

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                               |    |       |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|----|-------|
| 京都大学                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 博士（工学）                        | 氏名 | 佐藤 義也 |
| 論文題目                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 空間的に離れた光ナノ共振器間の強結合状態形成とその応用展開 |    |       |
| <p>（論文内容の要旨）</p> <p>本論文は、任意の位置・特に空間的に離れた位置にあるフォトニック結晶光ナノ共振器間の強結合状態を形成する方法を考案するとともに、その結合状態を動的に制御することで得られる新奇光操作とその応用展開を論じた結果をまとめたものであって、6章からなっている。フォトニック結晶光ナノ共振器は微小領域に光を閉じ込めることができ、またその内部での強い光集中のために光-物質間の相互作用を増強させるという特徴をもつ。このようなナノ共振器を複数個配置し、所謂、強結合状態を形成すると、共振器間のコヒーレントな光遷移が生じ、単独の共振器では得られない様々な光重ね合わせ状態の形成と制御が可能となる。しかしながら、これまで、ナノ共振器間の強結合を実現するためには、ナノ共振器同士を数<math>\mu\text{m}</math>程度の極めて近い距離まで近づける必要があった。これはナノ共振器がサブミクロン程度の大きさの微小領域に光を強く閉じ込める性質をもつためである。このため、強結合共振器の構成の柔軟性や制御性が大幅に制約されてきた。これに対し本論文では、閉じた導波路を適切に媒介させることにより離れた光ナノ共振器間であっても強結合状態を形成できること、およびその結合状態を外部から動的に制御することによって遠隔光操作や光パルス列の停止・再生操作などの単独の共振器では不可能な様々な光操作が可能になることを示している。この成果は強結合光ナノ共振器における距離の制約を大幅に緩和しつつ、その内部での自在な光操作を可能にするものであり将来の光パルス列の動的制御や光量子情報処理への展開につながるものである。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る光ナノ共振器および光導波路におけるこれまでの研究経過を紹介している。特に光ナノ共振器に関して、その光閉じ込め能力（<math>Q</math> 値）が劇的に向上していること、さらにその <math>Q</math> 値を外部から動的に変化させることによって共振器への光パルスの出し入れが実現されていることを述べている。さらに複数の共振器を近接して配置する際に生じる結合が外部環境への散逸より十分強い状態、所謂強結合状態を利用することで、光をナノ共振器間で遷移させることができることやその内部に量子ドット等の量子ナノ構造を埋め込むことにより量子多体状態が得られることを紹介し、光バッファメモリや量子情報処理への応用展開が期待できることを示している。</p> <p>第2章では、まずフォトニック結晶とその内部に形成されるフォトニック結晶光ナノ共振器および導波路の具体的な特性を示し、次に光ナノ共振器同士の結合構造（結合光ナノ共振器）や光ナノ共振器と導波路の結合構造を示しその諸性質を論じている。特に結合光ナノ共振器に関して、ナノ共振器同士が同じ共振周波数を持つ（同調している）場合では対称・反対称モードのスペクトル分裂（ラビ分裂）と共振器間の光遷移（光ラビ振動）が生じること、反対にナノ共振器同士が異なる共振周波数をもつ（離調してい</p> |                               |    |       |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |        |    |       |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|----|-------|
| 京都大学                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 博士（工学） | 氏名 | 佐藤 義也 |
| <p>る）場合では光ラビ振動が生じずに各々の共振器に光が留まり続けることを示している。この同調・離調を切り替えることで共振器間の光遷移（光ラビ振動）を停止することができる。</p> <p>第3章では、まず共振器間の結合を利用する上で大きな課題であった共振器間距離に関する制約について論じている。次にその制約の解消のために離れた光ナノ共振器間の中間部に有限長の導波路を配置した間接結合構造を提案するとともに、その特性を理論的・数值的解析により論じている。ここで一般にナノ共振器の近傍に導波路を配置すると、一般にはナノ共振器から導波路へと光が漏れ出してしまい、ナノ共振器特有の微小領域への光集中が維持できなくなってしまう。これに対し本論文では、有限長の導波路に形成される光状態・ファブリ・ペロー（FP）モードをナノ共振器から非共鳴化させることにより、ナノ共振器から導波路への光散逸を抑制できることを示している。さらにナノ共振器がFPモードと非共鳴的に結合することでナノ共振器間の実効的な結合が得られることを述べている。</p> <p>第4章では、実際にこの導波路を介した間接結合構造をフォトニック結晶上に形成し、実験的評価を行った結果について説明している。ここで光ナノ共振器間の距離を <math>87\ \mu\text{m}</math> 離しており、ナノ共振器間の直接の結合は無視できる。まずスペクトル測定によるラビ分裂の観測結果を示し、次いで時間分解測定による光ラビ振動の観測結果を示している。このラビ分裂・ラビ振動は結合共振器特有の現象であることから、この結果は <math>87\ \mu\text{m}</math> と大きく離れた光ナノ共振器間においても強結合が生じていることを表している。さらに一方の共振器に制御光を照射し、励起したキャリアによる動的屈折率変化を与えて共振器間を離調させることにより、光ラビ振動の停止操作に世界に先駆けて成功したことを示している。</p> <p>第5章では、さらなる高度な光操作の実現を目指し、様々な結合共振器構造での光操作を検討している。具体的には非共鳴化させた中間共振器を媒介とする間接結合構造を導入し、その中間共振器に制御を加えることにより、光ラビ振動を停止させるだけでなく、反転させたり再開させたりできることを示している。さらにこの構造を多段従属結合させた結合共振器導波路を用いて、複数の光パルス列を停止・開放できることを示している。この光操作を用いれば、光バッファメモリなどへの直接的な応用展開が期待できる。</p> <p>第6章では、本研究で得られた成果をまとめるとともに、今後の展開について述べている。</p> |        |    |       |

## (論文審査の結果)

本論文は、フォトニック結晶光ナノ共振器間の自在な強結合状態形成と、その結合状態の動的制御を利用したオンチップ光操作を提案・実証した成果をまとめたものである。これまで、ナノ共振器間の強結合を実現するためには、ナノ共振器同士を数 $\mu\text{m}$ 程度の極めて近い距離まで近づける必要があり、共振器の配置の柔軟性が大幅に制約されてきた。本論文ではこの制約を抜本的に解消し離れた光ナノ共振器間であっても強結合状態の形成が可能であることを世界に先駆けて示している。さらにこの共振器間の強結合状態を動的に制御することによる新奇光操作が示されている。本論文において示されている主な成果は、次のようにまとめられる。

1. 閉じた導波路を適切に媒介させることにより、離れた光ナノ共振器間であっても、ナノ共振器部への強い光集中を維持したまま、強結合状態を形成できることを理論的に示した。さらに実際にこの間接結合構造をフォトニック結晶上に形成し、 $83\mu\text{m}$ 離れたナノ共振器間において、共振器間の光遷移等の強結合状態特有のラビ分裂や光ラビ振動等の現象を実験的に明確に観測することに成功した。

2. 上記の遠隔強結合光ナノ共振器において、一方の共振器にのみキャリアを励起して屈折率変化を与えることにより光ラビ振動を停止させることに成功した。ここで興味深い点は、光が分布していない側の共振器にのみキャリアを励起する場合でも、他方の共振器に分布する光の振る舞いを遠隔操作できる点である。さらに、このときキャリアを励起した側の共振器には光がほとんど分布していないため、キャリアによる光吸収を抑制できる。

3. 光を蓄積する共振器間に第3および第4の共振器を配置した間接結合構造を提案し、導入した中間共振器に制御を加えることで、光ラビ振動の停止・反転・再開等の様々な操作が実現できることを示した。さらにこの構造を多段従属結合させた結合共振器導波路を用いて、複数の光パルス列を停止・再生させることができることを示した。

以上の成果は、離れた光ナノ共振器間の強結合状態形成とその動的制御による新たな光子操作・特に遠隔光操作を実現すると言う点で非常に興味深く、また従来不可避であった屈折率変化に伴う光吸収を抑制したままでの光操作が可能になったため工学的にも興味深い。また複数光パルス列の停止操作等、将来的な光バッファメモリへの応用を見据えた具体的な検討を行っている点も評価できる。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25年1月31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。