

機関番号：12608

研究種目：基盤研究 (B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20360295

研究課題名 (和文) 指向性発振微小球レーザー

研究課題名 (英文) Spherical Lasers for Directional Emission

研究代表者

柴田 修一 (Shibata Shuichi)

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：00235574

研究成果の概要 (和文)：

(1) 高屈折率ガラス微小球に光導入部としてテラスを設けること、(2) 光ファイバカップラによる微小球への励起光の導入と読み出しにより、球状ラマンレーザー、希土類イオン (Nd^{3+}) 添加球状レーザーの多波長発振 (約 50-100 本) に成功した。波長可変レーザー (チタンサファイアレーザー) による最適励起波長の選択により、ラマンと Nd^{3+} の相互作用が生じ、ラマン増強効果を確認することができた。テラスによる励起、ファイバカップラによる読み出しにより、指向性を有する発振と光信号の取り出しにも方向性を見いだすことができた。

研究成果の概要 (英文)：

Spherical Raman lasers and Nd^{3+} -doped lasers of multi-wavelength emission (50-100 wavelengths) were developed through the following techniques: (1) Terrace formation on the surface of high refractive-index glass spheres, (2) pumping and read-out by optical fiber couplers. Selection of pumping wavelength with a CW Ti: Sapphire laser enables us to find “the Raman enhancement effect” between Raman scattering and Nd^{3+} fluorescence. Using the optical fiber couplers and terrace microsphere, directional pumping and read-out will be possible.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	5,500,000	1,650,000	7,150,000
2009 年度	5,700,000	1,710,000	7,410,000
2010 年度	2,800,000	840,000	3,640,000
年度			
年度			
総計	14,000,000	4,200,000	18,200,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学・無機材料・物性

キーワード：微小球光共振器、微小球レーザー、光カップリング、多波長レーザー光源、ラマンレーザー

1. 研究開始当初の背景

レーザーは、活性物質を 2 つの鏡 (光共振器) で挟み、外部から励起光を照射してこの共振器構造の中に光を閉じこめることによ

って、コヒーレント光の発振を実現している。共振器の性能を表すため、閉じ込め効率 (Q 値) を指標として用いるが、従来の光共振器では $Q=10^2-10^3$ の値にすぎない。

本研究では、球状光共振器の光閉じこめを研究対象とする。 $Q > 10^8$ の値を示す究極の球状光共振を実現していく。この球の内部では、光と材料との相互作用が極限まで高まるため低い閾値での多波長発振光源や非線形光学効果を利用した高速光スイッチが実現できる。光の閉じ込めは全反射を原理としており、球と外部の媒質との屈折率差と球の粒径が基本パラメータになる

液滴からのラマン共振光の発振報告に続き、高いQ値が得やすい粒径70-100 μm のシリカガラス球(屈折率 $n_0=1.458$)を励起し、ラマンレーザーの実現をめざす研究が開始された。効率の高い微小球励起方法の探索が1994年から実施され、2000年からは、数 μm 径のテーパ光ファイバーを用いてシリカガラス球を励起し、ラマンレーザーの発振に成功している。しかし、脆弱な極細ファイバーを用い、しかも屈折率の低い裸のシリカガラス球では、実用にはほど遠いと言わざるを得ない。

報告者は、これらを解決する方法として、①ガラス球(粒径30-100 μm)の高屈折率化、②特殊な被覆形状による光導入口の形成を提案し、数mWの励起光強度で、誘導ラマンレーザーの発振に成功している。高屈折率微小球(コア)/低屈折率の被覆層(クラッド)とする特殊な形状(テラス形状)の光共振用微小球を実現することにより、直接、光回路上で微小球を励起することが可能となった。しかし、球状レーザーではあらゆる方向への発振となるため、球状共振器レーザーの長年の夢である「指向性発振」には至っていない。これまでの研究で得られた「被覆技術」、「光導波路作製技術」を活用して、光取り出し機構を設けることにより、球状光共振器の長年の夢であった「指向性・レーザー発振」の実現が期待できる。

2. 研究の目的

報告者は、低屈折率膜($n_0=1.49$)で被覆した高屈折率微小球($n_0=2.0-2.5$)を作製し、光共振器として用いることにより、数mWの閾値の誘導ラマンレーザーとして機能できることを明らかにしてきた。従来の球状共振器は、低屈折率($n_0=1.5$)なシリカガラスやプラスチックを材料としているため空気中でしか共振条件を満足する屈折率差が得られず、被覆層を設けることが不可能であった。安定的に動作する光学素子とするためには、コア/クラッド構造の形成は不可欠である。一方、高屈折率微小球は媒質との屈折率差が大きく高い光閉じ込めに有利であるが、表面における反射率が高く「微小球への光導入」「微小球からの光取り出し」の課題をより難しくする。光導入に関しては、テラス構造を設けることにより解決可能であることを明らかにしている。

本研究では、(1)高屈折率なマイクロサイズの球に、特殊形状の被覆層を形成する技術を確認する。(2)光導入にはテラス構造を適用し、同時に光導波路形・光取り出し用光カップリング機構を設ける。(3)光カップリング理論の構築と素子作製により、一方向に光を出射できる「指向性発振・微小球レーザー(多波長選択発振)」の実現を図っていく。

3. 研究の方法

(1) テラス光共振用微小球の作製

コア用の微小球に関しては、ガラス融液をカーボン上で溶融固化させ超半球を得る技術を活用する。先の研究では、被覆用原料液(ゾル)と微小球の混合物を有機溶媒で希釈して、エアースプレーによりテフロン上に噴射、テラス微小球を作製した。液状の被覆原料は下部に流れ落ち、その後乾燥させることになる。測定に供するためには、1個ごとの

テラス構造の精密制御が必要となるため、真空引きによるマニピレータを使用する方向で作製技術の改善を行う。

(2) 波長可変レーザーによる光カップリング (光導入) 実験

光共振条件は、①微小球と被覆の相対屈折率、②微小球の粒径、③励起用レーザーの波長により決定される。①②は被覆微小球を作製したときに固定化されるため、励起用レーザーの入射モードを精密に合わせるためには、最適波長を選択することが望ましい。現状の励起実験は、励起光を固定 (例: Ar+レーザー、波長 514.5nm) している。均一の被覆を施した微小球の励起結果では、被覆厚さが $1\mu\text{m}$ を越えると逆に光閉じ込めは減少する。テラス形微小球においては、テラスの一部を照射励起することにより、優れた共振が実現することが示されている。波長が 514.5nm に固定されているため、最適な励起条件ではないことが推定されるが、最低閾値は 2mW を示しており、半導体レーザーでの励起が可能な技術領域に至っている。

(3) 波長可変レーザーによる光カップリング (光導入・光取り出し) の原理確認

光共振器用微小球は被覆層を設けることによる相対的屈折率の低下や、外部からの物理的接触によりその部分の光閉じ込めが弱まる。本来の高い光閉じ込めの観点からは望ましくないように思われるが、一方、微小球内部で発振している光の取り出しには、有効な手法である。すでに、予備実験として、研磨してクラッド層を除去した光ファイバー (光ファイバカップラー) を用いて、微小球との光結合実験を行っている。励起用レーザー光 (波長可変のチタン・サファイアレーザー) は、テラス部に照射され、微小球に導入され、光共振条件を満足するように波長を選択する。一方、読み出しにも光ファイバカップラーを用いる。微動装置を用いて、球の被覆

部の最適な位置に移動させて接近・接触させ押し当てる時の圧力を制御しながら測定を行う。

4. 研究成果

(1) テラス光共振用微小球の作製

粒径数十ミクロンの高屈折率ガラス球を作製し、光導入部である「テラス構造」をガラス球に付与した後、波長可変レーザーを用いて光共振・レーザー発振実験を実施した。テラス作製のための基礎技術として、マニピレータを使用することでピコリットルのゾルを取り扱う技術を確立した。溶媒の粘度、ゲル化速度 (固化の速度) が作製の重要な因子となった。2成分系有機・無機ハイブリッドが原料として適しており、組成比を変えることによりテラス部の厚さが変化することを見いだした。図 1 にテラス微小球の SEM 写真を示す

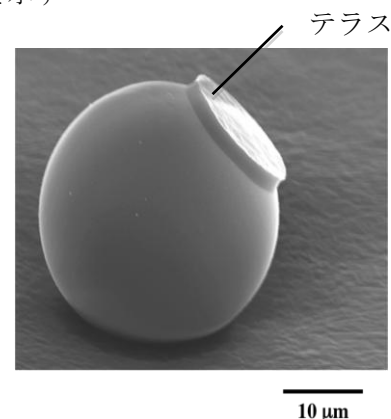


図 1 テラス微小球の SEM 写真

励起用レーザーの波長を微小球の光共振モードに精密に合わせるためには、最適波長を選択することが求められる。CW チタンサファイアレーザーを波長可変光源 (波長可変領域 750-950nm) として、直接照射によりテラス微小球への光カップリング実験を実施した。約 800nm の波長で励起し、0.1nm までの精度で最適な波長に合わせることにより、テラス微小球がラマンレーザーとして機能するこ

とを確認した。光導入には、少なくとも厚さ1ミクロン以上のテラス部が必要であることを明らかにした。

(2) レーザー発振

①波長可変レーザーによるテラス光共振用ガラス球の励起と発振

ガラス球は、高屈折率 ($n_p=1.93$) であり、同時に数ppmのNd³⁺を含有している。CW チタンサファイアレーザーを波長可変レーザー光源として励起実験を行った。ガラス球は高屈折率に起因するラマン散乱(波長830-890nm)とNd³⁺に由来する蛍光(波長860-930nm)が交差するように設定されている。励起光強度を変化させながら発振を行うと、蛍光によるラマン増強現象が生じることが確認された。固体中での蛍光/ラマン増強は、初めての報告と考えられる。レーザー発振の閾値は約4mWであり、100nmの幅の波長帯に多数の発振ピーク(約100個)を有する多波長光源として機能することが確認された。

(図2に多波長発振のスペクトルを示す)。

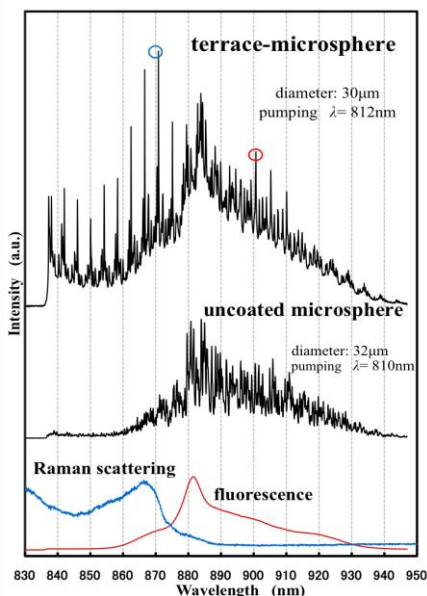


図2 テラス微小球からのレーザー発振

②光ファイバカップラを用いたガラス球の励起と発振

Nd³⁺添加高屈折率ガラス球を、コア部を露出させた自作の光ファイバカップラにより発振実験を行った。テラス形微小球と同様に、波長840-940nmにおいて、ラマンと蛍光に由来する多波長でのレーザー発振が確認された。励起光強度を増加させていくと、まず蛍光由来の発振が起き、次にラマン由来の誘導発振が生じた。閾値は約10mWとまだ改善の余地はあるが、励起方法が異なるにも関わらず、「固体中での蛍光/ラマン増強」が同様に観測された。

③希土類金属イオン添加ガラス微小球の作製と光信号増幅のための基礎実験

希土類金属イオン Nd³⁺を添加した超半球ガラスを作製し、自作した光ファイバカップラにより、ガラス微小球への光カップリング実験を行った。CW チタンサファイアレーザーを波長可変光源として、波長800nm帯で微小球を直接励起し、同時に光ファイバカップラにより信号光(波長1060nm)を導入して、発振光を測定した。励起光強度に依存して発振光の増加減少が観測され、従来の光増幅実験とは異なる結果が得られた。レーザー励起による温度上昇(室温→70°C)に由来する光共振ピークのシフトと光増幅の両者が重なり出現しているものと推測した。本基礎実験により、微小球光共振器での光増幅と、光スイッチングの可能性が示された。

(3) 光ファイバカップラによる光信号の読み出し

コア部を研磨し露出させた光ファイバカップラを作製した。これを用いて、励起され共振状態にある微小球からの共振光の読み出しに成功した。ガラス微小球の直接励起では、入射方向と読み出し方向が同じときに最も強く信号が測定でき、90度異なるときに信号強

度が弱まることを見いだした。さらに、テラス微小球では、90度異なるときには光信号は読み出せず、光読み出しには異方性を示すことが確認された。シミュレーション計算により、光導入と光読み出しは相互関係を有し、微小球の閉じ込め効率(Q値)には最適値が存在することを明らかにした。これらの実験により、一方向に光を取り出す指向性発振には球の閉じ込め効率を最適にする素子設計が必要となることを明らかにした。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計5件)

- (1) H. Uehara, T. Yano, S. Shibata, "Terrace Formation with a Picoliter Sol-Gel Droplet for Spherical Cavity Raman Laser", *J. Sol-Gel Sci. Technol.*, **58**, 319 (2011). (査読有)
- (2) S. Shibata, T. Yano, "Spherical Cavity Lasers for Multiwavelength Emission", *Int. J. Appl. Ceram. Technol.*, DOI: 10.1111/j.1744-7402.2010.02585.x (2011). (査読有)
- (3) H. Uehara, T. Yano, S. Shibata, "Terrace Microsphere Lasers: Spherical Cavity Lasers for Multi-Wavelength Emission", *SPIE vol. 7598*, 75981E, 1-9 (2010). (査読有)
- (4) S. Shibata, T. Yano, H. Segawa, "Organic-Inorganic Hybrid Materials for Photonic Applications", *IEEE of Selected Topics in Q.E.* **14**, 5, 1361 (2008). (査読有)

[学会発表] (計29件)

- (1) 岸哲生, 柴田修一, 矢野哲司 「StM法による超半球型ガラス光学素子の作製」 The 21st Meeting on Glasses for Photonics、日本セラミックス協会、東京工業大学、百年記念館 2011年2月9日。
- (2) 上原日和, 岸哲生, 矢野哲司, 柴田修一 「テラス微小球を用いた多波長レーザー発振—希土類金属イオンの蛍光による誘導ラマン散乱の増強効果—」 The 21st Meeting on Glasses for Photonics、日本セラミックス協会、東京工業大学、百年記念館、2011年2月9日。
- (3) A. Inoki, T. Yano, S. Shibata, "Optical Amplification in a Nd³⁺-Doped

Glass Microsphere", Fourth International Conference on Science and Technology of Advanced Ceramics (STAC-4), Mielparque-Yokohama, Yokohama, Japan, June 21-23, 2010.

(4) H. Uehara, T. Yano, S. Shibata, "Enhancement of Stimulated Raman Scattering in Terrace-Microspheres", Fourth International Conference on Science and Technology of Advanced Ceramics (STAC-4), Mielparque-Yokohama, Yokohama, Japan, June 21-23, 2010.

(5) 鴻野立宜, 瀬川浩代, 矢野哲司, 柴田修一 「光ファイバー カップラーによる光共振用微小球の励起と読み出し」 1H30、日本セラミックス協会 2010年年会、東京農工大学、2010年3月22日~24日。

(6) S. Shibata, T. Yano, "Glass Microspheres for Spherical Cavity Laser", 3rd AEARU Advanced Materials Science Workshop, POSCO International Center, POSTECH, Korea, Nov. 11-13, 2009.

(7) 柴田修一, 矢野哲司 「有機・無機ハイブリッド材料による光共振用微小球とその光機能性」第56回応用物理学関係連合講演会、応用物理学会、筑波大学、筑波キャンパス、2009年3月30日~4月2日。

(8) 佐藤哲朗, 矢野哲司, 瀬川浩代, 柴田修一, 岸哲生, 安盛敦雄 「StM法で作製した超半球ガラスの光共振特性」 2K10、日本セラミックス協会 2009年年会、東京理科大学、野田キャンパス、2009年3月16日~18日。

(9) 岸哲生, 安盛敦雄, 矢野哲司, 柴田修一 「Surface-tension Mold法により作製したSolid Immersion Lensのレンズ機能」日本セラミックス協会 第21回秋季シンポジウム、北九州国際会議場、西日本総合展示場、2008年9月17日~19日。

(10) H. Uehara, H. Segawa, T. Yano, S. Shibata, "Terrace-Microspheres Coated with Hybrid Materials" The 2nd International Conference on Science and Technology for Advanced Ceramics (STAC2), OVTA, Chiba, Japan, May 30-June 1, 2008.

[図書] (計3件)

- (1) 柴田修一、微小球ガラスレーザー、「セラミックス機能化ハンドブック」p. 114-119, エス・ティー・エス 2011年。
- (2) 柴田修一、「ゾルーゲル法技術の最新動向」シーエムシー出版、p. 126-133、2010年。
- (3) 柴田修一 「光共振用ガラス微小球からのレーザー発振」 p. 178-180、セラミックスデータブック 2009/10、工業製品技術協会、2009年。

[その他]

ホームページ:

<http://www.garaken.com>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

柴田 修一 (Shibata Shuichi)

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号: 00235574

(2) 研究分担者

矢野 哲司 (Yano Tetsuji)

東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号: 90221647

瀬川 浩代 (Segawa Hiroyo)

東京工業大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号: 90325697