

学位被授与者氏名	李 雪峰 (Xuefeng Li)
学位の名称	博士 (工学)
学位番号	博 (一) 第 1 1 号
学位授与年月日	平成 1 9 年 3 月 2 5 日
論文題目	Numerical Analysis of Photonic Crystal Device for Integrated Optical Circuit
論文題目 (英訳または和訳)	光集積回路のためのフォトニック結晶素子の数値解析
論文審査委員	論文審査委員会 委員主査 : 福岡工業大学大学院知能情報システム工学専攻教授 内田 一徳 同審査委員 : 福岡工業大学大学院知能情報システム工学専攻教授 松永 利明 同審査委員 : 福岡工業大学大学院知能情報システム工学専攻教授 バロリ レナルド 同審査委員 : 福岡工業大学大学院物質生産システム工学専攻教授 後藤 穂積
論文審査機関	福岡工業大学大学院工学研究科
論文内容の要旨 (英文)	<p>With development of information society, quantity of information to transmit or store is considered to keep increasing. To support such demand, research and development of devices for optical network system is intensively promoted. The size of typical planar lightwave circuit, which is most widely used for various optical circuits, is square of several millimeters. Further miniaturization for device size is expected.</p> <p>Photonic Crystal (PC) are artificial crystals, which have a periodic change of the refractive index corresponding to about half of the light wavelength. The PC waveguide is basically composed of periodic array of dielectric rods or particles with a line of defect in background media. Due to the band gap, the wave with limited range of propagation constants is allowed to exist in the waveguide. Its propagation characteristics are determined by the refractive index n, the lattice period P, and optical frequency. The light wave propagates along with the defects because the existence is forbidden due to PBG outside of the defects. Also, micro optical circuits such as perpendicular bend or branch with quite small loss is possible by making use of PBG. Therefore, it is expected that the size of optical device can be further miniaturized up to square of several tens of micrometer by PC structures. PC structures are indispensable for integrated optical circuits of next generation, because of its outstanding transmission characteristics based on band gap theory, to realize miniaturization of devices and reduction of cost with high reliability in whole system.</p> <p>In this doctor thesis, the analysis is demonstrated numerically by Finite Difference Time Domain (FDTD) method. First, a novel absorbing boundary condition for the FDTD method based on extrapolation is presented. As the FDTD method is basically applied for closed computational regions, it is necessary to set a hypothetical absorbing boundary that inhibits reflection from the ends of the region. Some numerical examples are presented to verify performance of the proposed Extrapolated Absorbing Boundary Condition (EABC). The EABC shows higher absorption performance than Mur's ABC. Also, in comparison with absorption by Berenger's Perfectly Matched Layer (PML) with 12 or less layers, EABC has better absorption performance. The formulation of EABC is as easy as Mur's ABC and the memory consumption to absorb is smaller than PML.</p> <p>Second, the transmissivity of two dimensional photonic crystal directional coupler have been investigated numerically by FDTD method and experimentally by a fabricated model in microwave frequency. The parameters of PC waveguide were first determined by FDTD simulation. Based on the simulation, we have fabricated a model of photonic crystal directional couplers and measured its transmissivity. The numerical and experimental results have shown fairly good agreement each other in frequency range of 3.60-4.20 GHz.</p> <p>Finally, all-optical logic device by PC structure is reported in this thesis. Optical Kerr effect, which arise instantaneous nonlinear refractive index change, is introduced in the structure to control the transmission characteristics by amplitude of optical signal itself. The refractive index changes with electric field E of light from n_0 to $n_0 + n_{NL}/E^2$. In numerical simulation for two-dimensional pillar type PC directional coupler, it was found that the signal output is controllable due to the input amplitude by making use of nonlinear dielectric rods. Possibility for optical switch and all-optical logic device of the coupler is also discussed.</p> <p>The thesis consists of the following chapters. In Chapter 1, the general background is mentioned. Also, the background and the purpose of this thesis and outline of each chapter is described. In Chapter 2, numerical analysis techniques of FDTD method is explained. In Chapter 3, novel extrapolated absorbing boundary condition is formulated and some numerical examples are demonstrated. In Chapter 4, transmissivity of two-dimensional PC structure by FDTD method and experiment by a fabricated model in microwave frequency is described. In Chapter 5, numerical analysis of two-dimensional PC directional coupler is described. In Chapter 6, the</p>

	<p>results obtained throughout this study are briefly summarized. Some future subjects are also mentioned.</p>
<p>論文内容の要旨 (和文)</p>	<p>今後、一層の情報化社会の発展に伴って伝送・記録すべき情報量は格段に増大すると考えられ、光ネットワーク用デバイスの研究が進められている。現在さまざまな用途に利用されている平面光回路は数ミリメートル四方程度の大きさであるため、更なる小型化が期待されている。</p> <p>フォトリック結晶は波長の半分程度の周期で屈折率が変化する人工結晶である。フォトリック結晶の中に線状の欠陥列を作成すると、Photonic Band Gap (PBG) により欠陥列以外の方向への光伝搬が抑制されるため、光は欠陥部分に局在することになる。これがフォトリック結晶型光導波路である。導波路を伝搬することができる光の条件は周波数、誘電率、格子間隔などで決まり、特定の伝搬定数を持つ光は通さない性質がある。この導波路構造では光は周囲にある PBG により閉じ込められているため非常に低損失であり、急激な曲げや分岐でも光閉じ込めが保持されるため、従来の導波路では不可能であった数十マイクロメートルの大きさで光部品が形成できる。システム全体の小型化・低コスト化・高信頼化を実現するため、超小型光集積回路の基本要素であるフォトリック結晶構造が不可欠であると考えられる。</p> <p>本論文では、主に有限差分時間領域法(Finite Difference Time Domain method: FDTD method)による数値解析を行っている。そこでまず、FDTD 法に応用する外挿吸収境界条件 (Extrapolated Absorbing Boundary Condition: EABC) について述べる。FDTD 法は基本的に閉領域の解析手法であるため、開放領域の問題を取り扱うためには、解析領域の外壁に反射が起こらないような、仮想的な境界を用いる必要がある。本論文では EABC の定式化を行い、それに基づいた吸収性能の比較を行った。その結果、EABC は Mur's ABC あるいは 12 層以下の Berenger's Perfectly Matched Layer より良い吸収率を持ち、また非常に小さいメモリ消費であることを明らかにした。</p> <p>次に、フォトリック結晶方向性結合器の透過率について、マイクロ波モデル実験と FDTD 法を用いた 2 次元シミュレーション結果を比較検討した。最初に、我々は FDTD 法を用いて導波路のパラメータを決定した。次にフォトリック結晶方向性結合器のモデルを製作して、ネットワークアナライザで透過率を測定した。周波数領域 3.60 から 4.20 GHz におけるマイクロ波モデル実験とシミュレーションの結果はよく一致した。</p> <p>更に、本論文では、フォトリック結晶を利用した全光学的素子の検討を行った。光 Kerr 効果は、光の電界 E で媒質中の電子の軌道が変化することによって屈折率が変化する現象であり、屈折率が n_0 から $n_0 + n_{NL} E ^2$ に変化する。フォトリック結晶導波路の一部に非線形誘電体を使うと、屈折率が電界 E によって変化を受け、透過特性が変化することを明らかにした。それを応用した 2 次元方向性結合器について、光非線形性による結合長の変化を利用した光スイッチと全光学論理回路としての動作を FDTD 法で解析した。本論文の構成は以下の通りである。第 1 章では、一般的な研究背景、本研究の背景と目的、各章の概要を述べる。第 2 章では、FDTD 法について述べる。第 3 章では、新しい吸収境界条件について述べる。第 4 章では、フォトリック結晶の基礎理論、フォトリック結晶マイクロ波モデル実験および数値シミュレーション結果について述べる。第 5 章では、非線形誘電体を用いた 2 次元フォトリック結晶方向性結合器の数値解析について述べる。第 6 章では、本論文の主要な結果を要約している。</p>
<p>論文審査結果</p>	<p>[学位論文審査の結果]</p> <p>論文題目は“Numerical Analysis of Photonic Crystal Device for Integrated Optical Circuit” (和訳：光集積回路のためのフォトリック結晶素子の数値解析) であり、論文目録として学術論文 3 編 (第 1 著者 1 編)、国際会議論文 7 編 (第 1 著者 3 編)、紀要 1 編 (第 1 著者) となっている。論文内容は、光フォトリック導波路の FDTD 法による解析が主テーマであり、マイクロ波によるシミュレーション実験と FDTD 法による計算領域節減のための外挿吸収境界条件の提案がその副テーマとなっている。論文構成は 6 章からなっている。第 1 章は序論であり、研究の背景と目的等が述べられている。第 2 章では数値解析に使用する FDTD 法の概説を行っている。第 3 章ではコンピュータメモリ節約のための外挿吸収条件を提案している。第 4 章では、フォトリック結晶の基礎理論について述べ、マイクロ波によるフォトリック結晶導波路のモデル実験結果と数値シミュレーション結果について述べている。第 5 章では、非線形誘電体を用いた 2 次元フォトリック結晶方向性結合器の数値解析であり、論理回路のための光スイッチ動作について述べている。第 6 章は結論であり、研究のまとめである。</p> <p>この学位論文に示す研究成果は次の 3 点にある。第 1 は、光 Kerr 効果による非線形性に基づく結合長の変化を利用した光スイッチを提案し、その出力が簡単な論理回路の動作</p>

	<p>行うことをFDTD法による数値シミュレーションで確かめていることである。非線形性をを用いた光スイッチの提案には新規性があり、全光学論理回路の実現に向けた基礎研究として実用的な価値が認められる。第2点として、電磁波の相似性を利用したマイクロ波によるフォトニック結晶導波路のモデル実験を提案し、所望の特性を確かめた点である。マイクロ波からミリ波、サブミリ波へと、今後の高周波化への実験研究の進展が期待できるものである。第3として外挿吸収条件を提案し、従来使用されてきた Mur の吸収条件と比べてメモリの使用は同等であるが、吸収状況が大幅に改善され、数値計算精度の向上に繋がった点である。以上の3点の理由により、審査委員会は提出論文が学位論文の内容として適合すると判定した。</p> <p>[最終試験の結果]</p> <p>学位論文公聴会においては、論文内容に関連する種々の理論的および応用に関する質問があったが、それらの質問に対して概ね適切な回答を行うことができた。また公聴会後の最終試験において、学位論文に関連する基本的な知識を有しており、研究を進めていくための研究能力と語学（英語）の基礎学力を備えていると判断した。</p> <p>以上の理由により、学位審査委員会は「李雪峰」君の最終試験結果を合格と判定した。</p>
<p>主な研究業績</p>	<p>◇査読付きジャーナル論文</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. X. Li and H. Maeda, “Wavelength Filtering by Photonic Crystal Y-branch Waveguide with Microcavity” International Journal of Microwave and Optical Technology (IJMOT), Vol.1, No.2, pp.656-660 (2006, Aug.) 2. H. Maeda, T. Miyaoka, X. Li, H. Nose J. Iwashige and K. Uchida “Experimental and Numerical Study on Transmissivity of Photonic Crystal Directional Coupler” International Journal of Microwave and Optical Technology (IJMOT), Vol.1, No.2, pp.661-665 (2006, Aug.) 3. 内田一徳, 藤井泰憲, 中川真弓, 李雪峰, 前田洋, 「ランダム粗面に沿う電波伝搬特性のFVTD解析」, 電子情報通信学会 和文論文誌B Vol.J-90B, No.1 (2007, Jan) <p>◇国際会議論文</p> <ol style="list-style-type: none"> 4. H. Maeda and X. Li, “Optical Switching in Photonic Crystal Directional Coupler by Kerr Nonlinearity”, Proc. of 2004 International Union of Radio Science (URSI 2004) EMT Symposium, Vol.2, pp.745-747 (2004, May) 5. X. Li and H. Maeda, “Numerical Analysis of Photonic Crystal Directional Coupler with Kerr-type Nonlinearity”, Proc. of 5-th Asia-Pacific Engineering Research Forum on Microwaves and Electromagnetic Theory, pp.165-168 (2004, July) 6. K. Uchida, X. Li, H. Maeda and K.Y.Yoon, ”On Extrapolated Absorbing Boundary Condition for FVTD Method”, Proc. of 2005 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP 2005), Vol.1, pp.197-200 (2005, Aug.) 7. H. Maeda, X. Li, T. Miyaoka, H. Nose, J. Iwashige and K. Uchida, “Frequency Filtering Characteristics of Photonic Crystal Directional Coupler”, Proc. of 2005 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2005), Vol.2, pp.467-470 (2005, Aug.) 8. X. Li, H. Maeda, and K. Uchida, “All-Optical Logic Device by Photonic Crystal Directional Coupler with Kerr-Type Nonlinear Material”, Proc. of Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS) 2006-Tokyo, p.239 (2006, Aug.) 9. H. Maeda, X. Li, and T. Miyaoka, “Numerical Analysis of Photonic Crystal Directional Coupler by Super Cell Method ”, Proc. of 6-th Asia-Pacific Engineering Research Forum on

Microwaves and Electromagnetic Theory,pp.99-103 (2006,Aug.)

1 0 . **X. Li**, H. Maeda, and K. Uchida, "Extrapolated Boundary Condition for FDTD Analysis", Proc. of 2006 China-Japan Joint Microwave Conference (CJMW2006), Vol.1,pp.321-324 (2006,Aug.)

1 1 . K. Uchida, **X. Li**, H. Maeda and K. Y. Yoon, "On Extrapolated Absorbing Boundary Condition for FVTD Method", 2006 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP 2006), Session:SB2,Nov.1-4,2006.

◇紀要

1 2 . **李雪峰**, 前田洋, 内田一徳 「Extrapolated Boundary Condition for FDTD Analysis」, 福工大研究論集, (2006)