

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 原 佳子

透明な誘電体微小球は小さな体積に光を長時間閉じこめることが出来る究極の光共振器として働く。この光閉じこめモードは Whispering Gallery Mode(WGM) と呼ばれ閾値の無いレーザーやフォトンレベルで動作する光双安定素子、さらには単一光子発生源として利用することが期待されている。このような機能と光素子に要請される高速応答性を両立させるためには、光閉じこめの体積が出来るだけ小さくかつ、光閉じこめの指標となる光子寿命が光の周期の数千倍以上とすることが必要である。本研究では直径が数ミクロンの十分透明なポリマー微小球がこの条件を満たすことに着目し、広い均一広がりをもつ色素分子を微小球内に導入した試料を用いて、誘電体微小球の微小光共振器としての基本特性を系統的に調べた。さらにその結果をふまえ、微小球の連結構造によって、光波をミクロンスケールで操作する方法について議論した。

本論文は以下の7章からなる。以下に各章の内容を要約する。

第1章では、微小領域における光波操作技術の必要性、微小光共振器の特徴と用途、微小共振器の共鳴的連結構造について述べ、本研究の背景を紹介している。さらに、これらを踏まえた上で本研究の目的を示し、さらに本論文の構成について述べている。また、本研究の直接的な背景となった、サイズの揃った2つの微小球の共鳴的結合モードの観測に関する過去の実験について紹介している。

第2章では、本研究の理論的背景として、微小球光共振器の電磁気学、単一微小球のモード構造及びその寿命について述べまた、微小光共振器による自然放出確率の変調効果の一般論について述べている。これらをもとに、微小球共振器内に配置された励起分子の自然放出寿命が共振器効果によってどのように変化するかを2つの立場から議論している。第一は球面波の散乱振幅を計算し、微小球内の真空場強度を計算する方法である。これを用いて、励起分子の均一幅が十分広い場合には、全自然放出確率は一様媒質の場合と同じになるが、共振器Q値の高いWGMモードに優先的に放射され、いわゆる自然放出結合係数が特異的に高くなることを示している。第2の方法として、古典的な振動双極子を配置し、その放射電磁波が微小球を介して振動双極子に作用しその反作用として減衰の時定数が変化することに着目し、その変化量から放射減衰の共振器効果を評価する方法である。両者の方法による表式を見比べ、両者が等価であることを示している。また、2つの計算法について、角運動量量子数を指数とする部分波に分けて、数値計算すると、第一の計算法では評価する周波数領域に共鳴ピークをもつWGモードまでの角運動量量子数の寄与を考慮すれば十分収束するのに対し、第2の方法では、より高い次数のモードの寄与までを加算しなければ収束しないことを見いだしている。

第3章では、球径と色素のドーブ濃度を系統的に変化させ、色素ドーブ微小球の光励起による発光およびレーザー発振特性について実験を行った結果について述べている。色素分子の発光特性は共振器の効果を反映したスペクトル構造を示す。このスペクトルと2章で議論した自然放出率の計算によって得られたスペクトルを比較した。球内部に配置された色素分子はWGモードによってその発光スペクトルは変調され、かつ球内部での色素吸収による効果と球から外部に漏れ出す効率の競合によってスペクトル形状が決定していることを示した。人為的にモードの球外への損失を大きくした測定では、発光スペクトルが理論

とよく一致することを見いだした。また、色素ドーブ濃度と球径を変えた色素ドーブ単一微小球におけるレーザー発振を観測し、閾値近傍の入出力特性からWGモードの自然放出結合係数を見積もっている。その結果、直径3-4ミクロンの色素ドーブ微小球において、自然放出結合係数が約7%の値となることを見出している。

第4章では、活性媒質となる色素分子をWGモードの電場強度が強くなる外縁部のみに配置する、シェル構造を持つ試料を用意し、発光およびレーザー発振について調べた。直径10ミクロンのシェル構造微小球サンプルで、レーザー発振閾値特性評価から $s=3$ のモードが約7-10%の自然放出結合係数を示すことを見いだしている。この値が、一様に媒質をドーブした直径10ミクロンの微小球における $s=3$ のモードの自然放出結合係数3.5%の約2倍であり、第2章の議論とつじつまがあうことを示している。

第5章では、微小球を保持する方法について検討するために、高い屈折率を持つ板と微小球の相互作用について、FDTD法による電磁波解析を用いて考察した。球と基板の間に500nm以上の距離があればWGモードは基板の影響を受けないという結果を見出した。また、V字型の溝構造を持つSiliconの基板上に色素ドーブ微小球を載せ空間分解測定を行い、その蛍光スペクトルのWGモードのピーク構造からV溝と球の間の空隙はWGモードの高いQ値を損なわずに保持できることを示した。これをもとに、V溝上の2連球を構成し、発光スペクトルの空間分布測定とレーザー発振閾値特性評価を行った。その結果、結合モードと反結合モードの球内部電場分布の違いが明瞭に観察された。また閾値特性の評価から、2連球の結合モードがコヒーレントな結合によって生じており、Q値がほぼ保存されていることが示された。

第6章では、1次元連結微小球構造へと拡張し、球径の揃った3個から6個の微小球をV溝上に並べて1次元的フォトニックチェーン構造を作製し、生じる1次元フォトニックバンドモードについて考察している。各連結球構造における蛍光スペクトルから結合モードを観測し、各結合モードの共鳴が、最近接の結合係数のみをパラメーターとして用いる強束縛近似に基づく結合調和振動子モデルと良く一致することを見出した。この結果は、シンプルな結合調和振動子モデルによって、連結微小球構造という3次元的構造の共鳴周波数を波動光学による電磁波解析と同程度に精度良く予測することができることを示すものであり、応用上大きな意義を持つと結論している。次に、連結微小球構造による光波操作の可能性の検証を目的とし、1次元フォトニックチェーンにおける共鳴散乱スペクトルを観測し、その共鳴特性から群屈折率を評価し、40という大きな値を得た。更に、光遅延導波路としての応用について、群速度分散や球径の揺らぎ、微小球のQ値による影響などの考察を行った。2種のフォトニックチェーンを直列につなぎ、群速度分散の補償を行い、遅延導波路の帯域を確保する方法を提案した。

第7章では、本研究の結果をまとめ、最後に課題と今後の展望を述べている。

以上のように、本研究は、微小領域における光波操作について、高い閉じ込め効率と高い自然放出結合係数を両立させることのできる微小球共振器をサイズを厳密に選別した上で連結させた構造について調べ、微小球連結構造が微小領域における光波操作について有効な手法となることを見いだした。これは、サイズを揃えた微小球を部品として、多様な微小光導波構造を構成する方法として大きな可能性を持っていることを示している。

これらは、微小領域における光遅延回路や低閾値動作微小非線形素子の実現への指針を与えるものであり、物理工学の発展への寄与は大きい。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。