

平成 30 年 6 月 22 日現在

機関番号：37112

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06043

研究課題名(和文) 光通信における多値振幅信号とWDM方式に対応する自動ルーティング回路に関する研究

研究課題名(英文) Self-routing optical circuits for multi-level optical communication and WDM systems

研究代表者

前田 洋 (Maeda, Hiroshi)

福岡工業大学・情報工学部・教授

研究者番号：50264073

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：データ通信のバックボーンであるフォトニックネットワークの帯域が圧迫されつつあり、今後も更なる通信路容量の増大が求められている。このため、複数レベルの信号振幅による情報(多値信号)表現と、WDM方式を組み合わせた光信号処理回路を提案した。この回路は非線形誘電体の自己屈折率変調により、信号振幅に依存して共振器の光学的長さが変化することを基本アイデアとしていた。また、人工的かつ周期的な媒質定数の分布をもつフォトニック結晶構造を回路部品および導波路として利用し、媒質定数差による電磁波の全反射に基づく従来の構造よりも小型の光信号処理回路の設計を行い、素子製作に必要なパラメータを見出した。

研究成果の概要(英文)：Extension of optical fiber channel capacity is required for increase of data traffic in the Internet. For the purpose, the researcher proposed self-routing optical circuits by combination of multi-level signal amplitude and wavelength division multiplexing (WDM) systems. The circuits include nonlinear refractive index to respond with high or low signal amplitude to show different amount of index change. As fundamental wave-guiding structure and optical circuit component, photonic crystal structure with periodicity is adopted to achieve smaller circuit size compared with conventional slab waveguide. The design parameters are obtained by numerical computation and experiment in microwave scaled model.

研究分野：光通信工学

キーワード：光信号処理 通信容量 非線形誘電体 フォトニック結晶 周期構造 多値振幅通信 WDM

1. 研究開始当初の背景

フォトニックネットワークにおける情報表現には、光信号のオン/オフを「1」と「0」によって表す二元符号が用いられてきた。送受信すべき情報量の増大に伴って、光ファイバ中の分散制御技術が進展しWDM(波長分割多重化)方式のための光回路(アレイ型導波路など)が実用化されたために、光ファイバ1心あたりの通信路容量を拡大できた。

そこで、この研究課題では、次世代の光ファイバ通信方式における容量拡大の方策として、WDM方式に対応し、かつ「1」と「0」だけではない多値振幅の光波を用いた光信号の分波回路を設計し、これを用いた通信容量の拡大や光振幅と周波数情報によるルーティングの実現可能性を検証しようとした。

基本的な導波構造には、2次元フォトニック結晶構造を基本とする平面回路を用いる。フォトニック結晶は光電磁界の閉じ込めを格子周期や格子形状で自在に設計でき、また導波路の曲り部においても設計次第で放射損を低減できる特徴がある。

多値振幅と様々な波長の光波を組み合わせた信号(信号の配送ルートを示すラベルに相当)を、フォトニック結晶中に設けた共振回路を利用してフィルタリングする。申請者は、過去にフォトニック結晶中に設けた様々な共振回路を用いて、入力信号を波長ごとに別々の出力ポートに取り出せることを実証してきた。

更に、申請者は非線形誘電体の数値解析による非線形波動伝搬についても研究してきた。非線形誘電体の数値解析には、デジタル・フィルタにも用いられるZ変換理論が適用可能であり、その数値解析結果は設計にとって良い見通しを与える。申請者の従来の解析手法は時間領域有限差分(FDTD)法であったが、後述するCIP法においても、その処理の組み込みは同様に可能である。

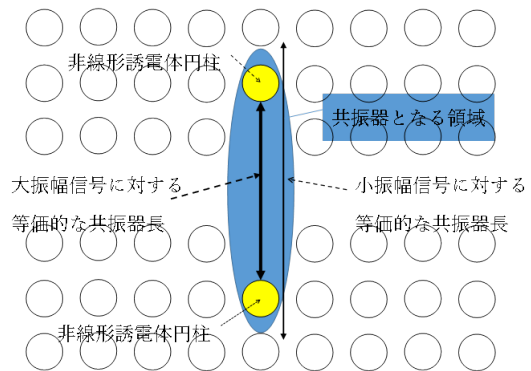
2. 研究の目的

データ通信のバックボーンであるフォトニックネットワークの帯域が圧迫されつつある。現在は波長分割多重化(WDM)方式の多重度を上げることで光ファイバ1心あたりの通信路容量を向上させている。さらなる通信路容量の増大を企図し、複数レベルの信号振幅による情報(多値信号)表現と、WDM方式を組み合わせた光信号処理回路を提案するための基礎的検討を行った。この回路は非線形誘電体の自己屈折率変調により、信号振幅に依存して共振器の光学的長さが変化することを基本アイデアとしている。また、微小な光回路の集積化・モノリシック化において実用が始まっているフォトニック結晶構造(人工的かつ周期的な媒質定数の分布をもつ構造)を回路部品および導波路として利用し、媒質定数差による電磁波の全反射に基づく従来の構造よりも小型の光信号処理回路の設計を行い、素子製作に必要なパラ

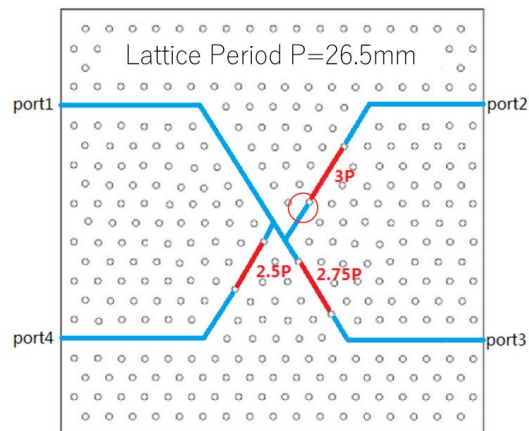
メータを見出すことを目的とした。

3. 研究の方法

申請者が開発済みのCIP(Constrained Interpolated Profile)法を用いたフォトニック結晶構造内の電磁波伝搬解析用プログラム・コードに、Z変換に基づく線形/非線形分散を含んだ差分計算アルゴリズムを導入し、非線形誘電体を含んだフォトニック結晶内の数値解析を行った。それによって、多値振幅を持つデジタル信号入力に対し、周波数および振幅に依存して出力ポートを切り替える光信号処理回路の構成方法について検討した。Z変換を用いた分散の計算は、従来FDTD法のために開発したものであったので、CIP法に適用するよう若干の修正を行った。高速数値計算用にサーバ・コンピュータを導入し、具体的な設計パラメータを得ることを目指した。



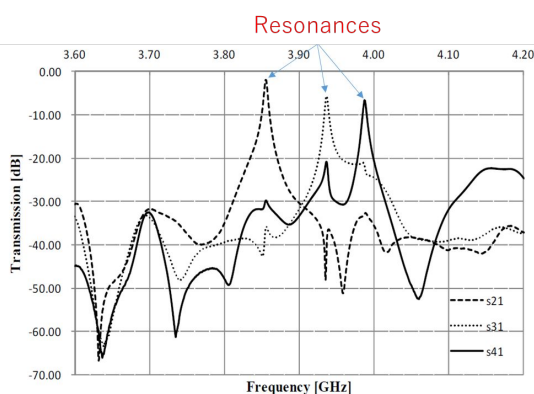
このようなアイデアに基づき、上図のような周期構造中に、非線形誘電体を部分的に導入した共振器構造について、数値計算により検討した。また、光周波数領域で素子を作成することは、申請者の研究環境では不可能なので、代わりにマイクロ波領域でのスケールモデルを作成して、共振器の位置を細かく変化させることで、共振器の長さを変化させ、そのときのフィルタ出力特性について検討した。



4. 研究成果

高価な設備を必要とする光信号周波数で

の実験の代替として、比較的安価なマイクロ波領域でフォトニック結晶回路を製作し、信号周波数に依存する出力ポート切替実験を行った。構造の一例を前ページの図に示す。青い線が導波路部分、赤い線が共振器部分を示す。入力がポート1、出力がポート2から4までである。この時の出力ポートの周波数スペクトルを下図に示す。



この図から、各出力ポートにフィルタされた周波数スペクトルが現れていることが分かる。さらに、この構造をCIP法でシミュレーションして共振器の共振中心周波数を求めて比較したのが下表である。実験結果とシミュレーション結果が、誤差1%程度以下で一致している。

	Cavity #2	Cavity #3	Cavity #4
Experiment [GHz]	3.855	3.936	3.987
CIP with FFT [GHz] (Gaussian w. f.)	3.828	3.896	3.955
Difference (%)	0.700	1.016	0.803
CIP with FFT [GHz] (Raised-cosine w. f.)	3.828	3.906	3.926
Difference (%)	0.700	0.762	1.530

Difference(%) = 100 × (Experiment - CIP)/Experiment

次に、光信号処理では、信号振幅の増大とともに現れる自己屈折率変調などの非線形光学効果が知られている。しかし、現状の光通信では、非線形光学効果が信号歪みを増大させ、通信速度低下などの悪影響があることから、非線形現象が現れない程度に小さく且つ信号伝送に必要な電力を確保するように入力信号エネルギーが選択されてきた。申請者は、光通信でこの現象を取り扱うために、デジタル信号処理で周波数フィルタ処理を時間領域の演算で直接おこなうことが可能なZ変換を用いた時間領域有限差分法の定式化を利用し、非線形媒質中のパルス電磁波伝搬シミュレーションを行った。

主な結果として、非線形媒質中の包絡線パルス波形が非線形効果によって収束し、あるいは分散性が強い設定にすると逆に発散する様子が確認できた。これを周期構造中に応用すべく数値計算コードの改良に取り組んだ。その結果、入力信号振幅を変化させると、共振器からの出力の周波数スペクトルが変動することが確認できた。このことから、当

初想定していた、入力信号振幅によってフィルタの等価的長さが変化することによる出力ポートの切替えが実現可能であると考えられる。

以上のシミュレーションや実験を通して得られた成果を、論文として公表し、また主として国際学会で講演を行った。研究期間に配分された研究費は、数値計算サーバ・コンピュータ導入、数値計算ソフトウェア保守契約更新、学会及び研究打合せのための旅費、論文投稿料として使用した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計6件)

[1] Y. Ma, M. Eldlio, H. Maeda, J. Zhou, and M. Cada, "Plasmonic properties of superconductor-insulator-superconductor waveguide", Applied Physics Express, (査読有), Vol.9, 072201, pp.1-4, (2016, June)

[2] Y. Ma, J. Zhou, J. Pištora, M. Eldlio, N. Nguyen-Huu, H. Maeda, Q. Wu, and M. Cada, "Subwavelength InSb-based Slot waveguides for THz transport: concept and practical implementations", Nature Scientific Reports (査読有), 6, Article number: 38784 (2016, December)

[3] M. Eldlio, Y. Ma, F. Che, H. Maeda, and M. Cada, "A THz semiconductor hybrid plasmonic waveguide with fabrication-error tolerance", Japanese Journal of Applied Physics, (査読有), Vol. 56, pp.010306-1--010306-4 (2017, January)

[4] M. Eldlio, Y. Ma, H. Maeda and M. Cada, "A long-range hybrid THz plasmonic waveguide with low attenuation loss", Infrared Physics & Technology, (査読有), Vol. 80, pp.93-99, (2017, January)

[5] V. Jandieri, H. Maeda, K. Yasumoto and D. Erni, "Analysis of Post-Wall Waveguides and Circuits Using a Model of Two-dimensional Photonic Crystals," Progress In Electromagnetics Research M, (査読有), Vol.56, pp.91-100, (2017, May)

[6] Y. Ma, N. Nguyen-Huu, J. Zhou, H. Maeda, Q. Wu, M. Eldlio, J. Pištora and M. Cada, "Mach-Zehnder Interferometer-based Integrated Terahertz Temperature Sensor," IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, (査読有), Vol. 23, No. 4, p.4601607, DOI 10.1109/JSTQE.2017.2660882 (2017, July/August)

〔学会発表〕(計 13 件)

[1] H. Maeda and K. Yasumoto, “Bending Loss in Two Dimensional Photonic Crystal Waveguide”, Proc. of CISIS2015, (査読有), pp.24-27 (2015, July)

[2] H. Maeda and Y. Bao, “Numerical Analysis of Cavities in Photonic Crystal Waveguide for Filtering”, Proc. of BWCCA-2015, (査読有), pp.455-459, (2015, November)

[3] Y. Bao, H. Maeda, N. Nakashima, “Studies on Filtering Characteristics of X-shaped Photonic Crystal Waveguide in Two-Dimensional Triangular Lattice by Microwave Model”, Proc. of ISAP2015, (査読有), pp.842-845, (2015, November)

[4] H. Maeda, M. Cada, Y. Bao, J. Jin, K. Tomiura, “Numerical analysis of transmission spectrum of X-shaped photonic crystal waveguide for WDM system”, Proc. of CISIS2016, (査読有), pp.186-189, (2016, July)

[5] H. Maeda, M. Cada, J. Jin, K. Tomiura, “Simulation of optical pulse propagation in nonlinear and dispersive medium by constrained interpolated profile method”, Proc. of CISIS2016, (査読有), pp.403-407, (2016, July)

[6] H. Maeda, J. Jin and K. Tomiura, “Control of envelope pulse through nonlinear and dispersive medium”, Proc. of NBiS2016, (査読有), pp.425-428, (2016, Sep.)

[7] H. Maeda, K. Tomiura and J. Jin, “Numerical and experimental study on transmission spectrum of waveguide with periodic structure”, Proc. of NBiS2016, pp.442-446, (査読有), (2016, Sep.)

[8] H. Maeda, K. Tomiura and J. Jin, “Numerical analysis of resonance characteristics in cavities in periodic structure for WDM telecommunication system”, Proc. of MAPWC-2016, (査読有), pp.703-710 (2016, November)

[9] H. Maeda, J. Jin and K. Tomiura, “Spectrum analysis of envelope pulse after propagating in nonlinear dielectric material”, Proc. of MAPWC-2016, (査読有), pp.711-718 (2016, November)

[10] H. Maeda, “Numerical Analysis of Electromagnetic Pulse Wave Propagation in

Dispersive and Nonlinear Medium by Constrained Interpolation Profile Method”, Proc. of 2017 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics (ICCEM2017), (査読有), pp.8-10(2017, March)

[11] Y. Ma, Y. Alattar, M. Eldlio, N. Nguyen-Huu, H. Maeda, and M. Cada, “Plasmonic Semiconductor-Based Interferometers for Ultrasensitive THz Biosensing”, Proc. of 2017 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics (ICCEM2017), (査読有), pp.295-296(2017, March)

[12] H. Maeda, X. Meng, K. Haari and N. Higashinaka, “Design of Microwave Circuit with Periodic Structure for Channel Switching by Carrier Frequency”, Proc. of the 20th NBiS-2017, Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies, (査読有), Vol.7, pp.969-974 (2017, August)

[13] H. Maeda, K. Haari, X. Meng and N. Higashinaka, “Signal Routing by Dispersive Medium”, Proc. of BWCCA-2017 (Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies 12, Springer), (査読有), pp.764-773(2017, October)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

6. 研究組織

(1)研究代表者

前田 洋 (MAEDA, Hiroshi)

福岡工業大学・情報工学部・教授

研究者番号 : 50264073

(2)研究分担者 なし

(3)連携研究者 なし

(4)研究協力者 なし