

京都大学	博士（工学）	氏名	Jeremy Upham
論文題目	Dynamic Photon Control by Photonic Crystals （フォトニック結晶による光子の動的制御）		
（論文内容の要旨） 本論文は、次世代の光材料として期待されている 2 次元フォトニック結晶を利用した光子の動的制御についてまとめたものであり、6 章から成る。2 次元フォトニック結晶は、光の波長程度の周期的屈折率分布をもつ光ナノ構造である。この構造は、半導体において周期的なクーロンポテンシャルによって電子バンドギャップが形成されるのと同様に、周期的な屈折率分布によって特定の波長域の光の存在を許さないフォトニックバンドギャップが形成されることを特長とする。 フォトニック結晶に適切な人為欠陥を導入すると、フォトニックバンドギャップ中に動作周波数をもつ光ナノ共振器、導波路、帯域フィルター等が形成可能となる。近年、半導体（特にシリコン）の微細加工技術を応用し、ナノメートルを切る精度でフォトニック結晶を作製する技術が確立されている。これを利用することで、光の波長程度の微小領域に光を閉じ込めることが可能となるなど、光子を空間的に制御することが実現できている。本論文では、この空間的な光子制御に加え、時間領域で光子を制御するという新しい概念を提案し、光子の捕獲・解放や光の周波数の動的な変換といった新たな機能を実証した結果についてまとめられている。 第 1 章は序論であり、現在の光通信技術の現状について述べ、フォトニック結晶による空間的な光制御に加えて、時間領域で光制御を行うこと重要性について述べられている。 第 2 章では、本研究の基本となる 2 次元フォトニック結晶の構造と、その基本的な解析手法・作製および評価手法について述べられている。また、フォトニック結晶の特性を動的に制御する手法として、キャリアプラズマ効果および熱光学効果が提案され、この原理が述べられている。 第 3 章では、具体的な動的制御の例として、光導波路の分散制御による光波長の動的な変換、光共振器の Q 値制御による光子の捕獲・放出の 2 点の提案がなされ、また、それぞれに関する理論解析結果についてまとめられている。 （1）光波長の動的な変換：光が媒質中を伝播している際に、その伝播媒質の屈折率を高速に変化させることで、伝播している光の波長が変化する可能性を提案している。そして、この現象を理論的に示すために、Maxwell 方程式の数値解析手法である時間領域差分法 (FDTD 法) に時間的な屈折率変化を取り込む方法について検討した後、フォトニック結晶導波路に対して数値解析を行っている。この結果、ピコ秒程度の高速な屈折率変化を与えることにより、確かに光の波長が変化することを理論的に示すことに成功している。 （2）光共振器の Q 値制御による光子の捕獲・放出：共振器と外部との結合の強さを時			

間領域において高速で変化させることにより、共振器中に光を捕獲し、また放出できる可能性を提案している。具体的には捕獲時においては、あらかじめ共振器と外部との結合を強くし、光子が共振器に導入しやすい状態にし、その後、光子が導入されるや否や、共振器と外部との結合を弱くする、また放出時には再び共振器と外部との結合を強くするという手法を提案している。そして、この動作を実現するための現実的な構造として、光ナノ共振器と導波路、完全反射鏡からなる系を提案し、FDTD 法を利用してその動作の理論解析を行って、所望の捕獲・放出動作を実現できることを示している。

第 4 章では、前章で示した光波長の動的な変換および光共振器の Q 値制御による光子の捕獲・放出の理論解析結果の実験による実証結果について述べられている。これらの機能を実現するには、フォトニック結晶を伝播する光と同期してフォトニック結晶の屈折率を高速に変化させる必要がある。これを実現するために、フォトニック結晶の上部から、材料に吸収される波長の光を照射し、生成される自由キャリアによるキャリアプラズマ効果を利用することを提案している。また、光遅延線と 2 倍高調波発生器を利用した系の構築についても述べられている。次に、この系を利用した動的制御の実証結果について述べられている。光波長の動的な変換に関しては、波長 $1.5\mu\text{m}$ の光に対して 0.5nm の波長変換が生じていることを実証している。光共振器の Q 値制御による光子の捕獲・放出に関しては、 Q 値を 3800 から 22000 まで動的に増加させ、それによる光の捕獲動作の実証を行っている。また、これらの動作を時間領域で観測するために、相互相関法を利用した測定系を構築し、実際に捕獲・放出動作を時間分解測定することに成功している。

第 5 章では、第 4 章で述べた動的変化の最適化など、より詳細な検討結果について述べられている。光の周波数の動的な変換に関しては、群速度の遅いフォトニック結晶導波路を利用することで波長変化量を大きくすることが可能となること、異なる位置に複数の屈折率変化を起こすことで多段の波長変換を実現することが可能となることを示し、最大で 3nm の波長変化量を得ることに成功している。光共振器への光子の捕獲・解放に関しては、まず、共振器の近傍にさらに 1 本導波路を追加した構造について検討を行い、構造の最適化を行った結果、時間幅 4ps の光パルスを捕獲し、 327ps 保持した後に共振器から放出するという動作を直接観測することに成功している。また、屈折率の動的変化に用いている自由キャリアによる光吸収の影響についても検討を行い、光吸収の影響を受けにくい手法である、キャリア寿命の短い材料を利用した捕獲・放出手法の提案を行っている。さらに、キャリア寿命の短い材料であるガリウム砒素を用いたフォトニック結晶を作製し評価を行った結果、キャリア吸収の影響なく共振器へ光を捕獲できることを示している。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、次世代の光材料として期待されている 2 次元フォトニック結晶を利用した光子の動的制御についてまとめたものである。2 次元フォトニック結晶は、光の波長程度の周期的屈折率分布をもつ光材料であり、光の存在を禁止するフォトニックバンドギャップを持つことを特徴とする。これまでに、2 次元フォトニック結晶を利用して、強い光閉じ込めが可能な共振器が実現されるなど、設計や作製技術に関して優れた結果が得られてきている。本論文では、下記のように 2 次元フォトニック結晶の特性を時間領域で制御するという新しい概念を提唱し、光子の捕獲・解放や光の周波数の動的な変換といった新たな機能を実証し、その有用性を明らかにしている。

1. まず、フォトニック結晶導波路中を伝播している光に対する動的制御に関する検討を行っている。これは、空間領域でのスネルの法則では、屈折率の異なる媒質間を光が伝播すると光の波数が変化することが知られているが、これと双対の現象として、時間領域で屈折率が変化すると、光の波長が変化するというものである。この現象を、フォトニック結晶導波路を利用し、自由キャリア生成による高速の屈折率変化を利用した実験を行い、確かに波長変換が実現することを示している。さらに、導波路の群速度や多段の波長変換など、大きな波長変換量を得るための最適化を行い、最大で 3nm の波長変化量を得ることに成功している。

2. 次に、フォトニック結晶共振器の Q 値を時間領域で動的に制御することによる、光の捕獲・保持・解放に関する検討を行っている。自由キャリア生成による高速の屈折率変化を利用し、共振器の Q 値をピコ秒程度の短い時間で高速に変化させるという手法を提案している。この系を利用し、時間幅 4ps の光パルスを、光ナノ共振器の Q 値を動的に増加することで捕獲し、327ps 保持した後に Q 値を動的に減少させ光を取り出すということを、時間領域で観測することに成功している。さらに、高速な屈折率変化に用いている自由キャリアによる光吸収の影響の検討を行い、この吸収の影響を受けない新たな Q 値制御方法を提案・実証している。

以上のように、本論文はフォトニック結晶への動的制御により、光の性質(周波数)や光の伝播を時間領域で直接操作することが可能であることを初めて示したものであり、物理的に興味深いと言える。また、このような動的な光子制御は光と物質との相互作用の制御やスロー/ストップライト、全光ルーティングなどの応用の可能性を秘めており、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 23 年 2 月 22 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。