

# 論文内容の要旨

## 微小球共振器による光波操作

原 佳子

微小な領域における光波操作は、応用、基礎どちらの観点からも重要であり、特に構造の共鳴効果を用いた光波操作は、光学特性の設計の自由度から光信号処理や量子情報処理など様々な応用面から注目されている。そのアプローチには2つあり、フォトニック結晶による散乱の重ね合わせを用いるものと、高い閉じ込め効率をもつ微小共振器 (high-Q 共振器) の共鳴的連結を用いるものがある。High-Q 共振器の共鳴的連結構造において光は各共振器に強く閉じ込められつつ隣接する共振器間の弱い結合を介して伝搬し、強束縛近似的描像に従う。この系の単位構造の候補には、微小ファブリーペロー型共振器、フォトニック結晶中の欠陥構造、マイクロディスク、微小球等がある。

微小光共振器の中でも、微小球共振器は、誘電媒質と外部との境界における内部での全反射によって、かつ三次元的構造によって光を閉じ込めることで、小さなモード体積と高い閉じ込め効率を実現でき、3次元的な輻射場の制御にあたり最も有力な系であると考えられている。以上を踏まえ、本研究では誘電体微小球共振器を単位構造とする high-Q 共振器の共鳴的連結構造における光波操作を試みた。

本論文ではまず、色素ドーブ単一微小球の共鳴発光の観測及びレーザー発振の観測を用い、色素の様に媒質の均一幅が広い場合の共振器量子電気力学効果について考察を試みた。次に、1次元的な連結構造の直線性を保持する基板の微小球モードへの寄与について考察を行った。また直径  $4-5\mu\text{m}$  の球径の良く合わせた2連球におけるモードの空間分布やレーザー発振の観測を用い、連結球構造における WG モードの結合について調べた。更に、球径を良く合わせた2-7個の微小球を連結させ1次元フォトニックチェーン構造を作成し、共鳴発光及び共鳴散乱の観測を通して1次元フォトニックバンドについての考察を行った。

本論文は以下のように構成される。

第一章は序論として、光微小共振器や high-Q 共振器の連結構造のこれまでの研究を述べ、本研究の位置付け及び目的、構成について述べる。

第二章では、理論的背景として、単一微小球のモード構造、均一幅の広い媒質を用いた微小球共振

器における共振器量子電気力学効果について述べる。また、連結微小球構造における共鳴モードについても述べる。

第三章では、球径と色素のドーブ濃度を変えた微小球の共鳴発光及びレーザー発振の観測について述べ、結果を共振器量子電気力学効果の観点から解釈する。

第四章では、微小球の外皮部分にのみ色素をドーブしたコア・シェル構造のサンプルの共鳴発光及びレーザー発振の観測について述べる。

第五章では、微小球連結構造の保持法についての考察を述べ、球径を合わせた2連球構造におけるモードの空間分布測定及びレーザー発振観測の実験と2連球におけるWGモードの結合についての考察を述べる。

第六章では、微小球を1次元的に連結させた1次元フォトニックチェーンにおける共鳴発光と共鳴散乱の観測について述べ、重い光子状態について考察する。

第七章では、本研究のまとめと今後の展望について述べる。

自然放出の変調は、ファブリーペロー共振器における議論で、媒質のスペクトル関数の幅と共振器モード間隔の大小に依存することが示されている。微小球共振器における自然放出率は、それと同時に球内の外縁部分に局在するWGモードの電場分布を反映し、球の外縁部において大きく増強されると考えられ、媒質のスペクトル関数が共振器モード間隔程度に広い場合においても自然放出の増強が期待される。自然放出光のモードへの寄与分は、単一で発振するモードの発振閾値前後の入出力特性から評価することができる。

微小球共振器における共振器量子電気力学効果の検証を行うには、モード同定をした上でレーザー発振閾値近傍の振る舞いを定量的に評価する必要があり、それには高いQ値と密でないモード分布の特徴を共に持つ直径数ミクロンの微小球が適していると考えられる。一方、色素ドーブ微小球は比較的容易にドーブ濃度を調整できる為、定量評価を行うのに適した系と言える。そこで、濃度と球径をそれぞれ  $10^{-3} - 10^{-2}$  mol/l、 $\phi 2.9 - 6.9\mu\text{m}$  の範囲で変えた色素ドーブ単一微小球において、共鳴発光の観測を行い、蛍光スペクトルにあらわれる微小球内の光子状態密度より微小球による自然放出の変調の効果を考察した。色素には、量子収率が高く、蛍光の損失が少なくレーザー媒質に適した準位構造を持つ Pyrromethene580 を用いた。また、この系においてレーザー発振の観測を行い、レーザー発振閾値近傍の入出力特性に対して孤立4準位系を媒質とした単一モード発振におけるレート方程式を適用し、自然放出光のモードへの寄与を見積もった。その結果は、双極子同士の相互作用によるエネルギーの譲渡の効果 (Förster energy transfer) や、有効モード体積内における色素分子数のレーザー発振への効果を考慮することで理論と対応させることが出来た。また、コア・シェル構造における共鳴発光及びレーザー発振の観測を行い、同様の議論を行った。

1次元的な連結構造の作製にあたって、構造の直線性を保持する基板は重要である。そこで、基板

の微小球モードへの寄与について FDTD 法を用いた電磁波解析と蛍光スペクトルの観測の両面より考察を行った。その結果、V 字の溝 (V 溝) 構造においては、溝と溝に載せた微小球の間に空隙が生じ、溝方向に平行かつ基板に垂直な面内を廻る微小球モードが保たれることを確認した。

次に、シリコンの V 溝構造上の直径  $4 - 5 \mu\text{m}$  の 2 連球における WG モードの結合について詳細な議論を試みた。バンドルファイバーを用いてサンプルの拡大像を分光器出口にある CCD カメラ上に結像することで、空間情報と周波数情報を同時に解析し、モードの空間分布を測定した。その結果、2 連球モードはそれぞれ bonding, anti-bonding な振る舞いを示すことがわかった (図 1(a))。また、2 連球モードのレーザー発振を観測し、その自然放出結合係数として単一球モードの約半分の値を得た。これらの結果は、連結微小球において WG モードのコヒーレントな結合が生じていることを示唆している。

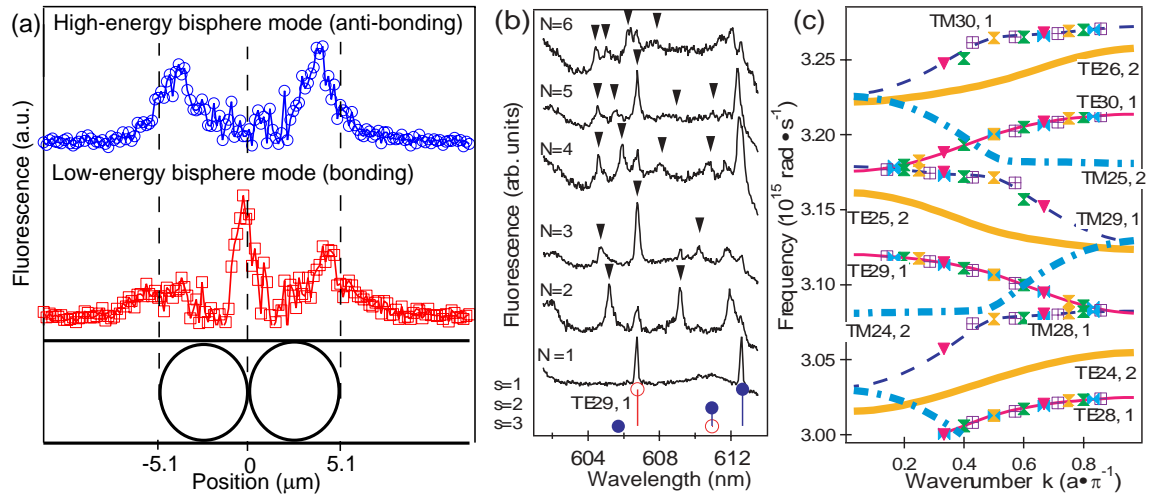


図 1: (a) 2 連球における 2 連球モードの空間分布. (b) 1 次元フォトニックチェーンにおける TE<sub>29,1</sub> モード近傍での蛍光スペクトルおよび (c) バンド図.

V 溝構造上に球径を良く合わせた微小球を連結させて 2 - 6 個の 1 次元フォトニックチェーン構造を作成し、共鳴発光の観測を行った。その結果、図 1(b) に示すように連結球の数に等しい共鳴的結合モードを観測した。これらの共鳴周波数の波数空間へのプロットより得られるバンドは、2 連球の実験から得た最近接球間の結合係数をパラメータとして調和振動子モデルで計算した結果と比較すると、近傍に存在する高次のオーダーのモードとの相互作用によるノーマルモードの分裂幅の非対称性も含め、良い一致を示した (図 1(c))。これは、1 次元フォトニックチェーンにおける光の伝搬が最近接近似を用いた強束縛近似描像に従っていることを示しているといえる。

次に、光の伝搬特性についての考察を行う為、共鳴散乱の方法を用いて 1 次元フォトニックチェイ

ンの共鳴を観測した。図 2(a) に示すように入射の位置や偏光等の制御によって、連結球モードのみを選択的に励起することが可能であり、色素の蛍光を用いる場合よりも高い精度でフォトニックチェーンの共鳴周波数を決定することができる。この共鳴周波数より得られるバンド図(図 2(b)) から、40 という大きな群屈折率を得た(図 2(c))。無限個の微小球の連結による 1 次元フォトニックバンドを作成した場合、バンド端の傾きは 0 に漸近する為、バンド端における群屈折率はバンドの幅、即ち各微小球共振器の  $Q$  値によって決まる。熔融シリカのような透明性の高い物質を用いれば  $10^6$  程度の  $Q$  値が可能であり、その際、バンド端での群屈折率は 200 以上になる。

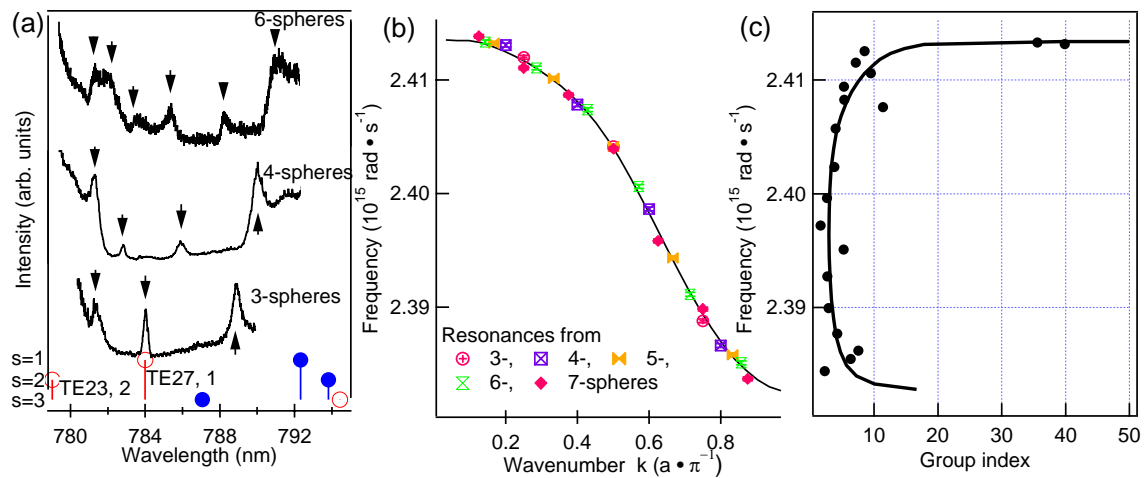


図 2: 1 次元フォトニックチェーンにおける (a)TE27, 1 モード近傍での共鳴散乱スペクトル,(b) バンド図,(c) 群屈折率.

以上の結果から、球径のよく合わせた微小球の連結構造を用いた 1 次元フォトニックチェーンが、究極的な光波操作の有力候補であることを確認できた。本研究において議論した誘電体微小球の連結構造による 1 次元フォトニックチェーンの作製方法は、単位構造である微小球の球径を選別した後に構造を組み上げる方法である。この場合、フォトニックチェーンの性能は、個々の微小球に依存し、共鳴スペクトルを利用して微小球の選別を行えば高い精度での制御が可能となる。このスキームは、マイクロファブリケーション技術によって作製されるフォトニック結晶やマイクロディスクの方法とは全く異なるアプローチであると言える。