

光ファイバに直接接合可能な極低パワー動作全光スイッチに関する研究

研究代表者

田邊 孝純

慶應義塾大学 理工学部 准教授

1 はじめに

光技術はインターネットの大容量データ伝送などで我々の生活を支えている。インターネットを流れる通信量は今後も増加の一途を辿ると考えられており、関連機器が使用する電力は将来的には世界の消費電力の10%に達すると試算されている。光ネットワークにおいて、さらなる大容量化を図るためには、データの行先を切り替えるノードの高性能化が欠かせない。原理的にはデータを並列処理することで、さらなる高速化が図られるが、実際には速度を制限する要素は別にある。それが消費電力である。現在ネットワークで用いられるノードでは、光で到着した信号を一度電気に変換し、電気的に処理をしたのちに、再び光に変換して送信している。電気光、光電気変換におけるオーバーヘッド、さらには電気的な信号処理は多くのエネルギーを消費する。もし、光で信号処理ができればエネルギー消費は減少できるが、信号処理は未だ電子技術に頼っている。光信号処理は光と双極子の相互作用が小さいため、結果的に要するパワーが大きくなってしま

う。超低電力光デバイスを実現するための課題について考えると、光は高速が故に物質との相互作用が弱くそれが光制御デバイスの低エネルギー化を阻んでいるので、それを解決するために、光を微小空間に強く閉じ込め、光と物質の相互作用を強め、省電力光信号処理を実現させればよい。つまり、省電力光信号処理を実現させる技術は、高性能な微小光共振器の開発に帰着される。

光信号処理研究は古くは1970年代から、1990年代にかけて盛んに報告されてきたが、当時は素子が大きすぎて消費電力が大きく、実用化に結ぶつくことはなかった。しかし近年の微細加工技術の進展に伴い、高性能な微小素子が作製できるようになった。それに伴い、微小光共振器の基本性能も向上し、これらの素子を光信号処理に応用することもできるようになってきた。

微小光共振器にはフォトニック結晶やシリコンマイクロリング共振器等が挙げられ、それらの素子は光集積回路への利用が期待されるが、光ファイバとの親和性は高くはない。それは、シリコンの屈折率が高いため、光ファイバへの結合が難しいためである。本研究では、シリカ及び結晶材料による微小光共振器に特に着目している。それは、シリカは光ファイバで利用されているように極めてロスが小さい素子であり、さらにはバンドギャップも広いため、光非線形効果を効果的に利用できるためである。加えて、直接光ファイバに接合出来る特徴を有している。

2 テーパ光ファイバ作製

微小光共振器は通常全反射を用いて光を閉じ込めるため、レーザを直接照射しても光を励振できない。そこで、エバネッセント光を介して光を結合する必要がある。エバネッセント光を励振するために、我々はテーパ光ファイバを用いた。

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

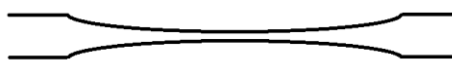


図1：テーパ光ファイバの図

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

テーパ光ファイバを実際に作製するにあたり、テーパ形状が必要となる。本研究では、次の手順により特

定の位置におけるテーパファイバの太さを得た。

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

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

(1)式を整理すると、

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

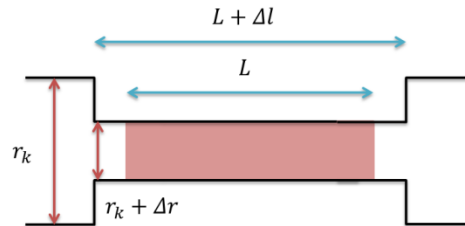


図 2:加熱範囲

ここで、加熱範囲を一定範囲に固定することを考えているため、半径 r_k 、長さ $\Delta l/2$ の円柱が次々と形成されることとなる。(2)式を繰り返し適用することにより、図 3 のようなテーパ形状が得られる。実際には連続時間で行うため、なめらかな形状となることは明らかである。

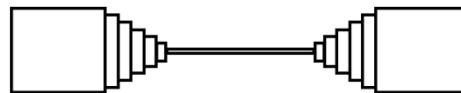


図 3 : 作製するテーパ光ファイバの形状の説明図

後述する作製装置の制約より、引張速度 $v=240 \mu\text{m/s}$ 、加熱範囲 $L=3 \text{ mm}$ 、1 ステップ時間を $t=0.1 \text{ s/step}$ とすると、 $\Delta l=t \times v=24 \mu\text{m/step}$ と表せる。図 4 に示すように、後述する作製法により実際に作製した実測点と比較すると、 $L=3 \text{ mm}$ とすればよいことが分かった。ゆえに、以後はこの図の青線で示される関係を基にして、必要な太さのテーパを得るための引き時間を求めることにした。

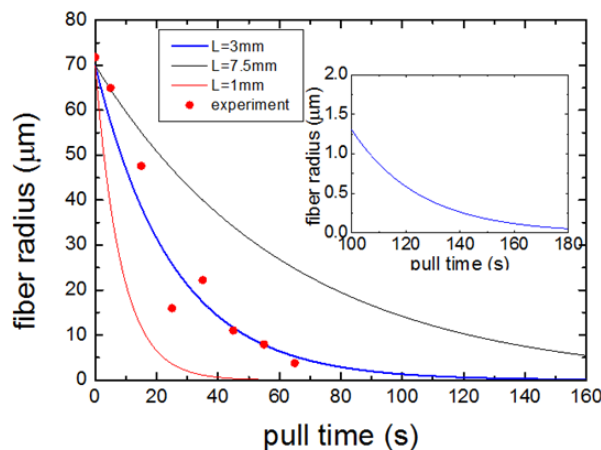


図 4: テーパファイバの引き時間と最小直径の関係

上記の計算で得られた形状に対してモード伝搬解析を行った。解析にはビーム伝搬法を用いた。図 5 は伝搬に伴う光のファイバ内外の強度を表している。これより、直径 600 nm のとき、最大で 40%の光がしみ出すことが分かった。微小光共振器に導入する光の量としては十分であるため、直径 600 nm を目標として作

製することとした。

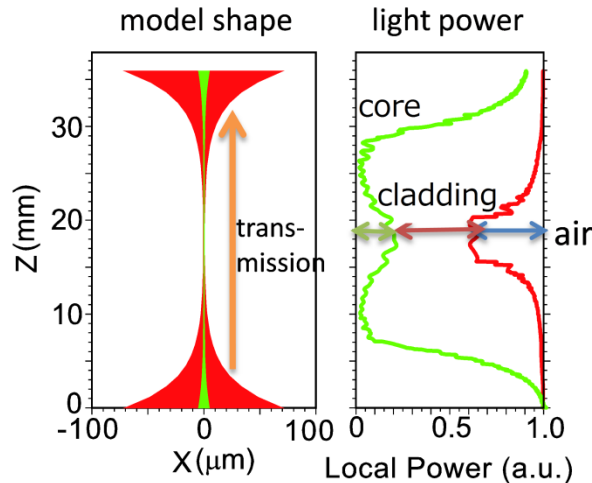


図 5: BPM に用いたモデル(a)と z における光パワー(b)

テーパ光ファイバを作製するにあたって、ファイバを加工する温度は重要な要因である。光ファイバの材料である石英ガラスの作業温度は 1900~2100 K である。この温度の燃焼炎を発生させるには、LP ガスと酸素ガスの mol 比を 2.8:5 とすればよい。この mol 比では LP ガスは燃焼により CO , CO_2 へと変化し、煤が発生しない。今回用いた装置では、LP ガス圧を 0.0686 MPa、酸素ガス圧を 0.1 MPa としているので、流量比に直すと 7:10 となる。本研究ではこの比をバーナーの流量比として採用した。

図 6 に、今回テーパ光ファイバを作製した装置を示す。中央にあるバーナーで光ファイバを熱しながら、左右に一定速度で引っ張ることでテーパを作製する。

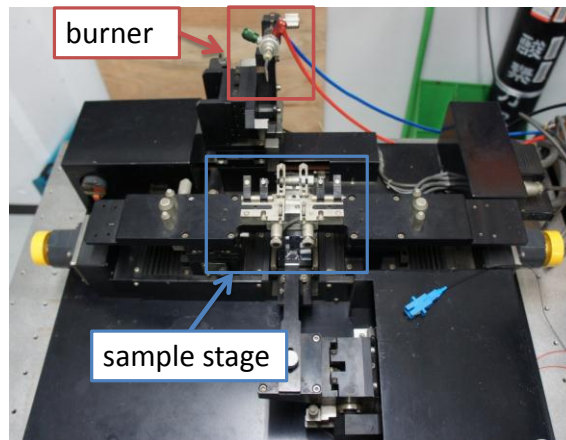


図 6: テーパ光ファイバ作製装置

このようにして作製したテーパ光ファイバの透過損失は 2 dB 程度であることがわかり、光学測定を実施することが可能になった。

言うまでもないが、テーパ光ファイバは他のファイバと直接接合ができるため、共振器の光を直接光ファイバに接合することが可能である。

3 トロイド微小光共振器の作製と評価

3-1 トロイド微小光共振器の作製と評価

シリカトロイド微小光共振器の作製及び、構造を図 7 に示す。

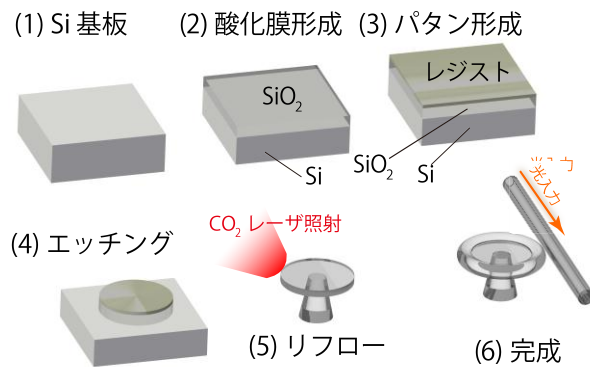


図 7: トロイド微小光共振器の作製手順

作製は初めに Si 基板に水素アニールを施すことで、良質の SiO₂ 膜を形成するところから開始する。その後 SiO₂ をエッチングし、Si 犠牲層を XeF₂ や KOH 等で等方的にエッチングし、ディスク共振器を作製する。その後、CO₂ リフロープロセス装置を用いて表面のラフネスを取り除き、高性能なトロイド共振器を作製する。ここでポイントとなるのが、CO₂ レザリフロー系である。

レーザリフロープロセスの実験セットアップを図 8 に示す。CO₂ レーザから出射した光は可変アッテネータを通過後、Au コートされた Si ミラーによって構成されている顕微鏡系に入射し、ZnSe 球面レンズで集光される。ZnSe レンズによって絞られたレーザ光が XYZ 自動ステージ上のチップに作製されたディスク状構造にリフロープロセスを施す。また、レーザのスポットとディスク状の構造の位置合わせのための観察系も組み込まれており、図 8 に示すようにビームスプリッタによって分離された可視光が CCD カメラへと入射する。

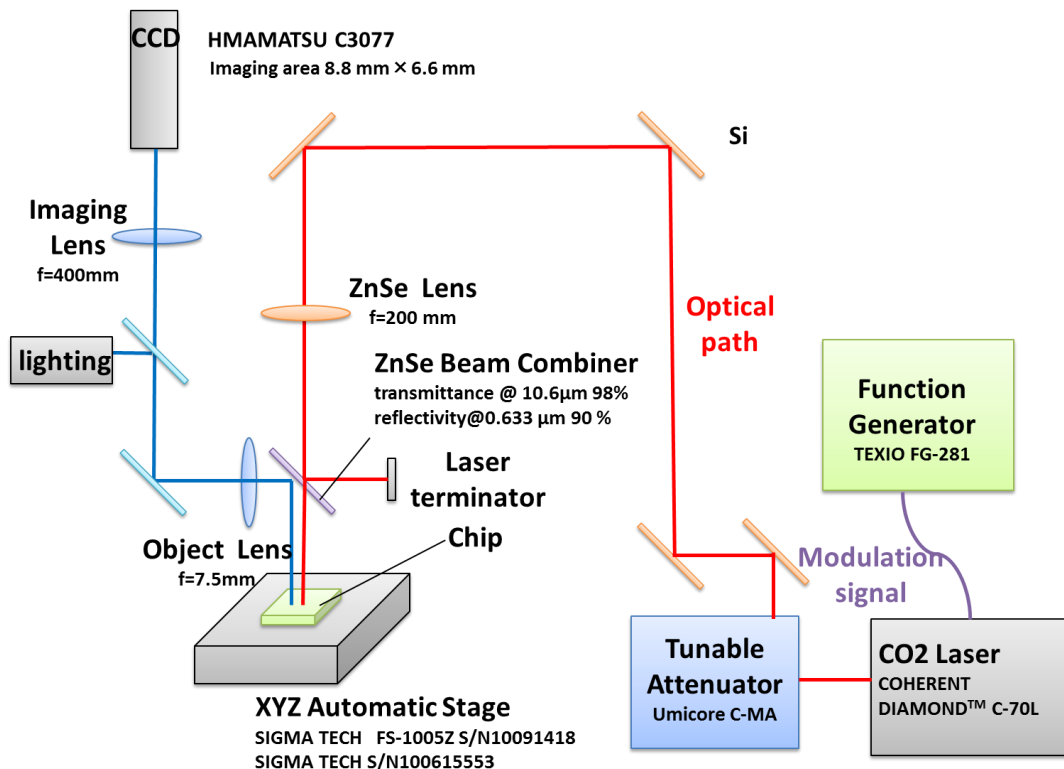


図 8: 実験セットアップ

このようにして作製したトロイド微小光共振器の電子顕微鏡写真を図 9 に、透過スペクトルを図 10 に示す。共振器の共鳴波長でディップとなるスペクトルが得られる。微小光共振器のリフローが不完全で、綺麗な円形状をした共振器が得られないと、図 10(a)のようなスペクトルが得られるのに対して、対称性の優れ

た共振器では図 10 (b)のように等間隔な自由スペクトル領域(Free Spectral Range: FSR)となるスペクトルが得られる。対称性が優れた共振器を得るためには、レーザーリフロを最適化する必要があった。CO₂レーザーをディスク共振器に均一に照射すると、下層のSiの熱伝導率が高いためヒートシンクの役割を果たし、熱を基板の下側へと放熱する。その結果、ディスクの淵のみが熔融し、滑らかなトロイド構造が得られる。つまり、いかにして均一なレーザー照射を実現するかがポイントとなる。レーザービームはある程度大きい方が良いが、照射可能なレーザーパワーには限界があるために、最適値として、ビーム直径が 267 μm となるように設計した点がポイントである。

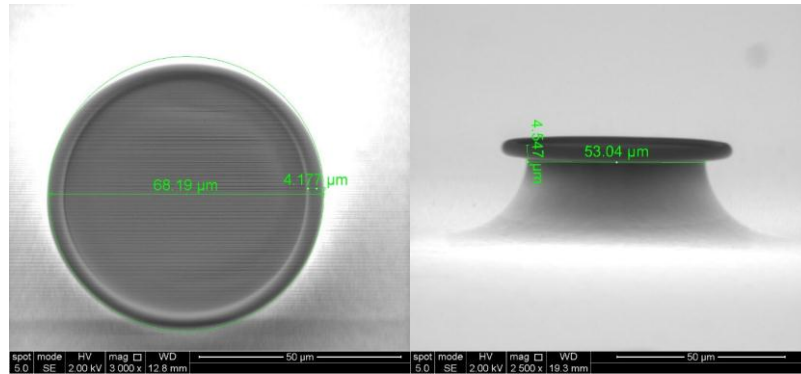


図 9: 作製したトロイド微小光共振器の電子顕微鏡写真

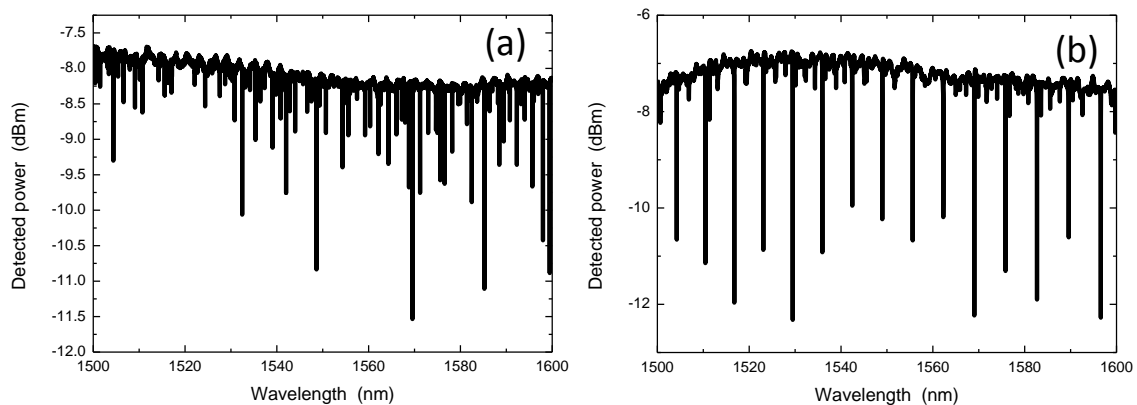


図 10: (a) 均一性の優れないトロイド微小光共振器の共鳴スペクトル。(b)対称性の優れたトロイド微小光共振器の共鳴スペクトル。

3-2. レーザリフロの最適化

レーザーリフロの最適化は本研究においてきわめて重要であるので、それについて以下述べる。

熱分布解析を実施することで、最適な照射条件を求める。シミュレーションに用いたシリカトロイド微小光共振器の構造について説明する。今回は直径が 100 μm と 25 μm のディスクの 2 つケースを仮定した。直径 25 μm のディスクには、高さは 1 μm 、半径 12.5 μm のシリカディスクと高さ 5 μm で半径が 7.5 μm の円柱型のシリコンポストを仮定した。直径 100 μm のディスクには、高さ 1 μm で半径 50 μm のシリカディスクと、Si ポスト部分には半径高さ 5 μm で半径が 30 μm の円柱を用いた。どちらも Si ポストの直径が SiO₂ の直径に対して 3/5 になるように設定した。5 W の CO₂ レーザビームを照射した場合について解析した。シリカの反射率、シリカ膜厚から計算される 10.6 μm における吸収率、さらには、集光レーザービームとシリカディスク共振器との面積比を考慮して、100 μm のディスクの熱源は $1.61 \times 10^{13} \text{ W/m}^3$ 、25 μm のディスクの熱源は $6.5 \times 10^{13} \text{ W/m}^3$ と設定した。図 11 にシミュレーションの結果を示す。

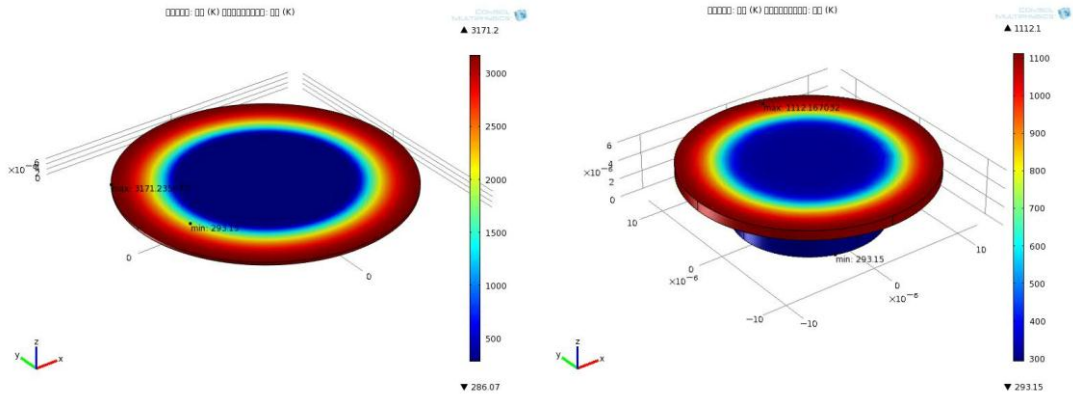


図 11: 有限要素解析による熱解析. (左): 直径 100 μm , 熱源: $1.61 \times 10^{13} \text{ W/m}^3$, (右): 直径 50 μm , 熱源: $1.61 \times 10^{13} \text{ W/m}^3$

図 11 より, 直径 100 μm のディスクの外縁部の最高温度は 3171 K であることがわかる. それに対し直径 25 μm のディスクの外縁部の最高温度は 1112 K となった. SiO_2 の融点は約 2000 K (1650 $^\circ\text{C}$) であるので, 同じ照射パワーでも直径 25 μm のディスクはリフローできないことがわかる. この最高温度の差異は, 直径 100 μm のディスクではガウスビームの 23.1% がディスク表面に到達するのに対し, 直径 25 μm のディスクでは 5.84% しか到達しないことに起因する. ビームスポット径に対してディスクが小さいためにパワー量が足りない.

次に Si ポストの大きさを変えてシミュレーションを行った. SiO_2 部分の直径は 100 μm とし, パワーは 5 W (熱源 $1.61 \times 10^{13} \text{ W/m}^3$) を照射させたとする. このときの外縁部の最高温度の変化を図 12 に示す. 横軸は Si ポストの直径を示し, 縦軸は外縁部の最高温度を示している.

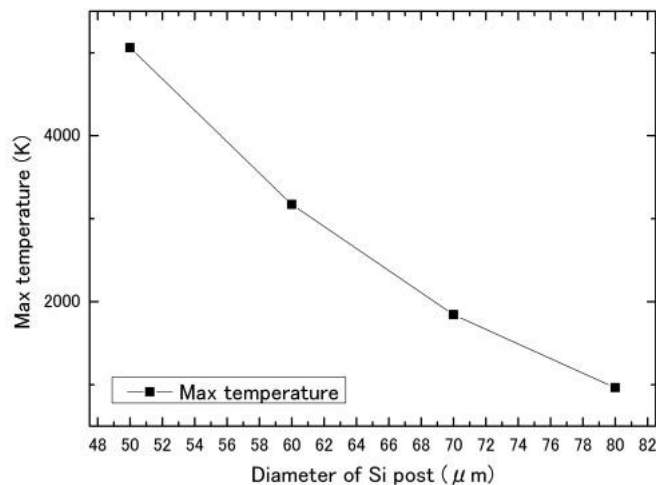


図 12: シリコンポスト系と最高温度の関係

図 12 より, Si ポストが大きくなるにつれ外縁部の最高到達温度が下がることがわかる. これは Si ポストが大きくなると Si 部分への熱流量が増え, 外縁部の温度が上がらないためである. 同じディスク直径でもリフローできるものとできないものがあるのは, Si ポストの大きさの違いである.

次に, 過渡解析を行い, 熱平衡に達するまでのディスクの温度の時間的な変化について行ったので, その結果を示す. 図 13 示すのは, 0.1 ms ごとの温度変化である. 横軸はディスクの中心からの距離を示し, 縦軸は表面の最高温度を示している.

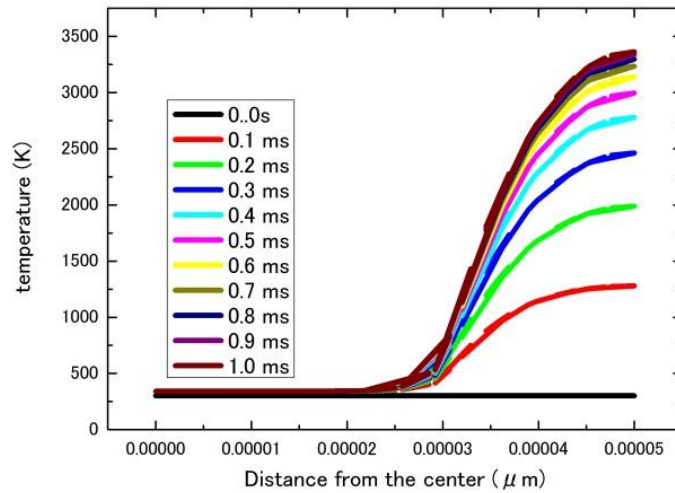


図 13: 照射時間を変化させたときの中心からの温度分布

図 13 より、外縁部は 1.0 ms 付近で平衡状態に達することがわかる。以上のシミュレーション結果から、直径 100 μm のディスクをリフローするために、5 W~8 W の CO₂ レーザビームを直径 267 μm に集光し、50 ms 間照射することとした。

図 14 に示すのはリフロー前のディスク型共振器である。直径は 98.87 μm 、SiO₂ 膜の厚みは 1.24 μm であった。リフロー後のシリカトリッド微小光共振器の SEM 画像を、Fig. 11 に示す。レーザ照射パワーは 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) で照射時間は 50 ms でリフローを行った。直径は 90.16 μm 、SiO₂ 膜の厚みは 2.63 μm であった。

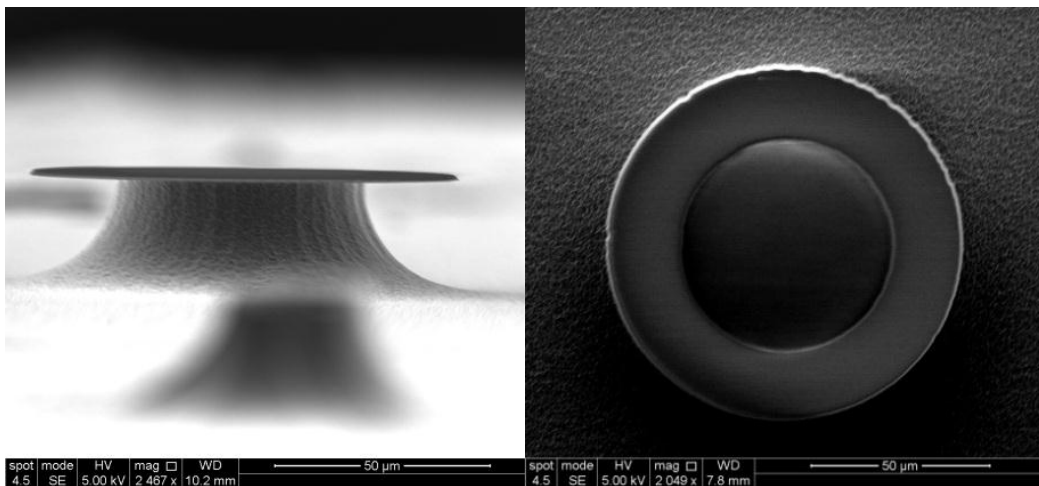


図 14: ディスク共振器(レーザリフロー前)

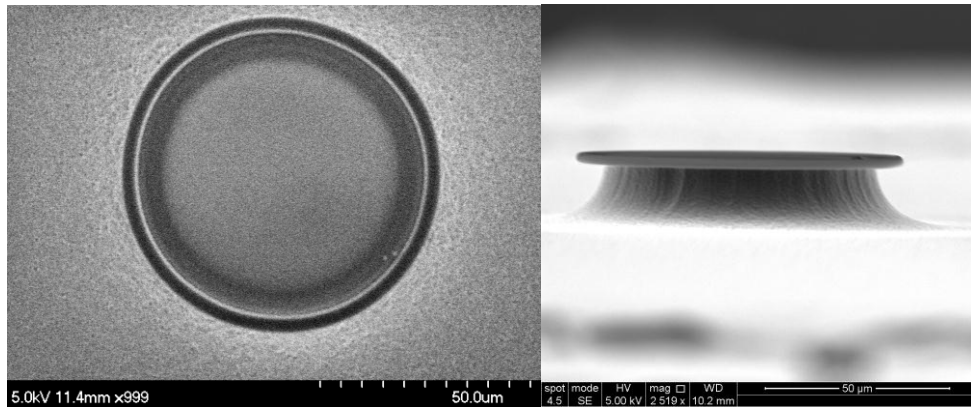


図 15: トロイド微小光共振器. Reflow power: 10^4 MW/m², Reflow duration: 50 ms.

図 14 と図 15 を比較すると、外縁部が収縮し円環状となっていることが確認できる。また、リフロー前の直径 98.87 μ m に対し、リフロー後直径が減少していることと、酸化膜の厚みが 1.24 μ m から増加したことから収縮が確かめられる。

最後に、こうして作製したトロイド微小光共振器の光学測定結果を図 16 に示す。共振器の Q 値は共鳴スペクトル幅より求め、 1.7×10^6 が得られた。同様にして現在までに 3×10^6 が得られるようになっている。

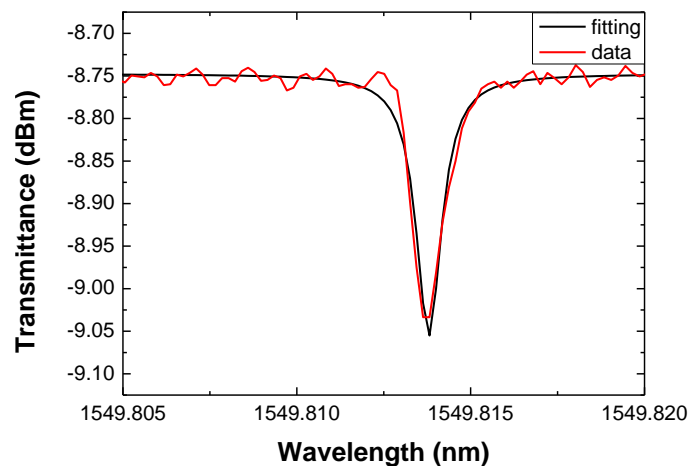


図 16: トロイド微小光共振器の共鳴スペクトル

高 Q 値微小光共振器を用いた研究が抱えている共通の問題の一つに、作製誤差の内在により、共振器の共鳴波長のチューニングが困難となり、共振器ネットワークの実現や他の素子との共鳴波長の調整が困難であることが挙げられる。そこで我々は、微小光共振器の共鳴波長のチューニングのデモンストレーションを実施した。

既に、プロセスの条件が固まれば Q 値に大きな揺らぎが見られることはないことがわかっている。一方、共鳴波長はわずかなプロセス誤差が原因で揺らぐため、実際の素子で狙った設計波長を直接得るのは難しい。それに対する解としては、作製した共振器の特性を評価後に追加プロセスを施すことで精密な波長制御を実現することが現実的である。そこで、我々は現在ポストプロセスの実行による共鳴波長のチューニング技術の開発を行い、図 17 に示す結果を得た。作製したトロイド微小光共振器に追加リフローを施し、共鳴波長を制御できることを示した。本手法単独ではこれまでに目的とする精度での制御は実現できてはいないものの、本手法に温度チューニングを組み合わせることで各素子の波長を精密に制御できることが期待される。

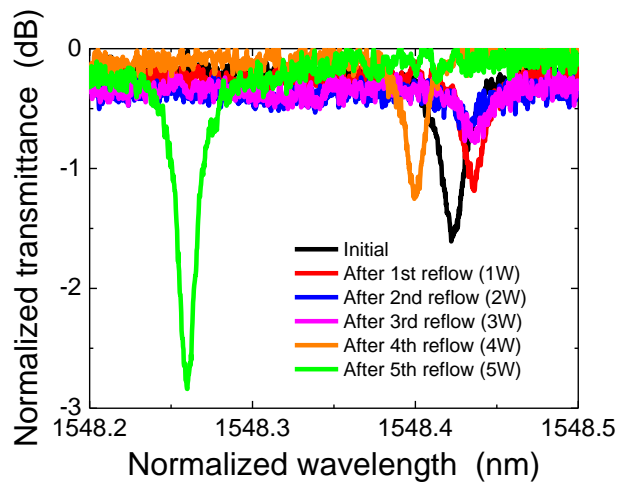


図 17: 追加リフローによる共鳴波長制御の実験結果

4 結晶材料による微小光共振器の作製と評価

結晶材料は一般的にシリカよりも光の損失が低く、高性能な共振器を作製することができる。特に CaF_2 やサファイア等の結晶等は赤外光において低い吸収特性をもつので、通信応用のみならず光センシング応用も拓ける。しかし、結晶材料は、シリカのようなレーザーリフロープロセスを利用できないため、これまでは精密加工や研磨を用いて共振器を作製してきた。しかしながら、小さいサイズの共振器を作製することが困難であるために、新たな手法の開発が望まれる。

レーザー溶融ペDESTAL法 (LHPG 法) はチョクラ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。そのため、チョクラスキー法とは違い、結晶を細く、均一に成長させる目的で発展してきた。結晶ファイバは図 18 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。ここまでの一般的な用いられている LHPG 法の作製手順である。

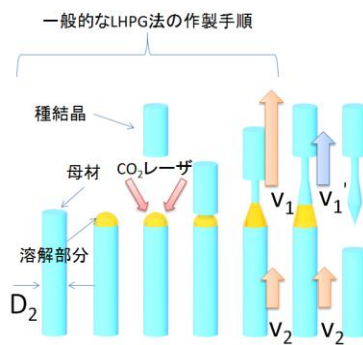


図 18: 結晶成長を用いた Whispering Gallery Mode 微小光共振器の作製手順。

我々はレーザー溶融ペDESTAL法において、成長速度を変化させることで、直径を途中で変化させる構造を作製した。具体的には、種結晶の速度を落として成長させ、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した。この膨らみ部分に光を励振させる。

図 19 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、モード体積は $1.28 \times 10^{-2} \text{ mm}^3$ である。

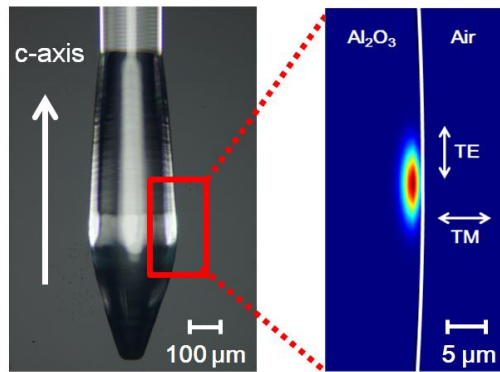


図 19 : LHPG 法を用いて作製された共振器とその形状に対するモードプロファイル. ここでのモードプロファイルは, TE モードのポインティングベクトルを表している.

このようにして作製した共振器の断面形状を図 20(a)に, 光学測定結果を(b)に示す. 断面形状が六角形形状となっており, $Q=8,500$ であった. 解析によって, 断面形状が Q 値に極めて強い影響を及ぼすことがわかったので, 我々は新たにプリヒーティング法を開発し, 断面形状の円形化を試みた. その結果得られた共振器の断面形状が図 20(c)である. 光学測定を行うと図 6(d)に示すように, 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り, 断面形状を制御することで, 高 Q 値なサファイア結晶による微小光共振器を作製できる可能性が示された.

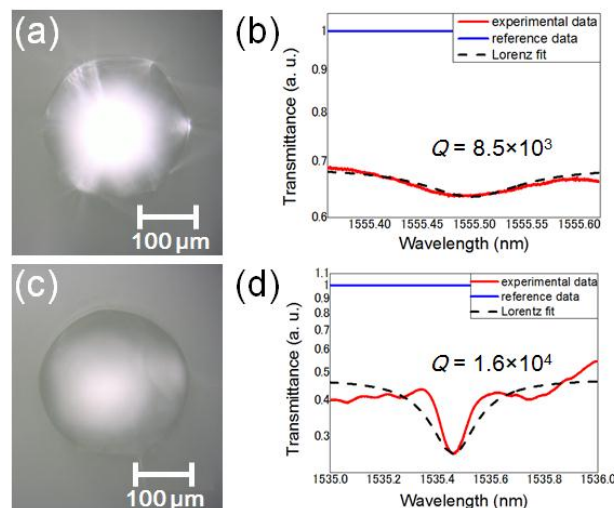


図 20: (a) 断面が六角形状の共振器. (b) 六角形状の共振器に対する光学測定結果. (c) 断面が円形状の共振器. (d) 円形状の共振器に対する光学測定結果.

5 八角形トロイド共振器の作製

5-1 多角トロイド微小光共振器

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 of の発生や Cavity-QED, バイオセンシング等への応用が期待されている. 前述のように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 sub- μm 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. つまり, 構造を設計することによって, 共振器とテーパファイバの結合を最適化し, 機械的安定性に優れた系を構築することで, 系を実験室の外に持ち出すことを可能とさせる.

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. シリカトロイド微小光共振器の作製は前述のように(1) フォトリソグラフィ, (2) シリコンエッチング, (3) レーザリフロ の 3 つのステップに分けられる. 図 21 はこのプロセスの(2)と(3)について示している. 通常の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.

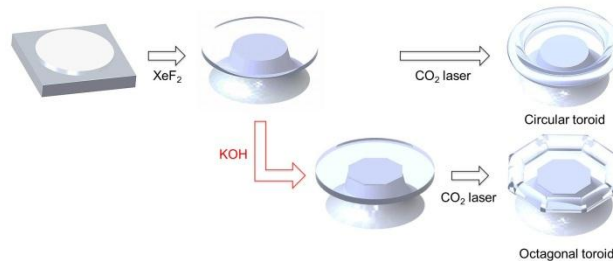


図 21: トロイド共振器の作製プロセス. 通常のプロセスに KOH 水溶液の異方性エッチングを加えることで多角形状化を行った.

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 22 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.

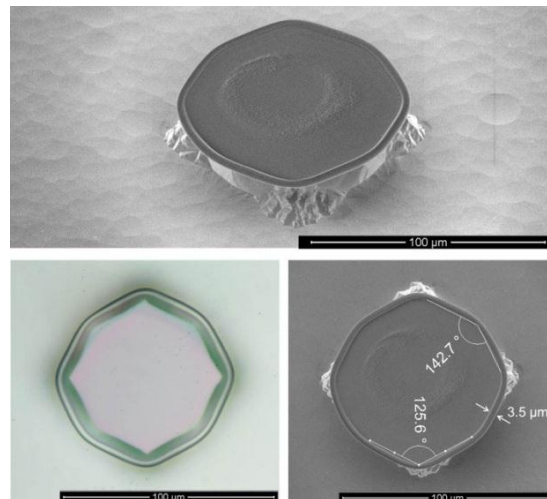


図 22: 8 角形トロイド共振器の作製結果. この作製法による共振器を用いて光学特性評価を行った.

5-2 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 23 (a)のように綺麗なシリコンの柱が形成された. レーザリフロを施すと図 23(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.

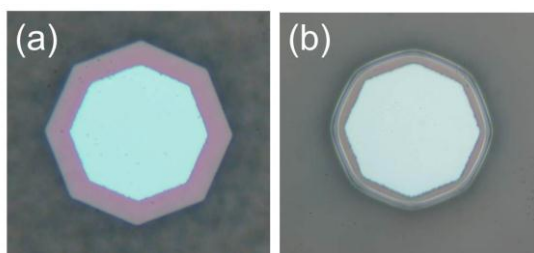


図 23 : 8 角形のシリカディスクから作製した (a) 等方性エッチング, (b) レーザリフト 後の 8 角形トロイド共振器.

5-3 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,

$$Q_{\text{load}}^{-1} = Q_{\text{unload}}^{-1} + Q_{\text{coup}}^{-1} \quad (3)$$

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 24 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. 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.

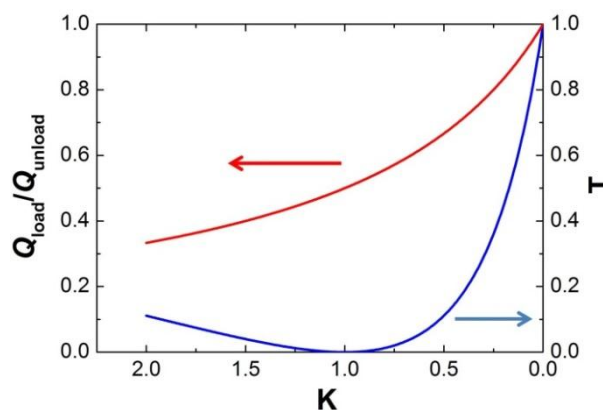


図 24 : 結合係数 κ と実効的な Q 値 Q_{load} (赤線), テーパファイバの透過率 T (青線) の関係.

5-4. 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 25 に示す. 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.

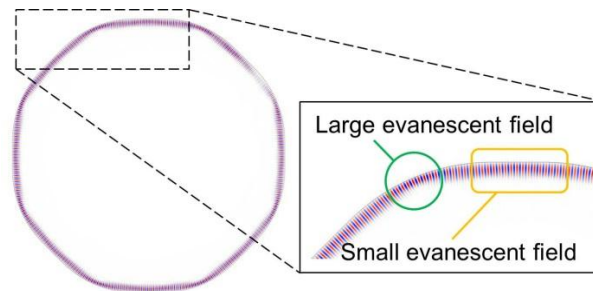


図 25 : FDTD を用いた 8 角形トロイド共振器内の共振モードのシミュレーション結果. 角に比べて辺の部分では光が共振器の内側を伝搬しているため, 表面付近の光の密度が小さくなっている.

5-5. 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 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 26 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 nm) の透過スペクトルのデータを図 27 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.

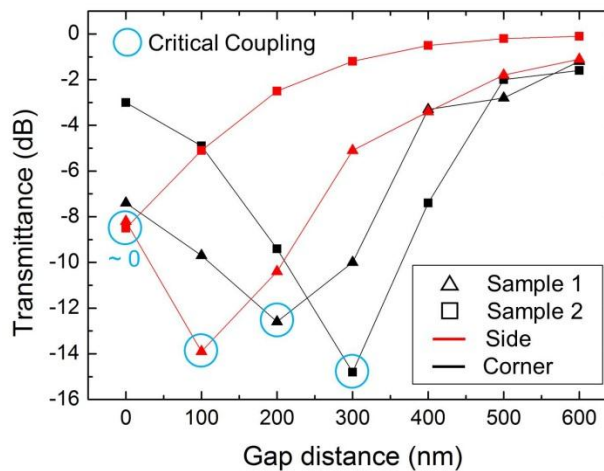


図 26 : 共振器にテーパファイバを接近させたときの透過率の変化. 辺と角に対する結合がそれぞれ赤, 黒線で表されている. 辺に対する結合の方がより共振器に近い位置で critical coupling が生じているのがわかる.

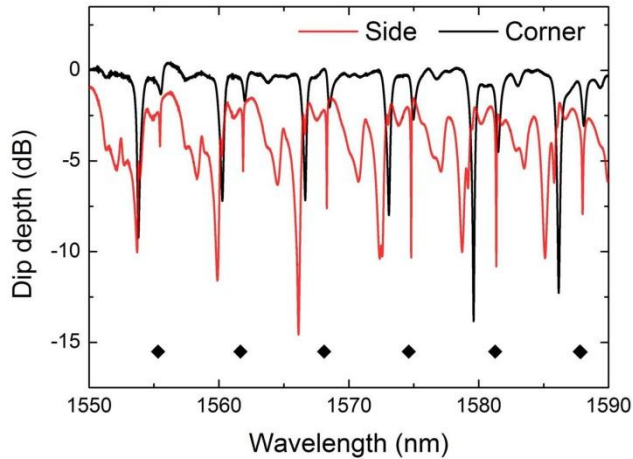


図 27：共振器にテーパファイバを接触させたときの透過スペクトル．辺と角に対する結合がそれぞれ赤，黒線で表されている．点は同じ共振モード(共振波長)を表しており，これにより比較を行った．

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．

6 シリカトロイド微小光共振器中の非線形スイッチ・非線形メモリ

6-1 厳密なモデル計算による双安定メモリの解析

我々は初めに，シリカトロイド微小光共振器を用いて，非線形スイッチや非線形メモリが実現できるか否かを調査した．まず，シリカトロイド微小光共振器にテーパ光ファイバを近づけた系 (Fig. 1(a)) を仮定し，光共振器中の光エネルギーの時間的変化をモデル化する．光双安定メモリの入出力特性は共振器内部に蓄えられた光エネルギーに依存して変化するため，光共振器内部の光エネルギーのモデル化は光メモリの入出力のモデル化と同義である．今，結合モード理論を用いれば，光共振器内部の光エネルギー $U_p(t)$ に関する微分方程式は以下のように表せる．

$$\frac{dU_p(t)}{dt} = -\frac{1}{\tau_{ph}} U_p(t) + \sqrt{T_{in}(t)} P_{in}(t) \quad (4)$$

ただし， $P_{in}(t)$ はテーパから入力するパワー， $\sqrt{T_{in}(t)}$ はテーパから共振器へのパワー透過率を表す．また

$1/\tau_{ph}$ は

$$\frac{1}{\tau_{ph}} = \frac{1}{\tau_{abs}} + \frac{1}{\tau_{scat}} + \frac{1}{\tau_{coup}} \quad (5)$$

と表すことのできる，テーパとの結合をも含めた共振器の全光子寿命である．ただし， τ_{abs} は共振器の吸収に対応する光子寿命， τ_{scat} は共振器中における散乱に対応する光子寿命， τ_{coup} はテーパとの結合に対応する光子寿命である． τ_{abs} 及び τ_{scat} は共振器の材料と構造によって決まる共振器固有の値であるが， τ_{coup} は共振器-導波路間のギャップの大きさを変えることによって調整可能な値である．

共振器-テーパ透過率 $\sqrt{T_{in}(t)}$ は共振器の屈折率変化に依存するため，式(1)を逐次的に解くためには共振

器内の屈折率変化を先に求める必要がある。シリカ中ではキャリアプラズマ効果は生じないので、T0 効果及び Kerr 効果による屈折率変化 $\Delta n_{T0}(x, y, t)$ 、 $\Delta n_{Kerr}(x, y, t)$ のみをモデル化すれば良い。屈折率変化の解析は Fig. 1(b)に示す 2 次元のシリカトロイド共振器断面モデルを用いて行った。光エネルギーは共振器断面で WG (Whispering Gallery) モードに従う分布をするので、その分布を計算に加えた方がより正確な解析となる。共振器断面の WG モード分布を考慮すると、それぞれの効果による屈折率変化は以下のように表せる。

$$\Delta n_{T0}(x, y, t) = nC_{T0}\{T(x, y, t) - 300\} \quad (6)$$

$$\Delta n_{Kerr}(x, y, t) = \frac{2n_2c}{n} \cdot \frac{U_p(t)}{2\pi R} \tilde{I}(x, y) \quad (7)$$

ただし、 n は屈折率、 $T(x, y, t)$ は 2 次元断面における温度分布、 n_2 は非線形屈折率、 R はトロイド共振器のメジャー半径、 $\tilde{I}(x, y)$ はトロイド断面における正規化された WG モードの強度分布である(形状は Fig. 1(b)に示す通りである)[4]。 $\tilde{I}(x, y)$ の値については事前に求めてある。式(4)を用いることによって Δn_{Kerr} は直接算出可能だが、式(6)によって Δn_{T0} を求めるためには先に温度分布 $T(x, y, t)$ を求める必要がある。これは Fig. 1(b)の 2 次元モデルに有限要素法(FEM)を適用して熱拡散方程式を解くことによって求めることができる。

まとめると、式(2)～(4)を組み合わせることによって式(1)を逐次的に解くことが可能となるので、 $U_p(t)$ の時間的変化を計算することができる。

シリカトロイド微小光共振器中での光 Kerr 双安定メモリを解析するにあたって最も重要となる物理量は、吸収に対応する光子寿命 τ_{abs} である。 τ_{abs} は共振器中で発生する熱の大きさを決める定数であるので、この大きさ次第で T0 効果による影響がどの程度生じるのかが変わってくる。シリカの材料吸収から算出される吸収係数は約 $\alpha = 3 \times 10^{-5} \text{m}^{-1}$ と非常に小さいが、実際には、シリカ表面に吸収体が付着することにより吸収係数が材料吸収よりも遥かに大きくなることが知られている。従って本解析においては、吸収体による吸収を考慮した現実的なケース($\alpha = 0.021 \text{m}^{-1}$)を仮定して解析する。

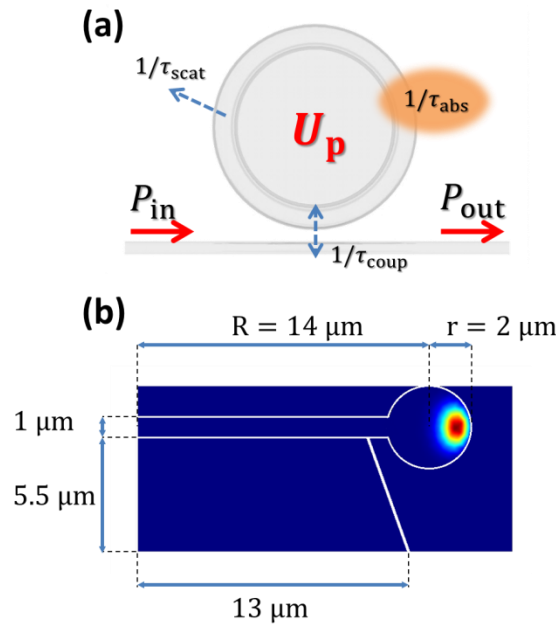


図 28: (a)解析に用いた共振器構造。(b)トロイド微小光共振器の断面モード分布。

図 29 に $1 \mu\text{s}$ の時間幅を持つ矩形波を入力した時の屈折率変化 Δn_{Kerr} 及び Δn_{T0} の時間的変化を示す。グラフ中の実線は Kerr 効果による屈折率変化、点線は T0 効果による屈折率変化であり、縦軸は $\Delta n_{Kerr, \max} = 1$ となるように正規化されている。色の違いは τ_{coup} の違いを表している。この図よりまず分かることは約 800 ns が経過するまでは光 Kerr 効果が T0 効果を上回っているということである。すなわち、この時間中であれば、光 Kerr 双安定メモリを実現できる可能性がある。次に分かるのは τ_{coup} の大きさによって Δn_{T0} の応答速度が変化するという点である。 τ_{coup} が大きい時には応答速度が遅いが、小さい時には応答速度が非常に速くなっている。これは直感的には、 τ_{coup} が小さい方が共振器—導波路間の結合が強くなりエネルギーの入出力が

行われやすくなることに起因する。さらに、 τ_{coup} が小さいほど Δn_{Kerr} がフラットな領域が広いということも分かる。光 Kerr 双安定メモリとして使用可能なのは Δn_{Kerr} がフラットな領域のみであるので、光 Kerr 双安定メモリを長く利用するためには、 τ_{coup} 小さく取ることが必要であるという結論が得られる。

図 29 (b)には入力パワー P_{in} と光エネルギー U_p との関係を示す。 $\tau_{\text{coup}} > 10 \text{ ns}$ の領域では波形が歪んでしまっているが、 $\tau_{\text{coup}} \leq 10 \text{ ns}$ の領域では歪みが少なく光 Kerr 効果による光双安定現象を観察できる。 $\tau_{\text{coup}} \leq 10 \text{ ns}$ の時のみ光双安定が観察できるのは前述の通り光の入出力が早いためである。光の入出力が早ければ熱が蓄積して T0 効果の影響が大きくなる前に処理を完了できる。そのため、このような正常な光双安定の形状が得られるのだ。このグラフからも τ_{coup} を小さく取ることの有効性を示す結果が得られた。

しかし実際には、応答速度を速くするために τ_{coup} を小さく取ると、光双安定を得るのに必要な駆動パワーが増大してしまうという問題点がある。図 29 (c)にその様子を示す。ただし図 29 (c)では簡単のため、吸収係数が非常に小さい ($\alpha = 3 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$) 場合を仮定している。この図より、 τ_{coup} を小さくしていくと急激に双安定に要するパワーが増加することが明らかである。これは τ_{coup} を小さくすることによって共振器全体の Q 値が低下することに起因している。

最後に、図 29 (d)に光 Kerr 双安定メモリとして実際に動作させた時のグラフを示す。 τ_{coup} の取り方による違いを明確に表現するため、 U_p は $U_{p,\text{max}} = 1$ となるように、横軸は $t/\tau_{\text{ph}} = 1$ となるように正規化を施して

ある。横軸にも正規化を施しているため、実際の経過時間は τ_{coup} が大きいほど長くなる点に注意が必要である。このグラフより分かることは、 $\tau_{\text{coup}} = 10 \text{ ns}$ の時この共振器系は光 Kerr メモリとして動作するという事である。セットパルス入力後に High 状態へ移行して状態を維持し、リセットパルス入力後は Low 状態へと移行してその状態を維持しているのが分かる。これはメモリとして動作していることを意味している。この時駆動に要したパワーは $P_{\text{drive}} = 1 \text{ mW}$ であり、メモリ保持時間は約 360 ns であった。 $\tau_{\text{coup}} > 10 \text{ ns}$ の時は、セットパルスの入力によって High 状態へ移行はするものの、リセットパルス入力後も High 状態のままになっている。このような振る舞いをするのは、 τ_{coup} が大きいために光の入出力に時間を要するので、その間に熱の蓄積が蓄積して T0 効果が支配的になってしまうためである。

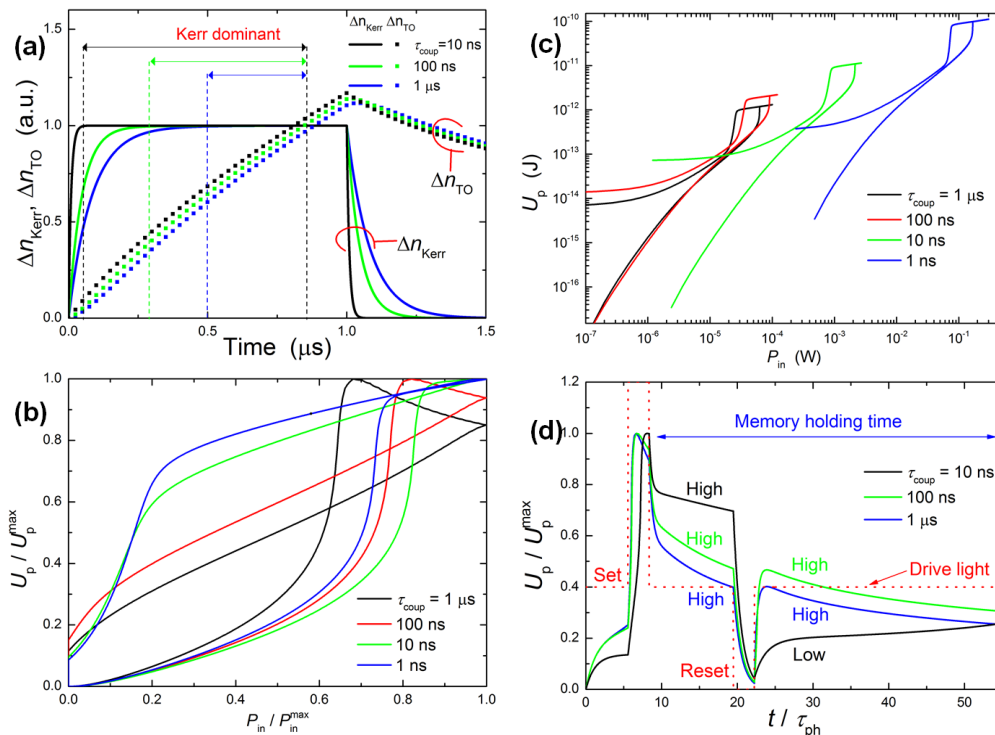


図 29: (a) Δn_{Kerr} Δn_{T0} vs. time for different τ_{coup} (b) 異なる τ_{coup} に対する U_p と P_{in} . (c) 異なる τ_{coup} に対する U_p

と P_{in} (吸収小) (d) 異なる τ_{coup} に対するメモリ動作

シリカトロイド微小光共振器中において、光 Kerr 双安定メモリが共振器—導波路間の結合を調整することにより実現可能であるということ、CMT と FEM を組み合わせた数値解析によって明らかにした。解析した光 Kerr メモリは駆動パワー1 mW、メモリ保持時間約 360 ns という性能を持っている。光 Kerr 双安定メモリの特長はその低損失さであるため、本メモリは光情報処理の分野だけではなく、量子通信の分野にも応用できる可能性がある。

6-2 熱光学による光双安定の確認

シリカトロイド微小光共振器中での、非線形光学効果を確認した。まず、トロイド微小光共振器の透過スペクトル測定を行い、図 30 に示すように、Q 値 2×10^6 を確認した。これは四光波混合をはじめとする光学非線形を得るために十分な Q 値である。そこで、入力光強度を上げて、短波長から長波長側に入射レーザ光を掃引させると、図 30 (b) にみられるように透過スペクトルが大きくひずむことが観測された。これは光学非線形効果による光双安定が生じているためである。本効果は直接的には熱光学効果による光双安定現象が観測されているものであるが、我々が 6-1 で示した詳細な理論解析によれば、本共振器において 3 次光学非線形効果を得られる可能性が高いことがわかる。

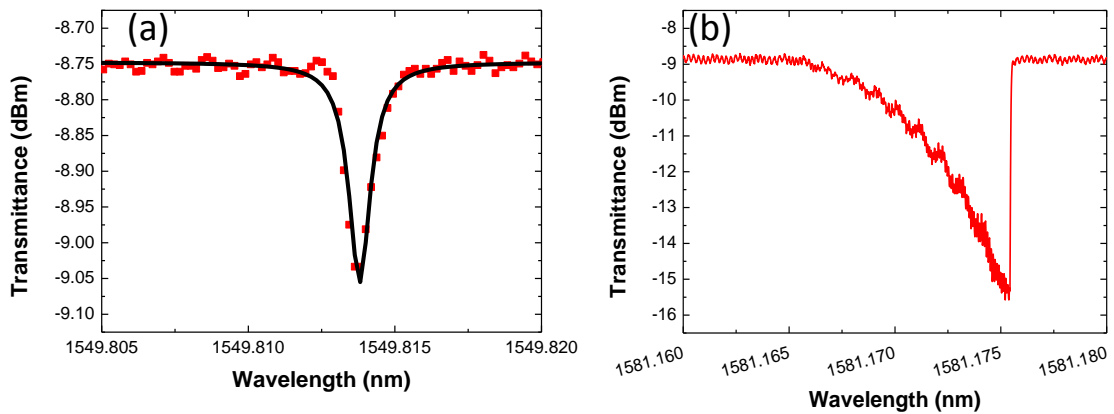


図 30. (a) トロイド微小光共振器の透過スペクトルとローレンツフィット。Q = 2×10^6 が得られた。(b) 短波長から長波長へ入射光波長を掃引した結果。光双安定現象特有の共鳴波長のひずみが観測されている

6-3 光スイッチ実験

続けて、変調光と信号光を同時に共振器に入射させ、光スイッチの実験を行った。実験セットアップを図 31 に示す。

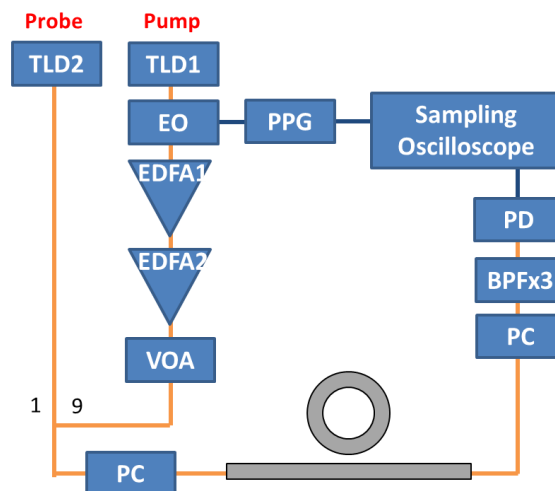


図 31: 実験セットアップ図。TLD: 波長可変レーザ。EO: 電気光変調器。PPG: パルスパターン発生器。VOA:

可変アッテネータ. PC: 偏波コントローラ. BPF: バンドパスフィルタ. EDFA: 光増幅器.

得られた結果を図 32 に示す. 変調光を入射させると, 信号光が変調することが確認できる. しかしながら, 現状はまだ熱光学効果による変調であり, 光カー効果による光変調の実現が課題となる.

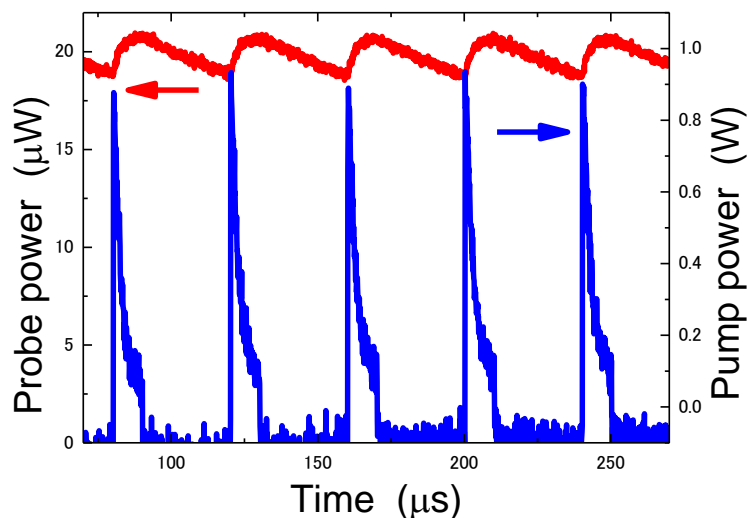


図 31: 熱光学効果による光変調実験結果

図 32 に示した解析によれば, Q 値が 10^6 を超えるあたりから, 急速に効率的な変調が得られるようになる. 図 31 で使用した共振器の Q 値は 10^5 程度であるので, 現在我々のところで得られている最高 Q 値を有する共振器での変調実験が必要となることが示された.

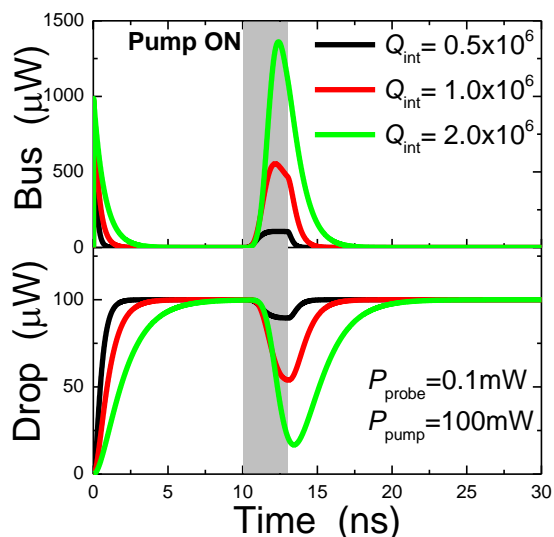


図 32: 異なる Q 値における光カー効果スイッチの変調度の理論解析

6 まとめと今後の展望

本研究では光を直接光ファイバに接合可能な微小光共振器を用いて、超低エネルギーでの光変調を目指した研究を行った。テーパ光ファイバを設計することで、良好な結合が得られることが示された。さらに、共振器を多角形状化するなど、その形状をコントロールすることで、安定した光結合が実現できることも示された。詳細な理論解析を行った結果、駆動パワーは比較的大きくなるが、シリカの優れた透明性とトロイド微小光共振器の高Q値性のおかげで、他の共振器によるものをはるかに凌駕する低損失性が得られることが示された。また、熱光学効果のみでなく、理想的とされる光カー効果による光変調が実現できることが示された。

実際に実験において光変調を実現するために、シリカトロイド微小光共振器及び、結晶材料による微小光共振器の開発を行った。後者は2次の非線形光学定数を有する場合もあり、少数光子非線形光学においては実現できれば魅力的なプラットフォームである。

最後に、シリカトロイド微小光共振器を用いた光変調実験のデモンストレーションを示した。

今後は、光カー効果を用いた光変調を超低損失な系で実現させ、量子情報処理との融合を目指す研究を展開していく予定である。その一方で、今回は光変調に特化して報告したが、シリカ微小光共振器中の非線形光学効果を利用すれば光コムが発生にもつなげることができる。また、高効率ということは高感度ということとほぼ同義であり、超高感度センシング応用にも適用できる。我々は、こうした研究も平行して実施しており、微小光共振器による強い光閉じ込めをキーワードに、光と物質の強い相互作用実現による超微弱光による非線形光学の分野の開拓を視野に研究を継続する。

〈発表資料〉

題名	掲載誌・学会名等	発表年月
Analysis of four-port system for bistable memory in silica toroid microcavity	2nd International Symposium on Photonics and Electronics Convergence (ISPEC 2012)	Tokyo, December 3-5 (2012)
Crystalline whispering gallery mode cavities directly fabricated by crystal growth	2012 Frontiers in Optics/Laser Science XXVIII meeting (FiO/LS)	Rochester, October 14-18 (2012).
Polygonal silica toroidal microcavity for easy and stable coupling with waveguides	2012 Frontiers in Optics/Laser Science XXVIII meeting (FiO/LS)	Rochester, October 14-18 (2012).
Fabrication of whispering gallery mode cavities using crystal	Fifth International Conference on Optical, Optoelectronic and Photonic Materials and Applications (ICOOPMA12)	Nara, June 3-7 (2012)
Rigorous analysis of bistable memory in silica toroid microcavity	Conference on Lasers and Electro-Optics and International Quantum Electronics Conference (CLEO2012)	San Jose, May 6-11 (2012)
Fabrication of whispering gallery mode cavity using crystal growth	Appl. Phys. Lett.	Vol. 102, 211105 (2013)
Analysis of bistable memory in silica toroid microcavity	J. Opt. Soc. Amer. B	Vol. 29, No. 12, pp. 3335-3343 (2012)
Octagonal silica toroidal microcavity for controlled optical coupling	Appl. Phys. Lett.	Vol. 101, 121101 (2012).