

フォトニック結晶共振器とウィスパリングギャラリモードの結合

遊部航希 (B4)

結合共振器を光情報処理に応用する場合、遅延時間と応答速度にはトレードオフの関係が存在する。異種の共振器による結合共振器は、各々の材料・製造プロセス・構造等が異なるため実現が難しく、現在のところ報告されていない。しかし、異種共振器間の結合共振器は同種の共振器による結合共振器のトレードオフの関係を打ち破ることが期待される。本研究では、シリカトロイド共振器とフォトニック結晶共振器の結合手法・条件を検討した。

キーワード：フォトニック結晶，シリカトロイド共振器，結合共振器

1. 背景

微小光共振器は、光を微小領域に閉じ込めることによって光と物質の相互作用を増強する機能を持ち、様々な光学現象が観測される。複数の微小光共振器を連結した系は結合共振器と呼ばれ、共振モード間の干渉効果による現象が観測でき、様々な応用可能性が議論されている。結合共振器の応用例として動的制御による光メモリ動作 [1] が挙げられ、シリカトロイド共振器 [2] やフォトニック結晶共振器 [3] によって実証されている。シリカトロイド結合共振器は高 Q 値のため 20 ns という長時間光バッファリングを実現しているが、スイッチ速度が 10 ns と遅いという欠点がある。一方、フォトニック結晶結合共振器による全光バッファは 4 ps という高速応答を達成しているが、バッファ時間は 330 ps と短い。

本研究ではシリカトロイド共振器とフォトニック結晶共振器による異種の共振器間の結合共振器を実現することを目的とする。シリカトロイド共振器をストレージ、フォトニック結晶共振器をゲートの共振器に用いることで長時間かつ高速な光バッファリングが期待される。

2. 結合モード理論

本研究では、シリカトロイド共振器とフォトニック結晶共振器の結合系のモデル化に結合モード理論 (CMT: Coupled Mode Theory) を用いた。図 1 は、シリカトロイド共振器とフォトニック結晶共振器の結合系の概略図である。この系のモデル式は CMT を用いると以下で与えられる。

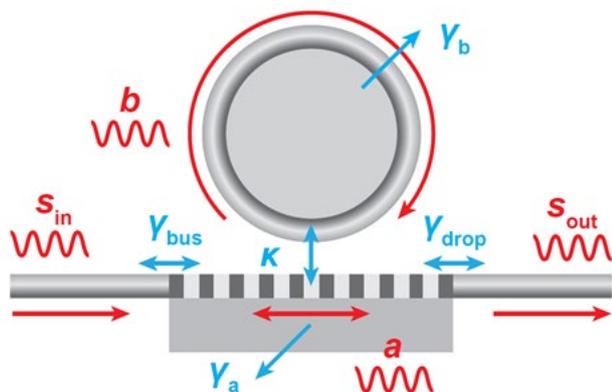


図 1：シリカトロイド共振器とフォトニック結晶共振器の CMT モデルの概略図及びパラメータ。

$$\frac{da}{dt} = \left(j\omega_a - \frac{\gamma_a + \gamma_{bus} + \gamma_{drop}}{2} \right) a + j\frac{\kappa}{2} b + \sqrt{\gamma_{bus}} e^{j\theta} S_{in} \quad (1)$$

$$\frac{db}{dt} = \left(j\omega_b - \frac{\gamma_b}{2} \right) b + j\frac{\kappa}{2} a \quad (2)$$

$$S_{out} = \sqrt{\gamma_{drop}} e^{j\theta} a \quad (3)$$

ただし、 a (b): フォトニック結晶 (シリカトロイド) 共振器内のモード振幅。 ω_a (ω_b): 共振角周波数。 γ_a (γ_b): 固有損失。 S_{in} (S_{out}): 入力 (出力) 導波路内のモード振幅。 γ_{bus} (γ_{drop}): フォトニック結晶と入力 (出力) 導波路間の結合損失。 κ : フォトニック結晶共振器とシリカトロイド共振器間の結合強度。

図 2 は、上式 (1)~(3) から求めた透過スペクトル $|S_{out}/S_{in}|^2$ である。図 2(a) は、 $\omega_a = \omega_b = 1550.0$ nm であり、図 2(b) は、 $\omega_a = 1550.0$ nm, $\omega_b = 1550.1$ nm の場合である。

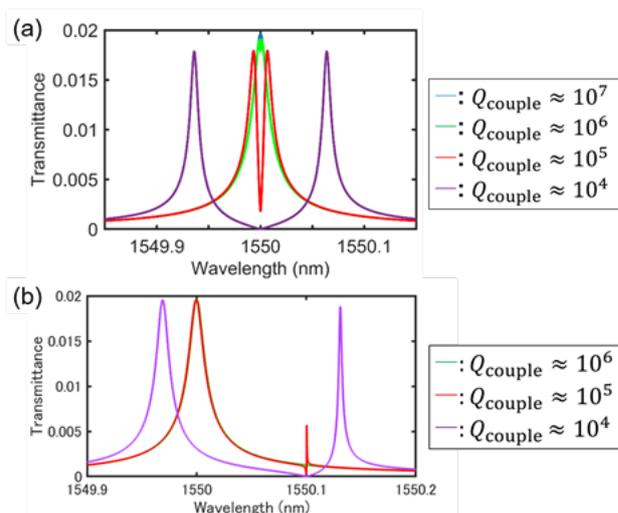


図 2：CMT モデルから計算した結合共振器系の透過スペクトル。(a); $\omega_a = \omega_b$ の場合。(b); $\omega_a \neq \omega_b$ の場合。

図 2(a) のように共振角周波数が一致している場合、結合損失 $Q_{couple} = \omega/\kappa$ が $Q_b = \omega/\gamma_b$ と同程度になると、シリカトロイド共振器内に入力光が入り始める。 Q_{couple} が $Q_a = \omega/\gamma_a$ と同程度の時、critical coupling となり、共振角周波数では全ての入力光がシリカトロイド共振器に閉じ込められる。図 2(b) のように共振角周波数が異なる場合、非対称なピークがシリカトロイド共振器の共振角周波数付近に現れる。これを利用してシリカトロイド共振器内に閉じ込められた光を取り出すことが出来る。

3. エアブリッジ構造の作製

実験的にシリカトロイド共振器とフォトニック結晶共振器の結合状態を実現するためには、フォトニック結晶をエアブリッジ構造にする必要がある。エアブリッジ構造とは、フォトニック結晶のシリカクラッドを剥がしてエアクラッドにした構造である。エアブリッジ構造にすることで、シリカトロイド共振器を物理的にフォトニック結晶共振器に近づけることが可能になる (κ を大きくすることに対応する)。

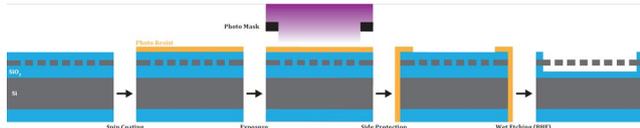


図 3 : エアブリッジ構造の作製プロセス。

図 3 はフォトニック結晶のエアブリッジ構造の作製プロセスである。まず、フォトリソグラフィによってフォトニック結晶チップ上面の構造に合わせてフォトレジストを画定する。次に、チップの側面にフォトレジストを塗布することで、スポットサイズ変換機構を保護する。この時、フォトレジストの粘度が低いと表面張力により側面だけでなく上面にまで流れてしまいパターンが崩れてしまう。そのため、あらかじめフォトレジストを $180\sim 200^{\circ}\text{C}$ で加熱し、フォトレジスト中の溶剤を蒸発させることで粘度を増強させたものを用いた。最後に、 27°C の恒温槽内でバッファドフッ酸 (BHF) によるウェットエッチングを 12 分間行い、アセトン・エタノールによる超音波洗浄を行い、エアブリッジ構造を作製した。作製したエアブリッジ構造の顕微鏡写真を図 4 に示す。



図 4 : シリカクラッド (上図) とエアクラッド (下図) のフォトニック結晶の顕微鏡画像。

4. 結合条件の検討

シリカトロイド共振器とフォトニック結晶共振器の結合状態を実現するためには、物理的距離を近づけるだけでは十分でなく、位相整合条件を満たす必要がある。また、結合損失や、ライトコーン (光がチップ上下面に放射する領域) による損失が大きいと共振ピークが観測できない。図 5 はシリカクラッドとエアクラッドの幅変化型フォトニック結晶共振器 [4] の透過スペクトルである。エアブリッジ構造にするとライトライン (ライトコーンと非ライトコーンの境界) が短波長側にシフトするため共振ピークがライトコーンによる損失を受けなくなる。伝搬モード自体も短波長側に 60 nm 程度シフトするも

のライトラインのシフト量の方が大きいと、共振ピークはライトコーンの領域外にあることが期待される。図 5 の黒線 (シリカクラッド) では伝搬モードがライトコーンによる損失を受けているが、赤線 (エアクラッド) では伝搬モードはライトコーンによる損失を受けていないことが確認できる。

しかし、エアブリッジ構造のフォトニック結晶共振器ではフォトニックバンドギャップ内に共振ピークを観測することが出来なかった。このことから十分に損失を抑制することができていないことが原因として考えられる。損失の原因として、側面に塗布した高粘度のフォトレジストの残滓による散乱損失の増加やエアクラッドとシリカクラッドの境界面での反射による損失の増加などが考えられる。前者に関しては十分な超音波洗浄を行うことで改善できるが、エアブリッジ構造はシリコン層が 220 nm と薄く、超音波洗浄によって壊れてしまうことが少なくない。そのため、溶剤を蒸発させる量を調節して、短時間の超音波洗浄で十分に洗浄できるような粘度のフォトレジストを用いることが求められる。

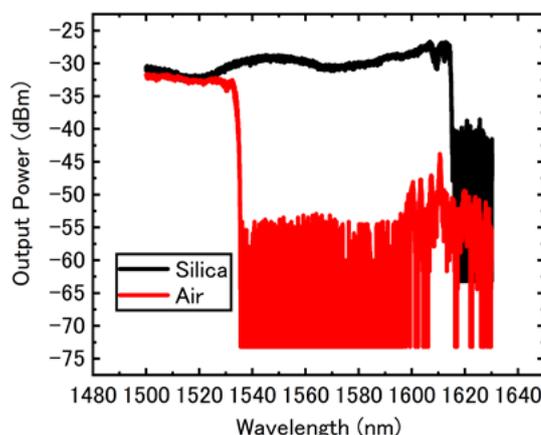


図 5 : シリカクラッド (黒) とエアクラッド (赤) の場合の幅変化型フォトニック結晶共振器の透過スペクトル。

5. 今後の展望

フォトニック結晶のエアブリッジ構造を作製することが可能になったが、共振ピークを観測するためには作製プロセスの最適化が必要である。また、結合共振器の形成のためには高 Q 値のエッジシリカトロイド共振器を作製する必要があり、現段階では 10^6 オーダー程度の共振器しか作製できていないため、こちらも作製プロセスの最適化が必要である。

参考文献

- [1] Q. Xu, P. Dong and M. Lipson, Nature Physics **3** 406-410 (2007)
- [2] W. Yoshiki, Y. Honda, T. Tetsumoto, K. Furusawa, N. Sekine, and T. Tanabe, Sci Rep **7** 10688 (2017).
- [3] J. Upham, Y. Fujita, Y. Kawamoto, Y. Tanaka, B. S. Song, T. Asano, and S. Noda, Opt. Express **21** 3809-3817 (2013)
- [4] E. Kuramochi, M. Notomi, S. Mitsugi, A. Shinya, and T. Tanabe, Phys. Lett. **88** 041112 (2006)