

Optical Field Modulation and Mode Control in Nano-Structured Hybrid Whispering Gallery Mode Microcavities

陳, 静涵

<https://hdl.handle.net/2324/7363837>

出版情報 : Kyushu University, 2024, 博士 (工学), 課程博士
バージョン :
権利関係 :



氏 名 : 陳 静涵

論 文 名 : Optical Field Modulation and Mode Control in Nano-Structured Hybrid
Whispering Gallery Mode Microcavities

(ナノ構造ハイブリッドウィスパーリングギャラリーモード微小共振器における
光場変調とモード制御)

区 分 : 甲

論 文 内 容 の 要 旨

ウィスパーリングギャラリーモード (WGM) を利用した高い光閉じ込め率を持つマイクロ光共振器の研究は、近年ますます注目されている。WGM マイクロ光共振器は、全内反射によって光を共振器内部に閉じ込め、高い Q 値と小さなモード体積を実現する。この特性により、光と物質の相互作用が大幅に強化され、レーザー技術・光通信・センサー技術といった非線形光学・量子光学の幅広い分野で応用が進んでいる。しかし、従来の WGM 共振器は、光場の空間分布やモード選択、または伝播方向性の制御において制限があり、より高度な応用を実現する上で課題が残されている。

著者は本論文において、金属ナノアンテナやグレーティングなどのナノ構造を統合した WGM 共振器を設計し、その光場とモードの制御可能性を探究した。成果として、従来型共振器の限界を超えた新しい光場制御方法を提案し、以下の主要な成果を得た。

第一に、金属ナノアンテナを利用した光場の方向性制御を実現した。金属ナノアンテナは、光を特定の方向に効率的に放射する能力を持ち、光場の伝播特性を強化する要素として注目されている。本研究では、数値シミュレーションを通じて、異なる偏光モード (TE モードと TM モード) が金属ナノアンテナとどのように結合するかを詳細に調べた。また、表面粗さが Q 値に与える影響を評価し、ナノスケールでの表面精度の重要性を明らかにした。さらに、軸対称な単一リングではなく、非対称リングや大小異なる二重リング構造を使用することで、空間パラメーターを最適化し、単一モードの選択的励起を実現した。結果、方向性のある近接場光出力が可能であることを明らかにした。

第二に、円周方向グレーティングを導入した WGM 共振器にアクティブクラッドを積層することによって、WGM と径方向導波モードの共存とハイブリッド化・相互作用を実現した。シミュレーションと理論解析を通じて、ベッセル関数で記述される径方向導波モードがアクティブクラッド内で効果的に保持・増幅されることを示した。また、これらの径方向モードが非回折の準ベッセル・ガウスビームに変換されることを実験的に確認した。

第三に、改良した結合モード理論を用いて、円周方向グレーティングのパラメーターが径方向導波モードおよび WGM に与える影響を分析した。従来の結合モード理論は線型グレーティングに基づいているが、本研究では円周方向グレーティングを曲線グレーティングとして扱い、曲率による伝播損失を導入することで理論を改良した。このモデルを用いた解析により、グレーティング構造内部での導波モード共振効果を検証し、径方向モードの波長制御における重要な役割を明らかにした。

第四に、従来の WGM 共振器ではモード縮退した時計回りと反時計回りの WGM について、縮

退を破る非対称制御を実現した。グレーティングを傾斜させることによりキラル対称性が破れ、準キラルな伝播を達成しており、光の軌道角運動量（OAM）を有する光渦の生成を可能にした。OAMは、光通信や量子光学における高密度データ伝送や高精度な量子状態操作において重要な要素であり、この成果はこれらの分野における応用可能性を大きく広げるものである。

以上の成果は、熱アシスタント磁気記録にむけた知見や、WGM 共振器が構造化光の生成や先進的な光子学応用において大きな可能性を秘めていることを示す結果であり、ナノ構造を利用したハイブリッド型 WGM 共振器による光場およびモード制御の新たな可能性を示唆するもので、高度な光場制御を必要とする次世代光学デバイスの設計に寄与し、特に量子光学・構造化光場生成といった学術分野への展開が期待される。