

京都大学	博士 (工学)	氏名	鴻池 遼太郎
論文題目	光ナノ共振器結合系への制御共振器の導入と光転送および光反転		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は、半導体チップ上に集積可能なフォトニック結晶光ナノ共振器の結合系に対して制御共振器を導入し、光ナノ共振器間で任意のタイミングで光を転送する操作や、光ナノ共振器結合系に捕捉した光の時間反転操作をはじめとする高度なオンチップ光操作を実証した成果をまとめたものであって、7章からなっている。</p> <p>フォトニック結晶光ナノ共振器は、微小領域に光を長時間閉じ込めることができ、また強い光の集中によって光と物質との相互作用を増大できるという特徴をもつ。このような光ナノ共振器をチップ上に複数個集積し、そこに光が捉えられている間に結合状態を外部から光パルスの照射等によって操作することで、捕捉した光に対する自在な操作の実現が期待される。これにより光パルス列を一時保存する光バッファメモリ、光を用いた量子情報処理デバイス、小型の時間反転光デバイス等の様々な応用が可能な光機能デバイスの実現が期待される。本論文ではこのような応用における基礎的かつ重要な光操作の例として、2つの光ナノ共振器間で自在なタイミングで光を転送する(光転送)操作や、2つの光ナノ共振器間を行き来する光に対する時間反転(光反転)操作等の新規な光操作を実証している。本論文ではさらに、応用展開を見据えて多数の光ナノ共振器を同時に操作可能な制御方式として、共振器結合系と面内 p-i-n 構造を同時形成し、面内 p-i-n 構造に対して電圧パルスを印加することで、光ナノ共振器間の結合の強度を共振器に光が捕捉されている間に操作することに成功している。以下、各章の内容を要約する。</p> <p>第1章は序論である。まず研究背景として、フォトニック結晶およびその内部に形成された光ナノ共振器や光導波路による光の保持・伝搬の制御について概説している。そして同一チップ上に形成した複数の離れた光ナノ共振器同士を結合させる手法を述べ、その結合状態を自在に外部操作することが可能となれば、複数ビットをもつ光バッファメモリや量子情報処理デバイス等の応用につながることを議論している。</p> <p>第2章では、フォトニック結晶中における光の分散関係の解析方法、フォトニック結晶光ナノ共振器および光導波路の設計方法、ならびに光ナノ共振器の結合系の解析手法や、それを高速に操作する手法について説明している。</p> <p>第3章では、光転送操作方式の理論提案を行った結果について述べている。まず2つの光ナノ共振器の結合系において、片側の共振器の共振波長を時間的に変化させた際の光の振る舞いについて体系的に調べ、共振器間の結合強度から決まるある一定速度よりも低速でかつ光子寿命よりも高速な変化を加えた場合、光の状態が固有モードの状態変化に従う断熱遷移現象が生じることを理論的に示している。そしてこれを用いて固有モードの光分布の偏りを操作することで、共振器間でロバストに光を転送できることを論じている。さらに、光の転送を行う2共振器の間に第3の共振器を導入し、この共振器の波長を変化させる方式を提案し、これによって波長制御に伴う吸収損失の影響を抑制することで、約90%という高い効率をもつ光転送操作が可能であることを理論的に示している。</p>			

第4章では、第3章で提案した光転送操作の実験的実証を行った結果について述べている。まず、シリコン薄膜を用いたフォトニック結晶光回路として $1.5\mu\text{m}$ 程度の共振波長をもつ2つの光ナノ共振器を、制御共振器を中間におく形で導波路を用いて結合させた系を設計している。また、実際にこのような構造を作製した際には作製誤差によって共振波長がばらつくため、設計通りの操作を行うことが難しい点を検討している。そして、これを解決する手法として、共振器付近に小型ヒータを形成して熱光学効果によって共振波長を高精度 ($\sim 10\text{pm}$) に調整する手法を導入し、作製誤差を補正することに成功している。次に、この共振波長の補正を行った試料を用いて、まず第1の共振器に光を数百ピコ秒程度の時間捕捉しつつ、制御共振器に光パルス照射して共振波長を数十ピコ秒の時間をかけて変化させることで、 $82\mu\text{m}$ (物質内波長の100倍以上に対応) 離れた第2の共振器へと光を転送することに成功している。また、この転送のタイミングは制御パルス照射時刻を変えることで任意に制御可能であり、かつ光転送の効率は90%程度であることを実験的に示している。この結果より、任意タイミングかつ高効率な光転送操作の実証に世界に先駆けて成功したといえる。

第5章では、より多彩な光操作の実証を目指し、光ナノ共振器系に捕捉した光に対する時間反転操作の実証を行った結果について述べている。まず最初に、伝送路の分散補償等の様々な応用につながる光に対する時間反転操作は、従来では非線形光学結晶等の大型素子を用いて実現されていたため、集積化が課題であったことが議論されている。これに対して本論文では、3つの光ナノ共振器の結合系に光を捕捉させておき、制御光パルスを外部から照射することで、結合系における光のスペクトルを瞬間的に反転させるという、時間領域では時間反転に対応する操作を実現する手法を提案している。そして実際に3つの光ナノ共振器の結合系を用いて、提案した操作を行いつつ、共振器から漏れ出す光を測定することによって、この時間反転操作を実験的に実証することに成功している。さらに、同構造を多数の共振器の結合系へと拡張することで任意の光パルスに対する時間反転操作も可能であることを理論的に示している。以上の実証結果および理論提案より、光伝送路の分散補償などの応用が可能となる小型の時間反転光素子の実現が期待されることを展望している。

第6章では、電圧パルスによって光ナノ共振器結合系を操作できるデバイスを作製し、多数の共振器からなる結合系の制御のための基礎技術を確立した結果について述べている。まず、第4章、第5章の実証において用いられてきた外部から制御光パルスを照射する方式は、多数の共振器を同時操作することが難しく、大規模なシステムへの展開には向かないといった課題点があったことが論じられている。それに対して本章ではスケールアップが可能な方式として、面内 p-i-n 構造の導入と電圧パルスの印加によって制御共振器の波長を操作する手法を提案している。そしてまず、光ナノ共振器と同一チップ上に面内 p-i-n 構造を導入するプロセス技術を確立し、さらに、具体的な光操作の一例として、面内 p-i-n 構造に高速な電気パルスを印加することによって光ナノ共振器間の結合強度を共振器に光が捉えられている間に変化させることに成功した結果について述べている。

第7章は結論であり、本研究で得られた成果について要約するとともに、今後の展望について述べている。

(論文審査の結果の要旨)

フォトリック結晶光ナノ共振器は光を微小領域に長時間捕捉できる特徴をもつ。このような光ナノ共振器を複数結合させ、光をそこに捕捉している間に系の結合状態に操作を加えると、自在な光操作が可能となるため、新規な機能を持つ小型光デバイスの実現が期待できる。本論文は、そのような新規機能・操作として、ある共振器に捕捉した光を自在なタイミングで他方の共振器へと転送する「光転送操作」および結合系に捕捉した光に対して時間反転を生じさせる「光反転操作」を、初めて実証したものである。本論文ではさらに、これらの操作を大規模システムに展開するにあたって必要不可欠な、多数の共振器に対する複雑な制御を実現するための第一段階として、面内 p-i-n 構造による電気的な共振波長制御方式を導入し、電気パルスによって光共振器結合系に捉えられた光を操作することにも成功した。本論文で得られた主な成果は次のとおりである。

1. 2つの光ナノ共振器結合系の断熱的変化を用いた高効率な光転送操作方式を理論提案し、実験的に実証した。理論面においては2つの共振器間を第3の「制御共振器」を介して結合させた新規構造を提案し、光が系に捉えられている間に共振波長を変化させることで高効率な光転送操作が可能であることを示した。実験面においては作製誤差に起因して波長揺らぎが生じる課題点を指摘し、これを解決するため小型ヒータを用いた高精度な波長調整手法を開発した。結果として最大で90%程度という高い効率をもつ光転送操作を初めて実験的に実証した。
2. 共振器結合系のスペクトルを瞬時的に反転させることにより、2共振器の間で行き来する光に対する時間反転操作を実証した。本論文で実証した方式は、従来行われてきた四光波混合等を用いた時間反転操作とは原理的に異なり、非線形結晶を用いないため小型の時間反転光デバイスの実現につながると期待される。
3. 以上の操作の応用展開においては、多数の共振器からなる結合系の複雑な操作が必要となる。一方で、以上の実証では外部光パルスの照射によって操作を行っており、同方式では多数共振器の独立操作は困難であった。そこで本論文では共振器結合系に面内 p-i-n 構造を同時形成し、電圧パルスの印加によって共振器の波長を操作して、光操作を実現する方式を提案し、具体的な光操作の一例として共振器間の結合強度の電気的操作に初めて成功した。

以上の成果は、光ナノ共振器の結合系に捕捉した光に対する多彩な光操作を初めて実現し、また光バッファメモリや量子情報処理デバイス等の新たな応用に向けた基盤技術を実証したものである。このように、本論文は学術上、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29年2月1日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。