

テーパファイバ結合微小球共振器の 光共鳴特性制御に関する研究

学位論文内容の要旨

透明な誘電体微小球に光が入射すると、その光は微小球境界面で全反射して微小球内を周回し、周回したときに位相の揃う波長の光のみが微小球内に閉じこめられ共鳴する。即ち微小球は光共振器として機能し、微小球共振器として知られている。微小球共振器はほかの光共振器に比べて作製が容易であることに加え、境界面の全反射現象に基づいているため光閉じ込め効率(Q 値)が高く、共振器の共鳴モードの実効体積(モード体積)が小さい特長がある。また微小球共振器の共鳴モードは、エバネッセント場として球表面に若干しみ出しているため、エバネッセント場を介した高効率の光結合が可能となる。特にテーパファイバ(部分的にくびれをもたせた光ファイバ)を用いた光結合は、他の方法に比べ効率が高いことに加え、共鳴モードの空間的選択性・周波数選択性の面で優れていることが知られている。この結合方法は既存の光通信技術との整合が容易であるため、狭帯域フィルタや分波デバイスなどの、高い Q 値を活かした小型の光デバイスの実現が強く期待できる。また、単一原子をドープした微小球共振器による非線形位相制御デバイスも提案されている。

微小球共振器の応用可能性が著しく拡がりつつある一方で、その共鳴特性を自在に操ることが応用にあたっての必須条件となる。例えば、共鳴周波数の制御法である。単一の原子・分子・イオン等が持つ狭帯域の遷移を微小球共振器の共鳴モードに結合させる場合、共振器中に存在している単一原子等の環境はひとつひとつ異なるため、個々の遷移周波数に違いが生じる。また、微小球共振器の共鳴周波数は、微小球の歪みにより若干の共鳴周波数シフトが生じる。これらの理由により、所望の共鳴周波数が得られるような微小球共振器のパラメータを予め設定して共振器の共鳴モードを単一原子等の遷移へ完全に結合する事は実験的に非常に困難である。高い効率で共鳴モードを物質の遷移に結合するためには、MHz オーダーの精度を持つ共鳴周波数制御が必要になる。

テーパファイバによる微小球共振器への結合についても、所望の Q 値や共鳴周波数を持つ共鳴モードに結合するための方法が必要となる。しかしテーパファイバの導波モードと微小球の共鳴モードとの結合効率は、両モードの伝搬定数差に大きく依存する。そのため、テーパファイバの伝搬定数が所望の値から若干ずれ

ると、結合させたい共鳴モードと空間的に重なっている別の共鳴モードに結合する状況が生じる恐れがある。また、微小球の単一共鳴モードにテーパファイバの複数の導波モードが結合する場合も存在し、これに関する実験的解析が近年報告されている。しかし、微小球共振器には様々な共鳴モードが存在し、テーパファイバから微小球の共鳴モードの各々が受ける影響の違いに関する詳細な解析は行われていない。

本研究では、テーパファイバで結合した固体微小球共振器の共鳴周波数や Q 値、結合パラメータ(Coupling Parameter)などの光共鳴特性に関する解析を実験的に行った。まず、微小球の温度コントロールによる共鳴周波数の制御の検討を行い、この手法が共鳴周波数の高精度制御に適していることを実験的に示した。次に、微小球への光結合素子としてテーパファイバを用い、テーパファイバが結合した微小球共振器の共鳴特性の解析を行った。またこの過程で、テーパファイバ内で光が多モードで伝搬することにより微小球共振器の共鳴モードに Fano 効果を誘起できることを実験的に見出したのでこれについても解析を行い、そのスペクトル形状を任意に制御できることを理論・実験の両面から示した。

本論文は、全6章で構成されている。以下に、各章の概要を述べる。

第1章では、マイクロメートルオーダーの誘電体微小球が光共振器として機能することに加え、その共鳴特性を利用した様々な応用の可能性があることを説明する。また微小球共振器に関するこれまでの研究成果に基づいて、微小球共振器の共鳴特性制御の必要性並びに、それを踏まえた本研究の目的について述べる。

第2章では、微小球の光共鳴現象について、Mie 散乱理論に基づいて説明する。また、テーパファイバと微小球共振器との光結合に関する基礎知識についても述べ、第5章で述べる実験の基礎知識となる Fano 効果についても触れる。

第3章では、微小球共振器の共鳴周波数の温度依存性を利用した共鳴周波数の制御に関する検討を行う。まず温度による微小球の共鳴周波数制御の理論モデルを示す。その結果に基づいて、熔融シリカの熱膨張係数および屈折率の温度係数から、単位温度変化に対する微小球共振器の共鳴周波数シフトを定量的に評価する。次に、周波数掃引した狭帯域レーザ光をファーフィールドで微小球に照射して測定した、微小球共振器の共鳴周波数シフトの温度依存性が、理論モデルによる推定結果とよく一致したことを示す。

第4章では、テーパファイバによる微小球共振器の共鳴モードへの光結合について述べる。まず、テーパファイバのウエスト部(最もくびれた部分)に接触させる微小球共振器を色々替え、高い効率で結合できる共鳴モードを持つ微小球共振器の直径を実験的に探索した結果を示す。この結果から、微小球共振器の直径に許容される最適値からの偏差について議論する。次に、この結果に基づいて得た微小球共振器・テーパファイバの結合系を用いて、テーパファイバの透過スペクトルのテーパファイバ・微小球間距離依存性の測定結果について述べる。その結果から、テーパファイバの存在が共鳴周波数、 Q 値、結合効率へ与える影響について考察し、テーパファイバと微小球共振器との間のモード結合を評価する。

第5章では、多モードのテーパファイバが微小球共振器の単一モードに結合し

たときに Fano 効果が誘起されることを理論モデルに基づいて示す。そして、この系で誘起される Fano 効果が微小球共振器とテーパファイバとの相対的位置に依存して変化する事にも触れ、それがテーパファイバ内の多モード分散に起因することを示す。また、これらの実験的解析を行い、上述の理論の妥当性を示すとともに、テーパファイバにより結合された共鳴モードの考察を行う。

第 6 章では、論文全体の総括として、本論文で述べた知見のまとめと今後の展望について述べる。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 笹 木 敬 司
副 査 教 授 末 宗 幾 夫
副 査 教 授 武 藤 俊 一
副 査 教 授 三 澤 弘 明
副 査 助 教 授 竹 内 繁 樹

学 位 論 文 題 名

テーパファイバ結合微小球共振器の 光共鳴特性制御に関する研究

透明な誘電体微小球に光が入射すると、光は微小球境界面で全反射を繰り返し、微小球内を周回したときに位相が揃う光のみが球内に閉じこめられ共鳴する。このように、微小球は光共振器として機能し、その共鳴モードは高い Q 値と小さなモード体積とを併せ持つ特長を持つ。また微小球共振器の共鳴モードは、エバネッセント場として球表面近傍にしみだしているため、これを介した高効率の光結合が可能であることが近年示されている。特にテーパファイバ(局所的に直径を数 μm まで細くした光ファイバ)を用いた光結合方法は、他の方法に比べ効率が高く、共鳴モードの選択性の面でも優れている。この方法は既存の光通信技術との整合が容易であるため、高い Q 値を活かした小型の光デバイス(狭帯域フィルタ、光分波器等)の実現可能性がある。また、単一原子をドープした微小球共振器による非線形位相制御デバイスも提案され、これは量子情報処理に不可欠な光デバイスとして実現が強く望まれている。

微小球共振器は、上述した応用可能性がある一方で、その共鳴特性の制御が応用の必須条件となる。まず、共鳴周波数の制御法である。高い効率で微小球共振器の共鳴モードを単一の原子・分子・イオン等が持つ狭帯域の遷移に結合するためには、MHzオーダーの精度を持つ共鳴周波数制御が必要となる。また、微小球共振器の共鳴モードを選択的に励振する方法も要求される。テーパファイバのあるモードは微小球の複数の共鳴モードと結合するが、このときの、微小球の共鳴モードの各々がテーパファイバから受ける影響の違いに関してこれまで十分な知見が得られていなかった。

本論文では、微小球共振器を用いた光デバイスの実現にあたって不可避となる、上の2点について記述されている。また、テーパファイバの透過スペクトルに現れるディップの形状が微小球の位置に依存して周期的に変化することを、初めて理論・実験の両面から示し、スペクトル形状の非対称性を任意に制御できる可能性も示唆している。

本論文は以下の7章から構成されている。

第1章では、マイクロメートルオーダーの誘電体微小球が光共振器として機能することに加え、その共鳴特性を利用した様々な応用の可能性があることを説明している。また微小球共振器に関するこれまでの研究成果に基づいて、微小球共振器の共鳴特性

制御法の確立が必須であること並びに、それを踏まえた本研究の目的について述べている。

第2章では、微小球の光共鳴現象および、テーパファイバと微小球共振器との光結合に関する基礎知識について説明を行っている。また第5章で述べる実験の基礎知識として Fano 効果についても述べている。

第3章では、微小球共振器の共鳴周波数の温度依存性を利用した共鳴周波数の制御方法を提案し、簡単なモデルに基づいた計算から mK オーダーの温度変化で数 MHz の共鳴周波数制御が可能であることを示している。また、様々な微小球共振器の温度における散乱光スペクトルを測定して、共鳴周波数シフトの温度依存性を実験的にも示し、その結果が理論モデルによる推定値とほぼ一致することも示している。これらの結果から、微小球共振器の共鳴周波数の高精度制御法として有力な手法であることを結論付けている。

第4章では、テーパファイバによる微小球共振器の共鳴モードへの結合について述べ、テーパファイバから微小球共振器へのモード結合の評価を行っている。

微小球共振器にテーパファイバで光を結合させたときの、微小球共振器の共鳴モードの共鳴周波数や Q 値などの光共鳴特性に関する解析結果について述べている。その結果から、テーパファイバ・微小球間距離の変化による共鳴周波数および Q 値の変化は微小球の共鳴モードに依らない一方で、結合パラメータ(テーパファイバ・微小球間のモード結合を特徴付けるパラメータ)が共鳴モードに依る違いを示し、それが微小球共振器の共鳴モードを反映している事を示唆した。

第5章では、テーパファイバが微小球共振器の単一モードに結合したときに、微小球共振器とテーパファイバとの相対的位置に依存して透過スペクトルの形状が変化することを示し、それが Fano 効果によるものであることを論じている。また、この系で誘起される Fano 効果がテーパファイバ内の多モード分散に起因していることを理論的に示し、実験的解析を通じて上述の理論の妥当性を示すとともに、テーパファイバにより結合された共鳴モードの考察を行っている。

第6章では、論文全体の総括として、本論文で述べた知見をまとめ、今後の展望について述べている。

これを要するに、テーパファイバが共鳴モードに与える影響の解析に加え、温度コントロールによる共鳴周波数制御やファノ効果による共鳴ディップの非対称性の制御に関して理論・実験の両面から実証し有益な知見を示し、テーパファイバで結合した微小球共振器を光デバイスとして応用するための可能性が広がることが期待でき、著者の研究は光量子エレクトロニクスの分野に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。