

(論文内容の要旨)

本論文は、超小型・面内フォトニック結晶デバイスに関する研究成果をまとめたものであり、7章からなる。フォトニック結晶は光の波長程度の周期的な屈折率分布で構成された多次元周期構造体であり、特定の周波数域の光の存在を許さないフォトニックバンドギャップ(Photonic Band Gap; PBG)をもつことを特長とする。このフォトニック結晶に適切な人為欠陥を導入することにより、極微小な光導波路や光共振器を形成することができる。本論文では、2次元フォトニック結晶スラブ(高屈折率材料の薄膜に貫通孔などを周期配列した構造)の光導波路と光共振器で構成された面内フォトニック結晶デバイスにおいて、特にWDM通信に用いられる波長選択フィルタへの応用展開を目的とし、重要な要素技術である、線欠陥導波路の透過帯域制御や、点欠陥共振器と線欠陥導波路の面内結合動作を実現している。さらに、要素技術を応用発展させ、実際に、光通信波長帯において、ほぼ100%の効率で動作する4波長の多波長選択フィルタの実現にも成功している。

第1章は序論であり、まず本研究の背景としてフォトニック結晶の研究史概略とフォトニック結晶に期待される効果について述べられている。また、本研究と関わりが深い2次元フォトニック結晶スラブとその欠陥領域で実現される機能についても述べられている。次に、本論文の位置付け、目的が述べられている。

第2章では、WDM通信ネットワークにおいて重要な役割を担う波長選択フィルタに焦点をおき、WDM波長選択フィルタの特性を満たすために必要な面内フォトニック結晶デバイスの基本構成と要素技術について述べられている。また、波長選択フィルタのさらなる高機能化を考え、そこに求められる技術についても述べられている。

第3章では、面内フォトニック結晶デバイスの要素技術である、点欠陥共振器と線欠陥導波路について基本原理と技術課題が述べられている。特に、集積化に必須である線欠陥曲げ導波路の透過帯域が点欠陥共振器の共振周波数と一致しておらず、そのため大きな透過損失が見込まれることを指摘している。また、その解決策として、線欠陥曲げ導波路の透過帯域を共振器の共振周波数に合うようにシフトする手法を提案している。さらに、線欠陥曲げ導波路の曲げ部頂点の孔径に対する透過特性を数値解析により詳細に調べ、その結果、線欠陥曲げ導波路の透過帯域が広い周波数範囲に自在にシフトできることを理論的に示している。加えて、数値解析の結果にもとづきシリコン材料を用いて試

料作製と光学特性評価を行い、線欠陥曲げ導波路の透過帯域シフトを実験的に検証している。

第4章では、面内フォトニック結晶デバイスにおいて最も重要な要素技術である点欠陥共振器・線欠陥導波路の面内結合動作(共振器を介した異なる導波路間の光伝達)について述べている。高 Q 値光共振器を導入することにより共振器からの面外放射損失を抑制することを提案し、理論と実験の両方で詳細な検討を行うことで、共振器を介した異なる導波路間の光伝達を初めて実現している。さらに、効率を定量的に議論するために必須となる、面内フォトニック結晶デバイスへの光入出力構造についても検討を行っている。細線導波路による光入力構造とスラブ出力構造により、高効率で、再現性の良い光入出力構造を実現している。

第5章では、WDM通信波長選択フィルタの必須要件である高効率・波長多重動作について述べている。ヘテロフォトニック結晶構造による高効率動作を検討し、ヘテロ接続界面の波長選択的な反射を使うことで、光通信帯において、効率 $\sim 100\%$ 、 $Q \sim 1,400$ のフィルタ動作を実現している。さらに、ヘテロフォトニック結晶においては効率・ Q 値を保ったまま波長だけを変化させることができるという特徴を活かし、前述のフィルタ構造の周期だけを比例的に変化させた4つのフィルタユニットを多段に接続した多波長選択フィルタ作製している。これにより、 $Q=900 \sim 1,000$ 、効率 $\sim 100\%$ の高効率、波長多重動作を実現している。

第6章では、さらなる高機能化として、波長選択フィルタに光増幅や波長変換機能を集積化するため技術を検討している。これまで試料作製の基材として用いてきたシリコン材料が高いラマン散乱効率をもつことに着目し、点欠陥共振器によるシリコンラマンレーザー発振を狙った理論考察を行っている。シリコン材料中の光非線形効果も含めた検討により発振条件を導出し、さらにそれを満たす共振器構造を数値解析により設計している。検討の結果、 $\sim 2 \mu W$ の極低閾パワーでの発振を理論的に示唆することに成功している。

第7章は結論であり、本論文で得られた結果をまとめると同時に今後の展開について述べている。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、2次元フォトリック結晶の極微小な光導波路と光共振器を結合することでなる超小型・面内フォトリック結晶デバイスに関する理論および実験結果をまとめたものである。面内フォトリック結晶デバイスは、従来の1/1,000～1/10,000以下のサイズをもつ波長選択フィルタや様々な超小型・光集積デバイスへの応用展開が期待されている。本論文では、特に、WDM(Wavelength Division Multiplexing)通信用波長選択フィルタへの展開を目標として、必要となる要素技術を確認するとともに、さらに、これを発展させることで超小型の高効率・多波長選択フィルタの実現に到ったことを示している。本研究で得られた成果は、以下のようにまとめられる。

1. まず、面内フォトリック結晶デバイスの要素技術として線欠陥導波路と点欠陥共振器に関しての検討を行っている。特に、線欠陥曲げ導波路の透過帯域制御についての詳細な検討から、透過帯域を共振器の共振波長に一致させる手法を提案し、低損失な光伝搬を実現した。
2. 続いて、点欠陥共振器・線欠陥導波路の結合系について検討を進め、高Q値点欠陥共振器を導入することにより共振器からの面外放射損失を抑制し、共振器を介した異なる導波路間の光伝達(面内結合動作)を初めて実現した。また、面内フォトリック結晶デバイスへの光入出力構造について検討を行い、細線導波路など高効率で、再現性の良い光入出力構造を実現した。
3. さらに、面内フォトリック結晶デバイスのWDM通信用波長選択フィルタへの応用を狙い、そのために必須となる高効率・波長多重動作を検討した。異なる周期のフォトリック結晶で構成されたヘテロフォトリック結晶構造を用いることで、光通信帯において、ほぼ100%の効率をもつ4波長動作の超小型・波長選択フィルタを実現した。
4. 加えて、面内フォトリック結晶デバイスのさらなる高機能化を目的とし、光増幅や波長変換のための基礎技術として、微小点欠陥共振器によるラマンレーザー発振について検討した。発振条件の理論導出と微小共振器の理論設計を行い、 $2\mu\text{W}$ の極低閾パワーでレーザー発振する可能性を示唆した。

以上のように、本論文は、面内フォトリック結晶デバイスの原理実証や、その展開として高効率、多波長デバイスの実現をはじめて示したものであり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成20年4月25日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。