

## 3D 周期構造の技術開発とベンチャー起業

佐藤 尚\*・川嶋 貴之\*・川上彰二郎\*,\*\*

### Developments of Fabrication Technique of 3D Periodic Structures and Establishment of Photonic Lattice

Takashi SATO\*, Takayuki KAWASHIMA\* and Shojiro KAWAKAMI\*,\*\*

Photonic crystals (PhCs) are an artificial optical material, with a refractive index modulated on the micron scale. Photonic Lattice, Inc., a spin-out of Tohoku University has developed a unique PhC fabrication technique known as Autocloning, and is actively engaged in R&D. In addition to R&D it is involved in application development, rapid prototyping and technology transfer, and is currently the only company to sell 3D PhC chips, devices, and instruments. The PhCs are formed by alternately sputtering and sputter etching, thus autocloning is compatible with mature process technologies, further it is possible to fabricate arbitrarily patterned, optical elements which modify the optical polarization in a desired manner.

**Key words:** photonic crystal, polarizer, waveplate, ellipsometer, polarization imaging

フォトニック結晶とは、人工的に形成した微細な周期構造体からなる新しい光学材料である。その魅力はバンドギャップや強い異方性という周期構造に起因する特性を自由に設計し利用することで、従来にはない特徴的な光学素子を実現できるところにある。

株式会社フォトニックラティスは、筆者らが東北大学で開発したフォトニック結晶技術を基盤に設立した会社である。コア技術である自己クローニング法<sup>1)</sup>は、生産性・再現性がすぐれたフォトニック結晶製造技術であると同時に、異なる特性のフォトニック結晶を集積化することができるという点で、フォトニック結晶の産業応用を可能にするキーテクノロジーとなっている。現在は、ディスプレイ、光計測、光記録、光通信など光産業への幅広い応用展開を進めている。本稿では、当社の設立の経緯を述べるとともに、自己クローニング型フォトニック結晶を用いた現在の主力製品および将来技術について紹介する。

#### 1. 設立の経緯

当社の起源は東北大学電気通信研究所の川上研究室(1979~2000)である。同研究室は光ファイバーやマイクロプロセッサなど光通信分野を中心に研究開発を行ってきた。グレーデッドインデックス (GI) ファイバーやW型ファイバー、TECファイバーなど現在の光通信システムで使われている技術の基本特許を発明するなど、産業に役立つ研究に重点を置いた研究室であった。

フォトニック結晶に直接繋がる研究は、平坦な多層膜構造を用いた光学素子の研究であった。当時は、誘電体/金属の多層膜、あるいは2種誘電体の交互多層膜を用いたもので、前者は偏光子、後者は構造複屈折素子として利用していた。低損失の多層膜を得るためには、各境界面を平滑にして散乱損失を低減することが重要であり、その手段としてバイアススパッタリング法による積層プロセスを用いていた。積層中に基板表面上のミクロなゴミから凹凸が成長し柱状の欠陥パターンが形成されることがたびたびあって、問題になっていた。

\* (株)フォトニックラティス (〒980-0845 仙台市青葉区荒巻字青葉 あおばインキュベーションスクエア)  
E-mail: sato@photonic-lattice.com

\*\* 仙台応用情報学研究振興財団 (〒980-0845 仙台市青葉区荒巻字青葉 あおばインキュベーションスクエア)

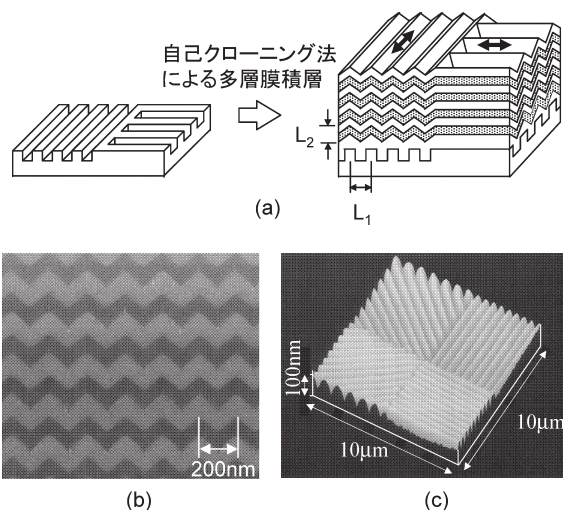


図1 自己クローニング型フォトニック結晶。(a) 直交する溝列のパターン上に形成したフォトニック結晶。矢印が光軸方向を表す。(b) 断面 SEM 写真, (c) 4 方位のフォトニック結晶を集積化した例 (AFM 像)。

ちょうどそのころ、欧米でフォトニック結晶の研究が目されはじめていた。川上はフォトニック結晶の作製方法に上記のプロセスが利用できると考えた。基板に人工的にミクロな凹凸パターンを形成し、先の条件で積層したところ、きれいな三次元周期構造が容易に形成された。これが弊社のフォトニック結晶作製技術である自己クローニングの発見であった。

その後は研究の中心をフォトニック結晶に移し、作製プロセス、電磁波解析、応用素子にいたる広範囲な研究を一気に開始した。2000年に川上は電気通信研究所を退官したが、発足間もない東北大未来科学技術共同研究センター (NICHe; ニッチェ) の客員教授となり、フォトニック結晶の研究を継続した。

筆者らの発明したフォトニック結晶技術は、通常の薄膜作製技術を基盤にしていることから生産性が高く、産業化に適したほとんど唯一の製造方法といえる。当初から実用化を念頭に入れていたが、2000年に科学技術振興機構 (JST) のプレベンチャープロジェクトに採択され、フォトニック結晶偏光子の実用化研究を本格化した。プロジェクト期間中の2003年7月に、当時の研究メンバー4名で (株) フォトニックラティスを設立した。当初は東北大ニッチェ内で活動していたが、2004年5月にあおばインキュベーションスクエアに移転し独立した。この施設は宮城県が運営しているインキュベーション施設であり、東北大学工学部キャンパスから約1kmと近く、大学との連携で開発を進めている筆者らにとっては最適な場所である。

フォトニックラティスのメンバーは、おもに技術を担当

している筆者ら3名のほか、財務や販売をおもに担当している青山、石川の5名が常勤役員である。常勤役員・社員は合わせて12名である。それに社外取締役として中原恒雄氏、井口泰孝氏の2名が加わっている。

## 2. 自己クローニング法

自己クローニング法は薄膜堆積プロセスを利用したフォトニック結晶の作成方法である。図1 (a) のように、サブミクロン周期 ( $L_1$ ) の溝列あるいは孔列を加工した基板の上に、高屈折率材料 (例えば  $Ta_2O_5$  や a-Si) と低屈折率材料 ( $SiO_2$ ) の多層膜をバイアスパッタリング法 (スパッターエッチングの効果を伴うスパッター成膜) により積層する。成膜とエッチングそれぞれの表面整形作用がバランスする条件では、下地の周期的な凹凸パターンを三角波状パターンに整形し、さらにその形状を安定的に保持しながら積層が進む。積層方向を多層構造 (周期  $L_2$ ) にすることで、微細な二次元あるいは三次元周期構造が一度の連続した成膜プロセスで容易に作製される。自己クローニング法は既存の薄膜形成プロセスの延長上にあり、すでに信頼性、量産性が確立された技術を基盤としている。そのため、工業化に適した唯一のフォトニック結晶生産方法といえる。また、自己クローニング法は一般的なスパッター材料が使えること、凹凸パターンの周期や方位、積層周期を自由に選べることから、さまざまな素子に対応させることができる。図1 (b), (c) は、100層以上積層した後の断面 (SEM 写真) と四方位の集積素子 (AFM 像) の例である。多層化が安定して行えること、方位の異なるフォトニック結晶の集積化が容易であることがわかる。

## 3. フォトニック結晶の応用素子

自己クローニング型フォトニック結晶からなる偏光子および波長板 (図2) は、すでに製品化されているもののひとつである。それぞれについて説明する。

偏光子<sup>2)</sup>は多層構造に起因する伝搬域/遮断域が偏波依存性をもつために、ある波長域においては2つの直交する偏波 (溝列に垂直な偏波 TM 波と平行な偏波 TE 波) を透過と反射で空間的に分離することができる。本素子の特徴は、波長の選択性が高いこと、高性能であること、環境安定性や耐光性が高いことである。動作波長は材料、基板溝の周期、積層周期を選ぶことにより任意に選定することができる。例えば、材料に Si と  $SiO_2$  を選ぶことで波長  $1.1 \mu m$  以上で動作する光通信帯用偏光子を、高屈折率材料を  $Ta_2O_5$  や  $Nb_2O_5$  にし面内/積層周期を小さくすることによって可視域 RGB の各領域や紫外域で動作する偏光

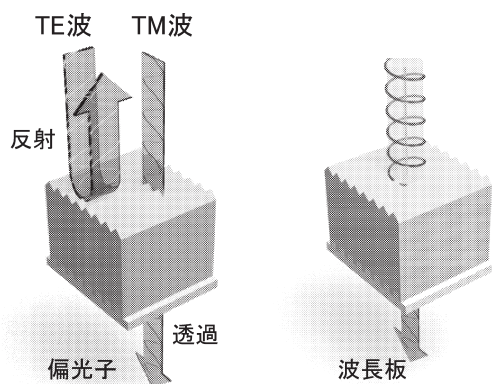


図2 フォトニック結晶からなる偏光子と波長板の概念図。

子を実証している<sup>3)</sup>。また、材料は無損失であるため透過率が高く(98%以上)、消光比(遮断する偏波と透過する偏波の透過率の比)は積層周期数によって40 dB以上まで任意に設定できる。動作波長が可視域まで広がったことで、光記録やディスプレイなどコンシューマー機器への応用展開が始まっている。既存の有機材料からなる偏光子ではハイパワーに対する信頼性が問題となっており、無機材料からなる本偏光子の優位性が大きい。

TE波、TM波ともに伝搬域となるように周期構造を選ぶと構造複雑性を有する素子として動作する<sup>4)</sup>。したがって、積層数を調整すれば所望の波長で $\lambda/2$ あるいは $\lambda/4$ などの位相板として利用することができる。波長特性をデザインできることで、従来にない多波長対応の位相板も可能である。

上記に述べたフォトニック結晶素子の既存素子との差別化の最大のポイントは、面内の集積化である。ピッチあるいは方位が異なる凹凸パターンを基板上に加工し、多層膜の積層を1回行うことで特性の異なる偏光子を任意配置に集積化することができる。従来素子のハイブリッド集積と比較すると、①方位の角度精度が高いこと、②領域の微細化が可能(10ミクロンオーダー)、③境界部分に不良領域がない、という3点が挙げられる。任意パターンからなる複合素子は当社技術の要であり、事項で述べる新規機能の製品群を開発している。

#### 4. 集積化フォトニック結晶の応用デバイス

##### 4.1 偏光イメージングカメラ

偏光イメージングカメラは、輝度情報に加えて偏光情報を画像にして表示することのできるカメラである。得られた画像から無偏光成分を抽出することで、ガラスや水面のように偏光依存性の反射光を除去でき物体をより鮮明に見ることができる。一方、偏光成分に着目すると、その偏光

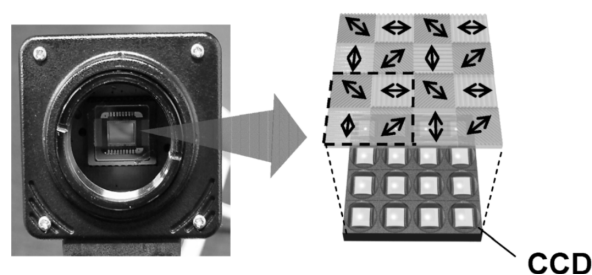


図3 偏光イメージングカメラの概念図。



図4 偏光イメージングカメラで撮影した写真(処理前(左)と処理後(右))。リアルタイムで任意の方向のガラス面の反射を除去することができる。

軸方向から物体の面の傾き方向を求めることが可能になり、物体の形状認識ができる。従来はカメラの前で偏光子を回転させて各画像を取得しなければならず、大型になり、リアルタイムの撮影ができなかった。

本カメラは図3のように、透過方位が異なるフォトニック結晶偏光子をCCD撮像素子のピクセルに1対1に合わせて二次元集積化し、CCDと一体化させたものである<sup>5)</sup>。本デバイスは偏光画像を同時に取得することができるなど、高速性、安定性に特長を有しており、マシンビジョン、セキュリティ、バイオ医療、ITSなどさまざまな分野で応用が期待できる。

図4は、実際に作製したカメラで屋外の車を撮影した画像である。左は4つの偏光子を透過した強度の平均値(すなわち通常のカメラで撮影した画像に相当)、右は偏光に依存しない成分を解析し表示した画像である。方位の異なるフロントガラスとサイドガラスの両方において、反射が除去されていることがわかる。カメラの前の一様な偏光子を回転させるだけでは得られない。そのほか、道路を撮影すると、路面部分が一定の偏光状態であるために高度なソフトウェア技術を要することなく、簡単に路面部分を抽出することも実証した。現在注目されているITS技術への展開が期待される。

##### 4.2 マトリックスエリプソメーター

エリプソメーターは薄膜の試料に斜めに光を入射し、その反射光の偏光解析を行うことで、膜厚や屈折率などの光学定数を測定する計測方法である。特に、薄い膜に感度が

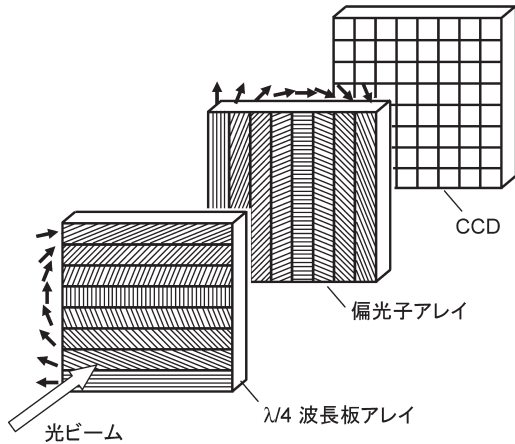


図5 フォトニック結晶を用いたエリプソメータの受光モジュールの構造。矢印は光軸の方向を表す。

高いこと、膜厚と屈折率を独立に測定できることが特長である。これまでのエリプソメータは、光学素子の回転機構を有するために、小型化および使用環境が制限されていた。図5は、当社が開発している新方式のエリプソメータの受光モジュールの構造である<sup>6)</sup>。フォトニック結晶からなる波長板アレイ、偏光子アレイ、CCD撮像素子を組み合わせた受光部に特徴があり、従来、偏光子や波長板を回転させて得られる時系列のデータを空間的に展開して一括して取得することができる。得られた画像を解析することにより瞬時にエリプソメータ計測を行うことができる。本方式は小型、高速、環境安定性が高いなど、これまでのエリプソメータの概念を一新するポテンシャルを持っている。特に、光源部と受光部を1つの筐体に入れるエリプソメータのモジュール化が可能になるため、真空チャンバーをはじめ、従来困難であった装置組み込みへの期待が大きい。

現在、フォトニック結晶アレイ、CCDチップ、制御電子回路からなる受光モジュール(24 mm×35 mm×78 mm)を作製し、A4判サイズでポータブルのスタンドアロン型エリプソメータを実現した(図6)。重量は既存の装置の約10分の1の4 kgである。

精度を確認するため、厚さの異なるSi酸化膜を測定した。図7の横軸は分光エリプソメータで測定した厚さの公称値、縦軸は本エリプソメータで測定した値である。厚さ300 nmまでよく直線に乗っていることがわかる。また再現性も高く、厚さ126 nmのサンプルに対して $\sigma=0.02 \text{ \AA}$ 、屈折率1.48に対して $\sigma=10^{-4}$ であった。さらに、極薄膜の厚さ分解能が0.1 nmときわめて高いことも実証している。

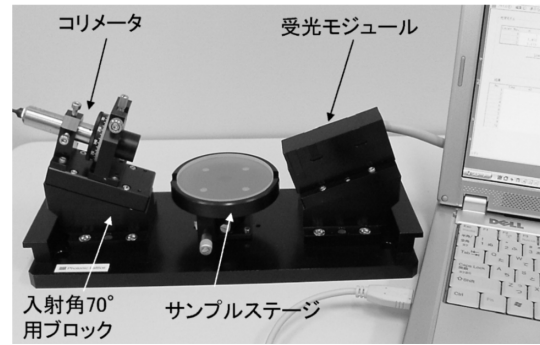


図6 本エリプソメータの構造。A4判サイズで重量は約4 kg。

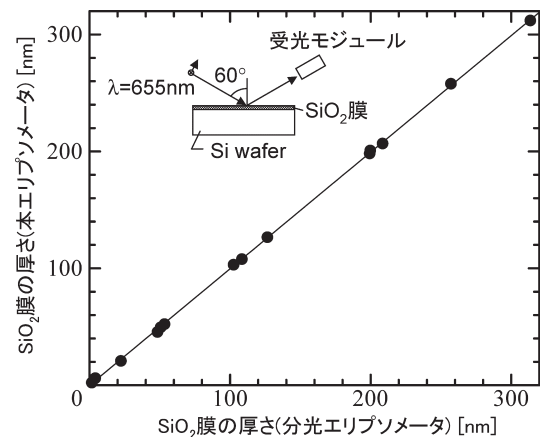


図7 本エリプソメータの測定結果。SiO<sub>2</sub>膜の公称膜厚(横軸)と本エリプソメータによる測定値(縦軸)。

#### 4.3 偏光縦スリット

結像光学系において、シャープな結像を行うために焦点位置にピンホールを置く方法が広く用いられている。しかし、信号と不要光との分離特性が十分でないこと、像が暗くなるなど実用上の問題となることが多い。ここで述べる偏光縦スリットは、フォトニック結晶を用いた合焦点光を選択する新しい構造であり<sup>7)</sup>、ピンホールに比べてきわめて高い信号分離特性を実現することが可能である。

基本構成と機能を図8に示す。主軸方向が隣接する2つの領域で直交する1/4波長板領域を2枚対向させる。これをクロスニコル状態の2枚の偏光子で挟む。2枚の波長板の間に焦点を結ぶ光は、同じ方位の1/4波長板を2回通ることになり偏光方向が90°回転し、検光子を透過する。焦点が波長板の間にない光は、方位が直交する1/4波長板を2回通ることになり偏光方向は変化せず、検光子を透過できない。ピンホールタイプでは不要光の一部は必ずピンホールを透過してしまうが、偏光縦スリットでは原理的に100%の遮断が可能になる。偏光縦スリットを用いて、多層ディスクの各層の信号を効果的に分離する実験が報告さ

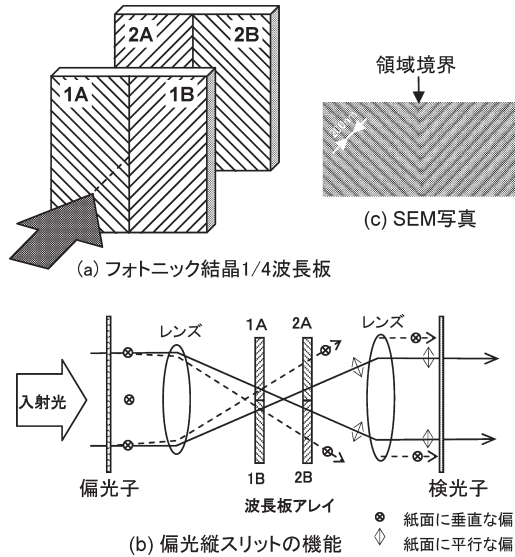


図8 偏光たてスリット。(a) 概念図, (b) 機能を表す光線図, (c) 表面のSEM写真。

れている<sup>7)</sup>。一方、当社では一次元的掃引で高速に、不要光のほとんど残存しない共焦点二次元画像を取得できることに着目し、本原理に基づく共焦点顕微鏡の開発を進めている。

筆者らの会社の生い立ちを紹介し、自己クローニング型フォトニック結晶からなる最近の素子・デバイスの製品展開の状況について述べた。偏光子などの機能素子や、それらを集積化した素子は光通信<sup>8)</sup>、光計測、映像などさまざまな分野の製品へ展開されつつある。自己クローニング結晶はアイデア次第で応用の可能性を無限に広げられる。これからも市場を創造することのできる魅力ある製品を実現していきたい。

〈校正時の追記〉

2006年の夏に画像センシングの展示会に偏光カメラを出展したところ、筆者らが予想していたJTS、セキュリティ関係分野からの関心だけでなく、透明体の検査、製品管理など工業計測関係者の強い関心を引いた。偏光カメラの当面の大きな応用分野として、ガラス、射出成形品、ディスプレイ光学フィルムの二次元一括計測は重要である。

文 献

- 1) S. Kawakami: "Fabrication of submicrometre 3D periodic structures composed of Si/SiO<sub>2</sub>," *Electron. Lett.*, **33** (1997) 1260-1261.
- 2) Y. Ohtera, T. Sato, T. Kawashima, T. Tamamura and S. Kawakami: "Photonic crystal polarization splitters," *Electron. Lett.*, **35** (1999) 1271-1272.
- 3) 川嶋貴之, 井上喜彦, 佐藤 尚, 川上彰二郎: "可視光用フォトニック結晶偏光子の開発", 第52回応用物理学関係連合講演予稿集, 29p-YV-11 (2005).
- 4) T. Sato, K. Miura, N. Ishino, Y. Ohtera, T. Tamamura and S. Kawakami: "Photonic crystals for the visible range fabricated by autocloning technique and their application," *Opt. Quantum Electron.*, **34** (2002) 63-70.
- 5) 川嶋貴之, 佐藤 尚, 本間 洋, 井上喜彦, 川上彰二郎, 太田晋一, 長嶋 聖, 青木孝文: "偏光子アレイを用いた偏光イメージングカメラの開発", 第67回応用物理学学会学術講演会, 31a-T-3 (2006).
- 6) T. Sato, Y. Sasaki, N. Hashimoto and S. Kawakami: "Novel scheme of ellipsometry utilizing parallel processing with arrayed photonic crystal," *Photonics Nanostr. Fundam. Appl.*, **2** (2004) 149-154.
- 7) T. Ogata: "Multi-layer disk read-out technology used photonic crystal," *Optics Japan*, 23aPD1 (2005).
- 8) 橋本直樹, 本間 洋, 佐藤 尚, 青山 勉, 千葉貴史, 上塚尚登, 川上彰二郎: "PMD マネージメント向け小型・高精度DOP モニタの開発", 電子情報通信学会ソサイエティ大会, C-3-106 (2005).

(2006年8月24日受理)