

学 位 論 文 題 名

Fabrication of Three-dimensional Spiral Structure  
Photonic Crystals by Femtosecond Laser and  
Their Optical Characterization

(フェムト秒レーザーを用いた3次元らせん構造フォトリック結晶の  
作製とその光学特性評価)

学位論文内容の要旨

Photonic crystal, or photonic band gap (PBG) material, is one of the most important issues in modern optoelectronics, highly regarded as *the* key element that will lead to breakthrough in optical technology and miniaturized optical devices. Photonic crystals are microstructures that have a spatial modulation of their dielectric properties, giving rise to a PBG, which is a spectral range that affects the propagation of electromagnetic waves within certain energy (frequency) range. Hence photonic crystals can be used to control the flow of photons, or to localize light strongly within an optical cavity to study light-matter interactions. Photonic crystals can also be used in the diffractionless transport of light signals in a so called all-optical microchip, which can perform functions analogous to current microelectronic circuits, and open up the way to photonic computing.

From the practical viewpoint, engineering of 3D PBG near the telecommunications wavelengths around  $1.5\ \mu\text{m}$  is especially important. 3D microstructuring of high refractive index materials can be achieved with conventional planar-semiconductor technologies, but it is tremendously arduous, involving lengthy multi-step procedures even for the simple woodpile structures (straight rods stacked in a periodic manner which can be build layer-by-layer). These difficulties have stages a search for alternate strategies that would allow practical and economical fabrication of 3D periodic structures. Lithography by direct laser writing (DLW) in dielectrics using tightly focused laser radiation to induce multi-photon absorption, enables rapid, straight-forward and flexible micro- and nano-fabrication of arbitrary patterns with high spatial resolution, and therefore is an attractive tool for the tailoring of PBG structures.

In this research work, the intrinsic patterning capability of the DLW technique is applied and exploited to fabricate 3D photonic crystals belonging to a recently elaborated novel class of structures whose spiral architecture has promising PBG properties. The complexity of the spiral structure photonic crystal makes it difficult to implement by many common microstructuring techniques such as the layer-by-layer lithography, multibeam interference and self-assembly planar, but is realizable using DLW. The mechanism of photopolymerization has been investigated extensively, and near-optimal exposure, pre- and post-processing conditions have been established. This allows successful fabrication of highly periodic square spirals structures that have photonic stop gaps appearing in the spectral range of 1.5 – 6.0  $\mu\text{m}$ . Introduction of intentional defects for functionalities such as waveguiding into these structures is also been demonstrated. The world's first circular spiral structures, which has large theoretical PBG, has also been implemented successfully. By improvising the fabrication scheme, horizontal circular spiral with photonic stop gaps at 0.88  $\mu\text{m}$ , the shortest so far observed in spiral structures, have been constructed. These high quality polymeric spiral structures are useful as photonic crystal templates for secondary infiltration such as the double infiltration technique to exchange the low refractive index photoresist material with a high refractive index material like silicon.

This thesis consists of six chapters.

*Chapter 1* describes the fundamentals of photonic crystals using the 1D photonic crystal (dielectric mirror) as an example. Some of the important photonic crystal architectures, and current common fabrication techniques are discussed and compared. The motivation of this research work is described.

*Chapter 2* includes a section devoted to describe the technique DLW. The mechanism of photopolymerization is described in details.

*Chapter 3* is focused on square spirals. The square spirals were proposed by Toader and John in 2001, and were implemented using DLW, which displayed stop gaps in the spectral range of 1.5 to 5.0  $\mu\text{m}$ . In addition, we demonstrated that defects can be inserted into the spiral structures freely, and more importantly, the defects are sustainable. Tailoring of the pre- and post-processing conditions of the photoresist, in addition to optimizing the exposure conditions, for improving the mechanical rigidity and inhibiting image blurring is also described.

*Chapter 4* is devoted to circular spirals. This work implemented the world's first circular spiral structures photonic crystals, and investigated their optical properties. The so-called horizontal spiral structures photonic crystals exhibit photonic stop gaps in the

spectral region of 0.88 – 1.1  $\mu\text{m}$ , which is the shortest reported so far for spiral structures, and simultaneously they have reasonable attenuation of around 15%.

*Chapter 5* described the polymeric photonic crystals fabricated by DLW used as templates for the double infiltration processes, which replaced the photoresist material with a high refractive index like silicon.

*Chapter 6* summarized the results and conclusions, and discusses future possible work on this research topic.

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 三 澤 弘 明

副 査 教 授 末 宗 幾 夫

副 査 教 授 笹 木 敬 司

副 査 助 教 授 Saulius Juodkazis

## 学 位 論 文 題 名

### Fabrication of Three-dimensional Spiral Structure Photonic Crystals by Femtosecond Laser and Their Optical Characterization

(フェムト秒レーザーを用いた3次元らせん構造フォトニック結晶の  
作製とその光学特性評価)

フォトニック結晶は、屈折率の異なる二種類の物質を、光波長程度の周期で規則正しく配列され人工結晶である。それによって、光に対するフォトニックバンドギャップ (PBG) が形成され、光の伝搬と放出の制御が可能であり、次世代の光デバイスに導く重要な素子と注目を浴びている。半導体微細加工技術で3次元フォトニック結晶の作製は報告されているが、本質的には2次元加工技術であるため、簡易なログパイル構造の作製でも長時間と煩雑な過程が要求され、3次元加工には適していないと言われている。本研究では、集光したフェムト秒レーザーパルスを感じ材料の内部に照射し、焦点のフォトン密度が多光子吸収プロセスが誘起されやすい高いレベルまで達し、光の回折限界を超える加工分解能で自在な微細立体形状の形成が可能である加工法に着目した。らせん構造に基づくフォトニック結晶は、理論計算より有望な PBG 性質を持つと解明されているが、形状が複雑であるため、いままで他の手法で実現するには困難である。本研究では、集光フェムト秒レーザー加工を用いて、重合反応後化学と熱の耐久性が優れているネガ型フォトレジスト (SU-8) で3次元らせん構造フォトニック結晶を作製し、作り出した構造の光学特性評価を行った。

研究の概略としては、SU-8 の前と後処理と露光条件を最適化することによって、解像度 (周期 1 ミクロン) と強度の優れた 3 次元らせん構造の作製を行った。作製されたらせん構造の種類は四方形と円形らせんで、光学特性評価より 0.88 ~ 5.5 ミクロンのスペクトル範囲内にフォトニック・ストップ・ギャップが測定された。0.88 ミクロンで現れたフォトニック・ストップ・ギャップはいままで報告されたらせん構造の中では最短であり、円形らせん構造は世界初の実例として報告された。フォトニック結晶に欠陥の導入は、欠陥内に光を局在させることにより導波路やマイクロ・キャビティの形成が可能であり、応用面ではいかに重要である。デザインされた欠陥が正確で任意な位置に設置できることは四方形らせん構造を通して証明された。また、作製したらせん構造は、CVD 法で屈折率の高いシリコン材料に置き換えるフォトニック・テンプレートとして有効であることが検証された。

本論文は以下の6章から構成されている。

1章では、フォトニック結晶とフォトニックバンドギャップに関する解説がなされており、重要なフォトニック結晶構造と代表的なフォトニック結晶作製手法を紹介している。その上で本研究を行う意義・目的が述べられている。

2章では、集光フェムト秒レーザー加工法、使用されるネガ型フォトレジスト材料、実験装置と手法について説明されている。更に、ボクセルの形成と露光条件が述べられている。

3章では、四方形らせん構造の分別、作製と光学特性評価について詳しく述べられている。測定された光学特性結果は理論計算と比較し、計算と一致する波長帯域にPBGが得られたことが示されている。

4章では、円形らせん構造の作製と光学特性評価について詳しく述べている。水平円形らせん構造の利点が述べられ、作製した構造の光学特性評価によりフォトニック・ストップ・ギャップがらせんいままで得られた構造のなかで最も短波長に現れたことが示された。

5章では、作製された四方らせん構造をフォトニック・テンプレートとして活用され、シリコン・ダブル・インバージョンという過程でシリコンらせん構造の作製と光学特性評価について述べている。

6章では、これまでの研究成果をまとめて総括とし、今後の方策が提案されている。

これを要するに、他の手法では実現が困難である、有望なオプティカルな性質を有するらせん構造フォトニック結晶を集光フェムト秒レーザー加工で作製し、その光学特性評価を行うことによって、著者の研究は光量子エレクトロニクス分野に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。