

京都大学	博士 (工学)	氏名	仲代 匡宏
論文題目	高 Q 値光ナノ共振器結合系と pin ダイオード融合デバイスの開発と電氣的な光操作に関する研究		

(論文内容の要旨)

本論文は、次世代の光情報処理チップの実現に向け、フォトニック結晶光ナノ共振器の結合系と pin ダイオードを融合させたデバイスの作製プロセスを開発するとともに、同デバイスにおいて共振器に閉じ込めた光に対する共振器間での光転送などの光操作について理論提案と実験的検討を行ったものである。

フォトニック結晶光ナノ共振器を用いることで、光を微小な領域に長時間閉じ込めることが可能になり、光のままのバッファリングをはじめとした光のままの高度な光操作の実現が期待できる。さらには、閉じ込めた光と物質との強い相互作用によって非線形光学効果や量子効果が増強されるので、光量子情報処理への展開も期待されている。このように多岐にわたる機能をもつ光ナノ共振器を 1 つのチップ上に集積し、結合系の中で光を自在にやりとりさせることができれば、高度な光情報処理を統合するチップの実現へと展開していく。しかしながら、共振器結合系において光をやりとりするために従来は制御用の光パルスを外から照射していたが、この手法は集積化に適さない。

それに対して、光ナノ共振器の近傍に pin ダイオードを組み込むことで電氣的な制御機構を導入できれば、集積上の課題を解消できるだけでなく、電子回路との併用による高度な制御によって多彩な光操作を可能にすると期待できる。一方、その作製プロセスについては十分な検討がなされていない結果として、光閉じ込め性能が低く(Q 値 40 万)、かつ電氣的制御の速度も低いといった問題があった。さらに、新規光操作に関する検討もほとんどなされていなかった。

そこで、これらの課題を解決するように作製プロセスを抜本的に改善しつつ、世界最高性能の融合デバイスを設計/開発した上で、電圧パルスの印加による共振器間での光転送を世界で初めて実証した。さらに、電氣的な制御によるキャリア注入と引き抜きを組み合わせることができる正弦波変調を用いた新しい光操作についても理論と実験の両面から検討を行なった。本論文はこれらの内容を 7 つの章にまとめた。

第 1 章では序論として、冒頭で概略した研究背景や先行研究について詳しく説明している。

第 2 章では基本的事項のまとめとして、フォトニック結晶における光の閉じ込め原理や、閉じ込め性能指標の定義、共振器結合系の実装方法、屈折率制御手法等について説明している。特に、屈折率制御によってどのように共振器間で光をやりとりするかということ、電圧パルスを印加してできる断熱的な光転送を具体例として詳しく説明している。

第 3 章では正弦波変調による光操作に関する理論解析結果をまとめている。正弦波変調によって生じるサイドバンドを利用すると、直接は結合していない共振器間において結合を動的に生成できる。この定性的な考察を踏まえて、本章では解析的な導出を行なうとともに、数値計算も併用して定量的な考察を行なっている。このような結合の動的な生成は、電圧パルスを用いる断熱的な光転送に対して、非断熱的な光転送に利用できる。そこで断熱的光転送と比較し、より低損失であることなどについて述

京都大学	博士 (工学)	氏名	仲代 匡宏
<p>べた。さらに、正弦波信号の位相によって結合位相も制御できるため、外部磁場を用いずとも非相反的な光伝搬が実現できることについても説明している。</p> <p>第 4 章では融合デバイスの設計と作製プロセスの開発についてまとめている。共振器単体についての設計手法は精力的に研究が行われているが、共振器結合系についての設計はほとんどなされていない。しかしながら、性能が非常に優れた共振器を用いて共振器結合系を構成しても、共振器間を結合させようとする一方で閉じ込め性能が著しく低下するということがわかった。そこで優れた性能をもつような共振器結合系を設計するべく、機械学習を利用して閉じ込め性能と結合強度の両方を同時に最適化する手法を開発した。また、デバイス作製において、光ナノ共振器の近傍に pin ダイオードを組み込むにあたって、光パルス照射方式では不要であった pn 領域やコンタクト電極などを形成するための工程を追加する必要がある。これらの工程における諸条件を最適化することで、閉じ込め性能や制御速度の両方を先行研究と比較して約 10 倍改善した。詳細は次の段落にて述べる。</p> <p>第 5 章では作製したデバイスの光学特性と電気特性を評価した結果をまとめている。100 個以上の共振器について閉じ込め性能を実験的に評価し、最大の光閉じ込め性能として Q 値 400 万を得た。pn 領域やコンタクト電極などを形成しているにもかかわらず、pin ダイオードをもたない単一共振器で得られている最大 Q 値 1100 万に匹敵する高い性能であるといえる。また、pin ダイオードについてもその特性を実験的に評価した。先行研究と I-V 特性を比較すると微分抵抗が 1/10 倍に低減できている。またその性能が理論値に近いということを数値計算に基づいて示している。</p> <p>第 6 章では作製したデバイス上における光操作についての実験結果をまとめている。まず、電気的な制御による断熱的な光転送を実証するべく、3つの共振器が結合した系を用いて、パルス幅 10 ns 程度の電圧パルスを印加することで、ある共振器に閉じ込めた光を 100 μm ほど離れた別の共振器へと転送することを世界に先駆けて成功した。この中でタイミングの任意性やその精度の高さについて述べると共に、最大で 84%の転送効率を達成していることも述べている。また、正弦波変調による光操作のために必要となる RF 信号用の配線をもつフォトニック結晶チップや、測定に必要な回路等の開発についても述べている。</p> <p>第 7 章では結論として、得られた研究成果の要約や今後の展望について述べている。</p>			