

学位被授与者氏名	中武 義将 (Yoshimasa Nakatake)
学位の名称	博士 (工学)
学位番号	博 (一) 第 3 8 号
学位授与年月日	平成 2 6 年 9 月 2 2 日
論文題目	2次元円柱配列からなるフォトニック結晶導波路デバイス構造に対する数値解析法に関する研究
論文題目 (英訳または和訳)	Numerical Analysis of Photonic Crystal Waveguide Devices Formed by Two-Dimensional Circular Cylinder Array
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 渡辺 仰基 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 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 前田 洋 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 朱 世杰
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 (和文)	<p>近年の情報化社会の発展は、大変目覚ましいものがある。これには、回路の小型化が大きく寄与しており、それにより機器の高性能化が達成されている。しかし、小型化によるノイズ耐性の悪化などによって、長期的な性能の向上には困難が予想される。この解決策として、光回路を用いてコンピュータを構成することが提案されている。この光回路を構成する基本的な構造としてフォトニック結晶が注目されており、現在研究が進んでいる。</p> <p>この論文では、2次元円柱配列で構成されるフォトニック結晶に欠陥を設けて作られた導波路や共振器などの導波路デバイス構造に対する電磁波伝搬問題について数値計算法を提案している。電磁波散乱問題の解析法は複数あるが、よく用いられている手法では、有限域内に解析対象を含める必要があり、有効な解析結果を得るために解析領域端に PML 層が必要な手法や、共振器などの構造を考察することに有用なエバネッセントモードを求めることができない手法もある。この論文で提案している手法は、これらの問題を考慮し定式化しているものである。</p> <p>この論文は5章からなっている。第1章では、本論文の背景および目的について述べている。</p> <p>第2章では、円柱による散乱問題の解析について触れ、この論文で提案する手法の基礎となっている複数の散乱体による散乱問題解析手法である Recursive Transition-Matrix Algorithm (RTMA)についても説明している。</p> <p>第3章では、円柱による完全フォトニック結晶構造から適当な位置の円柱を取り除いて作られるフォトニック結晶導波路デバイス構造について、Fourier 級数展開法と多層構造の解析手法を併用した定式化を行い、計算例を示している。この定式化では、電磁界の主たる伝搬方向と垂直に仮想周期を導入する。円柱配列が電磁界の導波方向に多層構造をなしていると考え、構造全体の伝搬特性を各層の縦続接続により得ることができる。また、伝搬モードだけでなくエバネッセントモードについても計算が可能な手法である。</p> <p>第4章では、第3章と同様な構造について、周期境界条件を陽に用いないスペクトル領域法による定式化を行い、計算例を示している。この手法では、仮想的な周期境界を導入することなく波数空間で離散化を行う。この手法についても、構造全体の伝搬特性は、各層の縦続接続により得ることができ、伝搬モードだけでなくエバネッセントモードについて計算が可能である。</p> <p>第5章でこの論文全体のまとめを行っている。</p>
論文内容の要旨 (英文)	<p>In recent years, there are very remarkable developments of the information and communication technology. One of the reasons is the miniaturization of the circuit. However, improvement in performance over the long-term is difficult due to a decrease in noise immunity by miniaturization of the circuit. Therefore, computer using an optical circuit has been proposed. The photonic crystal attracts attention as a basic structure forming this optical circuit, research is in progress now.</p> <p>This thesis deals with the numerical analysis of two-dimensional electromagnetic fields in the photonic crystal waveguide devices (PCWD). Appropriate arrangements of the defects in the photonic crystal function as resonator, branch, filter, etc. Various</p>

numerical techniques have been developed to analyze the electromagnetic wave propagation in the PCWD. Most of the techniques introduce absorbing boundaries to reduce the analysis region, and some techniques are not available to obtain the evanescent modes. In this paper, we propose a formulation to resolve these problems.

This thesis consists of 5 chapters. Chapter 1 describes the background and objective. The formulations proposed in this thesis are based on the recursive transition-matrix algorithm (RTMA), which is a numerical approach to the multiple scattering problem of circular cylinder array. Chapter 2 introduces several techniques of the RTMA.

In chapter 3, the numerical analysis of two-dimensional PCWD using periodic boundary conditions. The structure under consideration is decomposed into layers of the cylinder arrays, and the input/output properties of the devices are obtained using a technique for multilayer structure. The periodic boundaries are introduced in the direction perpendicular to the wave propagation, and the Floquet-modes of each layer are calculated by the Fourier series expansion method with the help of RTMA. The present formulation can calculate not only the guided-modes but also the evanescent-modes.

In chapter 4, a spectral-domain approach is presented for the PCWD structure. In this method, discretization in wave number space is performed without introducing periodic boundary. This approach obtains the propagation characteristics of the entire structure by cascading the layers as same with the approach shown in chapter 3. This is also possible to calculate the evanescent-modes not only guided-modes.

Chapter 5 is the conclusion of thesis.

論文審査結果

審査の結果

提出された主論文では、周期的な円柱配列からなる 2 次元フォトニック結晶中に設けられた、導波・共振構造の組み合わせで構成されるフォトニック結晶導波路デバイスの特性解析に適用可能な数値解析法が提案されている。提案手法は、複数の誘電体円柱による電磁波散乱問題の解析手法として知られている Recursive Transition-Matrix Algorithm (RTMA)を基本にしたもので、広く用いられているビーム伝搬法や Finite Difference Time Domain 法などと比べて、効率的な特性解析を可能にするものと考えられる。この研究の成果は、参考論文として提出されている査読付論文：7 編（うち第 1 著者 2 編）、国際会議論文：20 編（うち第 1 著者 6 編）となっている。

論文は、第 1 章から第 5 章からなる。第 1 章で研究背景と目的について述べられたあと、第 2 章では、RTMA の基本的な定式化として、複数円柱による散乱問題に対する本来の RTMA の考え方、Floquet の定理に基づいて周期的円柱配列による平面波散乱問題に RTMA を適用可能とする方法、さらに多層構造解析法と組み合わせて周期的円柱配列の多層構造による平面波散乱問題に適用する方法、周期的円柱配列の多層構造の間に直線状間隙を設けて作られたフォトニック結晶導波路の固有モード解析を行う方法が説明されている。第 3 章では、フォトニック結晶導波路デバイスを取り囲むように仮想周期境界条件を設け、デバイスの散乱行列を順次計算によって求める手法が提案されており、また、この手法を用いた計算によって得られる特性を他の手法によって得られた結果と比較することで妥当性が示されている。第 4 章では、擬周期 Fourier 変換に基づいたスペクトル領域法の考え方を導入することで、仮想周期境界条件を陽に用いることなくフォトニック結晶導波路デバイスの特性を数値解析する手法が提案されている。第 5 章では、本論文のまとめと今後の課題が述べられている。

提出論文で提案されている手法では、電磁界の平面波展開表現と円筒波展開表現の変換をうまく利用しており、円柱からなるフォトニック結晶導波路デバイスの特性解析を効率的に行うことができる。また第 4 章で提案されている、仮想周期境界条件を陽に用いない手法は、漏洩導波路あるいは漏洩アンテナの解析に応用できる可能性もあり、今後の発展が期待されるものとして高く評価できる。

	<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適切に回答した。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）の基礎学力も十二分に備えていると判断した。</p> <p>以上の理由により、学位審査委員会は中武義将氏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>参考論文 27編1冊 (査読付論文：7編 うち第一著者2編)</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. “Floquet-Mode Analysis of Two-Dimensional Photonic Crystal Waveguides Formed by Circular Cylinders Using Periodic Boundary Conditions,” IEICE Trans. Electron., Vol. E93-C, No. 1, pp. 24–31, Jan. 2010. Authors: Koki Watanabe and <u>Yoshimasa Nakatake</u> 2. “Numerical Analysis of Two-Dimensional Photonic Crystal Waveguide Devices Using Periodic Boundary Conditions,” IEICE Trans. Electron., Vol. E94-C, No. 1, pp. 32–38, Jan. 2011. Authors: <u>Yoshimasa Nakatake</u> and Koki Watanabe 3. “Spectral-Domain Formulation of Electromagnetic Scattering from Circular Cylinders Located Near Periodic Cylinder Array,” Progress In Electromagnetics Research B, Vol. 31, pp. 219–237, Jun. 2011. Authors: Koki Watanabe and <u>Yoshimasa Nakatake</u> 4. “Rigorous Coupled-Wave Analysis of Electromagnetic Scattering from Lamellar Grating with Defects,” Opt. Express, Vol. 19, No. 25, pp. 25799–25811, Dec. 2011. Authors: Koki Watanabe, Jaromír Pištora and <u>Yoshimasa Nakatake</u> 5. “Coordinate transformation formulation of electromagnetic scattering from imperfectly periodic surfaces,” Opt. Express, Vol. 20, No. 9, pp.9978–9990, Apr. 2012. Authors: Koki Watanabe, Jaromír Pištora and <u>Yoshimasa Nakatake</u> 6. “Accurate analysis of electromagnetic scattering from periodic circular cylinder array with defects,” Opt. Express, Vol. 20, No. 10, pp. 10646–10657, May 2012. Authors: Koki Watanabe, <u>Yoshimasa Nakatake</u>, and Jaromír Pištora 7. “Spectral-Domain Formulation of Pillar-Type Photonic Crystal Waveguide Devices of Infinite Extent,” Progress in Electromagnetics Research, Vol. 143, pp. 447–461, Nov. 2013. Authors: <u>Yoshimasa Nakatake</u> and Koki Watanabe <p>(国際会議：20編 うち第一著者6編)</p> <ol style="list-style-type: none"> 8. “Floquet-Mode Analysis of Two-Dimensional Electromagnetic Bandgap Waveguides Consisting of Circular Cylinders in Triangular Lattice,” Proc. 34th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2 pages in CD-ROM, Sept. 2009. Authors: Koki Watanabe and <u>Yoshimasa Nakatake</u> 9. “Differential Method for TM-Polarized Floquet-Mode Analysis of Photonic Crystal Waveguides Formed by Circular Cylinders,” Proc. IEEE Applied Electromagnetics Conf. and URSI Commission B meet., 4 pages in CD-ROM, Dec. 2009. Authors: Koki Watanabe and <u>Yoshimasa Nakatake</u> 10. “Two-Dimensional Electromagnetic Scattering from Circular Cylinder Located near Periodic Cylinder Array,” Proc. 12th Int. Symp. Microwave and Opt. Technol., pp. 221–224, Dec. 2009. Authors: Koki Watanabe and <u>Yoshimasa Nakatake</u> 11. “Fourier Series Expansion Method for Floquet-Mode Analysis of Photonic Crystal Waveguides Formed by Circular Cylinders,” Proc. 4th European

- Conf. Antennas and Propagation, 5 pages in USB memory, Apr. 2010.
Authors: Koki Watanabe and Yoshimasa Nakatake
12. "Electromagnetic Scattering from Cylinders Located near Periodic Cylinder Array," Proc. Fifth Int. Conf. Broadband Wireless Computing, Communication and Applications, pp. 577–580, Nov. 2010.
Authors: Koki Watanabe and Yoshimasa Nakatake
13. "Electromagnetic Scattering from Imperfectly Periodic Array of Circular Cylinders," 2nd Nanomaterials and Nanotechnology Meeting in Ostrava, p. 19, Apr. 2011.
Authors: Koki Watanabe and Yoshimasa Nakatake
14. "Spectral-Domain Formulation of Two-Dimensional Electromagnetic Scattering Problem from Periodic Cylinder Array with a Defect," Proc. International symposium on microwave and optical technology, pp. 285–288, Jun. 2011.
Authors: Koki Watanabe and Yoshimasa Nakatake
15. "Numerical Analysis of Two-Dimensional Photonic Crystal Waveguide Devices Using Periodic Boundary Conditions and Multilayer Technique," Proc. 14th Int. Conf. Network-Based Information Systems, pp. 497–501, Sept. 2011.
Authors: Yoshimasa Nakatake and Koki Watanabe
16. "Floquet-Mode Analysis of Two-Dimensional Photonic Crystal Waveguide with Triangular Lattice Formed by Circular Cylinder Array," Proc. Int. Symp. Antennas and Propagation, 4 pages in USB memory, Oct. 2011.
Authors: Yoshimasa Nakatake and Koki Watanabe
17. "Study on Electromagnetic Scattering Problem of Periodic Cylinder Array with Additional Cylinder," Proc. Int. Symp. Antennas and Propagation, 4 pages in USB memory, Oct. 2011.
Authors: Koki Watanabe and Yoshimasa Nakatake
18. "Plane-Wave Scattering from Periodic Cylinder Array with Defects," Proc. 2012 Korea-Japan EMT/EMC/BE Joint Conference, pp. 137–140, May 2012.
Authors: Koki Watanabe, Jaromír Pištora and Yoshimasa Nakatake
19. "Study on Spectral-Domain Analysis of Imperfectly Periodic Structures." Progress in Electromagnetics Research Symposium, p. 555, Aug 2012.
Authors: Koki Watanabe and Yoshimasa Nakatake
20. "Plane-Wave Scattering from Cylindrical Objects Buried under Periodically Corrugated Surface," Proc. Of the XIX Italian Meeting on Electromagnetics, pp. 84–87, Sep. 2012.
Authors: Koki Watanabe and Yoshimasa Nakatake and Giuseppe Schettini
21. "Electromagnetic Scattering Problem of Periodic Circular Cylinder Array Including an Impurity Cylinder," Proc. Int. Symp. Antennas and Propagation, pp. 399–402, Oct. 2012.
Authors: Koki Watanabe and Yoshimasa Nakatake
22. "Floquet-mode Analysis of Pillar-type Photonic Crystal Waveguide Using Spectral-domain Approach," Proc. Int. Symp. Antennas and Propagation, pp. 1538–1541, Oct. 2012.
Authors: Yoshimasa Nakatake and Koki Watanabe
23. "Floquet-Mode Analysis of Pillar-Type Photonic Crystal Waveguide Using Spectral-Domain Approach," Proc. 9th Asia-Pacific Engineering Research Forum on Microwaves and Electromagnetic Theory, pp. 134–136, Oct. 2012.
Authors: Yoshimasa Nakatake and Koki Watanabe
24. "Electromagnetic Scattering from Imperfectly Periodic Array of Circular Cylinders," Progress in Electromagnetics Research Symposium, p. 445,

Mar. 2013.

Authors: Koki Watanabe and Yoshimasa Nakatake

25. “Numerical Analysis of the Two-dimensional Pillar-type Photonic Crystal Waveguide Devices Using Spectral-Domain Approach,” Proc. 2013 URSI Int. Symp. Electromagnetic Theory, pp. 1121–1124, May 2013.

Authors: Yoshimasa Nakatake and Koki Watanabe

26. “Accuracy Improvement of Numerical Analysis for Two-Dimensional Photonic Crystal Waveguide Devices Using Periodic Boundary Conditions,” 2013 Asia-Pacific Radio Science Conference, 1 page in USB memory, Sep. 2013.

Authors: Yoshimasa Nakatake and Koki Watanabe

27. “Reformulation of Spectral-Domain Method for Electromagnetic Scattering from Periodic Circular Cylinder Array with an Additional Cylinder,” 2013 Asia-Pacific Radio Science Conference, 1 page in USB memory, Sep. 2013.

Authors: Koki Watanabe and Yoshimasa Nakatake