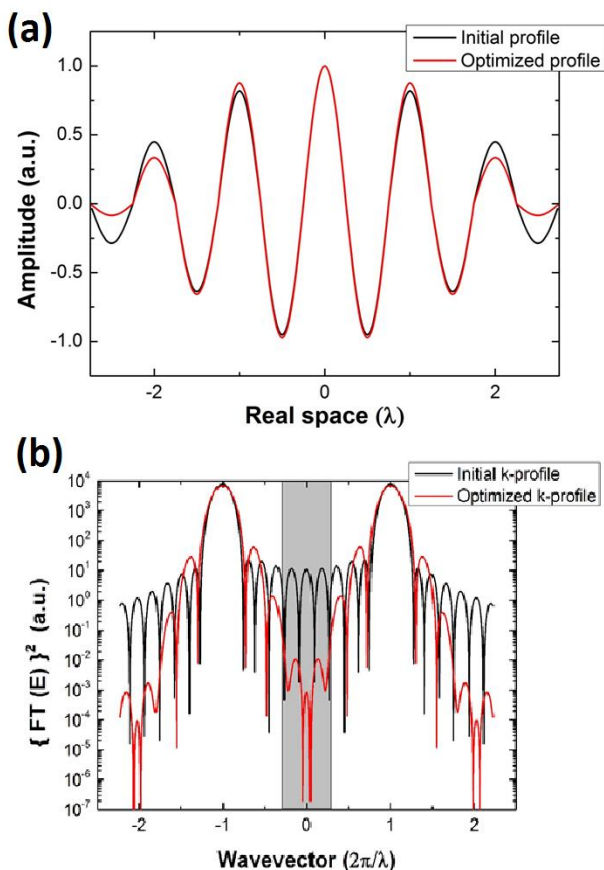


図 2 : (a) 振幅値移動法の最適結果。黒線は初期分布、赤線は最適化後の分布である。(b) 振幅値移動法の最適結果波数分布である。黒線は初期波数分布、赤線は最適化後の波数分布である。灰色の領域はライトラインを表す。

5. 指数べき分布

指数べき分布は次式であらわすことができる。

$$p(x) = \exp\left\{-\left(\frac{|x|}{w}\right)^\alpha\right\} \quad (2)$$

図 3 はべき数 α を変化させたときの分布を表している。 α が 1 のときはラプラス分布、 α が 2 のときはガウス分布と、さまざまな分布を含んでいる。また、 α が大きいほど分布は中心に集まる傾向がわかり、これは振幅値移動法の最適結果の分布と同じ特徴を持っている。

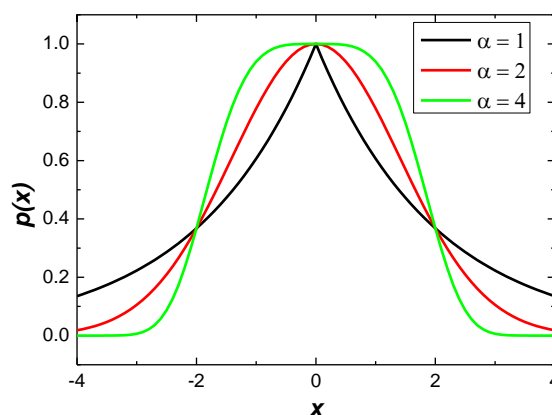


図 3 : 指数べき分布。

指数べき分布を波の包絡線として、最適なべき数 α を求めたその際、モード体積が一定になるように、分布の幅の指標であるパラメータ w を変化させた。図 4 はモード体積 V を変化させたときの、べき数 α と評価値との関係である。ここから、モード体積により最適な α が異なることがわかった。また、モード体積が小さいほど最適なべき数 α は小さくなり、 $V=0.8\lambda$ 程度になると $\alpha=2$ (ガウス分布) のときが最適になることがわかった。これ以上モード体積を小さくしても最適な α が 2 より小さくなることはなかった。共振器のサイズや屈折率を変化させたときも、最適な α との依存性が確認できた。

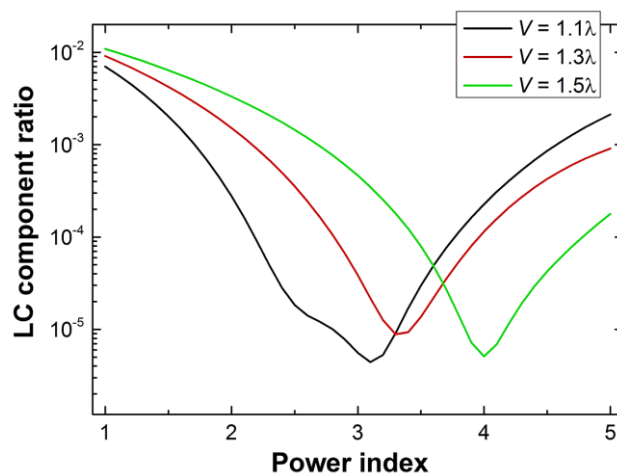


図 4 : 異なるモード体積でのべき数にたいするライトライン内の成分。

6. 結論

最適化アルゴリズムを用いて、ライトコーン内の成分の量を評価値としてモード分布を最適化したところ、ガウス分布よりも中央に成分が偏った分布が得られた。この分布を模すものとして、指数ベキ分布を用い、ベキ数を最適化することで、評価値の最小化を行ったところ、モード体積や共振器のサイズ、屈折率といった共振器固有のパラメータによって最適なベキ数が変化することがわかった。

参考文献

- [1] K. Srinivasan and O. Painter, *Opt. Express* **10** 670 (2002).
- [2] Y. Akahane, T. Asano, B. Song, and S. Noda, *Nature* **425** 944 (2003).
- [3] J. Robinson, C. Manolatou, L. Chen, and M. Lipson, *Phys. Rev. Lett.* **95** 143901 (2005).

資料の部

論文・会議発表

(2012 年 4 月~2013 年 3 月)

【論文発表】

- [1] T. Kato, W. Yoshiki, R. Suzuki, and T. Tanabe, "Octagonal silica toroidal microcavity for controlled optical coupling," Appl. Phys. Lett., Vol. 101, 121101 (pp. 4) (2012).
- [2] W. Yoshiki and T. Tanabe, "Analysis of bistable memory in silica toroid microcavity," J. Opt. Soc. Amer. B, Vol. 29, No. 12, pp. 3335-3343 (2012).

【国際会議発表】

- [1] W. Yoshiki and T. Tanabe, "Rigorous analysis of bistable memory in silica toroid microcavity," Conference on Lasers and Electro-Optics and International Quantum Electronics Conference (CLEO2012), CM2M.8, San Jose, May 6-11 (2012).
- [2] H. Kudo, Y. Ogawa, T. Tanabe, and A. Yokoo, "Fabrication of whispering gallery mode cavities using crystal," Fifth International Conference on Optical, Optoelectronic and Photonic Materials and Applications (ICOOPMA12), 1253, Nara, June 3-7 (2012)
- [3] T. Kato, W. Yoshiki, Y. Ogawa, and T. Tanabe, " Polygonal silica toroidal microcavity for easy and stable coupling with waveguides," 2012 Frontiers in Optics/Laser Science XXVIII meeting (FiO/LS), FTu4A.5, Rochester, October 14-18 (2012).
- [4] H. Kudo, Y. Ogawa, T. Tanabe, and A. Yokoo, "Crystalline whispering gallery mode cavities directly fabricated by crystal growth," 2012 Frontiers in Optics/Laser Science XXVIII meeting (FiO/LS), FTh1G.6, Rochester, October 14-18 (2012).
- [5] W. Yoshiki and T. Tanabe, "Analysis of four-port system for bistable memory in silica toroid microcavity," 2nd International Symposium on Photonics and Electronics Convergence (ISPEC 2012), C-4, Tokyo, December 3-5 (2012).

【国内会議発表】

- [1] 工藤寛史, 小川陽平, 加藤拓巳, 田邊孝純, 横尾篤「結晶成長を用いた六角形サファイア共振器の作製」第 73 回応用物理学会学術講演会, 13p-PA9-7, 愛媛大学, 平成 24 年 9 月 11 日~14 日
- [2] T. Tanabe, "Optical Nonlinearities and Their Applications at Ultralow Power using Optical Microcavities," Optics & Photonics Japan 2012 (OPJ2012), 24aBS4, タワーホール船堀, Oct. 23-25 (2012). (招待講演)

- [3] 鈴木良, 加藤拓巳, 田邊孝純, 「8 角形トロイド微小光共振器の作製と光学特性評価」 Optics & Photonics Japan 2012 (OPJ2012), 24pPD2, タワーホール船堀, 平成 24 年 10 月 23 日～25 日 (ポストデッドライン発表)
- [4] 田邊孝純, 「pin 集積フォトニック結晶微小光共振器による全シリコン超低ノイズ光レーザー」第 5 回超高速光エレクトロニクス研究会, 箱根強羅, 平成 24 年 12 月 7 日～8 日
- [5] T. Tanabe, "Optical nonlinear control at a low power using optical microcavity," RIKEN Symposium on Extreme Photonics Research, Extreme Photonics Seminar, RIKEN Saitama, Dec. 20 (2012) (招待講演)
- [6] 工藤寛史, 水本由達, 勘駿也, 柿沼康弘, 田邊孝純「CaF₂ を用いた WGM 微小光共振器の光学測定と Q 値の検討」第 13 回レーザー学会東京支部研究会, P1, 東海大学 高輪キャンパス, 平成 25 年 3 月 13 日
- [7] 齊藤龍介, 三橋龍樹, 工藤寛史, 寺川光洋, 田邊孝純「細胞のセンシングに向けた高 Q 値シリカ微小光共振器上での細胞培養の検討」第 13 回レーザー学会東京支部研究会, P, 東海大学 高輪キャンパス, 平成 25 年 3 月 13 日
- [8] 西村治郎, 田邊孝純「シリカ微小球共振器を用いた超純水イオン含有率評価の予備的検討」第 60 回応用物理学関係連合講演会, 28a-A2-1, 神奈川工科大学, 平成 25 年 3 月 27 日～30 日
- [9] 工藤寛史, 鈴木良, 横尾篤, 田邊孝純「結晶成長を用いたサファイア WGM 共振器の断面形状制御」第 60 回応用物理学関係連合講演会, 28p-A2-3, 神奈川工科大学, 平成 25 年 3 月 27 日～30 日
- [10] 鈴木良, 加藤拓巳, 田邊孝純 「8 角形トロイド微小光共振器の光学特性評価」第 60 回応用物理学関係連合講演会, 28p-A2-4, 神奈川工科大学, 平成 25 年 3 月 27 日～30 日
- [11] 吉岐航, 田邊孝純「Add-drop 型 WGM 共振器における光 Kerr 双安定メモリの解析」第 60 回応用物理学関係連合講演会, 29a-C1-8, 神奈川工科大学, 平成 25 年 3 月 27 日～30 日
- [12] 伏見亮大, 田邊孝純「最適化アルゴリズムによる高 Q/V モード分布の探索」第 60 回応用物理学関係連合講演会, 29p-PA7-16, 神奈川工科大学, 平成 25 年 3 月 27 日～30 日

学位論文題目

卒業論文

石川花帆 「シリカトロイド微小光共振器の作製とポストプロセスによる波長制御」

斎藤龍介 「シリカトロイド微小光共振器における液中光学測定と細胞培養に関する研究」

鈴木良 「8 角形シリカトロイド微小光共振器の光学測定とモード解析に関する研究」

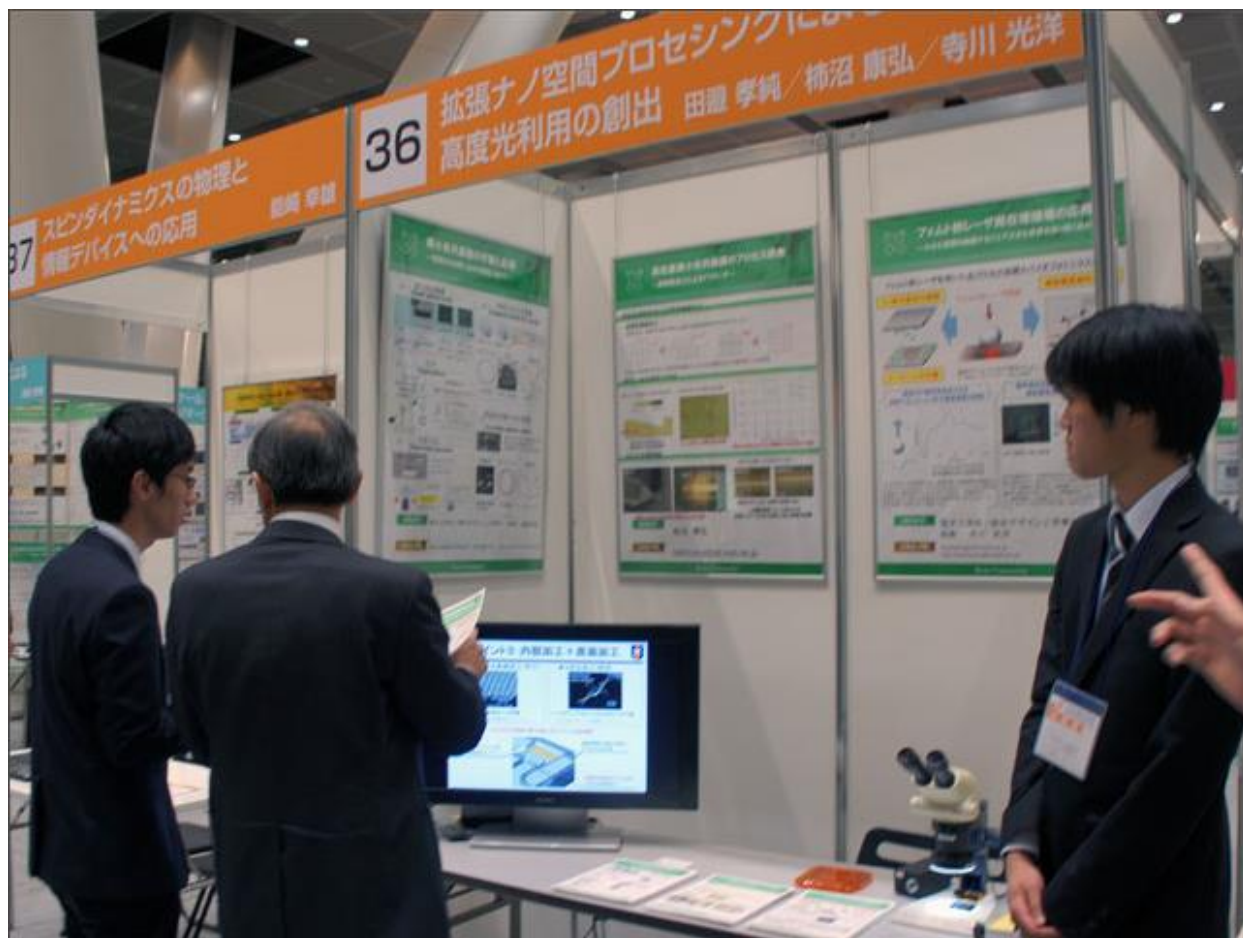
鐵本智大 「フォトリソグラフィを用いたシリカ製微小光共振器の作製に関する研究」

西村治郎 「シリカ微小球共振器を用いた超純水の汚染評価に関する研究」

伏見亮大 「2 次元フォトニック結晶共振器における 高 Q 値化のための最適モード分布の探索に関する研究」

第 13 回慶應科学技術展

2012 年 12 月 7 日に東京国際フォーラムにて開催された慶應科学技術展 (Keio Techno-Mall 2012) にブース 1 件、パネルを 1 件展示し、当研究室で得られた成果についてわかりやすく説明いたしました。ブース展示では次世代研究プロジェクト推進プログラムにおけるプロジェクトについて紹介しました。電子工学科田邊研究室、システムデザイン工学科柿沼研究室、電子工学科寺川研究室の 3 研究室による合同展示ブースです。



パネル展示は 2010 年度より当研究室で進めている慶應義塾先端科学技術研究センター指定研究プロジェクトの研究成果について、対外発表可能となりましたので、得られた成果について説明いたしました。