

学位論文題名

微小球およびファイバ結合微小球における 発光体の自然放出と制御

学位論文内容の要旨

発光体の誘導放出を共振器により増幅することで実現されているレーザーは、今日、光通信、光メモリー、微細加工、光計測、医療など、様々な産業で用いられている。また、レーザーは、基礎研究の分野でも広く用いられ、多彩な非線形光学現象が観測され、新しい物理現象が次々に実現されている。このように、レーザーは様々な分野で利用されているため、20世紀最大の発明の一つとされている。特に、半導体レーザーでは、幅が数 μm 、長さが数百 μm の領域に光を閉じ込め光を増幅するため、他のレーザーと比べ、小型で消費電力を小さくできるため、今日様々な分野で利用されている。さらなる性能改善のためには、より光閉じ込め(Q値)の大きな微小共振器を用いることで、より低閾値で発振する効率の良いレーザーを実現できることが知られている。そのような共振器中では、僅かな領域の中で発光体と光とが長時間相互作用するため、効率の良いレーザーを実現できるのである。また、発光体と結合した微小共振器は、このようなレーザーだけでなく、発光体の自然放出の人工的な制御にも用いることができる。たとえば、単一光子源や単一光子レベルでの非線形デバイスの新規デバイスや、また、強結合状態の実現による新しい基礎科学の開拓が期待されている。

そのような共振器には、Q値に加えて次のような条件が要求される。発光体と光場の強い相互作用を実現するための小さいモード体積をもつこと。発光体を微小共振器へ安定して結合可能な、固体共振器であること。さらに、光通信への応用や、実際の測定の簡易化のために、シングルモードファイバーに低損失で接続できることが強く望まれる。一般によく知られている共振器構造として、ファブリペロー型構造やフォトニクス結晶構造がある。しかし、それらの構造にはそれぞれいくつかの問題があった。一つは、増強された光場は一般に固体共振器の内部に存在し、発光体の導入が困難であること、もう一つは、光ファイバとのモノシリックな結合が困難であることである。

本研究では、それらの問題点を解決する共振器構造として、微小球共振器に着目した。微小球共振器は、10の9乗を超える高いQ値と、小さいモード体積を実現でき、かつ、一度溶融させることで表面張力により自然と球形になるため作製が容易である。また、微小球共振器のモードは球表面に局在するため、発光体を安定して共振器と結合させることが比較的容易である。しかし、以前は微小球へ光を結合する方法、特に単一モード光ファイバとの結合方法に問題があった。その問題は近年、Knightおよび引き続きVahalaらのグループの、テーパー状に引き延ばした単一モードファイバーを用いる方法によって解決した。シングルモードファイバーを数 μm まで細く引き伸ばしたファイバー(テーパーファイバー)を微小球共振器への光カップラーとして用いる方法である。

本研究では、このテーパーファイバー結合微小球共振器の、低閾値・無閾値で発振するレーザーや

非線形デバイス、量子情報デバイスへの応用を念頭に、ファイバー結合微小球共振器とカップルした発光体の自然放出過程とその制御に関して研究を行った。

微小球共振器のモードは、波長程度の幅を持ち表面から僅かに内側に存在するため、自然放出の共振器モードへの結合比 β は発光体を配置する位置に依存する。これまで、ファイバ結合微小球共振器に関して、結合比 β に関する報告はない。また、微小球共振器単体の β に関する研究では、球全体をゲイン媒質で構成した液滴微小球や、表面近傍に色素をドープしたポリマー微小球を用いたものが報告されていた。しかし、微小球内の光モードの空間分布よりもずっと広い範囲に発光体が配置されてしまうため、結合の最適化や理論との比較が困難であった。

そこでまず、本研究では、モードの空間分布よりも十分薄いゲイン媒質層を有するファイバ結合微小球レーザーの開発に取り組んだ。その結果、通常のエルビウムドープガラスのゲイン層に、さらにリンをドープすることにより、ゲイン物質であるエルビウムの高分散化に成功、知る限り初めて1ミクロンを切る、200ナノメートルのゲイン媒質層によるレーザー発振に成功した。また、レーザー発振特性から β 値を推定することに、ファイバ結合微小球共振器として初めて成功、さらに、ゲイン層の外側にシリカガラス層をオーバーコートすることによる、 β 値の増大の観測にも成功した。

さらに、近年単一発光体として注目されている量子ドットを微小球共振器表面に付着させ、その自然放出がどのような微小球モードと結合しているのかを研究した。その結果、サンプルからは低次のモードと結合した放射は観測されず、むしろQ値の小さい高次のモードと結合した放射が観測された。その理由を知るために、微小球表面のQDsの自然放出過程を詳細に検討した結果、表面のドットの吸収係数、および、微小球表面のラフネスを用いて現象を説明することができた。

また、上記の研究をおこなうに際して、作成した枝付き微小球を簡便に評価する必要がある。本研究では、レーザー光をレンズで集光し微小球に入射し、微小球の散乱光を測定する方法(ファーストフィールド観測)による、微小球の簡易評価システムを開発した。

以上を要するに、本研究では、発光体の自然放出を制御するための理想的な共振器の一つとしてテーパファイバ結合微小球共振器に着目し、自然放出過程とその制御について研究を行った。リン・アルミをドープしたエルビウムガラスという新たな光増幅媒質を開発、光モードの空間拡がりよりも十分薄い200 μm のゲイン層を有するファイバ結合微小球レーザーを実現し、自然放出結合係数の推定およびその制御にも成功した。また量子ドットからの発光と微小球モードとの結合についても詳細な研究を行い、ドットの吸収係数や表面ラフネスとの関係を明らかにした。

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 三 澤 弘 明
副 査 助 教 授 竹 内 繁 樹

学 位 論 文 題 名

微小球およびファイバ結合微小球における 発光体の自然放出と制御

光閉じ込め (Q 値) の大きな微小共振器を用いることにより、低閾値で発振する効率の良いレーザーを実現できることが知られている。そのような共振器中では、僅かな領域の中で発光体と光とが長時間相互作用するため、効率の良いレーザーを実現できる。また、発光体と結合した微小共振器は、このようなレーザーだけでなく、発光体の自然放出の人工的な制御にも用いることができる。たとえば、単一光子源や単一光子レベルでの非線形デバイスの新規デバイスや、また、強結合状態の実現による新しい基礎科学の開拓が期待されている。そのような共振器には、Q 値に加えて次のような条件が要求される。発光体と光場の強い相互作用を実現するための小さいモード体積をもつこと。発光体を微小共振器へ安定して結合可能な、固体共振器であること。さらに、光通信への応用や、実際の測定の簡易化のために、シングルモードファイバーに低損失で接続できることが強く望まれる。一般によく知られている共振器構造として、ファブリペロー型構造やフォトニクス結晶構造がある。しかし、それらの構造にはそれぞれいくつかの問題があった。一つは、増強された光場は一般に固体共振器の内部に存在し、発光体の導入が困難であること、もう一つは、光ファイバとのモノリシックな結合が困難であることである。

本研究では、それらの問題点を解決する共振器構造として、微小球共振器に着目した。微小球共振器は、10 の 9 乗を超える高い Q 値と、小さいモード体積を実現でき、かつ、一度溶融させることで表面張力により自然と球形になるため作製が容易である。また、微小球共振器のモードは球表面に局在するため、発光体を安定して共振器と結合させることが比較的容易である。しかし、以前は微小球へ光を結合する方法、特に単一モード光ファイバとの結合方法に問題があった。その問題は近年、テーパ状に引き伸ばした単一モードファイバを用いる方法によって解決された。シングルモードファイバーを数 μm まで細く引き伸ばしたファイバー (テーパファイバー) を微小球共振器への光カプラーとして用いる方法である。

本研究では、このテーパファイバー結合微小球共振器の、低閾値・無閾値で発振するレーザーや非線形デバイス、量子情報デバイスへの応用を念頭に、ファイバー結合微小球共振器とカップルした発光体の自然放出過程とその制御に関して研究を行っている。微小球共振器のモードは、波長

程度の幅を持ち表面から僅かに内側に存在するため、自然放出の共振器モードへの結合比 β は発光体を配置する位置に依存する。これまで、ファイバ結合微小球共振器に関して、結合比 β に関する報告はない。また、微小球共振器単体の β に関する研究では、球全体をゲイン媒質で構成した液滴微小球や、表面近傍に色素をドープしたポリマー微小球を用いたものが報告されていた。しかし、微小球内の光モードの空間分布よりもずっと広い範囲に発光体が配置されてしまうため、結合の最適化や理論との比較が困難であった。

そこでまず、本研究では、モードの空間分布よりも十分薄いゲイン媒質層を有するファイバ結合微小球レーザーの開発に取り組んでいる。その結果、通常のエルビウムドープガラスのゲイン層に、さらにリンをドープすることにより、ゲイン物質であるエルビウムの高分散化に成功、知る限り初めて1ミクロンを切る、200ナノメートルのゲイン媒質層によるレーザー発振に成功している。また、レーザー発振特性から β 値を推定することに、ファイバ結合微小球共振器として初めて成功、さらに、ゲイン層の外側にシリカガラス層をオーバーコートすることによる、 β 値の増大の観測にも成功している。

さらに、近年単一発光体として注目されている量子ドットを微小球共振器表面に付着させ、その自然放出がどのような微小球モードと結合しているのかを研究している。その結果、サンプルからは低次のモードと結合した放射は観測されず、むしろQ値の小さい高次のモードと結合した放射が観測されている。その理由を知るために、微小球表面の量子ドットの自然放出過程を詳細に検討した結果、表面のドットの吸収係数、および、微小球表面のラフネスを用いて現象を説明することができている。

これを要するに、著者は、テーパファイバ結合微小球共振器を作製し、発光体の自然放出過程の解析とその制御について研究を行い、有益な知見を示し、光量子デバイ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(情報科学)の学位を授与される資格あるものと認める。