

平成 30 年 6 月 6 日現在

機関番号：32612

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K13702

研究課題名(和文) 結合共振器における非線形光学

研究課題名(英文) Nonlinear optics in coupled resonators

研究代表者

田邊 孝純 (Tanabe, Takasumi)

慶應義塾大学・理工学部(矢上)・准教授

研究者番号：40393805

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：小さな空間に光を閉じ込めることができる、微小光共振器を複数結合させる、結合共振器系を構築し、様々な機能を実現した。初めに性能が極めて高い(高Q値)シリカトロイド微小光共振器の結合系を構築し、高い光閉じ込め性能を活用して、従来では実現できなかった20ナノ秒の光閉じ込めや、波長精度が極めて高いブリリュアン散乱を利用したブリリュアンレーザを実現させた。
また、制御性に優れたフォトニック結晶微小光共振器を用いて、それにテーパナノファイバを結合させることで、動的に共振器を形成させたり、これまでにない高い効率で光を取り出すことに成功した。
最後にフォトニック結晶とシリカトロイド微小光共振器の結合を実現させた。

研究成果の概要(英文)：A microcavity can confine light in a tiny space. We build coupled optical resonator system to demonstrate various functional operations. First, we constructed a coupled system using ultrahigh-Q silica toroid microcavities, and demonstrated photonic memories with 20-ns trapping time, or Brillouin lasing having high frequency accuracy. Next we tried to couple photonic crystals with tapered nanofiber and demonstrated dynamic formation of resonators. In addition, we achieved very high coupling of light to an optical fiber by using this setup. Finally, we demonstrated the coupling between silica toroid microcavity with photonic crystal slab.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：フォトニックナノ構造 微小光共振器 フォトニック結晶

1. 研究開始当初の背景

サイズの小さな微小光共振器を用いて光を閉じ込めると、光子密度を極限まで高めることができ、非線形光学効果を増強できる。微小光共振器は、光メモリや光コム光源素子等の様々な研究のプラットフォームとなる。数ある微小光共振器の中でも、フォトニック結晶(PhC)共振器と、ウィスパリングギャラリ(WGM)共振器は、最も高いQ/V値が得られる。ここでQは光の閉じ込め性能を表す指標(Q値)、Vは共振器の大きさである。Q/Vが高いと入力光が微弱であっても高い光子密度が得られ、強い光物質相互作用が達成できる。しかしながら、その特徴を使い尽くすためには、光共振器モードを外部とは完全に遮断する必要があり、光の取り出し効率や高速性が犠牲となる。そのため、高速で効率的な光変調器、高速読み出しできる光メモリ、さらには効率的に光を取り出し可能な広帯域な光コム源の実現が難しかった。

2. 研究の目的

このように高速な変調と長時間の光メモリを同時に達成させる、という課題を解決するために、PhC共振器をゲートとし、WGM光共振器を光保持用に用いるような、結合共振器系を提案し(図1)、その原理実証実験を行う。

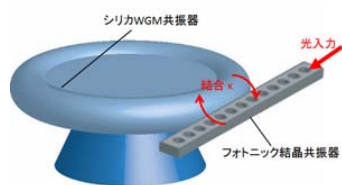


図1: シリカ WGM 共振器とフォトニック結晶との結合の概念図

3. 研究の方法

(1) シリカ WGM 共振器による結合共振器

初めにシリカ WGM 共振器同士の結合を実現する。シリカ WGM 共振器を結合させることで、光メモリやブリュアンレーザなど様々な機能を発現できる。

シリカトロイド WGM 共振器を結合可能なようにウェハ端に作製する(エッジ共振器と呼ぶ)技術を開発し、共振モードを調整することで、反交叉スペクトルを確認する。さらに、結合モードを利用した、光メモリ動作やブリュアンレーザ発振のデモンストレーションを行う。

(2) フォトニック結晶による結合共振器

フォトニック結晶とテーパファイバとの結合を行い、フォトニック結晶上に共振モードを形成させる。これは、結合系の実現だけでなく、フォトニック結晶素子から効率的に光ファイバに光を取り出す技術の開発にもつながり、微小光素子から光ファイバへの結合が低いという多くの研究者が抱える問題を解決できる可能性がある。

(3) 非対称共振器の結合とその応用

フォトニック結晶とシリカトロイド微小光共振器の結合実験を行い、高機能なシステムを実現させる。

4. 研究成果

(1) シリカ WGM 共振器による結合共振器

シリカ微小光共振器同士、あるいはシリカ微小光共振器とフォトニック結晶共振器を結合させるためには、シリカ微小光共振器を図2に示すように、ウェハのエッジに作製する必要がある。

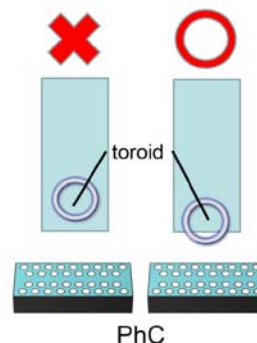


図2 シリカ WGM 共振器とフォトニック結晶との結合の概念図

そこで、我々は初めにエッジ共振器の作製方

法を開発した。作製手法及び作製された共振器の写真を図3に示す。基本的なプロセスは円形のトロイドと同様であるが、トロイドをチップ端面に位置させるためにダイシングする過程を含んでいることが大きな違いである。

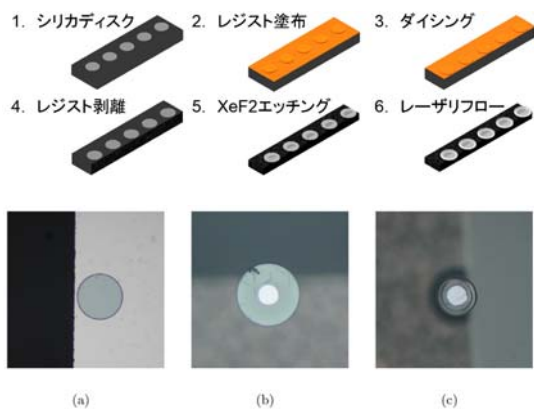


図3(上)エッジ共振器の作製プロセス (下) (a)ダイシング直後の共振器. (b)XeF2エッチング後. (c)完成した共振器

次に、この共振器の結合実験に取り組んだ。その結果を図4に示す。C1及びC2の2つの共振器を近接させることで、結合させることができ、微小光共振器としては極めて高い11 GHzを超える結合強度を得ることに成功した。

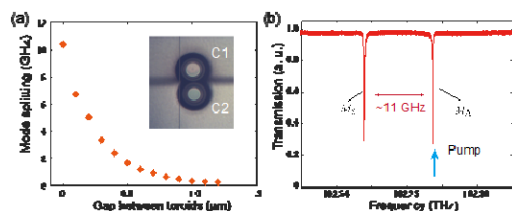


図4 : (a) 結合共振器の結合強度の測定結果. (b) 11 GHzの結合が得られた時の反交叉スペクトル.

結合共振器が得られれば、この共振器を用いた様々な応用実験が可能となる。ここでは2つの実験結果について示す。

一つ目が、光バッファ動作である。もし2つの共振器(C1, C2)の共振周波数が一致しているなら、テーパ光ファイバを介して入力された信号(“Signal”)光はまずC2に結合し、その後C1へと移動する(図5(a)の(1)Inputを参照)。信号光がC1に留まっている間、追加的な高いパワーを持つ制御(“Control”)光をC2

の他のモードへ入力する((2)Bufferを参照)。すると、制御光が光Kerr効果を誘起しC2の共振周波数をシフトさせ、C1とC2の共振周波数の間にずれを生じさせる。このずれが、C1内の光がC2へと抜けるのを防ぐので、制御光が入力されている間、信号光はC1に捉われることになる。制御光入力を切った後は、共振周波数が再び一致する。この状況では信号光がC2へ結合することが可能なので、最終的に信号光は光ファイバへと出力される((3)Output参照)。したがって、このでは、制御光のパルス幅を調整することによって、任意の時間信号光をバッファすることができる。これが結合シリカトロイド微小光共振器を用いた全光可変バッファの動作原理である。

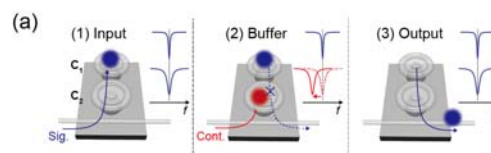


図5 : 光バッファ動作原理. 詳細は本文参照

図6に用いた結合共振器のスペクトルを示すが、共振波長を一致させることで、光バッファメモリに必要な特徴的な透過スペクトルが得られることが示された。

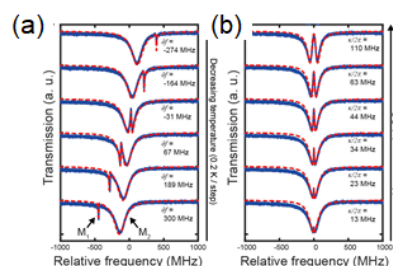


図6 : 光バッファに用いた結合共振器の透過スペクトル. (a) 共振波長の調整. (b) 結合強度の調整.

本スキームを用いて光Kerr効果の使用により超高Q値なWGM共振器を用いた全光可変バッファを実現させ、実験のプラットフォームとしては、超高Q値($> 2 \times 10^7$)と小モード体積を持ちチップ上に作製可能なシリカトロイド微小光共振器を用いた。この超高Q値と光Kerr効果とを組み合わせることにより、

先行研究では数百 ps 程度だった最大バッファ時間を 20 ns まで延伸することができた。

二つ目が、ブリリュアンレーザの実現である。2つの反交叉スペクトルの周波数幅をシリカのブリリュアンシフトである 11GHz と一致させることで、レーザ発振が実現できる。誘導ブリリュアン散乱(SBS)は低周波にダウンシフトするので、実験ではモードスプリットした高周波数側をポンプした。後方散乱してきた光のスペクトルデータを図 7(a)に示す。これよりポンプした光に対して、低周波側に 11 GHz シフトしたところに SBS によるゲインが確認できる。さらにポンプしたパワーに対する SBS の出力パワーの関係は図 7(b)のように測定することができた。これより、今回の実験における SBS の閾値は約 50 mW であると確認できた。

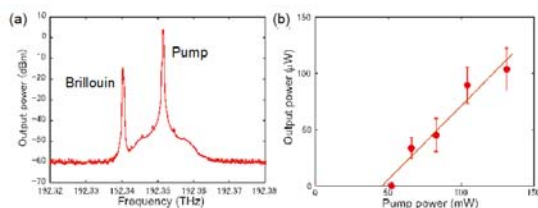


図 7 : (a)SBS レーザ発振結果. (b)レーザ特性

(2) フォトニック結晶による結合共振器

シリコンのフォトニック結晶導波路を用いることで高性能な共振器を形成した。以下に共振器形成の原理を示す。図 8(a)はフォトニック結晶導波路の導波モードの分散関係である。ここで、導波路にナノファイバを近づけていくと実効屈折率の変化が起るため導波モードのカットオフ周波数は下方シフトする。これにより、ナノファイバの接触位置において局所的なモードギャップが形成され、モードギャップ型のフォトニック結晶共振器として機能する。FDTD 法を用いた数値解析では、理論的に $Q = 1.4 \times 10^7$ とモード体積 $1.9(\lambda/n)^3$ が得られた (図 8(b))。

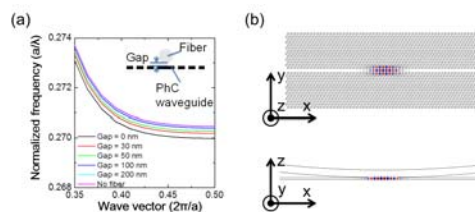


図 8 : (a) ファイバ結合型フォトニック結晶共振器の分散関係. (b) ファイバ結合型フォトニック結晶共振器のモード分布.

次に、実験的にファイバ結合型フォトニック結晶共振器形成に取り組んだ。図 9(a)に実験セットアップを示す。凸型に曲げた直径約 800 nm のテーパファイバを W0.98 型のフォトニック結晶導波路に接触させ、ファイバを通じて光の入出力を行うことで共振器の透過スペクトルを測定した。Q 値としては最高で $Q = 6.7 \times 10^5$ (結合効率 6.6%) が得られた (図 9(b))。また、ファイバ径を変えた条件で透過スペクトルを測定することで最大結合効率 99.6% ($Q = 6.1 \times 10^3$) が得られた。

共振器へナノファイバを結合させることで、動的な共振器形成を実現したのみでなく、この結合効率はフォトニック結晶共振器への光の入出力効率として世界最高値である。

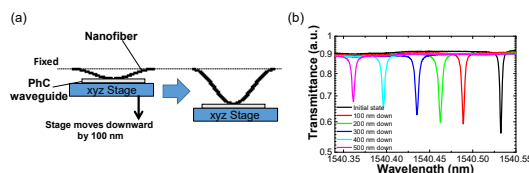


図 9 : (a) ナノテーパフォトニック結晶結合系の実験セットアップ. (b) 得られた共振モードとそのチューニング結果.

(3) 非対称共振器の結合とその応用

最後にフォトニック結晶導波路導波路とトロイド共振器の結合実験を行った。初めに、図 10 に示す実験セットアップを構築した。ここでは、フォトニック結晶スラブ上からエッジシリカトロイド微小共振器をアプローチできる構成とし、精密な結合調整を実現させた。

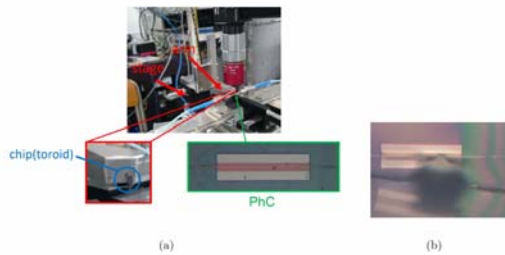


図 10：フォトニック結晶・シリカ微小共振器結合実験のセットアップ

実験セットアップを構築したので、実際にフォトニック結晶導波路とトロイド共振器を近づけた状態でフォトニック結晶導波路側に光を入射して透過スペクトルを測定した。その結果を図 11 に示す。

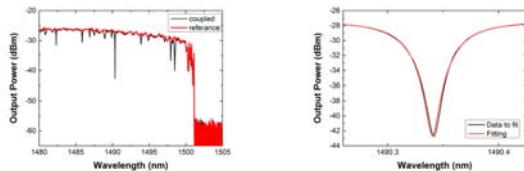


図 11：フォトニック結晶・シリカ微小共振器結合実験結果。結合させたときのみ共鳴が観測され、Q 値は 2.6×10^4 である。

多数の共振ピークが観測され、トロイドとフォトニック結晶導波路との結合に世界で初めて成功した。また、Q 値は 2.6×10^4 得た。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 6 件)

- [1] 田邊孝純, 鈴木良, 鐵本智大, 柿沼康弘, 「高 Q 値微小光共振器の作製と応用」応用物理, Vol. 87, No. 3, pp. 181-186 (2018). (解説記事) (査読有り)
- [2] Y. Honda, W. Yoshiki, T. Tetsumoto, S. Fujii, K. Furusawa, N. Sekine, and T. Tanabe, “Brillouin lasing in coupled silica toroid microcavities,” Appl. Phys. Lett., Vol. 112, 201105 (5 pages) (2018). (Featured Article) (Scilight) [arXiv:1712.09000v1] (査読有り)
- [3] T. Tetsumoto, H. Kumazaki, K. Furusawa, N. Sekine, and T. Tanabe, “Design, fabrication and characterization of a high Q silica nanobeam cavity with orthogonal resonant modes,” IEEE Photon. J. Vol. 9, No. 5, 4502609 (9 pages) (2017). (査読有り)
- [4] W. Yoshiki, Y. Honda, T. Tetsumoto, K.

Furusawa, N. Sekine, and T. Tanabe, “All-optical tunable buffering with coupled ultra-high Q whispering gallery mode microcavities,” Sci. Rep. 7, 28758 (2017). (査読有り)

- [5] W. Yoshiki, Y. Honda, M. Kobayashi, T. Tetsumoto, and T. Tanabe, “Kerr-induced controllable adiabatic frequency conversion in an ultra-high Q silica toroid microcavity,” Opt. Lett., Vol. 41, No. 23, pp. 5482-5485 (2016). (査読有り)
- [6] H. Itobe, Y. Nakagawa, Y. Mizumoto, H. Kangawa, Y. Kakinuma, and T. Tanabe, “Bi-material crystalline whispering gallery mode microcavity structure for thermo-opto-mechanical stabilization,” AIP Advances, Vol. 6, No. 5, 055116 (2016). (査読有り)

[学会発表] (計 9 件)

- [1] T. Tetsumoto, H. Kumazaki, Y. Honda, and T. Tanabe, “Demonstration of direct coupling between a toroid microcavity and a photonic crystal waveguide,” *The Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO-Pacific Rim 2017), 2-1L-4, Singapore, 31 July – 4 August (2017)*.
- [2] Y. Honda, W. Yoshiki, T. Tetsumoto, S. Fujii, K. Furusawa, N. Sekine, and T. Tanabe, “Brillouin lasing in coupled silica toroid microcavities,” *Conference on Lasers and Electro-Optics – European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe – EQEC 2017), CD-5.1, Munich, 25-29 June (2017)*.
- [3] W. Yoshiki, Y. Honda, T. Tetsumoto, K. Furusawa, N. Sekine, and T. Tanabe, “Demonstration of all-optical tunable buffering using coupled ultra-high-Q silica toroid microcavities,” *CLEO:2017, SM2N2, San Jose, May 14-19 (2017)*.
- [4] W. Yoshiki, Y. Honda, M. Kobayashi, T. Tetsumoto, and T. Tanabe, “Adiabatic frequency conversion in an ultra-high-Q silica microcavity using the Kerr effect,” *CLEO:2017, SM2N1, San Jose, May 14-19 (2017)*.
- [5] . Honda, W. Yoshiki, T. Tetsumoto, S. Fujii, K. Furusawa, N. Sekine, and T. Tanabe, “Tuning supermode splitting for stimulated Brillouin scattering,” *The 6th Advances Lasers and Photon Sources Conference (ALPS'17), ALPS8-4, Yokohama, April 18-21 (2017)*.
- [6] 田邊孝純, 藤井瞬, 本多祥大, 吉岐航, 鈴木良, 加藤拓巳「マイクロ共振器を用いた非線形光学」超高速光エレクトロニクス(UFO)研究会 第 1 回研究会, 名古屋大学 東山キャンパス, 平成 29 年 6

月 14 日. (招待講演)

- [7] 本多祥大, 吉岐航, 鐵本智大, 藤井瞬, 田邊孝純, 「シリカトロイド結合共振器によるブリルアン発振」第 64 回応用物理学会春季学術講演会, 15p-E205-18, パシフィコ横浜, 平成 29 年 3 月 14 日~17 日.
- [8] 鐵本智大, 熊崎基, 本多祥大, 田邊孝純, 「シリカトロイド微小光共振器とフォトニック結晶導波路の結合実験」第 64 回応用物理学会春季学術講演会, 16a-F202-4, パシフィコ横浜, 平成 29 年 3 月 14 日~17 日.
- [9] T. Tetsumoto, Y. Ooka, and T. Tanabe, “Observation of isolated mode and formation of coupled cavity in fiber coupled PhC cavity platform,” *The 12th International Symposium on Photonic and Electromagnetic Crystal Structures (PECS-XII)*, A28, University of York, July 17-21 (2016).

[その他]

ホームページ等

<http://www.phot.elec.keio.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田邊 孝純 (TANABE, Takasumi)

慶應義塾大学・理工学部・教授

研究者番号 : 40393805