HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	全光信号処理のための非線形フォトニック結晶光デバイスに関する研究［論文内容及び審査の要旨］
Author(s)	佐藤, 孝憲
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第13087号
Issue Date	2018-03-22
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/70571
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Takanori_Sato_review.pdf, 審査の要旨

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称　博士 (工学)　氏名　佐藤　孝憲

審査担当者　主　査　教　授　齊藤 晋聖
副　査　教　授　宮永 喜一
副　査　教　授　大鐘 武雄
副　査　准教授　藤澤 剛

学位論文題名

全光信号処理のための非線形フォトニック結晶光デバイスに関する研究
（A Study on Nonlinear Photonic Crystal Optical Devices for All-Optical Signal Processing）

急速な情報通信デバイスの普及, および, ネットワーク上で扱われるデータコンテンツの大容量化に伴い, 国内の通信トラフィックは 2006 年頃から指数関数的な増加を続けている. これに備えて, 光通信ネットワークの大容量化が求められるとともに, 光パケットの送受信を担う電子ルータにおける低消費電力化が急務となっている. 現在の光ネットワークでは, 電子ルータが受信する光信号を電気信号に変換し, 電子デバイス上で信号処理を行った後に, 再度光信号として送信する, という動作を繰り返している. この光信号と電気信号を相互に変換する処理が, 光通信における消費電力増加の主な要因であると考えられている. これを解決するための挑戦的な試みとして, 光信号を電気信号に変換することなく信号処理を行う「全光信号処理」に基づく光ネットワークを実現しようとする研究が行われている. これは, 電子回路で行われる処理の一部あるいは全部を, 光回路を用いて処理しようとするものである. 現状の光ネットワークに「全光信号処理」が導入されることで, 光パケットの処理速度が飛躍的に向上するとともに, スイッチングに必要なエネルギーも下げられることが期待されており, 光通信における情報量あたりの消費電力を 3〜4 桁削減できると考えられている.

しかしながら, 一般的な光学材料では, 光は線形な振る舞いをすることが知られており, 光を用いて光信号を制御することは容易ではない. 厳密には, 「光の非線形性は, 無視できるほど小さい」ということが問題となっている. 光の非線形性を積極的に利用するためには, 代表的なものを挙げると, 次に示す 3 つの手法のいずれかが必要である. (i) 結晶構造の反転対称性が崩れた非線形光学結晶とよばれる特殊な光学材料を用いること, (ii) 任意の光学材料を用いた長距離の光導波路中を伝搬させ, 非線形性を蓄積させること, そして, (iii) 任意の光学材料中で, 光エネルギーの密度を高め, 非線形性を大きくすること, の 3 つである. 本研究では, (iii) の方法に着目している. その理由は 2 つあり, 1 つは, 任意の光学材料に対して, 光の波長程度の周期を持つ人工構造「フォトニック結晶 (Photonic crystal: PC) 構造」を導入することで, 光エネルギー密度を容易に高めることができるためであり, もう 1 つは, 電子デバイスの作製に用いられる CMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor) プロセスをそのまま光集積回路作製に流用可能であり, 産業的な観点からも有利なためである. したがって, Si 等の CMOS コンパチブルな材料に PC 構造を導入することで, 光の非線形性を積極的に利用することができ, 光を用いた光信号の制御が実現可能となる.

ところで, 非線形 PC デバイスの構成とその動作原理は, 光導波路の非線形性を利用した光導波路型, および, 光共振器の非線形性を利用した光共振器型の 2 種類に大別することができる. 光導波路型の非線形 PC デバイスは, 光が導波路中を伝搬することで変化する光の位相が, 入力するパワーに応じて変化する効果を利用する. 例えば, マッハツェンダ干渉計の片側に PC 光導波路を配置すると, 光パワーによって出力ポートが変化する光スイッチとして動作させることができる. 光導波路型デバイスは, 光共振器型と比較して光信号の波形を維持しやすいという利点があるが, 光スイッチとして十分な非線形位相シフト量を得るためには, 大きなデバイスサイズや大きな光パワー密度が必要となる問題がある. そこで, 高い非線形性を有する導波路構造として, PC 結合共振器型光導波路 (Coupled Resonator Optical Waveguide: CROW) を採用することで, 小型化および低消費電力化が期待できる. 一方, 光共振器型の非線形 PC デバイスは, 時間をかけて光共振器に光エネルギーを

蓄積させることで, 共振周波数が変化する効果を利用する. 入力する光パワーに応じて共振回路を発振させたり, 共振を止めたりすることができ, 光共振器を適切に設計することで, 光スイッチや光メモリ, 光ダイオード (整流素子) といった様々な光機能デバイスを実現することができる. また, 光導波路型よりも低い光パワーで大きな非線形性を得ることができるという利点があるが, 光信号の波形が崩れやすいことや, 動作パワーと反応速度に対してトレードオフが生じるといった問題がある.

光導波路型の非線形デバイスに PC 構造を用いることで, 全光信号処理を現実的なデバイスサイズかつ低パワーで行うことができるようになった. しかしながら, 従来用いられてきた PC 導波路の非線形特性評価手法には強い近似が含まれており, 光パワーと非線形位相シフト量の関係を定量的に見積もることが困難であった. すなわち, マッハツェンダ干渉計に基づく光スイッチを動作させる上で, 必要な光パワーの大きさや導波路長が不明であり, デバイスの設計ができなかったということである. そこで本研究では, 3 次元周期構造光導波路のための非線形モードソルバを新たに開発している. この解析手法は, 有限要素法に基づく信頼性の高い解析手法であり, 非線形光学効果による伝搬特性の変化を詳細に調べることができ, 非線形位相シフト量と光パワーを定量的に見積もることも可能である. さらに, 線形解から非線形位相シフト量を定量的に見積もる評価手法も新たに提案しており, 近似手法ではあるものの, 簡便かつ高精度に非線形特性を評価できるようになった. これらの数値解析理論を駆使し, 非線形特性を極限まで高められる PC 導波路を新たに提案している. 一方, 光共振器は, 光導波路では実現困難なメモリ動作および整流動作を可能とすることから, 重要な非線形 PC デバイスの構成要素として位置づけられている. しかしながら, とりわけ全光ダイオードに関する先行研究については, 非相反透過率比 (順方向と逆方向の透過率の比) が主たる整流特性指標として評価されており, ダイオード動作時の順方向伝搬における損失や, 順方向透過時に生じる反射光の問題については触れられてこなかった. すなわち, 全光ダイオードの出力ポートに入射した光が入力ポートへ透過しないように設計したとしても, 入力ポートから入射した光の大部分が損失となるか, あるいは入力ポート側へ戻ってきてしまうという問題が存在するのである. そこで本研究では, 非線形 PC 光共振器を有する光ダイオードの設計理論を提案し, 反射の生じない高透過率光ダイオードの提案を行っている.

本論文の構成は, 以下の通りである.

第 1 章では, 本論文の背景, 目的, および構成について述べている.

第 2 章では, 非線形周期構造光導波路のための 3 次元有限要素モードソルバの定式化, ならびに, 本手法の妥当性評価を行っている. また, 従来の非線形特性の評価手法における問題点を示すとともに, 本手法の有用性を示している.

第 3 章では, PC 導波路のための厳密な非線形定数および実効コア断面積 Aeff の定義を行っている. これらは PC 導波路の非線形特性を示す重要なパラメータである. 本章では, 簡便かつ高精度に非線形特性を評価できる評価式を独自に提案しており, 前章で求められた非線形特性と比較することで提案手法の妥当性を示している.

第 4 章では, 光導波路型の非線形 PC デバイスとして, モードギャップ閉じ込めに基づくスロット型 1 次元 PC-CROW を新たに設計しており, 提案構造の非線形特性を評価している.

第 5 章では, 光共振器型の非線形 PC デバイスとして, 非対称 L 字型 PC 光共振器に基づく全光ダイオードを取り上げ, 高い順方向透過率を得るための設計理論について示し, 設計構造のダイオード特性を評価している.

第 6 章では, 光共振器型の非線形 PC デバイスとして, サイドカップル型 PC 光共振器に基づく全光ダイオードを取り上げ, 高い順方向透過率を得るための設計理論について示し, 設計構造のダイオード特性を評価している.

第 7 章では, 本研究により得られた結論をまとめている.

これを要するに, 筆者は, 光導波路型非線形デバイスにおける非線形位相シフト量と光パワーの関係を高精度に見積もることができる解析手法を開発し, 非線形特性を極限まで高められる PC 導波路を提案するとともに, 光共振器型非線形デバイスである全光ダイオードの設計理論を考案し, 無反射特性と高い順方向透過率を両立する光ダイオードを提案しており, 情報通信フォトニクスに関する学術分野に貢献するところ大なるものがある.

よって筆者は, 北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格があるものと認める.