

論文の内容の要旨

論文題目 Design of Photonic Crystals by FDTD Method and Fabrication of High-Q Three-Dimensional Photonic Crystal Nanocavities

(有限差分時間領域法によるフォトニック結晶の設計と高 Q 値 3 次元フォトニック結晶ナノ共振器の作製に関する研究)

氏名 タンデーシーヌラット アニワット

フォトニック結晶は波長程度の微小領域で光を制御するための基本構造として非常に注目を集めている。フォトニック結晶中に欠陥を導入することで、欠陥領域に非常に強く光を閉じ込めることが可能であり、Q 値の高い光共振器が実現できる。本論文は高 Q 値 2 次元、及び 3 次元フォトニック結晶ナノ共振器の設計と作製について論じたものである。共振器の設計には有限差分時間領域法を用いた。本研究では、高度に構造設計をすることでフォトニックバンドギャップがない場合にも、高 Q 値 2 次元フォトニック結晶が実現できることを実証するとともにそのメカニズムを解明した。この成果は共振器の設計の自由度を拡張した点と、フォトニックバンドの大きさが制限された系においても高 Q 値共振器の実現できる可能性を示した点で非常に重要である。さらに 3 次元フォトニック結晶ナノ共振器の世界最高 Q 値を実現するとともに、設計においてはモードの選択や構造微調整により高い Q 値が実現できることを明らかにした。これらの成果は 3 次元空間での光の制御が要求される様々な応用に向けて重要な一歩であると確信する。

第 2 章[Basis for Theoretical Analysis of Photonic Crystal]ではフォトニック結晶に関する基礎原理について概説する。そこではフォトニック結晶中での光の分散関係、及びフォトニックバンドギャップの形成について議論する。特に本論文で取り扱う三角格子、及び正方格子配列 2 次元フォトニック結晶と 3 次元ウッドパイル型フォトニック結晶に関する基礎について詳しく議論する。はじめに、フォトニックバンドギャップの形成に対するスラブ厚、円孔半径の影響を議論する。それらの影響を深く理解することは高 Q 値ナノ共振器の設計の基礎であり、きわめて重要である。続いて、フォトニック結晶中に導入された欠陥の影響について議論する。

第 3 章[Finite-Difference Time-Domain Method]ではフォトニック結晶の設計に用いられた有限差分時間領域法(FDTD 法)の基礎について概説する。FDTD 法は境界領域の扱いにより 2 種類に大別される。無限に広がった系での電界分布の計算、例えばフォトニックバンド構造の計算などにおいては周期境界条件が使われる。それに対して、有限領域上での電界分布の計算、例えばフォトニック結晶中に導入された欠陥周辺における電界分布の計算においては吸収境界条件が使われる。本章においては FDTD 法を利用した、フォトニック結晶ナノ共振器の設計にあつた重要な指標である、共振周波数、電界分布、共振器 Q 値、及びモード体積の求め方について特に詳しく議論する。

第 4 章[Increase of Q Factor in Photonic Crystal H1-Defect Nanocavities after Closing of Photonic Bandgap with Optimal Slab Thickness]ではフォトニックバンドギャップが消滅する厚い 2 次元フォトニック結晶スラブにおいても H1 型ナ

ノ共振器における単極モードの Q 値が上昇することを理論、実験両面から示した成果について述べる。高 Q 値という観点における最適スラブ厚は共振器内に閉じ込められる光の波長と等しいことが示された。最適なスラブ厚からなる共振器において、横方向への強い光の閉じ込めはフォトニックバンドギャップによる影響ではなく、共振器モードと導波モードとの弱い結合を起源としている。これらの知見は、高 Q 値共振器の設計に対し新たな指針を与えることになるであろう。特にフォトニックバンドギャップの発現が難しい低屈折率材料やサブバンド間発光デバイスのためのフォトニック結晶微小共振器の設計に対して、非常に有用であると考えられる。スラブ厚の最適化による Q 値の向上という概念は、スラブ厚は分子線エピタキシャル成長法(MBE)や有機金属化学気相成長法(MOCVD)を利用して非常に高精度に制御できるという点から作製上、非常に優位な特徴を有している。

第5章[High- Q Doubly-Degenerated Modes by Modulating Air Hole Radii in Square Lattice Photonic Crystal Nanocavity]では第4章で議論されたモード間の結合強度に関する概念を、面内方向のみではなく、面垂直方向へも拡張させ、正方格子フォトニック結晶を用いた2重縮退モードを有する半径変調型フォトニック結晶ナノ共振器について議論する。運動量空間でのモード解析により、設計した共振器構造における共振器モードは導波モード、及び放射モードとの結合が著しく抑制されていることが分かった。その結果、量子もつれ光子対発生源の実現に対し要求される、モード体積 V が小さく非常に高い Q 値を有するフォトニック結晶ナノ共振器を設計することに成功した。得られた性能指数 (Q/V) は現在までに報告された値より2倍程度大きい。また、この概念をフォトニックバンドギャップ形成が難しい低屈折率材料に適用できることも示した。コロイド状発光体を含む低屈折率材料を用いて、設計したフォトニック結晶ナノ共振器を作製し、光励起によりフォトニック結晶欠陥に起因する発光増強の観測に成功した。ここでは700という高い Q 値が得られた。これら低屈折率系フォトニック結晶ナノ共振器で最大である。

第6章[Designs of High- Q Nanocavities in Three-Dimensional Photonic Crystal with Finite Structural Size]では、ここまで2次元結晶に関して議論してきた事柄を3次元結晶に拡張し、高 Q 値3次元ウッドパイル型フォトニック結晶ナノ共振器の設計について論ずる。電磁界解析により、3次元フォトニック結晶中に導入された長方形型点欠陥に起因する高次の局在モードは、低次のそれに対し非常に大きな Q 値を持つことを示した。また、面垂直方向に対し、たかだか17周期からなる結晶においてさえ Q 値は104を超えることを明らかにした。さらに、欠陥付近の誘電体柱の位置をほんのわずかに変化させるだけで、1桁以上の Q 値の上昇が見込めることを発見した。これらの成果は、作製の難しい3次元フォトニック結晶で、少ない積層数においても高い Q 値が得られる可能性を示すものであり、今後の実験的発展に与える影響は大きい。

第7章[Fabrication and Characterization of High- Q Three-Dimensional Photonic Crystal Nanocavities]は、マイクロマニュピュレーション技術を用いた量子ドットを埋め込んだ3次元フォトニック結晶の作製と評価について論じている。欠陥構造を有する21層積層結晶において8,600という非常に高い Q 値が得られた。これは現在に報告されている3次元フォトニック結晶に関する Q 値としては最高値である。

第 8 章[Concluding Remarks]は、各章の主要な研究成果をまとめて総括し、本論文の結論及び将来展望について述べている。

本論文では高 Q 値フォトニック結晶ナノ共振器の設計と作製に関する多くの科学的知見を得ることができた。これらの成果はフォトニック結晶を用いた光の完全制御にむけて非常に有用であると確信する。