

招待論文

フォトニック結晶偏光子を用いた偏光イメージングカメラの開発 Polalization imaging device utilizing photonic crystal polarizer

川上彰二郎^{1,2}、川嶋貴之¹、井上喜彦¹、本間洋¹、佐藤尚¹、

太田晋一³、長嶋聖⁴、青木孝文⁴

1:株式会社フォトニックラティス

2:(財)仙台応用情報学研究振興財団

3:宮城県産業技術総合センター

4:東北大学大学院情報科学研究科

Shojiro Kawakami^{1,2}, Takayuki Kawashima¹, Yoshihiko Inoue¹, Yoh Homma¹,

Takashi Sato¹, Shinichi Ota³, Sei Nagashima⁴, Takafumi Aoki⁴

1:Photonic Lattice, Inc.

2: Sendai Foundation for Applied Information Sciences

3:Industrial Technology Institute, Miyagi Prefectural Government

4:Graduate School of Information and Science, Tohoku University

e-mail: kawasima@photonic-lattice.com

あらまし

フォトニック結晶は光の波長オーダーの周期構造により光学特性を発現させるという本質により、構造のパラメータを制御することで、従来の光学材料では得られない高い制御性を実現することができる。例えば偏光子の透過軸をマイクロオーダーで自由に配列し、撮像素子と組み合わせることで、偏光情報を画素単位で取得し、偏光の空間情報を1台のカメラで得ることができる。その高い制御性を応用したデバイスの一例として、偏光イメージングカメラについて紹介する。

本論文では、フォトニック結晶偏光子を用いた偏光子の原理及び、得られた偏光情報を使って窓ガラスの映り込み除去、物体形状の情報取得などについての実例を示す。

Abstract

The optical properties of photonic crystals can be controlled by their structural parameters. The controllability realizes integrated novel optical elements. For example, we can fabricate a segmented polarizer composed of segments, each of which is a few microns square.

In this paper, we report a polarization imaging camera utilizing a segmented polarizer, each segment corresponding to the pixel of a CCD, and we show some examples of polarization images for the purpose of recognition of object shapes and reduction of specular reflection.

キーワード 偏光、フォトニック結晶、画像処理、マシンビジョン、集積光部品
Keywords polarization, photonic crystal, image processing, machine vision,
integrated optics

1. はじめに

屈折率の多次元周期構造体であるフォトニック結晶は E. Yablonovitch の自然放出光抑制の可能性についての論文[1]に書かれてからすでに 20 年が過ぎようとしている。その間、数々の理論的、実験的な報告がなされ、現在においても学会で注目されるテーマの一つとして、活発に研究がなされている。

その内容としてはレーザー発光の高効率化、光回路の高集積化、非線形効果の増大などに広がっている。一方でフォトニック結晶の実用化の例は、フォトニック結晶ファイバ[2]を除いてほとんど無いと言っている。それは作製方法の難度が一番の原因である。

一方で、フォトニック結晶の技術について、人工的な周期構造を用いて光を制御するという点に着目すると、よりシンプルな現象においても様々な応用が見えてくる。その方向性の一つとして、自己クローニング法による面型偏光素子の展開が挙げられる。自己クローニング法は筆者らにより 1997 年に提案されたフォトニック結晶の作製方法である[3]。スパッタリングによる多層膜の積層プロセスを基本に、多次元周期構造を作製する方法である。シンプルなプロセスであるために通常の光学多層膜と同様に設計したとおりのフォトニック結晶をきちんと作ることが可能であり、以下に述べるようなフォトニック結晶の特長を活かした新しい光学部品が、実際に世に出ようとしている。

フォトニック結晶の大きな特長は微細構造の周期性により光学特性を規定している点にある。つまり、周期や配列などの構造パラメータを制御することで光学特性を制御できることが、従来の光学部品に比べて大きな優位点を持つ。例えば本稿で取り上げるように、偏光子の透過軸をマイクロオーダーで自由に配列することも、または曲線にすることも容易に可能である。このように微細構造を利用することで、従来の光学素子では実現困難であった素子を実現し、有用なデバイスを作ることができる。本稿ではその一例として、偏光の空間情報を取得する偏光イメージングカメラを紹介する。

2. 偏光イメージング

通常の撮像素子では光の輝度情報(カラーの場合は色情報も)の面内分布を取得し、画像として表示している。この場合、偏光という情報は無視されている。一方で光のもう一つの情報である偏光を取り扱うことで、従来のイメージングでは得られなかった情報を取得しようという試みが以前からなされている。

例えば物体の形状の情報をその反射光から得ようとした場合、偏光の情報が有用となる場合がある。物体の表面での反射光は散乱反射(ほぼ無偏光)とスペキュラー反射(偏光度が強い)に大きく分類できる[4]が、スペキュラー反射は光源の情報を反映しており、形状認識などにおいて障害となる場合が多い。その分離が可能となれば、3次元形状推定などの分野で有用となる[5]。また反射光は一般的にS偏光の反射率が高いため、その偏光方向から反射した面の法線方向の情報を得ることができる。宮崎らは透明3次元物体の形状を検出するために偏光の情報をを用いることで、3次元情報の取得に成功している[6]。

このように偏光を使ったイメージング技術は、おもにコンピュータビジョンの領域において研究がなされ、その有用性が議論されてきた。その反面、偏光イメージングのハードについては目立った進展は見られていない。これまではカメラの前に置いた偏光子を回転させながら撮影する方法や、透過軸方向の異なる偏光子を設置した複数台のカメラからの情報を使う方法などが取られてきた。このように計測に時間を要する、もしくは大掛かりなシステムが必要になることが、偏光イメージングが普及する上での障害になっている。

近年では微細化技術の発達により新しい複合素子が開発されている。例えば菊田らは光の波長よりも十分小さな微細構造により複屈折を持たせた構造により波長板を実現し、その波長板のアレイ化と撮像素子を組み合わせた偏光イメージングカメラが報告されている[7]。

今回は誘電体積層構造を基本とする、パターン化したフォトニック結晶偏光子を用い、1台で通常の画像取得と同時に偏光情報を取得できる偏光イメージングカメラを開発した。

3. フォトニック結晶偏光子

本節では偏光イメージングカメラの主要部品であるフォトニック結晶偏光子についてまとめる。

フォトニック結晶では周期構造中で起きる光の多重反射(ブラッグ反射)によってその光学特性を制御できるという点が注目され、研究が行われてきた。その中で常に議論の対象となっていたのはその実現方法にある。波長オーダーつまりサブミクロンの多次元周期構造をいかに作製するかが課題となっていた。

1997年に筆者らのグループから「自己クローニング法」が提案された。自己クローニング法とはスパッタリングによる薄膜形成技術を応用したもので、凹凸のある基板上に、その凹凸のパターンを保存したまま多層膜を積層できる方法である。(図1参照)具体的にはパターンニングした基板上に、エッチングを行いながら多層膜のコーティングを行う。製膜とエッチングのバランスを最適化することで、一定角度の斜面が選択的に保存される。一般的なバイアス・スパッタ装置で作製が可能であり、シンプルなプロセスで安定して図2のような多次元周期構造を作成できる[8][9]。すでにフォトニック結晶の量産化に向けたプロセス技術開発も進んでいる。

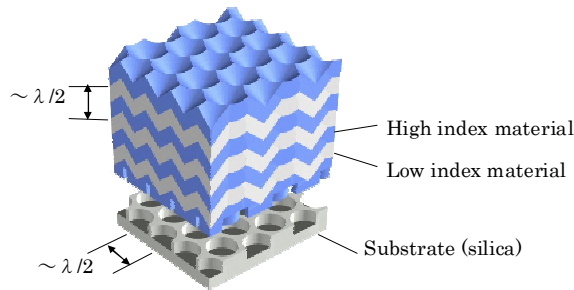


図1 自己クローニング型フォトニック結晶の概略図。基板のパターンを反映した多次元周期構造が積層される。

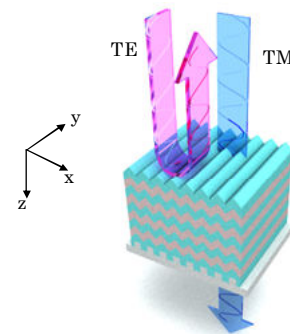


図2 自己クローニング型フォトニック結晶偏光子の概略図。屈折率の異なる材料を凹凸を保存したまま積層し、偏光依存性をもたせる。今回の設計ではTM偏光を透過し、TE偏光を反射する。

図2に自己クローニング法で作製されるフォトニック結晶偏光子の概略図を示す。xy面内での異方性を利用して、z方向に伝搬する光において、溝に平行な偏光(以下TE偏光と呼ぶ)と垂直な偏光(以下TM偏光と呼ぶ)との間でバンドギャップの波長域がずれることを利用して、偏光分離を実現させている。これまでに光通信用偏光子として挿入損失0.1dB、消光比40dBのものを実現し[10]、可視光用としては膜厚のチャージングを利用し帯域幅80nmの青用偏光子を実現してきた[11]。

この素子の特長は高性能であることに加え、無機材料から構成されるため、通常のフィルム偏光子に比べ耐熱性に優れることが挙げられる。またワイヤグリッドなどの微細構造を利用した素子に比べ、積層構造で機能を発現するため、取り扱いが容易という実用上のメリットも大きい。そして一番の特長はパターン化が可能であるという点である。偏光子としての透過軸の方向は基板のパターンで決まっているため、任意のパターンを用意することで、任意の透過軸を1枚の基板上に配置することが可能である。このような偏光子のパターン化という考え方は、フォトニック結晶のような人工微細構造を利用した偏光子によりはじめて可能となった。

今回は図3に示すように、4.65ミクロン角ごとに透過軸の方向を45度ずつ変えた偏光子を作製した。材料はNb₂O₅とSiO₂を交互に積層している。表面SEM像から方向の異なるパターン間においても形状が乱れることなく、積層できていることがわかる。基板ピッチは230nm、積層厚さは約5ミクロンである。

今回用いた偏光子の特性を図4に示す(3mmx3.5mmの面積の一樣なパターンで測定した)。波長550nm以下において消光比23dB程度のものを用いている。なお、このままでは550nm以上の光は両偏光とも透過するため、偏光子の裏面に多層膜フィルターを形成し、その波長域の光はカットしている。

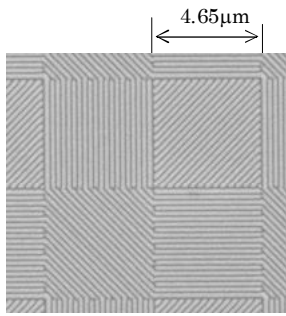


図3 パタン化したフォトニック結晶偏光子の上面SEM像。1領域が4.65μm角で、互いの境界もきれいに維持されている

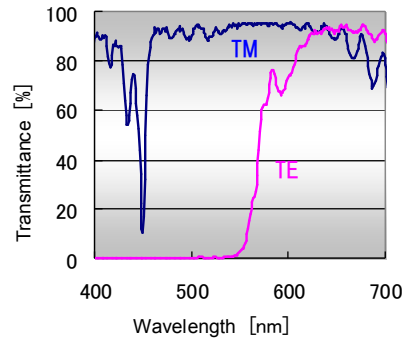


図4 フォトニック結晶偏光子の分光透過特性。波長550nm以下でTM偏光透過、TE偏光遮断の偏光子として機能している

4. 偏光情報解析アルゴリズム

今回は図3のパターンの0,45,90,135度の4領域(方向)分の偏光子を1ユニットとして、そこから偏光情報を抽出する。横軸に偏光子の方位、縦軸に光強度を示すと図5のように直流成分と交流成分の和として表される。各偏光子における受光強度 f_m は偏光子の方位に依存する強度と偏光子の方位に依存しない強度の和として式1のように表される。

$$f_m = A \left\{ \cos \left(\frac{\pi}{2} m + 2\phi \right) \right\} + M \quad (1)$$

偏光子の方位を $m(=0,1,2,3)$ 、変動成分の振幅を A 、各偏光子の強度の平均値を M 、偏光強度が最大となる方向を ϕ としている。したがって4方向の偏光子から得られた強度をフーリエ解析することで、式1における直流成分、交流成分の位相と振幅が得られる。つまり無偏光成分強度、偏光主軸方向、偏光成分強度の情報が得られる。なお本論文では入射光のうちの偏光の度合いを示す指標として、変動率(A/M)を用いる。

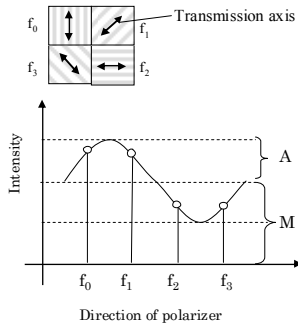


図5 各方向の偏光子からの透過強度の関係

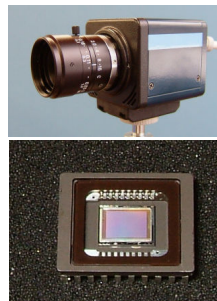


図6 試作したカメラの外観写真とCCD部分



図7 偏光イメージングカメラを用いて撮影した画像(上)とその拡大図(下)。

5. カメラ概要

今回用いたカメラの外観を図6に示す。使用したカメラは1380x1024 pixel、フレームレート9.4 f/secのモノクロCCDを持ち、USBインターフェースによりPCと接続される。今回はCCDの上に直接、上記の偏光子を張り合わせている。偏光子は積層面をマイクロレンズに対向するように置き、マイクロレンズとの間を接着材で充填して固定する。接着層の厚さは約10ミクロンである。偏光子の形成された領域は(1164x874)である。以下示す画像は偏光子を配置した部分のみのデータを用いて表示している。なお4つの画素から偏光情報解析を行う処理時間は、PC(Intel Pentium4 3.2GHz)において150万画素あたり約4msecであり、偏光処理画像のリアルタイムの表示が可能である。

このカメラを用いて撮影した画像を図7に示す。手に持っているのは写真撮影で用いられる偏光フィルターである。フィルターを透過した光は直線偏光となっているため、その部分を拡大すると図中に示すように偏光子パターンを反映したモザイク模様が観察される。このデータから各偏光子ごとの画像を再構成することが可能であり、さらに偏光強度、無偏光強度、偏光方向の情報をつかかって画像を構築することも可能である。

6. 偏光イメージングカメラによる観察結果

今回作製したカメラを用いて撮影した結果についてまとめる。

6-1 ガラス面の映り込み除去

観察結果の一例として図 8 に車のフロントガラスの映り込みを除去した結果を示す。ガラス面での映り込みは強く偏光している。例えばカメラの前に一般的な偏光フィルムを置いて適切な角度にまわすと、ガラス面での反射を少なくすることができ、写真の撮影ではよく使われるテクニックの一つである。ただし図 8 のように方向の異なる複数の面が存在する場合、すべての面の映り込みを同時に消すことはできない。

一方、今回開発したカメラでは、画素単位で偏光情報を取得するために、それぞれ偏光成分を除去することができ、画面全体で映り込みの影響の少ない画像を得ることができる。図 8 にその結果を示す。このような不特定の面の映り込みを除去できることは、セキュリティカメラの用途などに期待できる。



図 8 偏光イメージングにより車の窓ガラスの映り込みを除去した結果。左が未処理の画像で、右が偏光成分を除去した画像。フロント、サイドともに映り込みが効果的に除去できている。



図 9 ボールの偏光イメージング像。左のボールの撮影データから偏光方向の情報を計算し、カラーマップに従い表示させた結果。

6-2 形状抽出

2 でも述べたように物体表面での反射率は偏光依存性を持つ。具体的には P 偏光に比べ S 偏光の反射率が高いため、入射光が偏光していなければ、反射光の偏光の主軸は反射面の法線方向に直交する。したがって表面反射の偏光状態がわかれば、その反射面の方向の情報を特定することができる。つまり偏光から形状についての情報を得ることができる。図 9 にボールを偏光イメージングカメラで撮影し、偏光方向の情報を表示させた結果を示す。照明はドーム状の白い布の中にボールを置き、拡散照明を行った。

今回は偏光方向の情報を図 9 右に示すカラーマップに従い表示させた。ボールの形状を反映し、それぞれの方向に対応した色が表示されていることがわかる。また偏光の度合い(変動率)を用いて、明暗の情報を付加している。したがってより強く偏光している部分ほど明るく表示している。なお偏光方向は 180 度異なる面で同じ方向となるので、ある点とその 180 度反転した面は同じ色を表示する。

偏光だけの情報では奥行き方向の情報は得られない。したがって 3 次元の情報の一部、つまり 2.5 次元の情報を得ているといえる。また反射面の状態(粗さなど)により反射光の偏光/無偏光の割合も変化する。その情報から物体表面の質感の情報を得ることもできる。

こうした面方向の情報が得られる利点として図 10 に挙げるような場合が考えられる。二つの物体が重なっていた場合、輝度によってはその境界を識別することが困難な場合がある(図 10 上)。図 10 下には偏光方向を使ってカラー表示させた結果を示す。境界部分では輝度は同じであっても、それぞれの面の方向は明らかに異なる。したがってそれぞれの面の偏光方向も異なっている。よって図 10 のようにその境界を明確に識別することが可能である。このように、2 次元の情報だけでは識別が困難であったものを、偏光の情報を加えることで識別することが可能となる。



図 10 二つの物体の偏光イメージング像。偏光情報を加えることで二つの物体の境界が明確になる。

6-3 路面検出

偏光方向を用いて得られる情報のもう一つの例として路面認識を挙げる。路面はほぼ連続した面で構成されているため、反射光の偏光方向はほぼ一様である。一方でそれ以外の構造物は通常より複雑な構造か、別の方向をもつ面で構成されている。図 11 に道路を偏光イメージングカメラで撮影し、偏光方向の情報を画像化した例を示す。偏光の度合いと偏光角が路面では緩やかに変化しているという情報から路面候補の領域を抽出することが可能である。例えば車載カメラによる障害物検知の分野では、まず路面を認識することが重要である。偏光イメージングを用いることで、3次元計測など複雑な処理を行わずに路面を抽出できることは、計算負荷を軽減しリアルタイム性を高める上で重要な意味を持つ。



図 11 路面の領域抽出。
偏光情報により左の写真から、
路面候補の領域を抽出させた結果(上)。

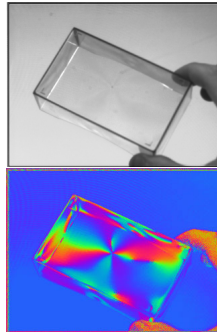


図 12 プラスチックケースの
偏光イメージング像。
入射光は直線偏光

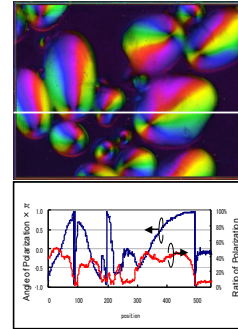


図 13 デンプンの顕微鏡観察像(入射は円偏光)。
白線上のデータから主軸方位(赤線)と
偏光度(青線)を計算した結果を下のグラフ
に示す。

6-4 光弾性

プラスチックなどの樹脂製品は一般的に複屈折性を持つ。したがって直線偏光を入射した場合、透過光はその複屈折性により偏光状態が変換される。図 12 にプラスチックケースを直線偏光の照明で撮影し、偏光方向を画像化した例をしめす。ケースの形成過程で生じた複屈折性を反映した模様が観察されていることがわかる。その他、ディスプレイ用材料の持つリターデーション分布の測定など幅広い応用分野への展開が期待される。

6-5 顕微鏡

偏光イメージングカメラを顕微鏡にセットするだけで、様々な偏光顕微鏡画像を取得することが出来るばかりではなく、正確なリターデーションや配向の面内分布を解析することが出来る。図 13 にジャガイモのデンプンを円偏光で照射して透過光を観察した例を示す。デンプンは光学異方性を持つことが知られているが、その異方性が明瞭に現れている。また、像の各点のストークスパラメータを測定することにより、デンプンの内部構造を推定することも可能になる。

7. まとめ

自己クロニング法により CCD の画素ピッチのサイズで透過軸方向の異なるパターン化偏光子を作製し、CCD と組み合わせることで、偏光イメージングカメラを開発した。輝度情報と同時に、偏光情報の面内情報を取得できることから、例えば複数の面を持つガラスへの映り込みを自動的に除去したり、反射光の偏光方向から反射面の方向を推定することが可能である。従来のカメラに偏光子を張り合わせたシンプルな構造であり、従来のカメラに比べ情報量の多い画像を得ることができる。

今回の偏光イメージングカメラだけではなく、波長オーダーの微細構造を基本とするフォトニック結晶を利用することで、既存の偏光素子では困難な集積化を実現できる。この自由度の高さは、光学全般において様々な応用が期待されるが、今回開発したカメラはその可能性の高さが実証された一例であるといえる。

謝辞

本研究は総務省戦略的情報通信研究開発推進制度の援助を受けている。バイオサイエンスの分野について、有益な助言を頂いた北海道大学永井健治教授、谷知己助教授に感謝いたします。

参考文献

- [1] E. Yablonovitch, "Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electrons," Phys. Rev. Lett. 58, 2059, 1987.
- [2] www.ntt-at.co.jp/product/optcurlcord/index.html
- [3] S. Kawakami, "Fabrication of submicrometere 3D periodic structures composed of Si/SiO₂," Electron. Lett., 33, 1260, 1997.
- [4] デジタル画像処理編集委員会監修、「デジタル画像処理」、(財)画像情報教育振興協会、2004年
- [5] 梅山伸二,"物体の見えからの拡散/鏡面反射成分の分離 -- 偏光フィルタを介した多重観測と確率的独立性を用いて --",画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2002) 論文集, Vol.I, pp.469-476, 2002.7.
- [6] 宮崎大輔, 池内克史,"偏光レイトレーシング法による透明物体の表面形状の推定手法,"電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol. J88-D-II, No. 8, pp. 1432-1439, 2005年8月.
- [7] 菊田久雄,「微細加工による構造複屈折材料の作製と解析」、光技術コンタクト, 43, 692-699 (2005).
- [8] S. Kawakami, T. Kawashima, and T. Sato, "Mechanisms of shape-fabrication of 3D periodic nanostructures by bias sputtering," Appl. Phys. Lett., 74, 463, 1999.
- [9] T. Kawashima, Y. Sasaki, K. Miura, N. Hashimoto, A. Baba, H. Ohkubo, Y. Ohtera, T. Sato, W. Ishikawa, T. Aoyama, and S. Kawakami, "Development of autocloned photonic crystal devices" IEICE Trans. Electron., vol.E87-C, 283-290, 2004.
- [10] 川嶋貴之, 大寺康夫, 佐藤尚, 川上彰二郎, 「2次元フォトリック結晶偏光分離素子の高性能化」、電子情報通信学会総合大会, C-3-1, 2000年3月.
- [11] 川嶋貴之, 井上喜彦, 佐藤尚, 川上彰二郎, 「可視光用フォトリック結晶偏光子の開発,」第52回応用物理学関係連合講演会, 29p-YV-11, 埼玉大学, 2005年3月29日

【脚注】

1: (株)フォトリックラティス、仙台市

Photonic Lattice Inc.

Aoba Incubation Square, Aramaki-Aza-Aoba, Aoba-ku, Sendai, 980-0845 JAPAN

2: (財)仙台応用情報学研究振興財団、仙台市

Sendai Foundation for Applied Information Sciences

N-oval Bld., 1-5-1 Nisiki-machi, Aoba-ku, Sendai 980-0012 JAPAN

3: 宮城県産業技術総合センター、仙台市

Industrial Technology Institute, Miyagi Prefectural Government

2-2, Akedohri, Izumi-ku, Sendai, 981-3206 JAPAN

4: 東北大学大学院情報科学研究科、仙台市

Graduate School of Information Sciences, Tohoku University

6-6-05, Aramaki-Aza-Aoba, Aoba-ku, Sendai 980-8579, JAPAN

【著者紹介】

川上 彰二郎 (かわかみ しょうじろう)

昭 40 東大大学院博士課程了, 東北大学電気通信研究所に入る。昭 54 同教授, 平 12 未来科学技術共同研究センター客員教授となる。平 14(株)フォトニクラティスを創立, 現在代表取締役。GI 光ファイバ, W 形光ファイバの発明や基本論文の発表など光ファイバの理論成果をあげた。1980 年以後, LAMIPOL, TEC ファイバなどのマイクロオブティクス技術を研究し, 1997 年以後はフォトニック結晶と応用デバイスの研究と開発に従事。電子情報通信学会業績賞(昭 62), 功績賞(平 10), 名誉員(平 14), 服部報公賞(平 8), 河北文化賞(平 15) などを受賞。IEEE ライフフェロー。

川嶋 貴之 (かわしま たかゆき)

1995 年東北大学工学部卒。2000 年同大大学院博士課程後期修了。1999-2001 年日本学術振興会特別研究員採用。2001 年より東北大学未来科学技術共同研究センターリサーチフェローに就任。2003 年より(株)フォトニクラティス取締役に就任。主にフォトニック結晶素子の製造技術開発を担当。電子情報通信学会、応用物理学会会員

井上 喜彦 (いのうえ よしひこ)

1993 年京都大学工学部金属系学科卒。同年 4 月ソニー(株)入社。磁気ヘッド及び磁性薄膜材料の開発に従事。2003 年 10 月から(株)フォトニクラティスに出向。主に自己クロウニングプロセスの量産化技術開発に従事。

本間 洋 (ほんま よう)

1997 年電気通信大学電気通信学部電子物性工学科卒。1997 年(株)トーキン(現 NEC トーキン株式会社)入社。2004 年(独)科学技術振興機構研究員に就任。2005 年(株)フォトニクラティス入社。現在、主に実装技術開発と組み立て作業に従事する。

佐藤 尚 (さとう たかし)

1989 年東北大学工学部通信工学科卒。1994 年同大学院博士課程了。工博。同年東北大学電気通信研究所助手、2001 年より東北大学 NICHe 科学技術振興研究員としてフォトニック結晶を用いた各種応用素子の開発に従事。2002 年 7 月(株)フォトニクラティスを設立後、取締役として兼務。2004 年 4 月から専任。取締役(開発担当)として現在に至る。

太田 晋一 (おおた しんいち)

2000 年東北大学工学部電子工学科卒業。同年三洋電機株式会社入社。2001 年宮城県産業技術総合センター入庁、現在に至る。組込システムのソフトウェア設計、FPGA 回路設計、画像処理システムに関する研究開発に従事。

長嶋 聖 (ながしま せい)

2003 年東北大学工学部情報工学科卒業。2005 年同大学大学院情報科学研究科修士課程修了。同年同大学情報科学研究科博士課程入学、現在に至る。画像処理、信号処理に関する研究に従事。

青木 孝文 (あおき たかふみ)

1988 年東北大学工学部電子工学科卒業。1992 年同大学大学院工学研究科博士課程修了。工学博士。同年同大学工学部電子工学科助手、1994 年同大学院情報科学研究科助手、1996 年同助教授、2002 年同教授。1997-1999 年科学技術振興事業団さきがけ研究 21 研究者兼任、現在に至る。超高速デジタル計算の理論、画像センシング、映像信号処理、バイオメトリクス、VLSI 設計技術、多値論理、分子コンピュータの基礎理論に関する研究に従事。英国電気学会フレミング賞およびマウントバッテン賞ほか受賞。