

目次

第 1 章 序論.....	3
1.1 はじめに.....	3
1.2 微小光共振器.....	4
1.2.1 微小光共振器の性能評価.....	4
1.2.2 Fabry-Perot 共振器.....	6
1.2.3 Whispering Gallery Mode 共振器.....	7
1.2.5 各微小光共振器の比較.....	9
1.3 微小光共振器の応用.....	10
1.3.1 光周波数コム.....	10
1.3.2 センシング.....	11
1.3.3 全光スイッチ.....	12
1.4 本研究について.....	13
第 2 章 理論.....	14
2.1 結合モード理論.....	14
2.2 リフロープロセス.....	17
2.2.1 レーザ光のスポット径.....	17
2.2.2 パワーの推定.....	18
2.3 アッテネータによる副スポット.....	21
2.5 SiO ₂ の結晶構造と相転移.....	22
2.5.1 非結晶シリカ.....	22
2.5.2 SiO ₂ の相転移.....	25
第 3 章 シリカトロイド微小光共振器の作製と光学評価.....	28
3.1 リフロープロセスセットアップ.....	28
3.1.1 シャッター.....	28
3.1.2 可変アッテネータ.....	29
3.1.3 窒素パージ.....	29

3.2 シリカトロイド微小光共振器の作製.....	30
3.3 シリカトロイド微小光共振器の Q 値測定	31
3.3.1 テーパーファイバの作製.....	31
3.3.2 Q 値測定	31
3.3.2 照射時間による Q 値の変化	33
3.3.3 パワーによる Q 値の変化	36
3.3.4 窒素パージによる Q 値の変化.....	41
第 4 章結論.....	44

第1章 序論

1.1 はじめに

2020年3月に第5世代移動通信システム(以下5G)が我が国でサービスを開始して以降、急速に発展していき、2022年3月に総務省はデジタル田園都市国家インフラ整備計画において全国の5G人口カバー率を2023年度末には95%、25年度末には97%、30年度末には99%と整備目標を掲げた^[1]。

加えて、2020年ごろから中国での感染確認に端を発し、全世界的な感染拡大をもたらした新型コロナウイルス感染症 Covid19 の猛威により、我々は密を避けた社会行動が求められるようになり、ビジネスにおいてはテレワークやリモートワーク、教育現場においてはオンライン講義といったネット環境を利用した生活がより身近になった。このようにここ数年でより一層我々がインターネットに常時接続し、ネット環境なしでは人間交際をすることは困難な環境になったといえる。今後もIoTやAIの活用、クラウドへの移行により、多くの通信が行われることが予測される。2022年11月には国際度量衡総会(CGPM)において急激に拡大するデジタルデータの容量に対応するためにSI接頭語にロナ R(10^{27})クエタ Q(10^{30})が新たに加わった^[2]。これらの膨大な通信を支えているのがデータセンターである。デロイトトーマツミック経済研究所の推定によれば我が国におけるデータセンターの電力消費量は2021年度で199.5億kWh/年と推定されている^[3]。今後も加速度的に消費電力は増えると予想され国立研究開発法人科学技術振興機構 低炭素社会戦略センターによれば今後機器の効率向上が行われなければ2050年には我が国では12000TWh/年、世界では500,000TWh/年に達すると見込まれている^[4]。今後日々増大するデータ通信やサーバーでの処理を行う上で消費されるエネルギーの増加を抑えることが求められている。

2015年の国連サミットで採択された国連加盟国が2030年までに達成すべき目標「Sustainable Development Goals (持続可能な開発目標)」の達成を目指している昨今、爆発的に増加する通信量に従って、消費する電力が増加することは「7. エネルギーをみんなにそしてクリーンに」の達成の障がいとなっている。

この消費電力の削減に貢献する方法として期待されているものが電気回路を中心としたシステムから光集積回路を用いたシステムへの転換である。現行の電気回路を用いた場合、電気が配線を通る際ジュール熱 $P = I^2R$ が発生し、小型化すればするほどその配線抵抗は大きくなり、その分が損失として現れる。加えて通信料が膨大になるほどこの影響が積み重なることで多大なエネルギー損失につながる。一方光回路を用いた場合、光をガラスに透過してもほぼ損失を生じないため原理的には損失をほとんどなくすることができる。

しかし、光は高速であるため、情報を処理するために一時的に光をとどめることが必要である。

1.2 微小光共振器

微小光共振器

微小光共振器とは一カ所に光を一定時間閉じ込める小さな素子のことである。通常であれば大きくない光子と物質との相互作用を限られた狭い空間に光を閉じ込めることによって相互作用を大きくし、それにより光信号処理可能にするものである。共振器の種類として、代表的なものとして Fabry-Perot 共振器, Whispering Gallery Mode 共振器, フォトニック結晶共振器があげられる。まず, 微小光共振器の性能評価について述べてから, 各共振器について述べる。

1.2.1 微小光共振器の性能評価

微小光共振器の性能は, 光共振器は光を閉じ込める性能である Q 値と光を閉じ込める体積であるモード体積 V の 2 つの指標を用いて評価される。より小さい体積で閉じ込め性能が高いことが光子密度が高く理想的であるといえる。

ここで後述する Fabry-Perot 共振器を用いて考える。2 枚の平面鏡の反射率を r_F, r_B 透過率を t_F, t_B , 2 枚の間の距離を L , 入射光の電場振幅を E_{in} , 出射光の電場振幅を E_{out} とおく。レーザーの角周波数 ω と光速 c を用いると一往復するときの位相変化 ϕ は以下の式(1.1)で示すことができる。

$$\phi = \frac{2L\omega}{c} \quad (1.1)$$

共振器内の電場振幅は,

$$\begin{aligned} E &= E_{in} r_F r_B e^{-i\phi} + E_{in} r_F^2 r_B^2 e^{-2i\phi} + E_{in} r_F^3 r_B^3 e^{-3i\phi} + \dots \\ &= E_{in} \sum_{n=0}^{\infty} (r_F r_B e^{-i\phi})^n = E_{in} \frac{1}{1 - r_F r_B e^{-i\phi}} \end{aligned} \quad (1.2)$$

1 往復光が共振器内移動することで生じる電界強度の損失を振幅減衰係数として $r_F r_B = \alpha$ とおくと,

$$E = E_{in} \frac{1}{1 - \alpha e^{-i\phi}} \quad (1.3)$$

共振器内における強度は

$$P_{out} = |E|^2 = \frac{|E_{in}|^2}{\left[(1 - \alpha)^2 + 4\alpha \sin^2\left(\frac{\phi}{2}\right) \right]} \quad (1.4)$$

また, 透過強度は

$$\begin{aligned}
E_{out} &= E_{in}t_Ft_Be^{-\frac{i\phi}{2}} + E_{in}t_Fr_Br_Ft_Be^{-\frac{3i\phi}{2}} + \dots \\
&= E_{in}t_Ft_Be^{-\frac{i\phi}{2}} \sum_{n=0}^{\infty} (r_Fr_Be^{-i\phi})^n \\
&= E_{in} \frac{t_Ft_Be^{-\frac{i\phi}{2}}}{1 - r_Fr_Be^{-i\phi}}
\end{aligned} \tag{1.5}$$

$$P_{out} = |E_{out}|^2 = \frac{(t_Ft_B)^2|E_{in}|^2}{\left[(1-\alpha)^2 + 4\alpha \sin^2\left(\frac{\phi}{2}\right)\right]} = \frac{(1-\alpha)^2|E_{in}|^2}{\left[(1-\alpha)^2 + 4\alpha \sin^2\left(\frac{\phi}{2}\right)\right]} \tag{1.6}$$

よって電界強度は位相変化 ϕ でローレンツ関数となっている。
電界強化のピーク付近において $\sin\frac{\phi}{2} = \frac{\phi}{2}$ の近似を行うことができるため、半値全幅 (FWHM: Full width half maximum) は以下の式を満たせばよい。

$$\frac{1}{\left[1 + \frac{4\alpha}{(1-\alpha)^2} \left(\frac{\phi}{2}\right)^2\right]} = \frac{1}{2} \tag{1.7}$$

$$\nu_{FWHM} = \frac{c(1-\alpha)}{2\pi L\sqrt{\alpha}} \tag{1.8}$$

$$\lambda_{FWHM} = \frac{\lambda^2(1-\alpha)}{2\pi L\sqrt{\alpha}} \tag{1.9}$$

したがって損失が大きくなるほど半値全幅も大きくなることがわかる。

振幅減衰係数が1往復によって生じる損失によるものであるため、単位長さあたりの係数 α_t を考えると

$$\alpha = \exp(-\alpha_t 2L) \tag{1.10}$$

共振器内の光電界強度が $\frac{1}{e}$ 、電界振幅になるまでの時間である光子寿命は以下のように示すことができる。

$$\tau = \frac{1}{c\alpha_t} \tag{1.11}$$

つまり、この時間が長いほど光を共振器内部に閉じ込めることができるということである。これらの数字を用いて Q 値について述べている。 Q 値は以下のように定義されている。

$$\begin{aligned}
Q &= \omega_0 \times \frac{\text{共振器中に蓄えられてるエネルギー [J]}}{\text{単位時間あたりに失われるエネルギー [J/s]}} \\
&= \omega_0 \times \tau [\text{s}]
\end{aligned} \tag{1.12}$$

$$\begin{aligned}
Q &= \frac{2\pi \times \text{共振器中に蓄えられてるエネルギー}[\text{J}]}{1 \text{ サイクル分の波で失われるエネルギー}[\text{J}]} \\
&= 2\pi \times \left[\frac{1}{c\alpha_t/v_0} \right] = 2\pi \times \left[\frac{1}{\tau/v_0} \right]
\end{aligned} \tag{1.13}$$

この式を変形させることで

$$Q = 2\pi\lambda\tau = \frac{v_0}{\Delta\nu_{FWHM}} = \frac{\lambda_0}{\Delta\lambda_{FWHM}} \tag{1.14}$$

この式は共振波長 λ_0 と共振スペクトルの半値全幅 $\Delta\lambda_{FWHM}$ を用いて変形することができる。

つまり、共振線幅が狭い、共振スペクトルが急峻であるほど Q 値が高いということとなる。 Q 値は様々な要素によって変化し、具体的には、材料物質の吸収による損失 Q_{mat} 、材料中の密度変化、欠陥によって生じるレイリー散乱による損失 Q_{scatt} 、表面における散乱による損失 Q_{surf} と全反射できないことによる漏れ出しの放射損失 Q_{WGM} 、 OH^- 基吸収による損失 Q_{OH} などがあげられる。

Q_{OH} について詳しく述べると、共振器に空気中の水分が吸着することにより OH^- 基が赤外線域において吸収を起こし、発熱する。このことにより屈折率が変化し、共振波長が変化する。また、水の吸着により、それにより、水の減衰係数により Q 値が低くなる。

これらをまとめたものである共振器固有の損失 Q_{int} と結合損失 Q_{coup} で全体の Q 値について考えることができる。

$$\begin{aligned}
\frac{1}{Q} &= \left(\frac{1}{Q_{mat}} + \frac{1}{Q_{scatt}} + \frac{1}{Q_{surf}} + \frac{1}{Q_{WGM}} + \frac{1}{Q_{OH}} \right) + \frac{1}{Q_{coup}} \\
&= \frac{1}{Q_{int}} + \frac{1}{Q_{coup}}
\end{aligned} \tag{1.15}$$

1.2.2 Fabry-Perot 共振器

Fabry-Perot 共振器とは Fig.1-1 で示す通り、平行に向かい合って配置された 2 枚の平面鏡からなる共振器である。この共振器に中を光がミラーで反射し、往復することによりミラー内に閉じ込められ、長距離利得媒質内を通過することで増幅される。共振器内にエネルギーが蓄積される。共振器内の媒質の屈折率 2 枚の平面鏡の距離を L とすると、共振条件は共振器の往復が波長 λ の整数倍になるときである。

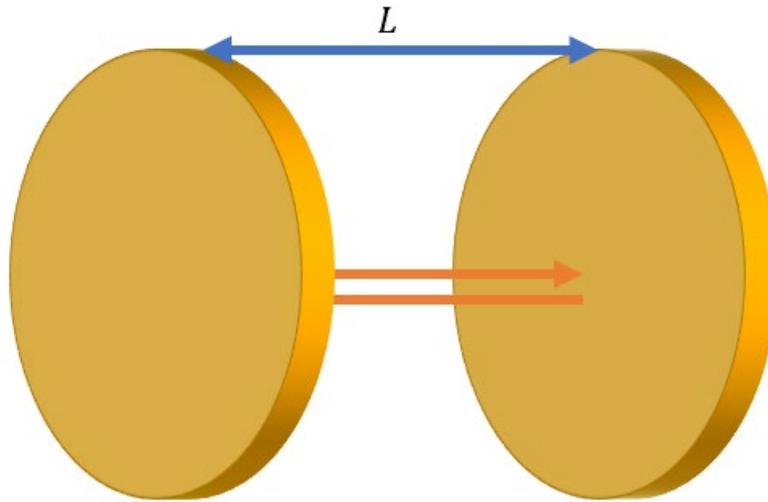


Fig1-1 Fabry-Perot cavity

$$m\lambda = 2nL \quad (m = 1,2,3, \dots) \quad (1.16)$$

共振器内の隣り合う共振波長の周波数 FSR(Free Spectrum Range)は光速 c を用いて

$$\text{FSR} = \frac{c}{2L} \quad (1.17)$$

1.2.3 Whispering Gallery Mode 共振器

イギリスロンドンにあるセントポール大聖堂のドーム回廊において回廊の内側にいると音がドームの壁面に沿って伝わり、遠く離れた反対側の人までささやき声が聞こえる「ささやきの回廊(Whispering Gallery)」という現象がおきる。これになぞらえて光が真円の共振器の周縁を伝搬することによって共振を起こすこと共振器を Whispering Gallery Mode 共振器(WGM 共振器)とよぶ。

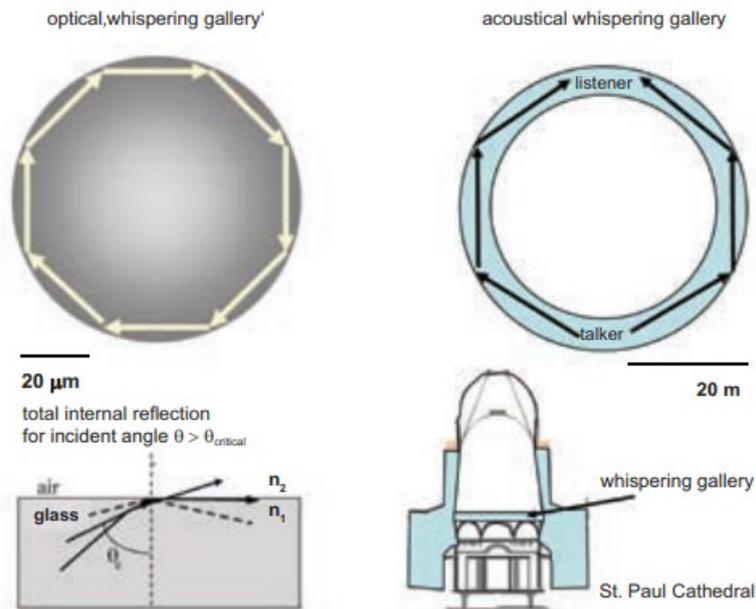


Fig1-2 Left: Total-internal reflection of light in a microsphere and at a prism. Right: Acoustic ‘Whispering Gallery’ in St. Paul’s Cathedral, London.

[F. Vollmer and S. Roy, “Optical resonator based biomolecular sensors and logic devices,” *J. Indian Inst. Sci.* **92**, 233–251 (2012).]

Fabry-Perot 共振器と同じように波数の整数倍の光路長になったとき，共振を起こす．つまり，共振が起きる条件および FSR は共振器の半径 R ，屈折率 n を用いて以下のように示すことができる．

$$2\pi R = \frac{\lambda}{n} \cdot l \quad (l = 1, 2, 3, \dots) \quad (1.18)$$

$$\text{FSR} = \frac{c}{2\pi n R} \quad (1.19)$$

WGM 共振器の種類としてはマイクロディスク，マイクロリング，微小球，シリカトロイド CaF_2 共振器 MgF_2 共振器と多種多様な共振器があり，そのなかで本実験使用する共振器であるシリカトロイド共振器について時に記述する．

1. シリカトロイド共振器

シリカトロイド共振器は 2003 年に K. J. Vahala らによって発表されたものであり^[6]，シリコン基板の上にトロイドと呼ばれるドーナツ型の形状のシリカが乗っている形となっている．詳しい作製方法については 3.2 シリカトロイド微小光共振器の作製にて述べる．

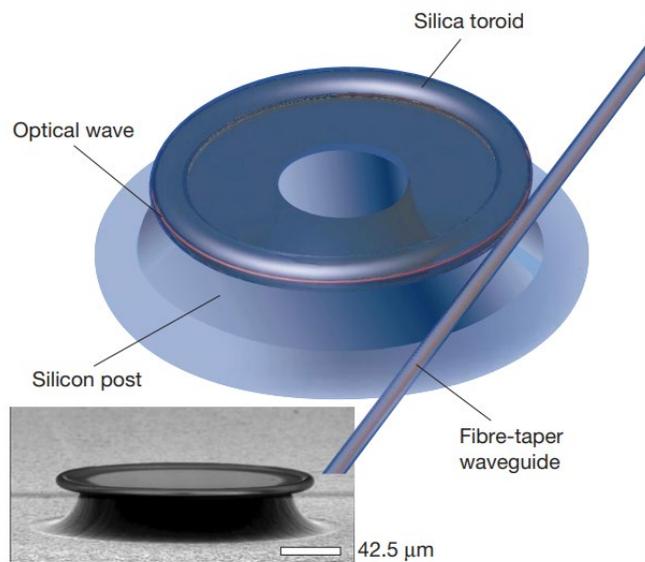


Fig1-3 Schematic rendering of an ultrahigh-Q microtoroid resonator and a scanning electron micrograph of a microtoroid resonator consisting of a thin silica layer upon a silicon post and substrate. [K. J. Vahala, "Optical microcavities," *Nature* **424**(6950), 839–846 (2003).]

Si とそこから酸化膜を成長させた SiO₂ と単一の材料から作製でき、オンチップでの作製が可能であり、その上微小球には劣るものの、 10^8 程度とQ値が高いという特徴を有している。そのため、光センシングや光周波数コム発生における活用が期待されているものの、薄いため、テーパファイバとの結合が難しく、位置調整がシビアな点あげられる。

1.2.5 各微小光共振器の比較

上記の通りさまざまな微小光共振器があるが、それぞれにおけるQ値とモード体積は以下の表のとおりである。Q値の高さとモード体積はトレードオフの関係になっており、チップ上で作製することができて、マイクロリング共振器，シリカトロイド共振器，フォトニック結晶はオンチップで作成できる点が強みとなる。

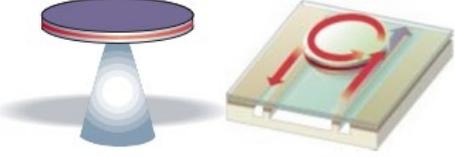
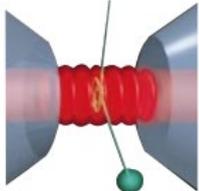
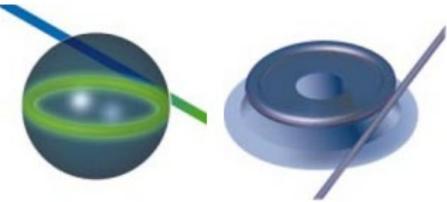
	Fabry-Perot	Whispering gallery	Photonic crystal
High Q	 <p>Q: 2,000 V: $5 (\lambda/n)^3$</p>	 <p>Q: 12,000 V: $6 (\lambda/n)^3$</p> <p>Q_{III-V}: 7,000 Q_{Poly}: 1.3×10^5</p>	 <p>Q: 13,000 V: $1.2 (\lambda/n)^3$</p>
Ultrahigh Q	 <p>F: 4.8×10^5 V: $1,690 \mu\text{m}^3$</p>	 <p>Q: 8×10^9 V: $3,000 \mu\text{m}^3$</p> <p>Q: 10^8</p>	

Fig1-4 Performance of several microcavities

The microcavities are organized by column according to the confinement method used and by row according to high Q and ultrahigh Q. Upperrow: micropost[8], microdisk[9], semiconductor[10], polymer[11] add/droplter, photonic crystalcavity[12]. Lower row: Fabry-Perot bulk optical cavity[13],microsphere[14], microtoroid[15]. n is the material refractive index, and, V , if not indicated, was not available. [K. J. Vahala, " Optical micro-cavities, "Nature 424, 839-846 (2003).][16]

1.3 微小光共振器の応用

微小光共振器の応用方法として光周波数コムやセンシング，全光スイッチなどがあげられ，この3つについて述べていく。

1.3.1 光周波数コム

光周波数コムとは空間領域では超短光パルス列で，周波数領域においてスペクトルが等間隔に並んだ光のことである。等間隔に並んおり，楕状のスペクトルであることからこのように呼ばれている。2005年にはJ. L. HallとT. W. Hänschが光周波数コムを用いて高い精度の周波数を作成し，任意の周波数での正確な測定を可能にした点が評価され，ノーベル物理学賞を受賞した[17]。

微小光共振器のなかに特定の波長を入射させると，光を閉じ込めることにより電界強度が上昇し，3次の非線形光学効果である四光波混合が発生する。これにより2つ以上の光子から新たな別の波長の光ができ，連鎖的に発生することで，1つの波長の光から周波数間隔が等しい複数の光が発生し，周波数領域において楕状のスペクトルができる。これは今までのモードロックレーザによって発生された光周波数コムと分けて特に光カーコムと呼ばれている。

キャリアエンベロープオフセット周波数 f_{ceo} と繰り返し周波数 f_{rep} を用いて n 次モードの周波数は以下のように示される。

$$f_m = f_{ceo} + n \cdot f_{rep} \quad (1.20)$$

レーザー周波数の絶対値を直接測定することはできないが、この式により2つの異なる周波数が同じ周波数 f の既知の倍数もしくは分数であった時、その周波数 f を求めることができ、2次高調波を発生させ、ビート信号から f_{ceo} 繰り返し周波数とオフセット周波数を求めることがモード番号を求めることも可能になる。これを自己参照法とよぶ。

この f_{ceo} 、 f_{rep} を用いて制御することで光周波数コムを原子時計に安定化させることができる。このように安定化させることで光周波数コムは「光周波数のものさし」として活用することができる。

1.3.2 センシング

WGM共振器の応用方法にセンシングがあり、表面への水の分極率を超える分極率を持つ微小な粒子の付着や熱による膨張により屈折率や光路長の変化により、共振周波数が変化することを利用している。屈折率の増大や膨張することにより共振波長が長波長側にシフトする。

これを利用することでF. Vollmerらによるインフルエンザウイルスの検知や^[18]、T.Tajiriによる溶液中の微生物に特異的に反応してできる抗体の検知^[19]が行われている。

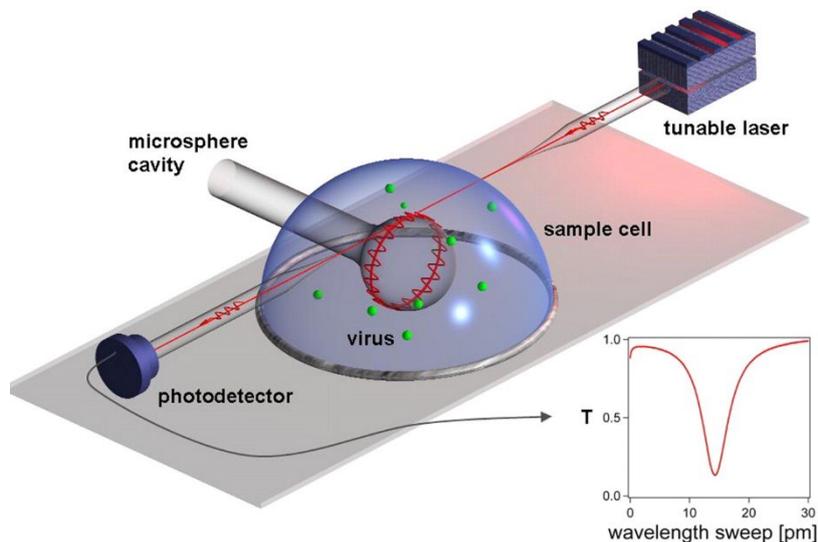


Fig1-5 Excitation of an equatorial WGM of a microsphere by evanescent coupling to a guided wave in a tapered optical fiber.

[F. Vollmer,S. Arnold &D. Keng ,Single virus detection from the reactive shift of a whispering-gallery mode,*Proceedings of the National Academy of Sciences*,**105**, 20701-20704,(2008)]

さらにこれに加えてキャビティリングアップ分光法をもちいたナノ秒単位での反応速度に

よってマイクロロイド共振器のスペクトルを16 ns単位で観測することを成功させた研究もある。

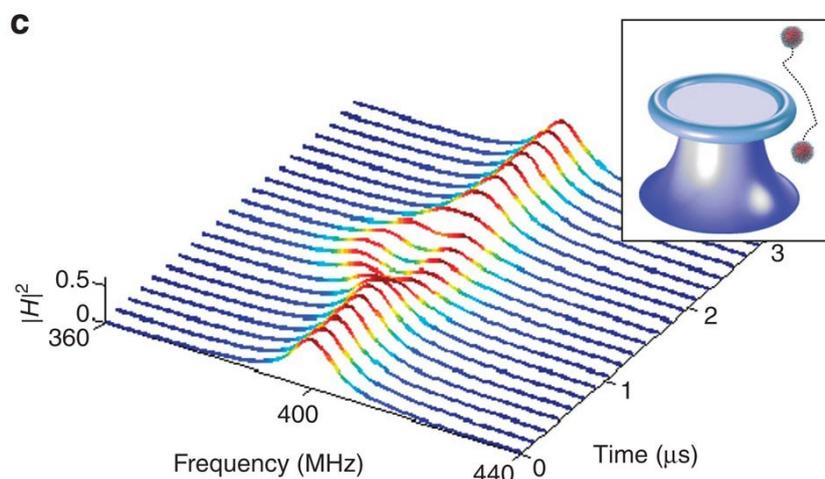


Fig.1-6 Simulated CRUS performed every 150 ns, for a 75 nm radius nanoparticle with refractive index $n=1.5$ crossing the evanescent field of a 10-MHz WGM at a speed of 1 m s^{-1} , with distance of closest approach of 150 nm (measured from the particle centre to the resonator surface).

[Rosenblum, S., Lovsky, Y., Arazi, L. *et al.* Cavity ring-up spectroscopy for ultrafast sensing with optical microresonators. *Nat Commun* **6**, 6788 (2015).]

1.3.3 全光スイッチ

全光スイッチとは光で光を制御するスイッチであり、通常の光スイッチの場合媒質に電界を引火するなどといった制御によって屈折率や吸収率の変化を起こすのに対し、フォトニック結晶やマイクロリング共振器を用いてにより、非線形の屈折率や吸収率の変化が起き、光路の切り替えや透過率の変調を行う。サイドカップリング方式による kerr 効果を用いた光スイッチなどが Yoshiki^[21]によって実現されており、必要な入力制御電力は $834 \mu\text{W}$ と、電気をを用いないことにより高速な低電力でのスイッチングを実現という利点を具現化した。

1.3.4 光ダイオード

Lan Yang のグループによって発表された片方は活性 Er^{3+} をドープしたシリカトロイド共振器を、もう片方にはパッシブなシリカトロイド共振器を結合させ、損失と利得が等しいので、時間反転下において損失と利得が反対になり、PT 対称性を破り、一方向への光伝搬を完全になくし、逆方向への光伝搬を大幅に強めるダイオードの開発が行われた。

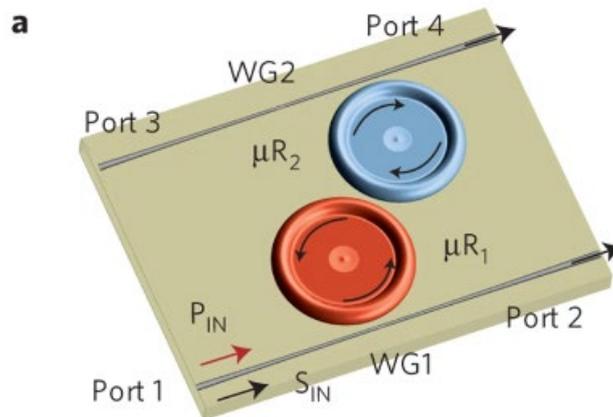


Fig.1-7 A system consists of two directly coupled whispering-gallery-mode resonators (WGMRs) and two fibre-taper waveguides. WG1: fibre-taper waveguide with ports 1 and 2. WG2: fibre-taper waveguide with ports 3 and 4. μR_1 : active Er^{3+} -doped silica microtoroid. μR_2 : passive silica microtoroid. P_{IN} : pump laser in 1,460 nm band to excite Er^{3+} ions that provide gain in 1,550 nm band. S_{IN} : probe light (signal) in 1,550 nm band.

[Peng, B., Özdemir, Ş., Lei, F. *et al.* Parity-time-symmetric whispering-gallery microcavities. *Nature Phys* **10**, 394–398 (2014).]

1.4 本研究について

シリカトロイド微小光共振器は高 Q 値であるが、 CO_2 レーザーによるリフロープロセスを経て周縁部がシュリンクする際、そのパワーや時間が不足した場合や逆に過剰にリフローした場合 Q 値が低下する。Ishikawa^[22]によって膜厚 $1\mu\text{m}$ 、直径 $100\mu\text{m}$ のシリカトロイド共振器のリフロー条件としてポストサイズと照射時間、2回リフローすることによる波長制御を実現していた。また、 Q 値の減少する要因として OH^- 基の吸着、空気中の塵や埃による影響があげられていた。

シリカトロイド共振器を用いた活用をするうえで、高 Q 値を安定して実現すること必要であるが、各種論文においては微小光共振器の Q 値は測定されたもののうち最も高いものが報告されており、安定した高 Q 値のシリカトロイド共振器を製作する上での障害となっており、弊研究室においても感覚ベースでリフロー時間やパワーの調節を行っていた。その結果リフロー不足や焦げが発生していた。この再現性の高い、高 Q 値のシリカトロイド共振器の製造という面で難があるというこの課題を解決するために、より大きい直径のディスクを使用したうえで、最適な照射パワー、リフロー時間を探るとともに窒素ページによる OH^- 基の吸着による Q 値減少を抑制の効果の検証を行った。

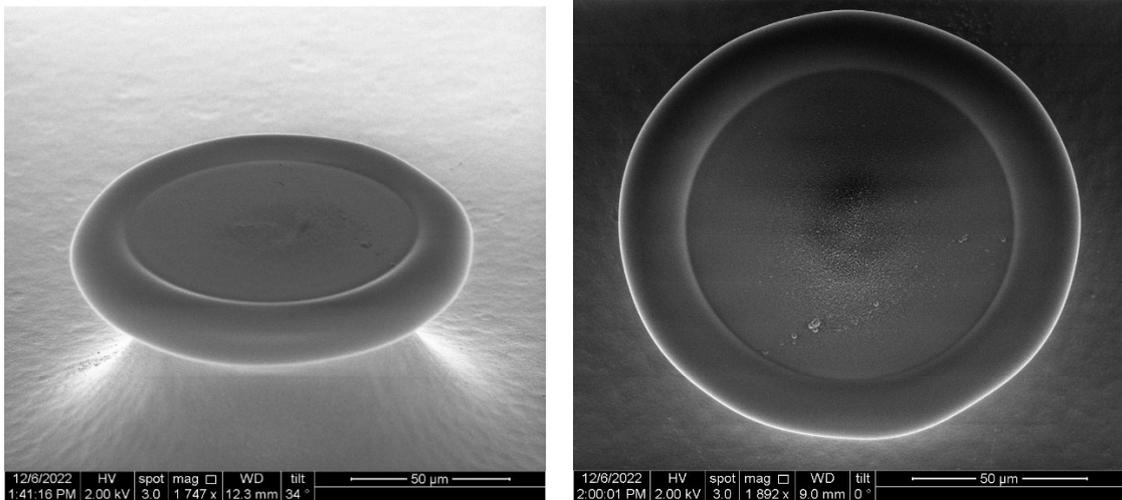


Fig.1.8 Burned toroid

第2章 理論

2.1 結合モード理論

テーパファイバと微小光共振器を数百 nm 単位で接近させると、テーパファイバから漏れ出したエバネッセント波が共振器の中に入射する。これにより、テーパファイバと微小光共振器を結合している。テーパファイバと共振器の距離によって結合の深さが決まるので、 Q 値を測定する上で最も大事な部分ともいえる。

このテーパファイバと共振器と結合の電解分布を正確に求める手法として、時間領域での解析法である FDTD 法(有限差分時間領域法)や TLM 法(伝送線路法)、周波数領域での解析法として MoM(モーメント法)、FEM(有限要素法)などがあげられる。しかしながら結合モード理論を用いることで簡略化することができる。

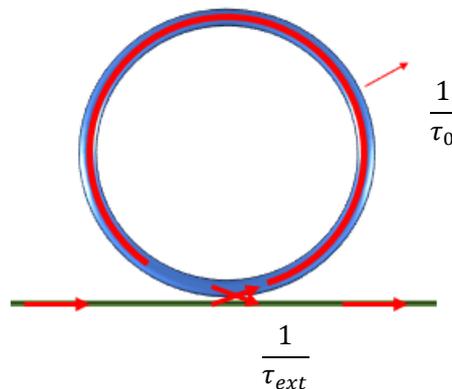


Fig2-1 A coupled system consisting of a resonator and an external waveguide.

共振器の結合モード方程式は共振器と外部の導波路との結合を考えない場合、共振モー

ド振幅 a は共振角周波数 ω_0 , 共振器固有の損失 $\frac{1}{2\tau_0}$ を用いて以下のように示すことができる.

$$a(t) = \exp(j\omega_0 t) \exp\left(-\frac{t}{2\tau_0}\right) \quad (2.1)$$

これを1次の時間微分系にすると

$$\frac{da}{dt} = j\omega_0 a - \frac{1}{2\tau_0} a \quad (2.2)$$

これに導波路との結合したとき外部導波路や外部空間へのロスとしての減衰率の変化と入射波によるモード振幅の励起によるエネルギー変化, モード振幅が考えられ, 前者のみ考えると $\frac{1}{2\tau_{ext}}$ を共振器外部への減衰率として, 以下のようになる.

$$\frac{da}{dt} = j\omega_0 a - \frac{1}{2\tau_0} a - \frac{1}{2\tau_{ext}} a \quad (2.3)$$

これに結合によって外部導波路から入射による励起の項をくわえる.

$$\frac{da}{dt} = j\omega_0 a - \frac{1}{2\tau_0} a - \frac{1}{2\tau_{ext}} a + \kappa s_{in} \quad (2.4)$$

定常状態 $\frac{da}{dt} = 0$ と仮定したうえで, モード振幅は

$$a = \frac{\kappa s_{in}}{j(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2\tau_0} + \frac{1}{2\tau_{ext}}} \quad (2.5)$$

入射光が存在せず $s_{in} = 0$, 共振器固有の損失 $\frac{1}{\tau_0} = 0$ の理想的な共振器において考えると損失は外部への減衰のみとなる. これにより, 共振器と外部導波路との結合係数について考える. 外部導波路からの出射波の振幅を s_{out} とおくと, s_{out} と外部導波路からの入射の振幅 s_{in} は時間反転の関係であることを利用すると以下のように求まる.

$$|s_{+}|^2 = \frac{1}{\tau_{ext}} |a|^2 \quad (2.6)$$

$$|\kappa| = \sqrt{\frac{1}{\tau_{ext}}} \quad (2.7)$$

よって, 先ほどの微分方程式は以下のように書き直すことができる.

$$\frac{da}{dt} = j\omega_0 a - \frac{1}{2\tau_0} a - \frac{1}{2\tau_{ext}} a + \sqrt{\frac{1}{\tau_{ext}}} s_{in} \quad (2.8)$$

また, 共振器内部エネルギーはモード振幅の式より以下のように書き直すことができる.

$$|a|^2 = \frac{\kappa^2 s_{in}^2}{(\omega_0 - \omega)^2 + \left(\frac{1}{2\tau_0} + \frac{1}{2\tau_{ext}}\right)^2} = \frac{\frac{s_{in}^2}{\tau_{ext}}}{(\omega_0 - \omega)^2 + \left(\frac{1}{2\tau_0} + \frac{1}{2\tau_{ext}}\right)^2} \quad (2.9)$$

ここで共振器の透過率について考える、透過率は外部導波路に入る入射光の振幅 s_{in} と出てくる出射光の振幅 s_{out} の比である。

$$s_{out} = s_{in} - \sqrt{\frac{1}{2\tau_{ext}}} a = \left\{ 1 - \frac{\frac{1}{2\tau_{ext}}}{j(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2\tau_0} + \frac{1}{2\tau_{ext}}} \right\} s_{in} \quad (2.10)$$

$$T = \frac{s_{out}}{s_{in}} = \frac{\frac{1}{2\tau_{ext}} - \frac{1}{2\tau_0} - j(\omega - \omega_0)}{\frac{1}{2\tau_{ext}} + \frac{1}{2\tau_0} + j(\omega - \omega_0)} \quad (2.11)$$

入射波の周波数は共振周波数のとき、

$$T = \frac{s_{out}}{s_{in}} = \frac{\frac{1}{2\tau_{ext}} - \frac{1}{2\tau_0}}{\frac{1}{2\tau_{ext}} + \frac{1}{2\tau_0}} = \frac{Q_0 - Q_{ext}}{Q_0 + Q_{ext}} \quad (2.12)$$

よって $Q_0 = Q_{ext}$ のとき透過率が0になる。 Q_0 と Q_{ext} の大小関係によって以下のようになる。

$$\begin{cases} Q_0 > Q_{ext} : \text{under coupling} \\ Q_0 = Q_{ext} : \text{critical coupling} \\ Q_0 < Q_{ext} : \text{over coupling} \end{cases} \quad (2.13)$$

Under coupling は、共振器内部での損失が外部導波路との結合損失を上回っている際に発生する。共振器に入らないまま外部導波路を透過する光のほうが、共振器内に結合し、入る光よりも大きい。この状況は、共振器と外部導波路の距離が遠くなるほど結合効率は落ちるので、離れているときに**Under coupling** になるといえる。

Critical coupling は、共振器内部での損失が外部導波路との結合損失と等しいときである。このとき、強度透過率 T は $T = 0$ となり、入射波による全てのパワーが共振器内に閉じ込められる最も効率が良い状態といえる。また、共振条件($\omega = \omega_0$)において、共振器内を一周した光と結合せず外部導波路共振器をそのまま進んできた光と位相が π ずれ、打消しあうといえる。

Over coupling は外部導波路と共振器が接近しすぎており、外部導波路との結合損失が共振器内部での損失を上回るときである。このとき共振器に結合している光が支配的であり、外部導波路をそのまま透過する光より、共振器から結合する光の方が大きくなる。

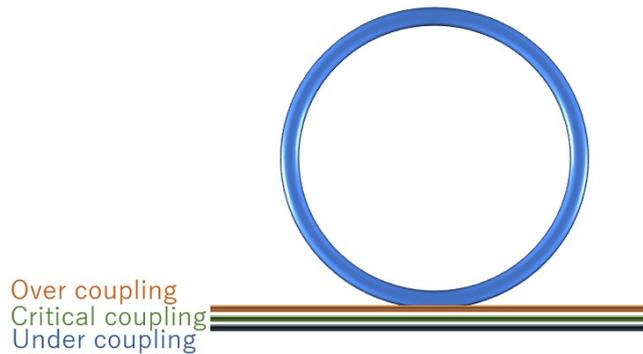


Fig2-2 Distance between fiber and microresonator and binding changes

2.2 リフロープロセス

今回の実験においてはシリカトロイド共振器作製の最終プロセスであるリフローについて注目し、改善をはかった。リフロープロセスの改善の前提として、スポット径、パワーの推定を行う必要がある。

2.2.1 レーザ光のスポット径

シリカトロイド共振器の CO₂ レーザによるリフローにおけるパラメータとしてレーザのパワー密度があげられる。パワー密度を求めるためにはパワーとスポット径が必要である。パワーはパワーメータが 5W 以上は測定できないため、可変アッテネータを用いて推測し、スポット径は計算で求める。今回実験で使用した Access Laser AL30 のレーザ出射口のビーム直径および広がり角 θ_0 は 5.5mrad である。

レーザ出射口からレンズまでの光路長は 680 mm。レンズからチップまでの距離および、レンズの焦点距離 f は 200mm に設定した。

レンズに入射するときのビーム直径は以下の式より 6.14 mm ともとまる。

$$\frac{\tan(\theta_0) \times z \times 2 + 1.2 \times 2}{\tan(\theta_0)} \approx \theta_0 \quad (2.14)$$

この値よりレーザビームの伝搬状況と理想的な TEM₀₀ ガウシアンビームの差異の程度を示す M² 因子を求める。理想的なビームの際は M² = 1 となり、大きくなるほど集光度が落ちることを意味する。M² 因子はビームウエスト ω_0 、広がり角 θ_0 、波長 λ を用いて以下の式で定義される。

$$M^2 = \frac{\pi \omega_0 \theta_0}{\lambda} \quad (2.15)$$

この M² 因子は 1 以上であるが、公称値が 1.2 と表記されていたため、以降はその数字をもとに計算する。この値をもとにレンズで集光されるビーム径を求めると、直径 527 μ m と

なった.

$$\omega = \frac{4\lambda f M^2}{\pi \omega_1} \quad (2.16)$$

したがってビーム面積は $2.19 \times 10^{-7} \text{m}^2$ となり, 20W で入射した際. 入射密度は 91.5MW/m^2 となる.

2.2.2 パワーの推定

CO₂ レーザのパワーを調節するにあたり, パワーメータが 5W までの対応であるため, 可変アッテネータを用いることによりパワーの推定を行う. アッテネータの内部構造は ZnSe (n = 2.403) 板が 2 枚 $I_{\text{Brewster}} = \tan^{-1} n = 67.4^\circ$ に設置されたブリュースターウィンドウがハの字に対向した構造になっており, 回転することにより, 透過率を調整するものである.

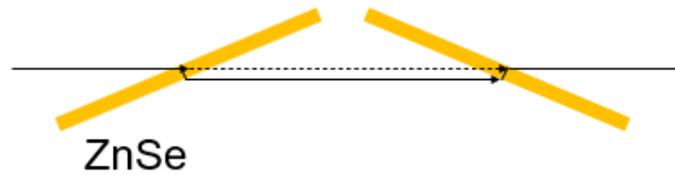


Fig.2-3 Internal structure of Attenuator

2枚設置されているのはブリュースターウィンドウによって変位したものを戻すためである。1回境界面を通過するにあたりP偏光は100%、S偏光は50.33%透過する。2枚分、計4回通過するためS偏光の透過率は6.42%まで落ちる。これがアッテネータの透過率の最大値となる。このブリュースターウィンドウを θ 回転させたときの透過率は以下の式、図のようになる。

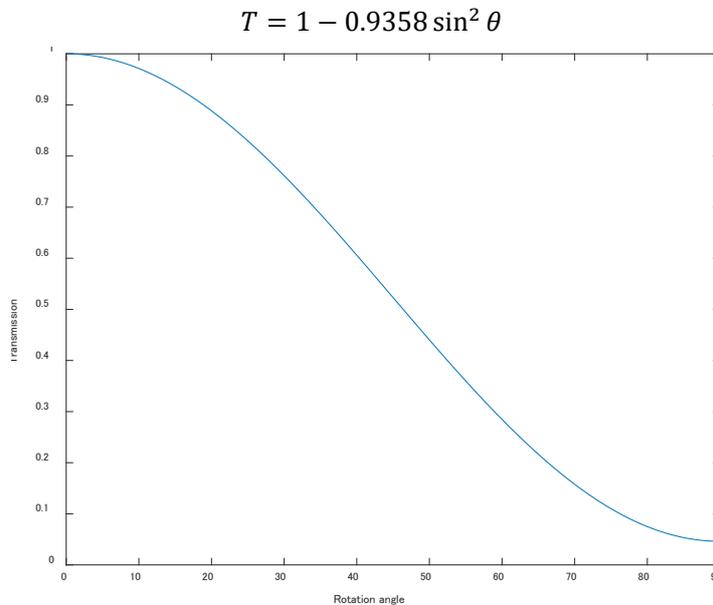


Fig.2-4 Rotation angle of Brewster window and damping rate

しかしながら下記の図の通り、目盛りと実際の透過率に差異があることが確認された。実線がそれぞれの理論値カーブであり、プロットが実測値である。

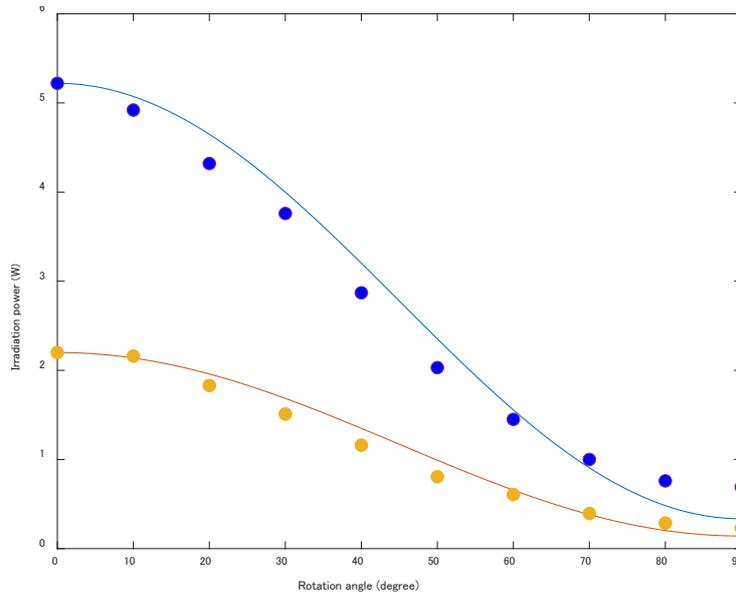


Fig.2-5 Difference between theoretical value and actual value of Attenuator

アッテネータの目盛りで 6%, 9%(回転角が 80° 90°)のときは誤差が大きくなるものの, 17%(回転角 70°)からは誤差が小さくなることから 17%の測定値からパワーを測定する.

先ほど求めたビーム径と上記のパワー P_0 をもとにビーム強度はガウス分布であるため, チップに実際に当たる強度を算出する.

$$P = P_0 \int_0^r 2x\pi A^2 \exp\left(-\frac{2x^2}{\omega^2}\right) dx = P_0 \frac{\omega^2 \pi A^2}{2} \left(1 - \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega^2}\right)\right), \quad (2.17)$$

$$A = \frac{1}{\sqrt{\pi} \omega}$$

上記を踏まえたうえでチップ上に照射される CO₂ レーザのパワーと 20W 照射時の入射強度密度は以下のようなになる. 入射強度密度ははガウス曲線に従う強度を円周に沿って積分したものを円形の面積で割るので, 結果としてガウス関数となる.

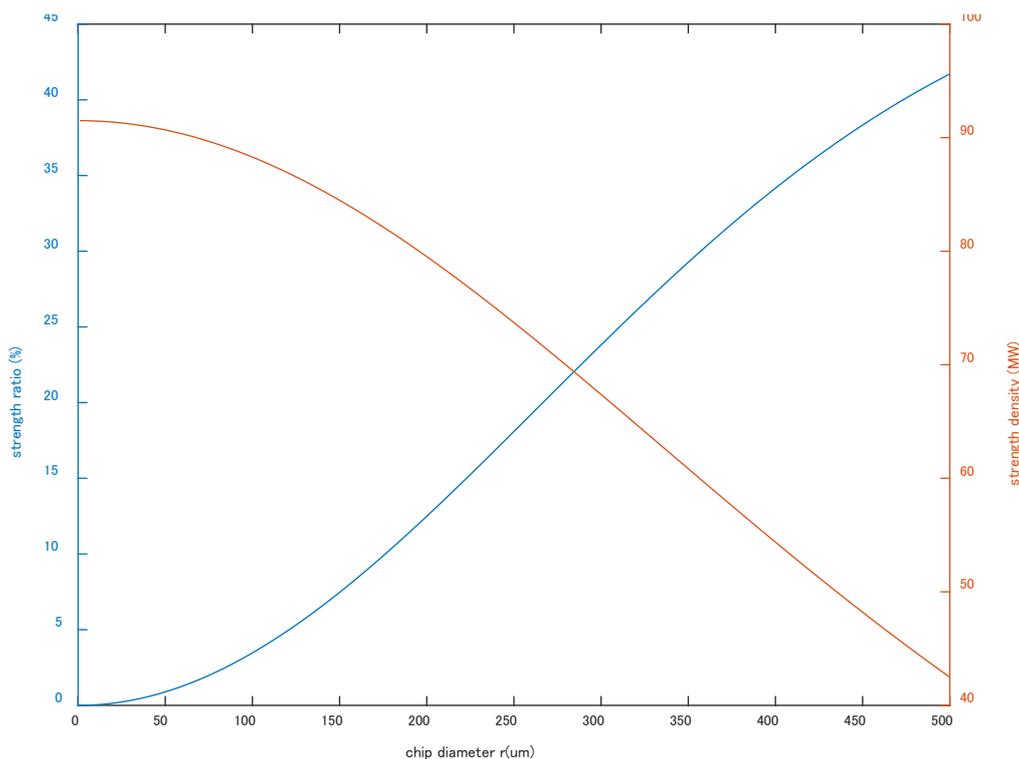


Fig.2-6 Relationship between chip size and irradiation intensity and irradiation density

上記の図の通り，同じ出力において照射されるパワーとパワー密度はトレードオフの関係にあるといえる．これはディスクが大きくなるほど照射されるパワーが大きくなるものの，中心から離れるほど照射される強度も小さくなるからである．また，実際にはディスク中心部はポストと触れており，そこからの放出や，シュリンクしたことにより照射される強度が逐次変化していくものとなる．今回，ビーム径が直径527 μm であることから，直径200~300 μm がリフローに適していると考えられたため，200 μm のチップを用いて測定を行った．

2.3 アッテネータによる副スポット

アライメントをとったのち，感熱紙を用いてカメラの画角を調整した際，下記の図のように本来の主スポットの上下に小さな副スポットが確認できた．このスポットにより，照射されるCO₂レーザ光が扁平型となり，トロイドがいびつな形となった．



Fig2-7 sub spot made by Attenuator

この副スポットの原因として下記のリフロー系においてレンズ，ミラー，アッテネータ，シャッターの各コンポーネントの前後(ZnSe レンズとミラーの間，ミラーとアッテネータの間，アッテネータとシャッターの間，レーザとシャッターの間)で感熱紙をもちいて特定したところ，アッテネータによるものと考えられた．アッテネータ直後においては奥行き方向へのゆがみが確認された．これがリフロー時においてレンズによって上記のようなサ副スポットになったと考えられる．

アッテネータの清掃を行ってもこの副スポットは残ったため，構造上もしくは清掃が難しい内方表面の汚れが原因であると考えられる．しかしながらアッテネータで6%等に大幅に減衰させたときのみ現れ，透過率100%のときには副スポットは確認できなかったため，アッテネータで減衰させない条件下でリフローを行った．

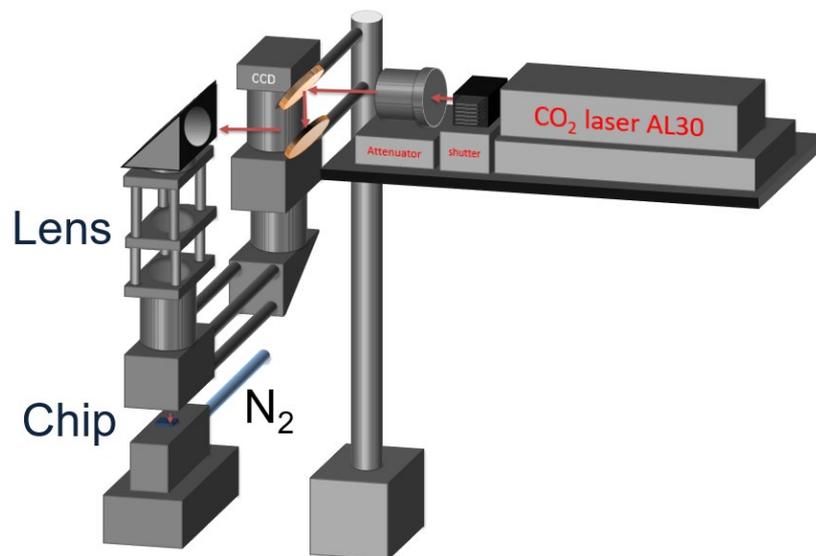


Fig2-8 Bird's eye view of reflow system

2.5 SiO₂の結晶構造と相転移

先述の通り，CO₂ レーザによるリフローによって酸化膜である SiO₂ が融解し，シュリンクが発生する．しかしながら SiO₂ は構造に柔軟性があり，温度により準安定な構造が多数存在するため，結晶構造が多彩に変化する物質として知られている．状態としては石英，クリストバライト，キータイト，スティショバイト，コーサイトの5種類があげられる．また，それぞれ低温型であるα型と高温型のβ型の2タイプ存在する．

2.5.1 非結晶シリカ

このほかにも非結晶シリカと呼ばれる構造があり，一般的に光ファイバ等光学材料で用いられる SiO₂ はこの構造である．非結晶シリカは Brückner によって4つの構造に分類されている．

- Type1** : 天然の石英を真空中もしくは不活性ガス雰囲気下で電気融合して製造されたもの。OH⁻基が 5ppm 以下とほとんど含まないものの、Al やナトリウムといった金属不純物が比較的多く含まれる。
- Type2** : 石英結晶粉末を酸素と水素の混合気体で燃焼させた炎で溶かした SiO₂ を種結晶に成長させるベルヌーイ法で製造されたもの。Type1 と比べて金属不純物が少ないものの、約 150-400ppm の OH⁻基と Type1 より多い特徴がある。
- Type3** : SiCl₄ を酸素と水素の混合気体で燃焼させた炎に通し、加水分解して生成した合成ガラス状シリカである。金属不純物をほとんど含まないものの、SiCl₄ から製造しているため、1000ppm 以上と多量の OH⁻基を含んでいる。
- Type4** : Si を純酸素の高周波プラズマ炎で高速酸化したもので、OH⁻基、金属不純物ともに含有量が極めて少ない特徴がある。

今回使用している SiO₂ は熱酸化膜であり、Si から組成変化が起きることによって作製される。シリコンウェハー上の酸化膜の構造、特に Si-SiO₂ の境界面、遷移領域における構造においては様々な議論が起こっており、トリジマイト、グリストパライト、コーサイトといった各種 SiO₂ の結晶が存在するというものと、結晶質は存在しないというものと 2 つ存在している。Si の熱酸化膜の構造に関しては Si のミラー指数が(001), (111), (110), の 3 面から成長する場合は考えられる。それぞれの熱酸化膜について Shimura の研究^[27] で述べられている。

Si(001)上に成長する酸化膜については、想定される構造でシミュレーションされるブラッグ反射と実際の測定におけるブラッグ反射を比較した結果から擬クリストバライト型構造がもっとも近いと考えられている。この構造はシリコン原子の間に酸素原子が入ることにより、縦方向に 2 倍長くなった分立方晶が正方晶に縦方向に歪んだ形といえる。したがってこの構造はβクリストバライトの構造に似ているといえる。

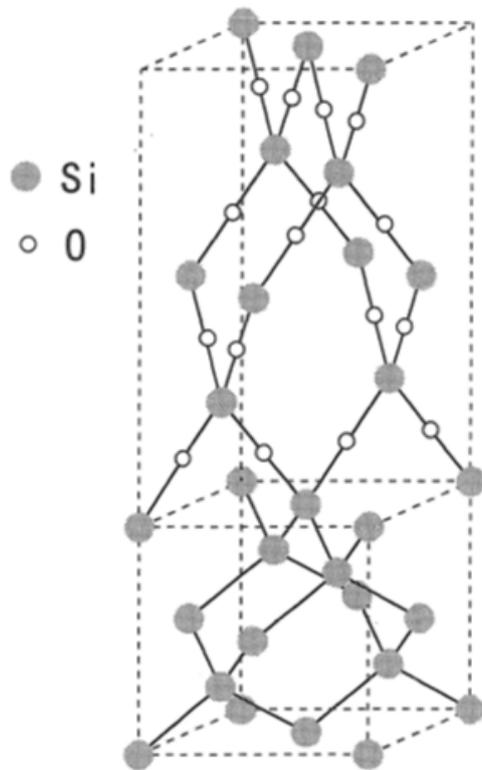


Fig2-9 Structure of the boundary surface of Si-SiO₂ grow on Si(001)
 [Takayoshi SHIMURA, Masataka UMENO, “The Crystalline SiO₂ in the Thermal
 Oxide Layers on Si Substrates”, 放射光: Journal of the Japanese Society for
 Synchrotron Radiation Research”.10(3) .286-298.1997.]

つぎに Si(110)上の SiO₂について述べる。(001)と同様に Si の構造を維持したまま Si 原子の間に O 原子が 1 つが入る構造になり以下の図のようになる。この構造はβトリジマイトの構造に似ているといえる。

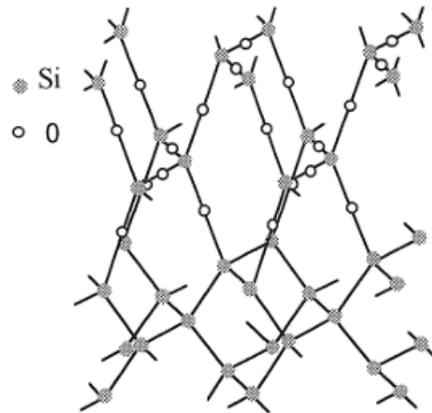


Fig2-10 Structure of the boundary surface of Si-SiO₂ grow on Si(110)

[Takayoshi SHIMURA, Masataka UMENO, “The Crystalline SiO₂ in the Thermal Oxide Layers on Si Substrates”, 放射光: Journal of the Japanese Society for Synchrotron Radiation Research”.**10(3)** .286-298.1997.]

Si(111)上の SiO₂について述べる. この構造はβトリジマイトの構造に似ており,

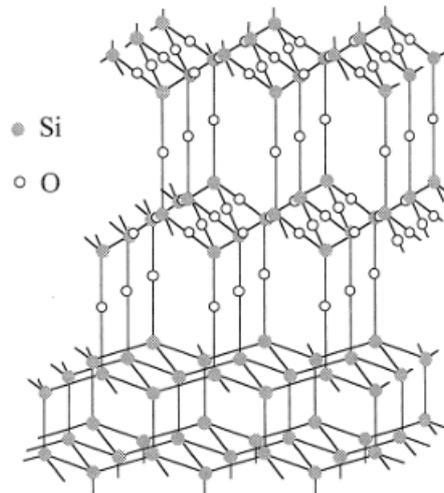


Fig2-11 Structure of the boundary surface of Si-SiO₂ grow on Si(111)

[Takayoshi SHIMURA, Masataka UMENO, “The Crystalline SiO₂ in the Thermal Oxide Layers on Si Substrates”, 放射光: Journal of the Japanese Society for Synchrotron Radiation Research”.**10(3)** .286-298.1997.]

2.5.2 SiO₂の相転移

これらの各結晶, 非結晶シリカは以下のように相転移をおこなう. コーサイト, スティショバイトに関しては高压化における状態であるため, 下記図においては範囲外となつて

いる。

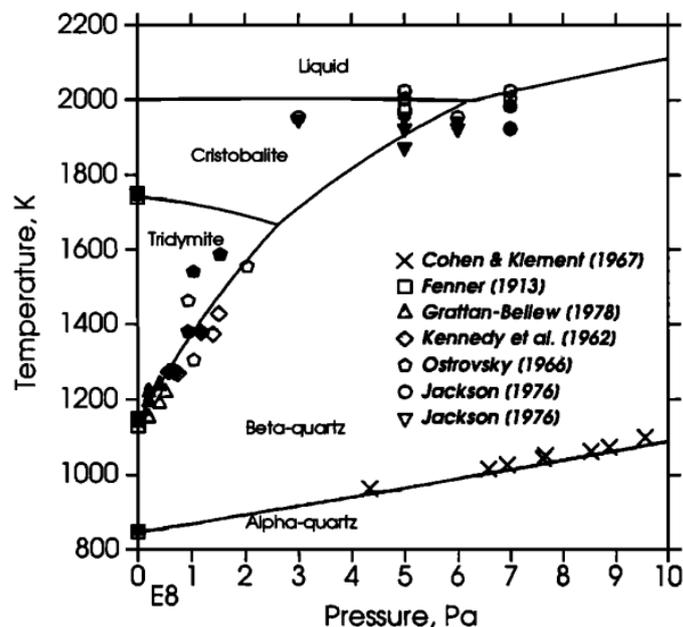


Fig.2-12 Calculated phase equilibrium relations among g-quartz, α-quartz, tridymite, cristobalite, and liquid silica [V. Swamy and Surendra K. Saxena “A thermodynamic assessment of silica phase diagram” JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 99, NO. B6, PAGES 11,787-11,794, JUNE 10, 1994]

実験環境が常圧であるため常温から CO₂ レーザによって高温になる場合 573 度で α クォーツから β クォーツ, 870 度で β トリジマイトへ, 1470 度で β クリスタバライトに, 1705 度で融解する. しかしながら実際には β クォーツから β トリジマイトへは転移が極めて遅くおよそ 1250 度で β クリスタバライトへ転移する. しかしながら, 急速に温度を上昇させた場合 β クォーツから 1550 度で直接融解する.

冷却においても, β クリスタバライトから β クォーツへの転移は遅いものの, β トリジマイトへの転移がより極めて遅いため, β トリジマイトへの転移はほぼみとめられない.

また, 急激に冷却した場合融解している SiO₂ の場合不規則な配列のまま非結晶の石英ガラスとなる. また, β クリスタバライト, β トリジマイトはそれぞれ急冷した場合 240 度, 114 度において α クリスタバライト, α トリジマイトと変化する.

Si(001)面の酸化膜は β クリスタバライトの構造に似ているため, ここから CO₂ レーザによって急激に加熱した場合, 1705°C で融解する. その後シュリンクしたのち非結晶シリカになっているものと考えられる.

Si(110)(111)面の酸化膜は β トリジマイトの構造は 1470 度でクリスタバライトに, その後同様に融解し, シュリンクしたのち非結晶シリカとなる.

非結晶シリカの屈折率は通信波長帯でよく用いられる 1550nm においては $n = 1.444$ で

ある。

非結晶シリカは 1000 度を超えることで β クリスタバライトとなり，そこから急冷させることで α クリスタバライトとなる。

したがって，シリカトロイド共振器においては基本的には非結晶シリカになるものの，再度加熱した場合 α クリスタバライトになる可能性があるといえる。

また，今回均一の結晶構造にするために 1 度のリフローにしたものに限るが，再度リフローする手法においては表面のみが融解すると考えられるため，結晶構造に変化が生じるのではないかと考えられる。

第3章 シリカトロイド微小光共振器の作製と光学評価

3.1 リフロープロセスセットアップ

Fig.3.1 にシリカトロイド共振器の作製する装置の写真と概略図を示す。

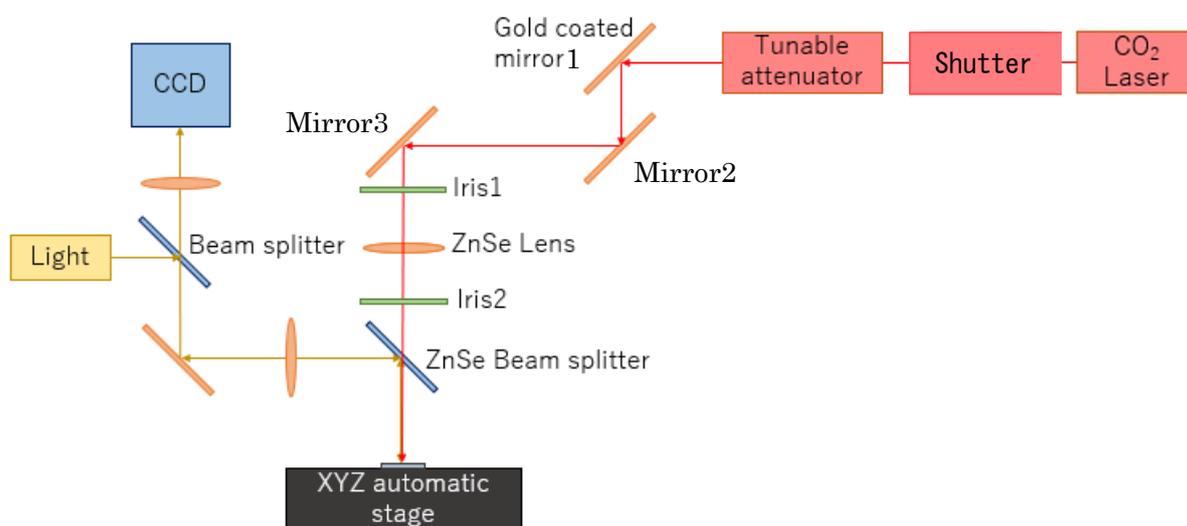


Fig.3-1 Configuration of reflow system

今回使用した CO₂ レーザは Access Laser AL30 で最大出力が 30W のものを使用した。波長が 10.6 μm と可視光外であるが、2つの Iris とステージ上のパワーメータを用いてアライメントをとった。高出力の上アッテネータで減衰させ、ステージ上のパワーメータの値が最も高くなるように Iris1 を閉めた状態で Mirror1 を、Iris2 を閉めた状態で Mirror3 を調整した。高出力でアッテネータを閉めたのは低出力においては CO₂ のパワーが安定せず、最大になるミラーの角度を定めるためである。

3.1.1 シャッター

今回 EOPC 社のシャッター SH66-BDH を用いた。TTL 信号により中心部にある金膜ミラーを回転させ、開閉を行っている。シャッターが閉じている際、ミラーで反射されたレーザー光はヒートシンクのついたアルミニウム製のボックスに照射される。ミラーを回転させるために TTL 信号を発信してからの立ち上がりには 15ms 要する。また、周波数単位は 25Hz までであるため、最短 40ms 間隔で開閉を行うことができる。

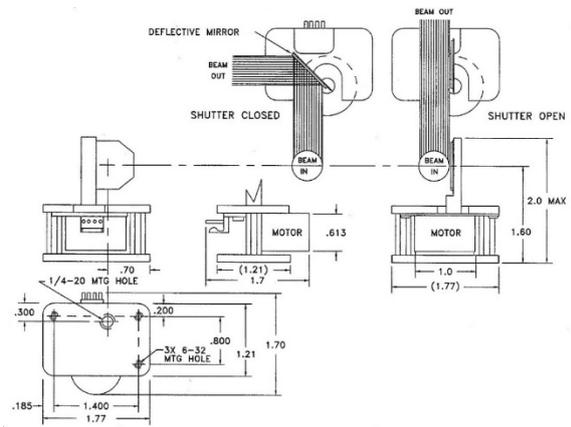
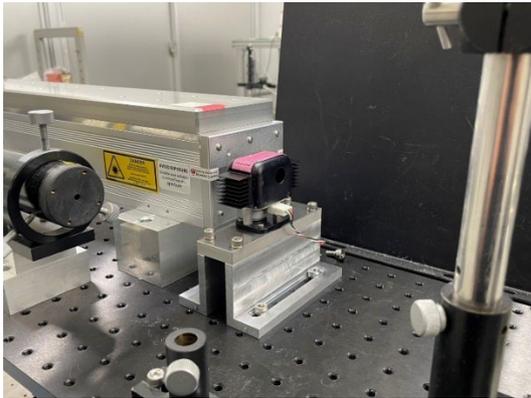


Fig.3-2 shutter

Right figure is quote from EOPC official website

3.1.2 可変アッテネータ

可変アッテネータは 100, 97, 89, 77, 61, 45, 30, 17, 9, 6% の目盛りがある unicore 社製のものを使用した。2.2.2 パワーの推定で述べた通り ZnSe 板 2 枚がレーザー光に対してブリュースター角になるように設置されており，CO₂ レーザを減衰させることができる。

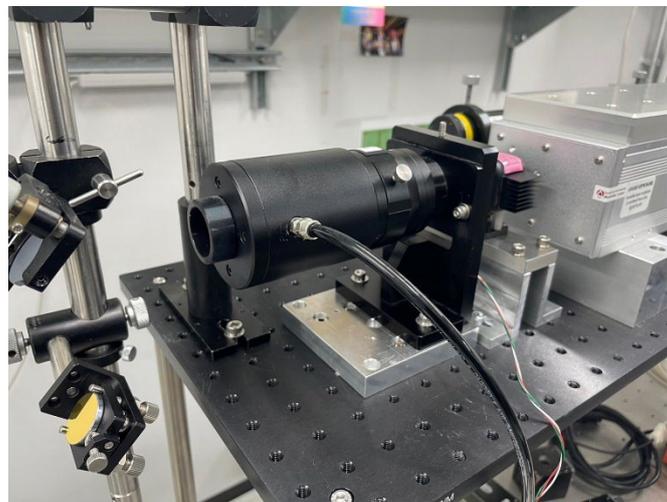


Fig.3-3 attenuator

3.1.3 窒素パージ

先述の通り Q 値を下げる要因としてトロイド共振器に吸着された OH⁻ 基や H₂O 分子、表面に付着した H₂O 分子による吸収があげられる。これを解決する手段として窒素パージがや真空におけるリフローがあげられている [28]。本研究においては、その中でも安価かつ簡便に行える窒素パージを実施し、その効果を検証した。手法としてはチップを置くステージのに元来ある吸引する口から窒素をチップ付近 2 か所(下記右図白い丸部分)から逆流させ、リフロー中にチップ周辺に窒素を注入することでチップ周辺を窒素で満たす方法

とした。

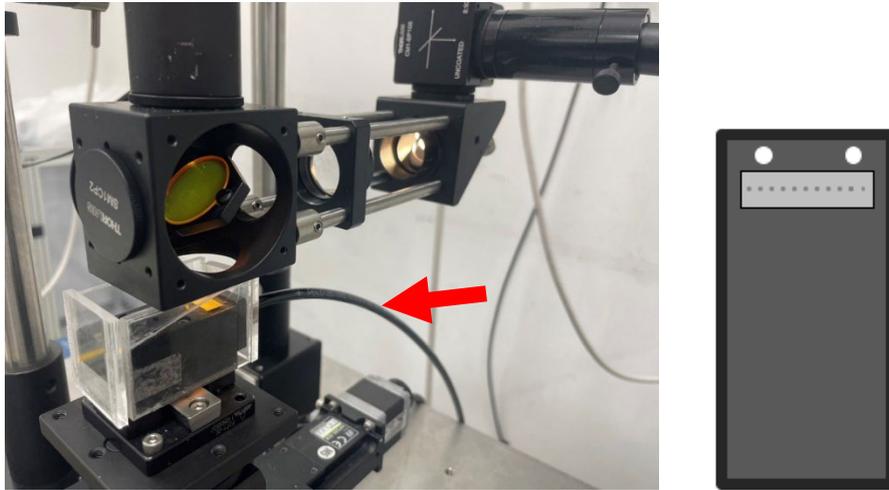


Fig.3-4 N₂ Purge

3.2 シリカトロイド微小光共振器の作製

シリカトロイド共振器は、以下のようなプロセスを経て製作される。下記図において赤色はフォトリジスト、青色は酸化膜、灰色がシリコン基板である。

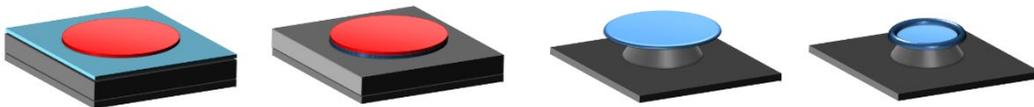


Fig.3-5 Fabrication process of silica toroid resonator

左から順にフォトリソグラフィ、ウェットエッチング、XeF₂エッチング、CO₂ レーザリフローの4つからなる。

フォトリソグラフィ

まず、酸化膜を5 μ m程度成長させたシリコン基板上にフォトリソグラフィを施し、フォトリジストを円形のパターンで転写する。

ウェットエッチング

これにフッ酸を用いてウェットエッチングを施し、レジストのない酸化膜をエッチングする。

ドライエッチング

そこにXeF₂を用いてドライエッチングを行うことでシリコンに対してSiO₂の1000倍と選択的に等方性エッチングさせ、キノコ状の構造のマイクロディスクを作製する。

CO₂ レーザリフロー

最後に上部から CO₂ レーザによるリフローを行うことによりシリコンとシリカの熱伝導性の違いにより酸化膜のみに熱がこもり、ドライエッチングによって生じた表面の粗さを解消するとともに、周縁部が融解し、表面張力によってドーナツ状の構造が出来上がり、トロイド型が出来上がる。

3.3 シリカトロイド微小光共振器のQ値測定

3.3.1 テーパーファイバの作製

ヒーターを用いてシングルモードファイバを熱しながらテンションをかけて引くことによりシングルモードファイバを作成する。引くことにより一度マルチモードファイバになるため、パワーメータに接続し、計測することでコアとクラッドが一様になるタイミングをはかる。このようにしてできたテーパーファイバは、ファイバ全体をコアとみなし、周囲の空気をクラッドとみなすことで、共振器へエバネッセント波を入れる。

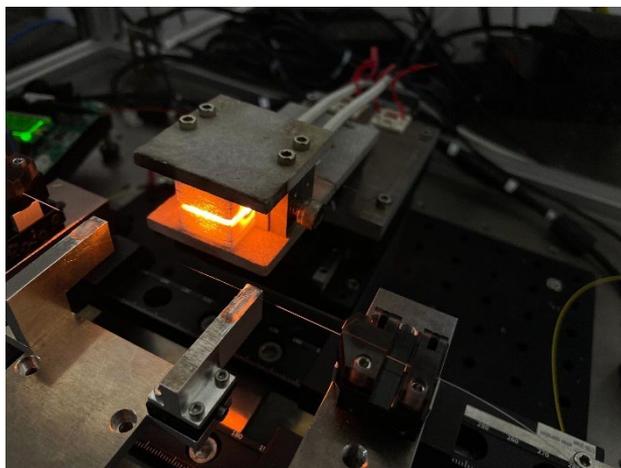


Fig.3-6 heater to make tapered fiber

3.3.2 Q値測定

Q値測定についてはテーパーファイバを用い、シリカトロイド共振器内に入射させるために、シリカトロイド共振器の位置を上方向および横方向からの 2 台のカメラとステージコントローラを用いて、3 軸電動ステージ上のシリカトロイド共振器とテーパーファイバの距離を最小 10 nm 単位で調整した。

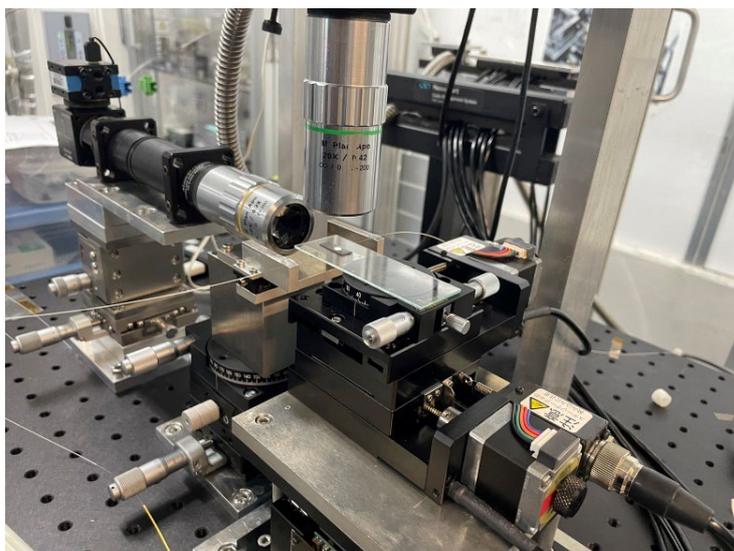


Fig.3-7 Instrument for measurement

以下のようなセッティングで Q 値測定を行った．波長可変レーザ(以下 TSL)の波長を 1550nm 付近を中心に掃引することによって，波長の変化に伴う透過率の変化をパワーメータで測定することができる．テーパファイバとシリカトロイド共振器を近づけることによって Q 値の測定を行った．

TSL の波長掃引速度の最小値は 0.5nm/s，パワーメータの応答速度は100 μ s であることから，プロットの最小間隔は 0.5pm 程度となり． Q 値の測定範囲としては 10^7 程度までとなる．今回 Q 値の最大は 10^7 程度であるため，範囲内に収まっているといえる．



Fig3-8 diagram of the experimental setup for measurement of quality factor.

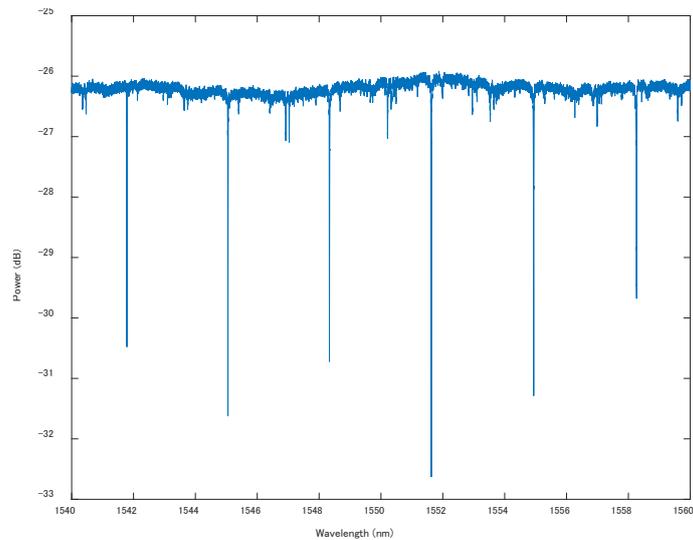


Fig.3-9

このなかで共振器本体の Q 値を計測するため、カップリングによる影響を同じにするため、この中で5dB落ちしているところをさがし、中心を合わせたうえで、dip mag と FWHM を調節し、ローレンツ関数でフィッティングすることにより Q 値を求める。

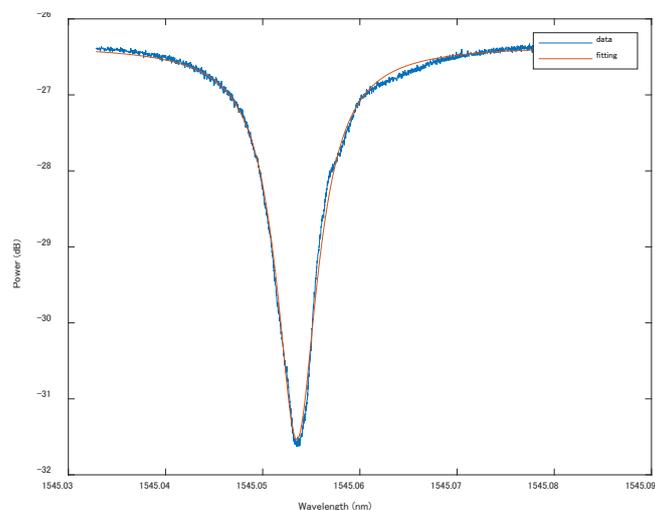


Fig.3-10 Measured transmission spectrum of edge toroid microresonator (left).
Enlarged view of Resonance dip

今回はこの操作を各共振器において4回ずつ行っている。ただし、著しく Q 値の低い10Wにおける照射では、2回しか測定できなかった。

3.3.2 照射時間による Q 値の変化

1500ms から 3000ms まで 500ms ごとにリフロー時間を変化させ Q 値を変化させた。

レーザ出力は25W付近を目標にした結果、23.6～25.8Wの出力となった。これは、17%出力の際、0.3W程度振れ幅があるため、そこから算出した際、2W程度の振れ幅が発生するためである。

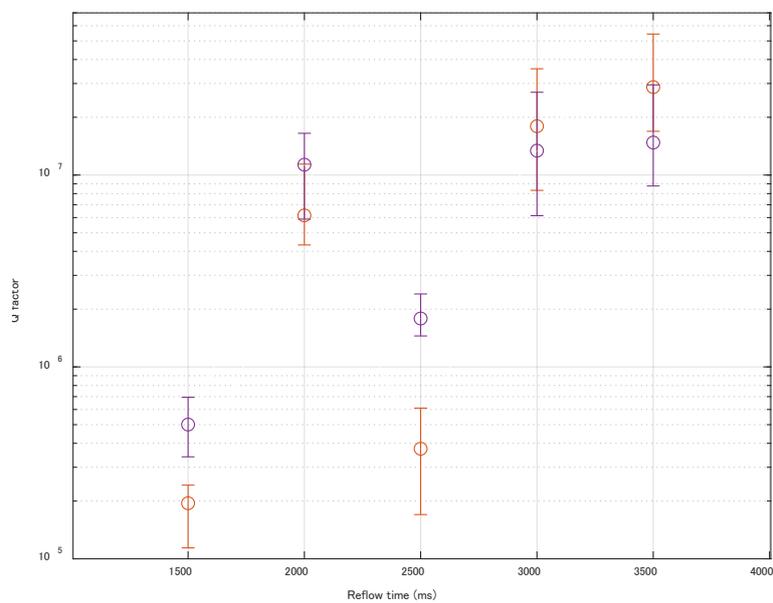
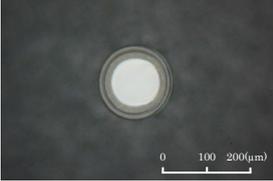
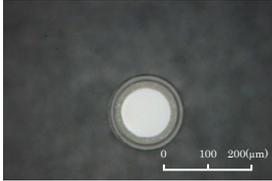
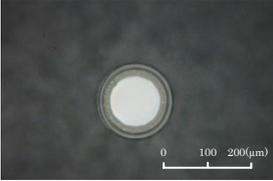
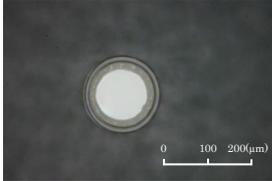
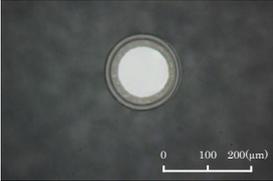
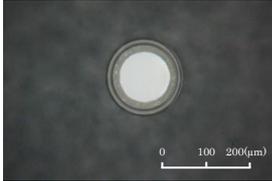
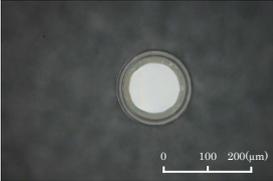
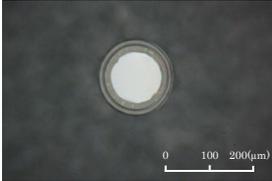
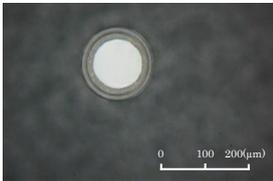
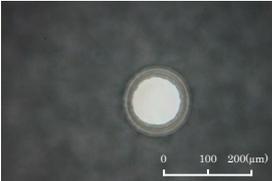


Fig3-11 Relationship between Q value and reflow time at 25W irradiation
また、それぞれのシュリンク後の画像は以下のとおりである。

Table3-1 Reflow time and shape of silica toroid resonator

Reflow time (ms)	Sample 1	Sample2
1500		
2000		
2500		
3000		
3500		

それぞれのポストとトロイドの直径の長さを計測したところ以下の図のようになった。

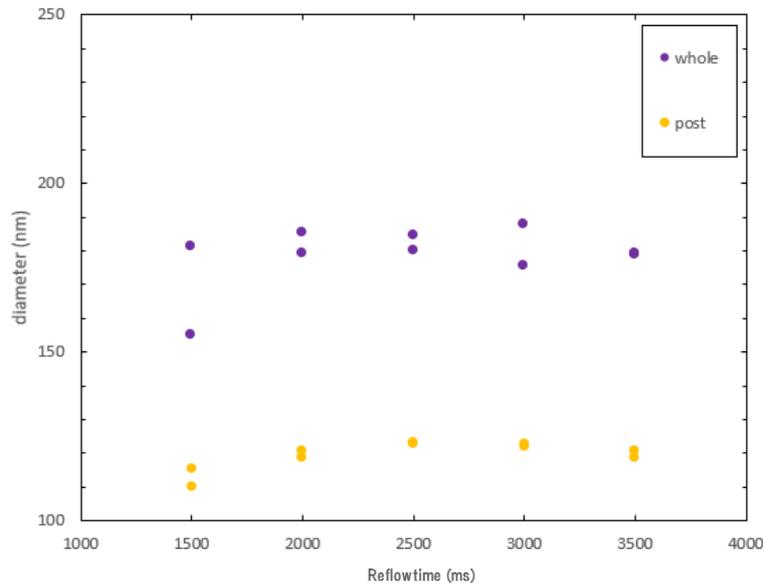


Fig.3-12 Reflow time and silica toroid resonator diameter and post size

この結果より、1500ms と 2000ms との間で Q 値に明確な差が存在する。しかしながら、それ以降に関しては 3000ms, 3500ms における Q 値上昇は認められるものの、その大きさについては軽微なものであるといえ、一定の照射時間を超えたのちは Q 値の劇的な上昇は見込めないと考えられる。これはシュリンク時の映像においてもまず、瞬時的に一定度合いシュリンクしてからのち徐々にさらにシュリンクが進んでいく様子と合致しているといえる。その結果見た目における差異はこの範囲内においてはほとんど確認ができなかった。

原因としては、シュリンクしたのちは直径がディスク時よりも小さくなることから得られるパワーの減少、ポストが近いことによるそこからの熱の流出があるためであると考えられる。

3.3.3 パワーによる Q 値の変化

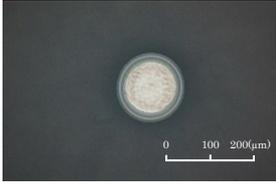
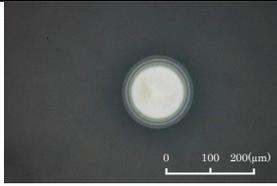
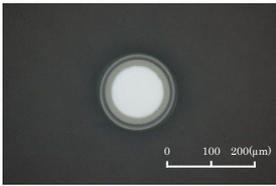
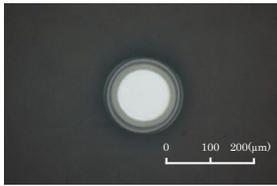
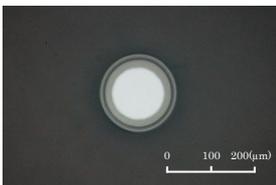
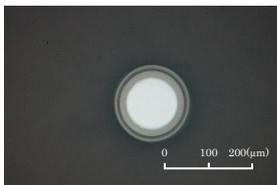
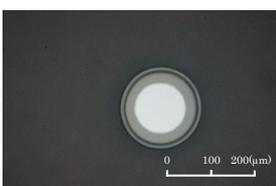
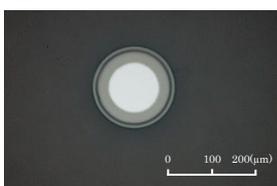
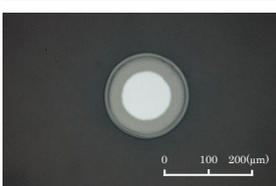
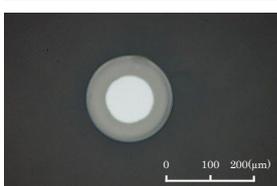
10W から 30W までおよそ 5W 刻みで 2500ms 間リフローを行った。レーザの出力が 17% で減衰させた場合の値から 100%透過率の際の出力を推定しており、厳密なパワーは以下の範囲である。ただし、30W は 17%に減衰時 5.1W とパワーメータの測定可能範囲を逸脱するため、使用するレーザの最大出力が 30W であることから最大出力でリフローを行った。3.3.2 同様各 2 個ずつリフローを行った。

Table3-2 Target output and actual output

Target output (W)	17%Attenuation value (W)	Guess output (W)
10	1.62~1.85	9.53~10.9
15	2.50~2.83	14.7~16.6
20	3.35~3.50	19.7~20.6
25	4.21~4.40	24.7~25.9
30	-	30(Max)

それぞれのリフロー後の様子は以下の表の通りである.

Table 3-2 Irradiation power and shape of silica toroid resonator

Laser power (W)	Sample 1	Sample2
30		
25		
20		
15		
10		

上記の図よりわかる通りシュリンク度合いに大きな差があり、ポストとトロイドの直径並びにポストに対するトロイドの直径の割合は以下の図の通りである。

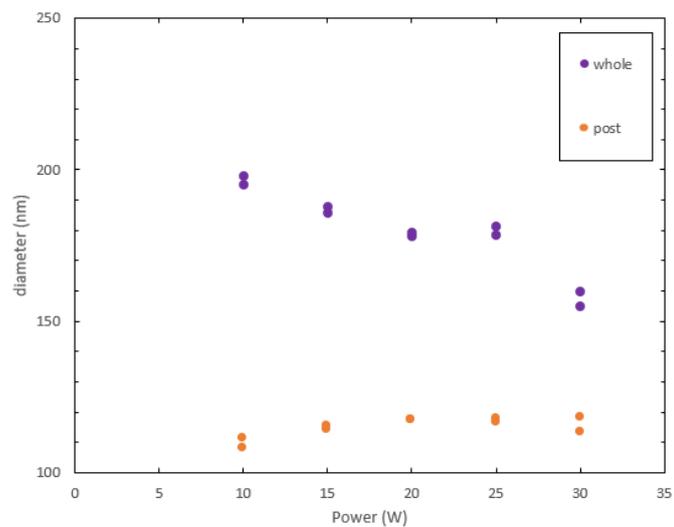


Fig.3-13 Relation between irradiation power and size of toroid and post after reflow

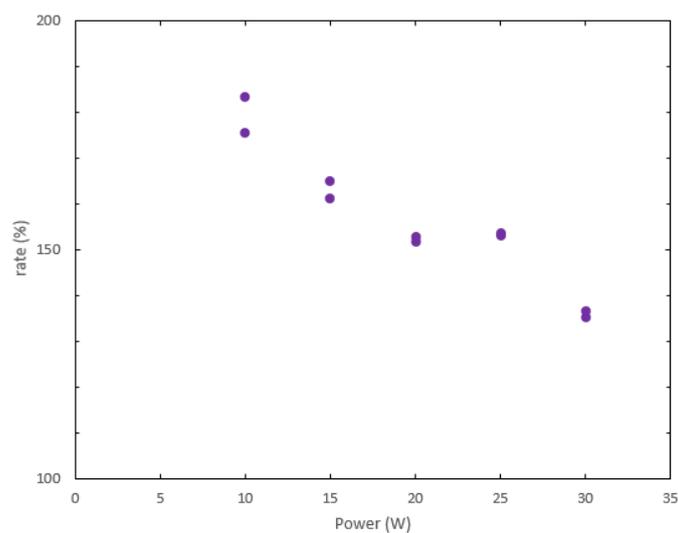


Fig.3-14 Change in ratio of toroid to post diameter with irradiation power

上記の図よりレーザーの出力とシュリンクの度合いに関しては強い相関関係が認められ、とくに 10W と 15W の間、25W と 30W の間に大きな変化が見られた。Q値を比較すると以下ようになった。

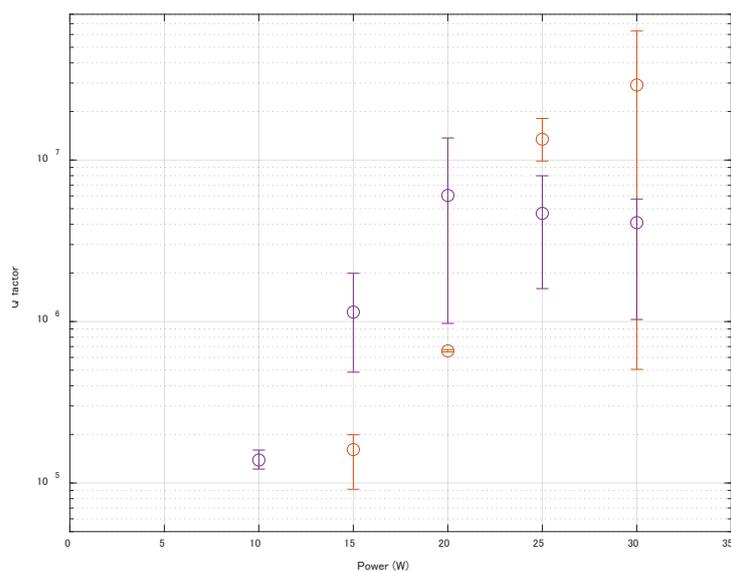


Fig. 3-15 Relationship between CO₂ laser output and Q factor after 2.5 seconds reflow

写真から 30W のほうには焦げのようなものが確認されたが、それに伴い、30W の 1 つ目 (紫, 表における左) において Q 値の減少が認められた。しかしながら、2 つ目 (橙, 表における右) においては多少の焦げが認められるものの、Q 値の範囲が拡大したものの、最大の Q 値は上昇した。

これらより、この系においては出力を上昇させるほど Q 値の向上がみられるといえるが、最大の Q 値を求めるうえではより 30W における短いリフロー時間が求められると考えられる。出力を抑えることができないのは、17%減衰時パワーメータが 5W を超え破損する危険性が高いことと先述の通り、出力に多少の揺らぎがあるため、細やかな調整が現実的に厳しいと言わざるを得ないからである。

3.3.4 30W におけるリフロー時間と Q 値の変化

上記の実験より本実験系においては最大出力である 30W におけるリフローが最適であるという結論が出た。しかしながら 30W2500ms におけるリフローにおいては過剰にリフローした形跡が確認されたため、30W かつ 2500ms 未満のレンジにおいて最適なリフロータイムが存在すると考えられる。

そこで、500ms から 500ms 間隔で 3000ms まで 30W でリフローを行いその結果が以下の通りとなった。

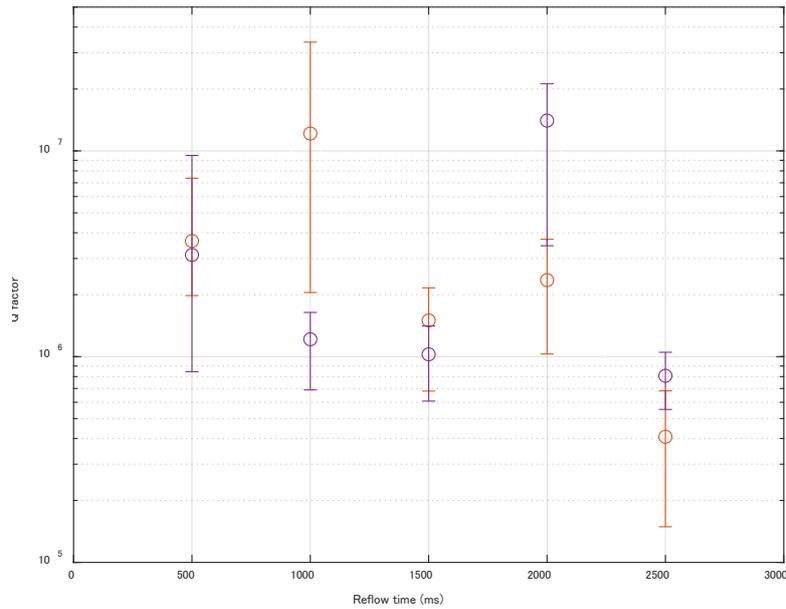
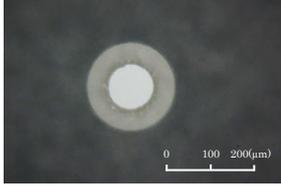
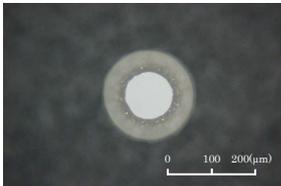
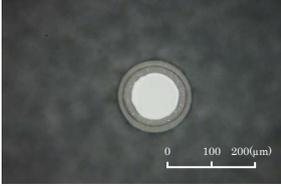
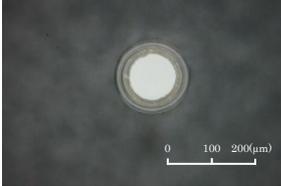
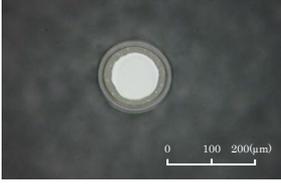
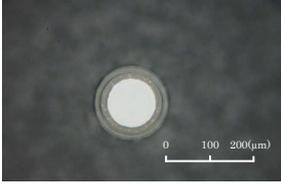
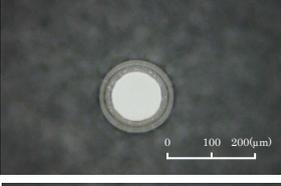
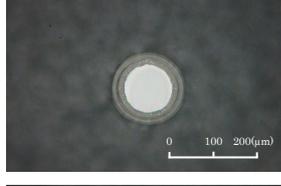
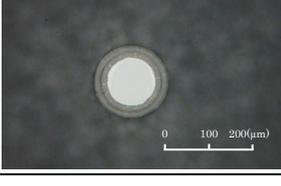
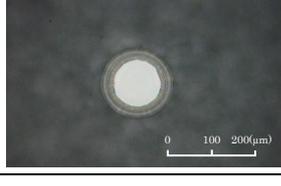


Fig. 3-16 Relationship between Q value and reflow time at 30W irradiation

全体的に Q 値が落ち込んでいるが、これはポストの状態からわかる通り全体的にディスクの状況は他の実験と比較して等方エッチングが歪であることに由来すると考えられる。

2500ms において大幅に Q 値が低下していることから写真に見えない範囲で沸騰などによる表面の粗さが発生していると考えられる。ポストからの熱の流出と照射されるパワーによって温度上昇は決定されるため、高 Q 値を実現するためには高出力において短時間のリフローが有用であるが、制御がシビアになることから、安定度を重視する上では 25W 程度でのリフローの方が良いといえる。

Table3-3 Reflow time and shape of silica toroid resonator

Reflow time (ms)	Sample 1	Sample2
500		
1000		
1500		
2000		
2500		

3.3.5 窒素パージによる Q 値の変化

窒素流量を 0.15MPa, 20°C, 10L/min に設定したうえでリフローした結果, 以下の図のような Q 値の変化が見られた.

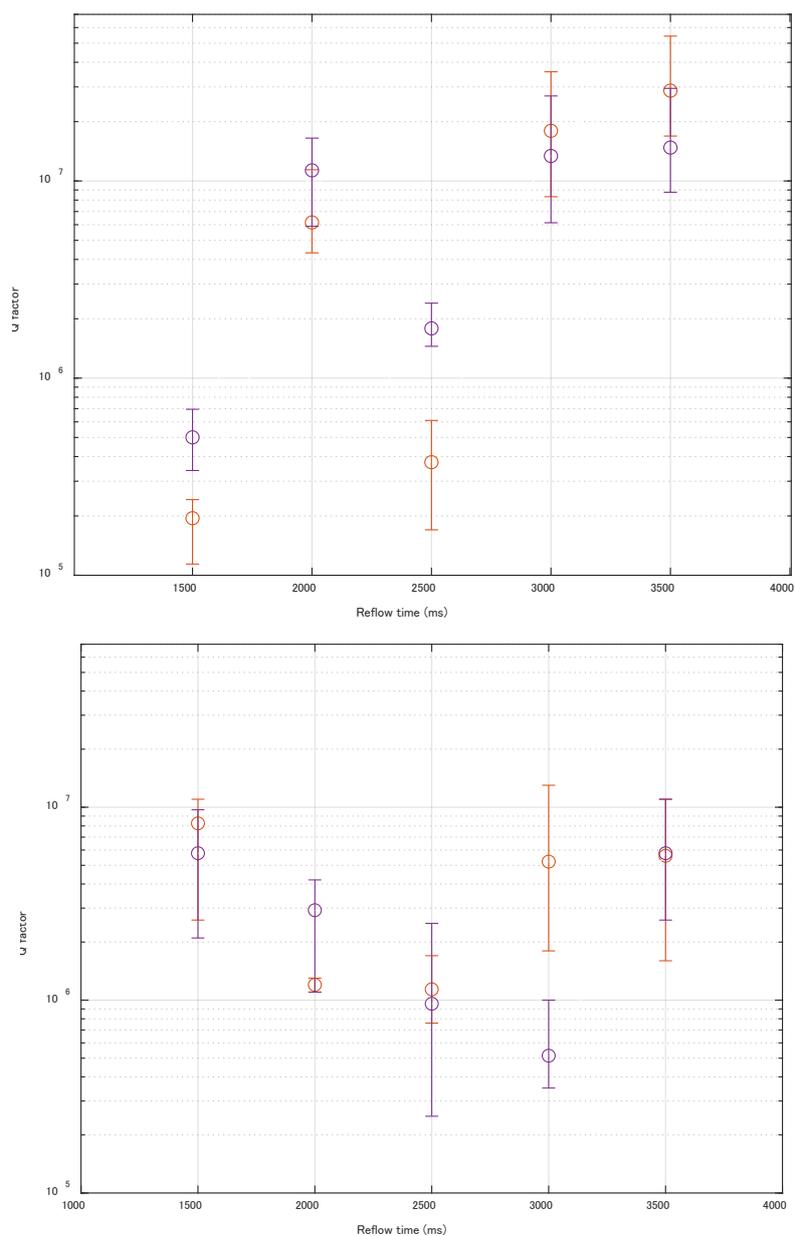


Fig.3-17 Difference in Q factor with and without N₂ purge
 Lower : non N₂ purge, Upper : N₂ purge

窒素パージによる効果については上記の結果としては因果関係を確認できるほどの全体的な Q 値の変化は測定できず、 Q 値の最大値に関しては減少傾向が認められた。加えて、傾向として窒素パージ後のほうがより Q 値が安定しているといえる。

この原因としては窒素の対空気であるガス比重は 0.967 とわずかながら空気より軽いですが、上部が空洞になっているため、窒素の充填率が不十分であるため、効果も限定的になっているためと考えられる。また、シュリンク後の直径、ポストとの大きさの比較については窒素パージの有無による明確な差異は認められなかった。

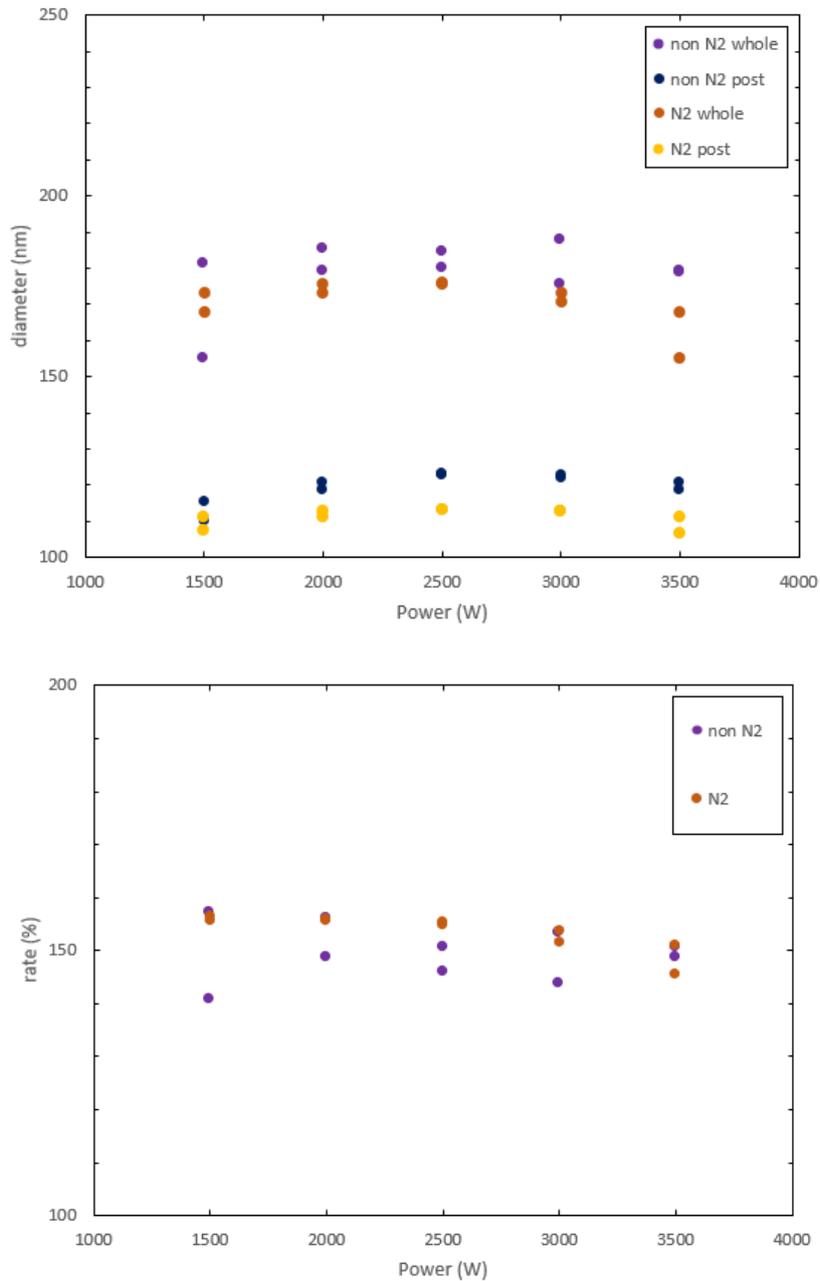


Fig.3-18 Difference in cavity size and size relative to post with and without N2 purge

e

これらを解決する手法として、理想的な形としては ZnSe 板等で密閉し、窒素濃度を窒素雰囲気下において、噴出孔とチップを十分な距離を保ちつつリフローすることであるといえる。しかしながら、現行の窒素流入に伴う OH⁻基の影響の軽減は認められなかったため、従来手法においても影響は軽微なものであると考えられる。したがって、今後窒素ページは不要であるという形で結論付けられた。

第4章結論

本研究の目的は安定的な高 Q 値のシリカトロイド共振器の作製をすることであり、そのパラメータとして

- ・パワー
- ・リフロー時間

の2つを用いた。くわえて、 OH^- 基吸収による損失 Q_{OH} を削減する目的として、

- ・窒素パーズ

の効果検証を行った。

パワーにおいては30Wが最大出力である本実験系においては2500msリフローする場合パワーを上げるほどより、シュリンクの度合いが大きくなることが分かった。低出力においては時間当たりの入射されるエネルギーとポストからの流出エネルギーが平衡状態になることによりシュリンクがゆっくりになり、途中で終わるものの、Siポストからの熱の流出を超えた入射エネルギーにことでよりポストに近い箇所までシュリンクすることができるといえる。

しかしながらこれは同時にその分リフロー時間によって大きく酸化膜の温度が変化するため、より時間による細やかな制御が必要になるといえる。30W、2500msではシュリンクがポスト根元まで行くほど十分なパワーを加えることができるものの、リフロー時間が過剰であるため焦げが発生した。しかしながら、それを踏まえても多少の焦げであればシュリンクのほうが Q 値への影響が大きいといえる。

これらを踏まえたうえで安定して Q 値が 10^7 のオーダーで製作することが可能になったといえる。

加えて30Wにおけるリフロー時間の変化を見た結果、総合的には30W、2000msのリフローが最も良いと言える。しかしながら、リフロー時間を超過することで Q 値の急激な低下がみられるため、安定した実現においては出力を抑えた方がより再現性が高められるといえる。

今後の展望としては、サーモセンサによるシュリンク時の温度変化や、真空におけるリフローおよび測定によって 2.1×10^8 が成功しているので結晶構造を見ることにより Q 値に変化を及ぼしている可能性を考え、今回窒素パーズが効果をなさなかったのは窒素パーズが不十分だったからかそれとも測定側までの間に吸着することによって発生しているのか判明する必要があると考えられる。

また、今回200 μm のディスクを用いたが、径を変化させた際の最適値を探ることにより総合的なリフローの最適化に期待したい。

参考文献

- [1] 総務省(令和4年)田園都市国家インフラ整備計画
- [2] BIPM, Résolution 3 de la 27e CGPM (2022)
<https://www.bipm.org/fr/cgpm-2022/resolution-3>
- [3] デロイトトーマツミック経済研究所株式会社『省エネ・ゼロエミッション化に向けたデータセンタ市場の実態と将来予測 2022年度版』
- [4] 国立研究開発法人科学技術振興機構低炭素社会戦略センター 情報化社会の進展がエネルギー消費に与える影響 (Vol.2) -データセンター消費エネルギーの現状と将来予測および技術的課題
- [5] F. Vollmer and S. Roy, "Optical resonator based biomolecular sensors and logic devices," *J. Indian Inst. Sci.* **92**, 233–251 (2012).
- [6] K. J. Vahala, "Optical microcavities," *Nature* **424**(6950), 839–846(2003).
- [7] 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 Syst.* **5**, 84–93(2011)
- [8] Gerard, J. M. et al. Enhanced spontaneous emission by quantum boxes in a monolithic optical microcavity. *Phys. Rev. Lett.* **81**, 1110–1113 (1998).
- [9] Gayral, B. et al. High-Q wet-etched GaAs microdisks containing InAs quantum boxes. *Appl. Phys. Lett.* **75**, 1908–1910 (1999).
- [10] Djordjev, K., Choi, S. J. & Dapkus, P. D. Microdisk tunable resonant filters and switches. *IEEE Phot. Technol. Lett.* **14**, 828–830 (2002).
- [11] Rabiei, P. Steier, W. H., Cheng Zhang and Dalton, L. R. Polymer micro-ring filters and modulators. *J. Lightwave Technol.* **20**, 1968–1975 (2002).
- [12] Srinivasan, K., Barclay, P., Painter, O., Chen, J., Cho, C. & Gmachl, C. Experimental demonstration of a high quality factor photonic crystal microcavity. *Appl. Phys. Lett.*(in the press).
- [13] Hood, C. J., Lynn, T. W., Doherty, A. C., Parkins, A. S. & Kimble, H. J. The atom-cavity microscope: Single atoms bound in orbit by single photons. *Science* **287**, 1447–1453 (2000).
- [14] Buck, J. R. and Kimble, H. J. Optimal sizes of dielectric microspheres for cavity QED with strong coupling. *Phys. Rev. A* 033806 (2003).
- [15] Vernooy, D. W., Ilchenko, V. S., Mabuchi, H., Streed, E. W. & Kimble, H. J. High-Q measurements of fused-silica microspheres in the near infrared. *Opt. Lett.* **23**, 247–249 (1998).

- [16] Armani, D. K., Kippenberg, T. J., Spillane, S. M. & Vahala, K. J. Ultra-high-Q toroid microcavity on a chip. *Nature* **421**, 925–928 (2003).
- [17] Udem, T., Holzwarth, R. & Hänsch, T. Optical frequency metrology. *Nature* **416**, 233–237 (2002).
- [18] F. Vollmer, S. Arnold & D. Keng, Single virus detection from the reactive shift of a whispering-gallery mode, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **105**, 20701-20704, (2008)
- [19] T. Tajiri, S. Matsumoto, T. Imato, T. Okamoto and M. Haraguchi, "Characteristics of whispering gallery mode in microsphere covered antigen-antibody layer at attenuated-total-reflection configuration," *SENSORS*, 2014 IEEE, pp. 641-644, (2014)
- [20] Rosenblum, S., Lovsky, Y., Arazi, L. et al. Cavity ring-up spectroscopy for ultrafast sensing with optical microresonators. *Nat Commun* **6**, 6788 (2015).
- [21] [W. Yoshiki, Study on an optical switch in a silica toroid microcavity using Kerr effect. thesis (Keio University, 2013)]
- [22] [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 graduate thesis (Keio University, 2012)]
- [23] Peng, B., Özdemir, Ş., Lei, F. et al. Parity–time-symmetric whispering-gallery microcavities. *Nature Phys* **10**, 394–398 (2014).
- [24] Kuniaki KIHARA: Crystal Structures of Silica Polymorphs and their Phase Transitions, *日本結晶学会誌*, **43**, 218-226(2001)
- [25] R. Brückner, Properties and structure of vitreous silica. I, *Journal of Non-Crystalline Solids*, **Volume 5**, Issue 2, Pages 123-175, 1970
- [26] Hattori, T. Igarashi, M. Ohi and H. Yamaguchi, "Chemical Bonds at and Near the SiO₂/Si Interface", *Jpn. J. Appl. Phys.* **28**, L1436 (1989).
- [27] V. Swamy and Surendra K. Saxena "A thermodynamic assessment of silica phase diagram" *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, VOL. 99, NO. B6, PAGES **11,787-11,794**, JUNE 10, 1994
- [28] V. Swamy and Surendra K. Saxena "A thermodynamic assessment of silica phase diagram" *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, VOL. 99, NO. B6, PAGES **11,787-794**, JUNE 10, 1994
- [29] Takayoshi SHIMURA, Masataka UMENO, "The Crystalline SiO₂ in the Thermal Oxide Layers on Si Substrates", 『放射光：日本放射光学会誌 = *Journal of the Japanese Society for Synchrotron Radiation Research*』 **10(3)**, 286-298, 1997
- [30] Ostby, Eric Paul (2009) Photonic Whispering-Gallery Resonators in New

- Environments. Dissertation (Ph.D.), California Institute of Technology
- [31] EOPC - SH-66 Optical Shutter and pulse picker EOPC official website
<https://eopc.com/sh66.html>