

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	縮退の解けたWGM共振のため欠陥構造を付与したガラス微小球光共振器に関する研究
Title(English)	Study on spherical optical microcavity of glass with defect structures for non-degenerate whispering gallery mode resonance
著者(和文)	熊谷 傳
Author(English)	Tsutaru Kumagai
出典(和文)	学位:博士(学術), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第10560号, 授与年月日:2017年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:矢野 哲司,腰原 伸也,安藤 慎治,松下 伸広,齊藤 卓志
Citation(English)	Degree:Doctor (Academic), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第10560号, Conferred date:2017/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	要約
Type(English)	Outline

Study on spherical optical microcavity of glass with defect structures for non-degenerate whispering gallery mode resonance

(縮退の解けた WGM 共振のため欠陥構造を付与したガラス微小球光共振器に関する研究)

熊谷 傳 (指導教員：矢野哲司, 松下伸広)

緒言

マイクロメートルサイズのガラス微小球は、球の界面で光が全反射を繰り返しながら周回する Whispering Gallery Mode (WGM) により球の内部に光を閉じ込め、光共振器として機能する。ガラス微小球光共振器の光閉じ込め効率は 10^9 と非常に高く、また光を閉じ込めるモード体積も小さい。そのため、マイクロワットという超低しきい値でレーザー動作を実現可能である。WGM 球状光共振器は高い対称性から共振モードが縮退しているが、そこに欠陥構造を制御して付与することで、高い光閉じ込め効率を維持したまま縮退が解ける。これにより光共振状態が制御でき、共振器としての機能性を高めることができると考えた。本論文では、縮退の解けた WGM 共振のため欠陥構造を付与したガラス球状光共振器について研究を行った。

レーザー局所加熱法による高真球なガラス微小球の作製

溶融急冷法により $80\text{TeO}_2\text{-}10\text{WO}_3\text{-}10\text{K}_2\text{O-}1\text{Nd}_2\text{O}_3$ (molar ratio) ガラスを作製し、粉碎・篩い分けにより粒径 $25\text{-}53\mu\text{m}$ のガラス微粉を得た。新規に開発したレーザー局所加熱法を用いてガラス微小球を作製した。ガラス微粉をシリカガラス基板上に載せ、波長 806.0nm 、強度 $150\text{-}300\text{mW}$ の CW-Ti:Sapphire レーザー光を、対物レンズを通じて照射することで Nd^{3+} 添加テルライトガラス微小球を基板上で作製した。このときレーザー照射条件を調整することで、欠陥として単一の気泡を位置制御して導入した。図 1 に作製したガラス微小球の SEM 像を示す。図 1(a) よりガラス球は、高真球度 (>0.99) で滑らかな表面性状を有しているためガラス微小球共振器に適している。また図 1(b) よりその内部に、真球度を保ちながら欠陥として気泡が導入されていることを確認できる。

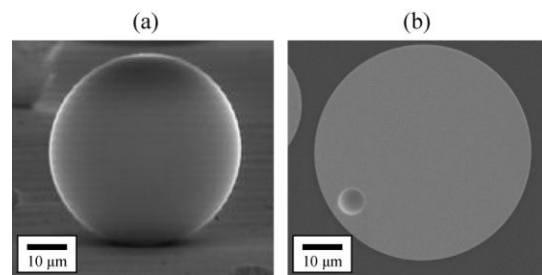


図 1 ガラス微小球の SEM 像
(a)表面観察像. (b)断面観察像.

重力下でも基板上で高い真球度を有するガラス微小球が作製できるレーザー局所加熱法のメカニズムを明らかにするため、干渉計を用いたガラス球内部および周囲の空気の可視化と、蛍光強度比法によるガラス球の温度測定を行った。レーザーをガラス微粉に照射すると添加した Nd^{3+} が光吸収し励起状態となる。このとき生じる非輻射緩和によってガラスが加熱され、粘性が低下する。ガラス微粉は軟化点以上で変形し表面張力によって球状になる。さらに加熱を続けるとガラス球内部および周囲の空気が対流し、周囲の空気が液滴と基板の間に入り込むことで薄い空気層が生じ濡れ広がることを防ぐマランゴニ浮遊が生じる。レーザー照射を止めるとガラス液滴は急冷され、粘性が急激に高くなるため基板との接着をすることなく球状を維持でき、基板上にガラス微小球を作製できることを明らかにした。

気泡含有ガラス微小球による縮退の解けた WGM 共振および低しきい値レーザー発振

図 2 は、ガラス微小球を励起レーザー光照射位置(A)–(D)、波長 790–817nm、強度 5mW で励起した際の励起・蛍光スペクトルである。直径 20 μm 、気泡径 1.6 μm の気泡含有ガラス微小球を用いた。位置(A), (B)は球の界面、位置(C), (D)は気泡であり、励起光の偏光の影響を調べるため、位置(A)–(C)では偏光を図の水平方向、位置(D)では垂直方向として測定を行った。蛍光スペクトルには、全ての励起位置から Nd^{3+} 由来の 1.06 μm 帯レーザー発振ピークが確認された。位置(A), (B)における励起スペクトルは、6.0nm 間隔の周期的なピークを示した。これは WGM 共振器の理論モードスペーシングと一致した。また最下部に示した散乱スペクトル解析のピークとも一致している。一方、位置(C), (D)では広い波長域に渡って複数のピークが確認され、位置(A), (B)ではピークが存在しなかった波長でも励起が可能であり、また偏光に対する依存性が小さい励起が可能となった。これは欠陥を導入したことにより誘起された縮退の解けた WGM に由来する。

図 3 より、位置(A)–(C)におけるレーザー発振閾値はそれぞれ 2.24mW, 2.31mW, 0.31mW であり、気泡を励起光照射位置にしたときに低閾値でレーザー発振を示した。ガラス微小球に気泡(欠陥)を導入することによって、励起効率を 7.5 倍増加し、低閾値なレーザー発振を実現できることを明らかにした。

欠陥導入が光共振モードおよび光結合に与える効果に関する電磁界解析

有限積分法を用いた散乱パラメータおよび過渡解析により、球状光共振器への欠陥の導入が光共振モードおよび光結合に与える効果について解析した。散乱パラメータ解析より、気泡を導入することで縮退の解けた WGM 由来

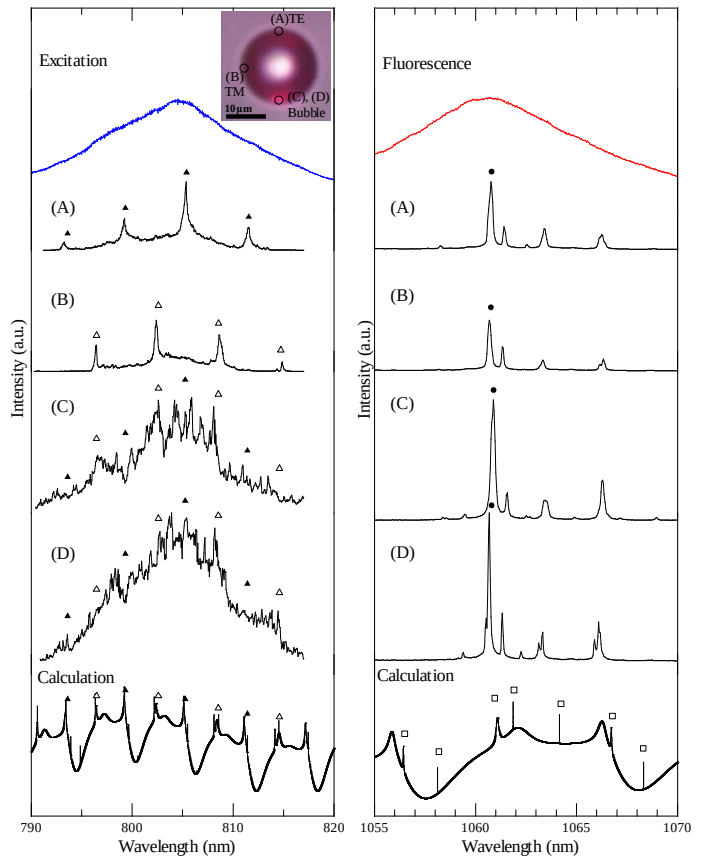


図 2 ガラス微小球の励起（左）および蛍光（右）スペクトル。挿入図は直径 20 μm 、気泡径 1.6 μm の気泡含有ガラス微小球写真。

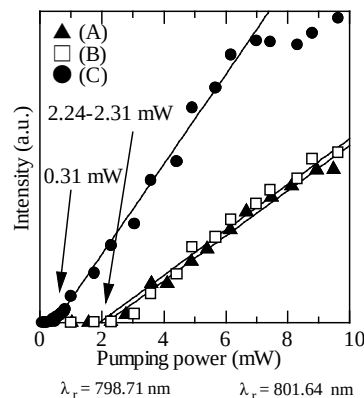


図 3 発光強度に対する励起光強度のプロット図。プロットには図 2 の黒丸で示したピーク強度を用いた。

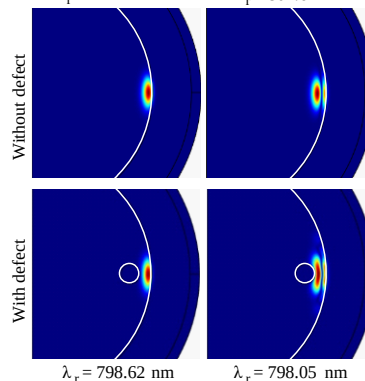


図 4 共振モードの電場および共振波長。空洞リングによって波長および電場が変化する。

のディップが見られた。また過渡解析により気泡がカプラとして機能し、光結合効率を高めることを示した。

有限要素法により縮退の解けた WGM について解析を行った (図 4)。ここでは空洞リングを欠陥とするモデルを考察し、電磁界解析を行った。図 5 に示すように、モードナンバー m の偶奇および偏光で縮退の解け方が異なり、欠陥と共振モードの相互作用が大きいほど共振波長の変化が大きいことを明らかにした。欠陥構造を設計し、望みの位置に導入することによって縮退の解けた WGM の光共振状態を制御可能と言える。

結論

本研究では、新規に開発したレーザー局所加熱法により、内部の欠陥（気泡）を位置制

御しながら高真球なガラス微小球の作製に成功した。また、欠陥の導入により縮退の解けた WGM が誘起され広い波長域に渡って光共振が見られること、気泡がカプラとして機能し光結合効率を高めることを光励起実験および電磁界解析により明らかにした。

高い真球度を有するガラス微小球光共振器に欠陥を付与することで、その光共振特性を制御し、高い光機能性が実現できる。この縮退の解けた WGM 光共振器は、連続光を効率的にレーザー光へ変換する素子への応用が期待される。

報文目録

- [1] Tetsuo Kishi, Tsutaru Kumagai, Tetsuji Yano, and Shuichi Shibata, "On-Chip Fabrication of Air-Bubble-Containing Nd^{3+} -Doped Tellurite Glass Microsphere for Laser Emission," AIP ADVANCES, 2, 042169 (2012).
- [2] Tsutaru Kumagai, Tetsuo Kishi, and Tetsuji Yano, "Low threshold lasing of bubble-containing glass microspheres by non-whispering gallery mode excitation over a wide wavelength range," J. Appl. Phys. 117, 113104 (2015).
- [3] Tsutaru Kumagai, Giuseppe Palma, Francesco Prudeniano, Tetsuo Kishi, and Tetsuji Yano, "Non-degenerate whispering gallery modes in microspheres with hollow defect structures simulated by eigenmode and transient analysis," IEEE Photonics Journal. (submitted)
- [4] Tsutaru Kumagai, Tetsuo Kishi, and Tetsuji Yano, "Levitation and formation of glass droplet for optical spherical cavity using thermo-capillary convection induced by localized laser heating," (in preparation)

講演目録

- [1] ○Tsutaru Kumagai, Tetsuo Kishi, Tetsuji Yano, and Shuichi Shibata, "Nd³⁺-Doped Tellurite Glass Sphere with an Air-Hole for Low-Threshold Microlaser," The 6th International Conference on the Science and Technology for Advanced Ceramics (STAC-6), 2PG-02, Kanagawa, Japan (June.2012).
- [2] ○Tsutaru Kumagai, Tetsuo Kishi, and Tetsuji Yano, "Effects of size and position of a bubble on resonance modes in glass optical microcavity," DGG-ACerS GOMD 2014, Aachen, Germany (May, 2014).
- [3] ○Tsutaru Kumagai, Giuseppe Palma, Francesco Prudeniano, Tetsuo Kishi, and Tetsuji Yano, "New Spherical Optical Cavities with Non-Degenerated Whispering Gallery Modes," SPIE Photonics West 2017, San Francisco, USA (Jun.-Feb. 2017).

(他 6 件)

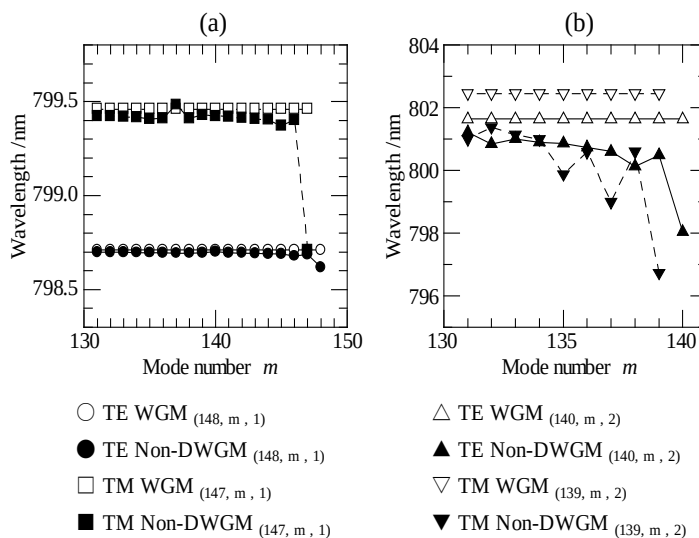


図 5 モード次数 1 (左) および 2 (右) の共振波長に対するモードナンバー m のプロット。従来の WGM は m に対して縮退しているが、欠陥導入によって縮退が解け、共振波長が変化する。