

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 29 日現在

機関番号：32612

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25600118

研究課題名(和文)結晶成長を利用した微小光共振器の作製に関する研究

研究課題名(英文)Fabrication of microcavities using crystal growth

研究代表者

田邊 孝純(TANABE, TAKASUMI)

慶應義塾大学・理工学部・准教授

研究者番号：40393805

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：レーザー溶融ペDESTAL法を用いてQ値16,000の微小光共振器の作製に成功した。Q値の制限要素が多角形化している共振器の断面形状にあることを突き止め、それを制御するためにプリヒーティング法と斜め成長を試みた。前者は種結晶をプリヒートすることで結晶性を低下させ、後者は結晶の方位を選択して成長することで多角形形状化を防ぐ手法である。いずれの手法でも円形に近い断面形状の作製が可能となり、手法の有効性が確認された。また、CaF₂結晶共振器の非線形光学の研究を進め、熱光学効果と熱膨張の相互作用によって、サイズが小さな場合、光を入射するだけで機械的な振動を始め透過光も時間的に変調を受けることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：We demonstrated a Q of 16,000 with a small whispering gallery mode cavity fabricated with laser heated pedestal method. We found that the Q is limited when the cross-section of the microcavity is polygonal, and developed pre-heating and tilted crystal growth technique to overcome this problem. Pre-heating is performed in order to polycrystalline the seed crystal before starting the growth and allow the cavity to have circular shape. Tilted growth is also attractive because it may allow us to have circular cavity where the crystal structure is maintained. We also studied the optical nonlinearities in crystalline microcavity by using CaF₂, and found that a thermo-mechanical oscillation occurs due to the interplay between the negative thermos optic effect and thermal expansion of the material. We found that the transmittance oscillates and this phenomena is pronounced for a smaller cavity.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：微小光共振器 光量子エレクトロニクス 結晶成長

1. 研究開始当初の背景

近年の微細加工技術の進展が、光の閉じ込め性能(Q 値)の高い微小光共振器の作製を可能とし、高 Q 微小光共振器を用いた研究が急速に拡大しつつあった。工学的には、申請者等によって微小光共振器を用いて、超省エネルギーな光スイッチを実現したり、通信波長帯の光に対して動作する全シリコン高感度光検出を実現したりされた。学術的にも、S. Haroche が cavity-QED の業績でノーベル賞を受賞したように、微小光共振器研究は盛り上がりを見せていた。

2. 研究の目的

その中で、本研究は微小光共振器に全く新しい作製手法を適用することで、結晶材料を用いた微小光共振器の作製を可能とし、結晶共振器の基礎と応用の深化を図るためのものである。

初めに、本研究では、レーザ溶融ペDESTAL法と呼ばれる結晶成長技術を改良して結晶材料による高 Q 値微小光共振器の作製技術を開発する。究極的にはシリコンやシリカを用いたのでは不可能な、強い光の閉じ込め効果や結晶機能を利用した光素子の実現を目指す。ここでの結晶機能とは、省エネ光信号処理に有用な効率的な電気光変調や波長変換機能ことである。

3. 研究の方法

レーザ溶融ペDESTAL法(LHPG法)はチヨクラルスキー法を応用した結晶成長技術であり、ファイバレーザを作製する目的で開発された。そのため、チヨクラルスキー法とは違い、結晶を細く、均一に成長させる目的で発展してきた。結晶ファイバは図1にある手順で作製される。まず、母材を用意し、CO₂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。ここまでが一般的に用いられているLHPG法の作製手順である。その後、種結晶の速度を落とし成長させ、最後に引き抜くことによって、一部分にのみ膨らみを作製することが可能となる。(図1)この膨らみ部分に光を励振させる。

一般的なLHPG法の作製手順

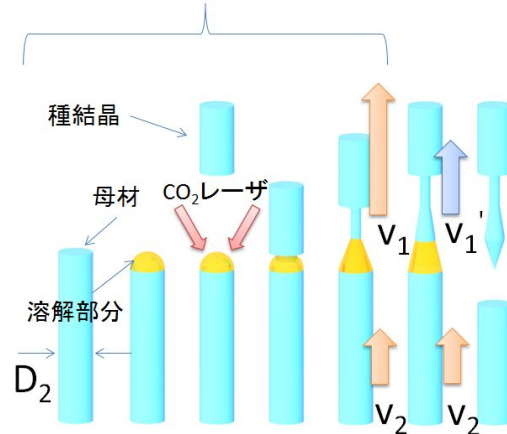


図1: レーザ溶融ペDESTAL法とそれを改良した、微小光共振器の作製プロセス。

4. 研究成果

LHPG法に基づいた手法を用いて作製した共振器の画像を図2に示す。右は電磁界解析の結果であり、共振器モードが存在することがわかる。

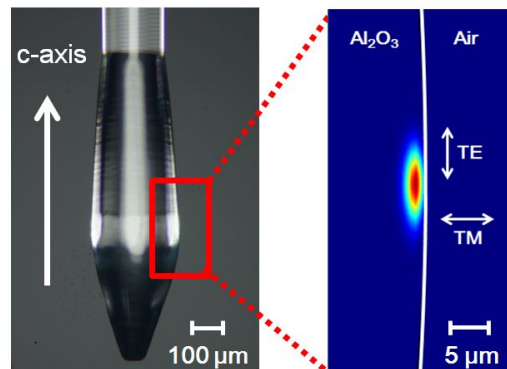


図2: レーザ溶融ペDESTAL法で作製したサファイア結晶共振器。電磁界解析結果を右に示す。

レーザ溶融ペDESTAL法を用いた微小光共振器の作製方法では、断面形状が結晶性の影響で図3のように多角形となることがわかった。

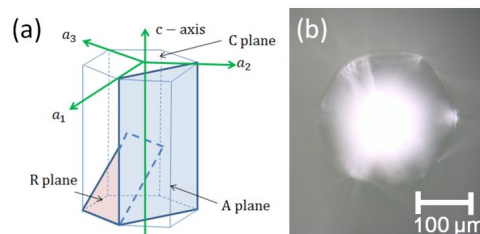


図3 (a) サファイアの結晶構造。(b) LHPG法を用いて作製したWGM共振器の断面図。

光を共振器周辺で全反射させながら閉じ込める Whispering Gallery Mode(WGM) モードにおいて、この曲率は Q 値を下げる要因の一つとなることが考えられる。まず、曲率半径が Q 値にどれだけの影響を与えるかに

について、図4の左上の挿入図のモデルに対して、2次元FDTD法によって解析を行ったところ、図4のような結果となった。この結果より、多角形共振器の曲率が小さくなればなるほど、 Q 値が低くなることがわかった。

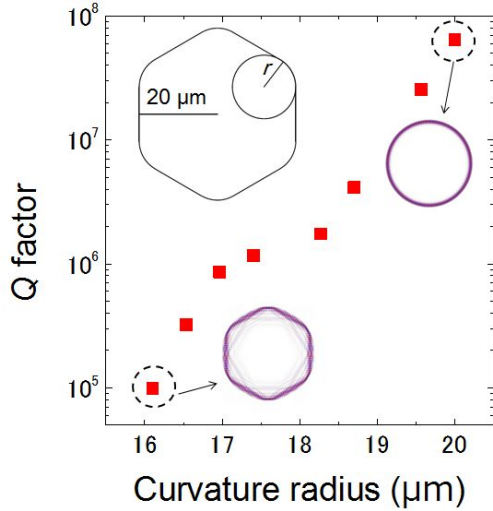


図4 六角形状の曲率半径に対する Q 値．左上挿入図は 2次元 FDTD に用いたモデル．その他は、各曲率半径に対応するモードプロファイル

円形に近い形状をえるため、種結晶をあらかじめ熱して結晶の方位をランダム化するプリヒーティング法を新たに開発した。六角形状と円形状のWGM微小光共振器の光学測定結果を比較したものが、図5となる。ここでは、六角形状の $Q = 8,500$ という結果に対して、円形状では $Q = 16,000$ という結果を得ることができた。この結果より、実験的にも六角形状に比べ円形状の方が Q 値に対して優位性を持っていることがわかった。

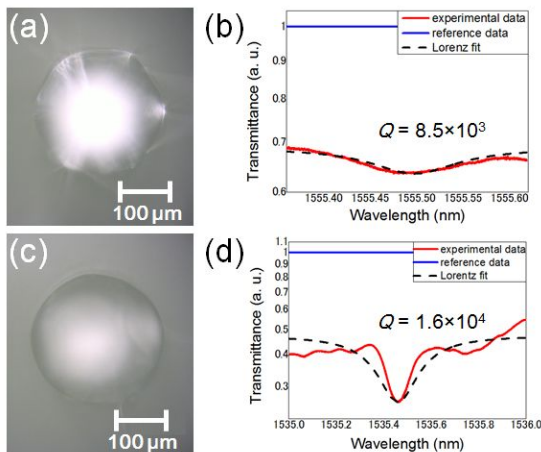


図5 (a) 断面が六角形状の共振器。(b) 六角形状の共振器に対する光学測定結果。(c) 断面が円形状の共振器。(d) 円形状の共振器に対する光学測定結果。

さらに、円形状を結晶性が高くても得られるよう、種結晶を傾けて成長させる手法を検討した。その結果が図6である。適切な角度を選ぶことで、断面形状を制御できること

が明らかとなった。

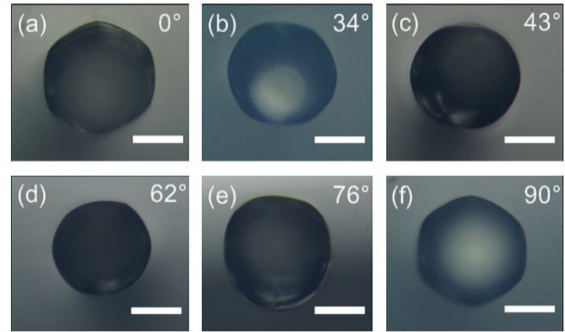


図6 角度を変え結晶成長させた共振器．白線の長さが $100 \mu\text{m}$ ．

一方で、結晶共振器の非線形光学について調査を進めるために、 CaF_2 共振器を切削加工と研磨加工で作製した。作製した共振器の写真を図7に示す。

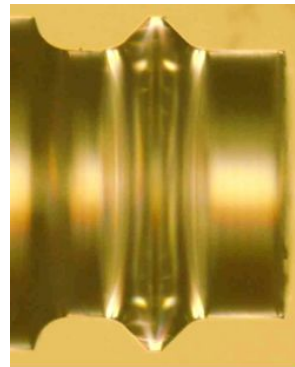


図7 作製した CaF_2 共振器の顕微鏡写真。

こうした CaF_2 共振器を用いると、これまであまり観測されていなかった非線形性が観測されるようになる。共振器の共振波長に光を入射すると図8のように、透過時間波形が振動する様子が観測された。

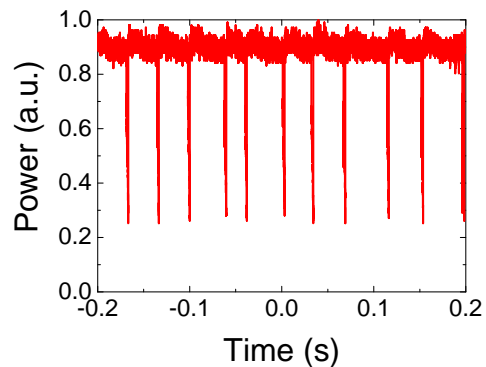


図8 CaF_2 共振器に共振する光を入射したときの透過時間波形

これは、 CaF_2 においては、熱光学係数が負であるので共振波長を短波長側にシフト

させるのに対して、熱膨張は共振波長を長波長側にシフトさせるためである。熱光学効果と熱膨張は、発生する時間が異なるために、この2つの効果が相互に作用して図8のような振動がみられる。特に本研究では、この熱振動が共振器サイズ依存性があることを初めて定量的にも定性的にも明らかにした。

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 3件)

S. Azami, K. Hiroshi, T. Tanabe, J. Yan, and Y. Kakinuma, "Experimental analysis of the surface integrity of single-crystal calcium fluoride caused by ultra-precision turning," *Procedia CIRP*, Vol. 13, pp. 225-229 (2014). (査読有)

H. Kudo, R. Suzuki and T. Tanabe, "Whispering gallery modes in hexagonal microcavities," *Phys. Rev. A* Vol. 88, 023807 (2013). (査読有)

H. Kudo, Y. Ogawa, T. Kato, A. Yokoo, and T. Tanabe, "Fabrication of whispering gallery mode cavity using crystal growth," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 102, 211105 (2013). (査読有)

[学会発表](計 11件)

糸部大貴, 中川陽介, 筋駿也, 柿沼康弘, 田邊孝純, 「超精密切削加工による結晶材料WGM共振器の作製および熱光学機械振動の共振器サイズ依存性についての検討」第62回応用物理学会春季学術講演会, 13a-A10-4, 東海大学湘南キャンパス(神奈川県・平塚市), 平成27年3月11日~14日。

R. Saito, M. Terakawa, and T. Tanabe, "Optical spectrum measurement of a cell-adhered microcavity for the cell-cycle analysis applications," *APS March Meeting 2015*, H1.00045, San Antonio (USA), March 2-6 (2015).

西村治郎, 小林美紗子, 田邊孝純, 「シリカトロイド共振器及びテーパファイバの固定化によるセンシング応用に関する検討」レーザー学会学術講演会第35回年次大会, 12aX-4, 東海大学高輪校舎(東京都)平成27年1月11日~12日。

西村治郎, 小林美紗子, 田邊孝純, 「シリカ微小光共振器とテーパファイバの流路内固定化による光流体工学応用に関する検討」*Optics & Photonics Japan 2014* 会, 5aB8, 筑波大学東京キャンパス

文京校舎(茨城県・つくば市), 平成26年11月5日~7日。

T. Tetsumoto and T. Tanabe, "High-Q silica zipper cavity with strong opto-mechanical coupling for optical radiation pressure driven directional switching," *IEEE Photonics Conference 2014 (IPC2014)*, San Diego (USA), October 12-16 (2014).

小川陽平, 田邊孝純, 「光ファイバへの結合を最適化したファイバファブリケーション共振器の設計」第14回レーザー学会東京支部研究会, 東海大学高輪キャンパス(東京都), 平成26年3月5日。

中川陽介, 工藤寛史, 田邊孝純, 「結晶材料によるWGM共振器の高Q値化を目的とした形状制御と表面プロセス」レーザー学会創立40周年記念学術講演会第34回年次大会, 22pVII-4, 北九州国際会議場(福岡県・北九州市), 平成26年1月20日~22日。

西村治郎, 田邊孝純, 「WGM微小共振器を用いた水中イオン含有率評価」第74回応用物理学秋季学術講演会, 17p-C13-11, 同志社大学田辺キャンパス(京都), 平成25年9月16日~20日。

H. Kudo, R. Suzuki, T. Kato, A. Yokoo and T. Tanabe, "Analysis and experimental measurement of the Q factor of hexagonal microcavities fabricated with crystal growth," *The 10th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR & OECC/PS)*, W11-4, Kyoto (Japan), June 30-July 4 (2013).

H. Kudo, R. Suzuki, A. Yokoo and T. Tanabe, "High-Q sapphire WGM cavities fabricated by crystal growth," *The Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*, CF21.7, San Jose (USA), June 9-14 (2013).

J. Nishimura and T. Tanabe, "Study on Detection of contamination of pure water using silica microsphere," *The European Conference on Lasers and Electro-Optics and the International Quantum Electronics Conference (CLEO®/Europe-IQEC)*, CH-3.3, Muenchen (Germany), May 12-16 (2013)

[その他]

ホームページ等

研究室ホームページ:

<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・理工学部電子工学科・准教授
研究者番号: 40393805