

論 文 要 旨

Abstract

論文題目：光コヒーレンストモグラフィシステム用フォトニック結晶ファイバの最適設計

Title :

Modeling and Optimization of Properties of Photonic Crystal Fibers for Optical Coherence Tomography Systems

Numerical modeling and properties optimization of photonic crystal fibers (PCFs) for generating supercontinuum (SC) in normal dispersion region are presented in this thesis for various optical coherence tomography (OCT) applications. Numerical calculations and analysis of optical properties of PCFs are done by finite difference method (FDM) and finite element method (FEM) with perfectly matched boundary layers.

Highly nonlinear (HNL) and high numerical aperture (HNA) PCFs are designed for OCT systems since HNL-PCFs have become the strong candidates for generating SC as superluminescent diodes (SLDs) which are the main light sources for the earlier OCT systems have limited spectral bandwidth and restricted wavelength ranges. This limitation is overcome by using highly nonlinear PCFs as a propagating media of ultra-short optical pulses for generating SC light sources. However, another potential limitation of medical imaging is the dispersion of the sampling medium which contains about 60% water in normal tissues and 90% water in anatomic structures such as in the eye. A mismatch of chromatic dispersion in the sample and the reference path of OCT systems lead to a degradation of axial resolution of OCT. Therefore, SC light sources are designed at 1.0 μm to eliminate dispersion effect of sample media of OCT systems as it is reported that the influences of the dispersion of the main component (water) of biological tissues can be eliminated if light sources are designed at 1.0 μm centre wavelength. Mainly, pure silica and germanium (Ge)-doped core HNL-PCFs are designed and used to generate SC at optical medical wavelengths as these two optical materials have very notable optical characteristics in near infrared regions. In addition, PCFs having high NA are designed for the sample arms of OCT systems since OCT can perform noninvasive cross-sectional imaging of internal structures in biological tissues by measuring their optical reflections. The nature of the reflecting structures in the biological sample imposes some practical limitation on OCT. Measurements of specular surfaces and cylindrical reflectors require angular alignment of the OCT system to achieve near normal incidence. Diffuse backscattering from tissue heterogeneity has weaker angular dependence and the detected signal level can be improved with the use of high NA PCFs. Moreover, this thesis also focuses on the applications of the soft glass fibers to design extremely highly nonlinear PCFs and high numerical aperture PCFs.

Name: HOSSAIN, MD. ANWAR

平成25年2月26日

琉球大学大学院
理工学研究科長 殿

論文審査委員

主査 氏名 波平 宜敬



副査 氏名 アシャリフ モハammad レザ-



副査 氏名 名嘉村 盛和



副査 氏名 比嘉 広樹



学位（博士）論文審査及び最終試験の終了報告書

学位（博士）の申請に対し、学位論文の審査及び最終試験を終了したので、下記のとおり報告します。

記

申請者	専攻名 総合知能工学 氏名 HOSSAIN MD ANWAR 学籍番号 XXXXXXXXXX	
指導教員名	波平 宜敬	
成績評価	学位論文 <input checked="" type="radio"/> 合格 <input type="radio"/> 不合格	最終試験 <input checked="" type="radio"/> 合格 <input type="radio"/> 不合格
論文題目	Modeling and Optimization of Properties of Photonic Crystal Fibers for Optical Coherence Tomography Systems (光コヒーレンストモグラフィシステム用フォトニック結晶ファイバの最適設計)	
審査要旨（2000字以内） 本研究では、有限差分法(FDM)及び有限要素法(FEM)を用いて、波長0.8-1.70 μm の広帯域における光学特性有する各種フォトニック結晶ファイバ(PCF)の最適設計を行い、新しいPCFを提案し、その特異な諸特性について明らかにしている。 現在、光の干渉を利用して生体組織下数mmの断層面を可視化できるイメージング技術、光コヒーレンストモグラフィ(OCT:Optical Coherency Tomography)が注目を集めている。OCTには幾つかの技術課題があるが、最適な構造パラメータを有する光ファイバを導入することによって、安価で高分解能なシステムを実現できる可能性がある。		

(次頁へ続く)

OCT では、深さ方向の空間分解能は光源のコヒーレンス長に依存し、コヒーレンス長は光源の帯域幅に比例する。空間分解能を向上させるための光源の1つに、PCF を励起して発生する超広帯域のスーパーコンティニューム (SC : Supercontinuum) 光を利用する方法がある。

本研究では、OCT の低価格化及び高分能化を目指して、医療用 SC 光源用高非線形六角形分散フラット PCF (HNL-HPCF: Highly Nonlinear-Hexagonal PCF), 及び医療診断イメージング用ファイバ스코ープに用いる OCT の採光用光ファイバとして高開口数分散フラット六角形 PCF (HNA-HPCF: High Numerical-Hexagonal PCF) を提案している。ここで、開口数 (NA) とは、最大受光角度のことである。

OCT では、被測定部位によって適切な波長が選択されているが、本研究では、主に3つの波長帯について検討を行っている。眼球が対象となる網膜の診断や眼底検査には、 $0.8\ \mu\text{m}$ 帯、組織細胞の主成分が水である皮膚や消化器系では、深さ方向の散乱の影響を受けにくい $1.0\ \mu\text{m}$, $1.31\ \mu\text{m}$ 及び $1.55\ \mu\text{m}$ 帯、並びに歯の解析では $1.31\ \mu\text{m}$ の波長の光を用いて研究を行っている。

光ファイバの構造パラメータの最適化設計の数値シミュレーションの結果、以下のことが明らかとなった。

- 医療用 SC 光源用高非線形六角形分散フラット PCF (HNL-HPCF) では、
- 1) 光ファイバの中心部の光が通るコア部に、3 % のゲルマニウム (Ge) を添加した HNL-HPCF の非線形係数は、波長 $1.31\ \mu\text{m}$ で約 $110\ \text{W}^{-1}\text{km}^{-1}$ になり、この値は、通常の光ファイバの約 6 倍となることが分かった。
 - 2) 長さが $110\ \text{m}$ の HNL-HPC に、 $1\ \text{ps}$ ($10^{-12}\ \text{sec}$) の光パルスを入射した場合の SC スペクトルの $10\ \text{dB}$ 帯域幅は、約 $140\ \text{nm}$ になり、その値は、既発表の PCF の約 2 倍になることが確認できた。
 - 3) 皮膚や消化器系の組織細胞の深さ方向の分解能は、約 $3.28\ \mu\text{m}$ になることが分かった。それは、スーパールミネセントダイオード (SLD: Superluminescent Diode) 光源の約 $10\sim 15\ \mu\text{m}$ より高分解であることが明らかとなった。

一方、医療診断イメージング用ファイバ스코ープに用いる OCT の採光用光ファイバとしての高開口数分散フラット六角形 PCF (HNA-HPCF) の開口数 (NA) は、以下のようになった。

- 1) $\text{NA} = 0.58$ @ 波長 $1.0\ \mu\text{m}$
- 2) $\text{NA} = 0.65$ @ 波長 $1.06\ \mu\text{m}$
- 3) $\text{NA} = 0.66$ @ 波長 $1.31\ \mu\text{m}$

通常のシングルモード光ファイバの NA は、約 0.11 で、マルチモード光ファイバでは、約 0.25 であるので、本研究の提案の HNA-HPCF は、高分解能であることが明らかとなった。

本研究の提案の HNL-HPCF 及び HNA-HPCF は、波平とベトナム工科大学間で、PCF の最適化及び製造に関する共同研究契約 (MOU) を 2012 年 6 月に締結しているため、ベトナム工科大学で PCF の製造を検討する予定で、産業への応用が有望視されている。

尚、特筆すべきは、本研究の成果は、全世界から約 11% の厳しい採択率の 2013 年度の JSPS (日本学術振興会) の外国人特別研究員 (ポスドク) に採択されており、波平と 2 年間共同研究する予定である。

したがって、本研究成果は工学的に有用であり、提出された学位論文は博士の学位論文に相当するものと判断し、学位論文の審査を合格とする。また、論文発表会における発表ならびに、質疑応答において、申請者は専門分野および関連分野の十分な知識ならびに琉球大学大学院理工学研究科後期課程修了者として十分な研究能力を有していることが確認できたので最終試験を合格とする。