

# 積層形フォトニック結晶の諸応用

川上 彰二郎

東北大学名誉教授, (株)フォトニックラティス  
〒983-0845 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  
Phone: (022) 726-2076 Fax:(022) 722-2078  
kawakami@photonic-lattice.com

**あらまし** 周期的な凹凸を持つ 2 種類の誘電体薄膜を数十周期以上にわたって形を正確に保持したままスパッタリングで積層することによりフォトニック結晶が作製できる。モザイク状パターンや同心円など曲線状のパターンを形成することもできる。その技術によって光チップやシステムの幅広い機能が可能になり、産業応用が始まっている。本稿では上の動向に関して筆者らのグループの R&D を中心に紹介する。

**キーワード** フォトニック結晶, 光イメージング, 軸対称偏光, 自己クローニング

## Industrial Applications of Stacked Photonic Crystals

**Shojiro KAWAKAMI**

Photonic Lattice, Inc.  
Aoba Incubation Square, Aramaki-Aza-Aoba, Aoba-Ku, Sendai, Miyagi 980-0845  
Phone: (022) 726-2076 Fax:(022) 722-2078  
kawakami@photonic-lattice.com

**Abstract** Two kinds of dielectric thin films, having periodic corrugations, can be stacked with precise periodicity by a bias sputtering process. Polarizers and waveplates can be fabricated with much freedom of geometry. Integration of different optical components has been extensively developed. Attempts for industrialization are reviewed.

**Keywords:** Stacked photonic crystal, Polarization imaging, Axially symmetric polarization, Autocloning

## 1. はじめに

フォトリソグラフィ技術の探求は、基礎的な R&D から産業化・実用化まで広い幅をもって急速に進展している。産業化は計測器への進出から始まったが、今や情報家電に進出するまでになっている。ディスクからの戻り光を半導体レーザー(Laser Diode: LD)から遮断する部品にフォトリソグラフィ技術を用いている青色帯の DVD プレイヤーが 2008 年春時点で市販されていることは、フォトリソグラフィ技術の普及状況のマイルストーンと云える。

フォトリソグラフィ技術を大別すると、2 次元フォトリソグラフィ導波路デバイス、フォトリソグラフィファイバー、および面入出力型の同期積層型フォトリソグラフィ結晶(面型フォトリソグラフィ結晶と略す)の三つとなる。本稿ではそのうち実用化が進んでいる三番目のタイプについて

- ・構造と作製法の概要
- ・そのようなフォトリソグラフィ結晶の特徴
- ・産業応用

を記し、面型フォトリソグラフィ結晶が新しい光学材料・光学部品として広い応用に進出しつつある現状を解説する。また、表面ナノ加工光素子(サブ波長光学部品)は、厚さ方向には周期性はもたないが、光を面に垂直に入射させて使う点で本稿の主題と共通しているの、簡単に触れる。光の受動部品という伝統のある分野でナノ加工技術の二つの流れが新しい自由度を提供している現状を展望する。なお本稿で紹介するフォトリソグラフィ結晶の諸応用は基本的に現段階で製品化されている。

## 2. 表面加工光ナノ構造

固体の表面に 1 次元または 2 次元の周期構造をナノ加工することにより波長板や偏光子の機能を作り込むことが出来る<sup>1-2)</sup>。

まず波長板から説明する。アスペクト比(奥行き/間口)の高い周期的な溝の列と面に垂直に入射する光を考える。電界の振動方向が溝に平行な偏光については、光が感じる複合構造の実効的  $\epsilon$  (誘電率)は固体材料の  $\epsilon$  と空気の  $\epsilon$  の、領域幅で重みつけた相加平均に等しく、垂直な偏光に関しては同じく調和平均に等しい(前者の方が大きい)。したがって、溝の深さによって 1/4 波長板、1/2 波長板などを作製することが出来る。屈折率が 1.55 の程度を用いて 1/4 波長板、1/2 波長板を作製する場合、山部分の幅・谷部分の幅・谷の深さはそれぞれ

1/4 波長板: 山幅  $0.7\lambda$ , 谷幅  $0.3\lambda$ , 谷深さ  $6\lambda$

1/2 波長板: 山幅  $0.7\lambda$ , 谷幅  $0.3\lambda$ , 谷深さ  $12\lambda$

程度を要する。この構造はエッチングまたはナノインプリントによって形成されるが、量産性はナノインプリント法が優れている。溝の微細な形状が位相差特性を左右するので波長板の多くの応用にはインプリントの精度が要求される。有機材料はナノインプリントしやすく、最初に開発さ

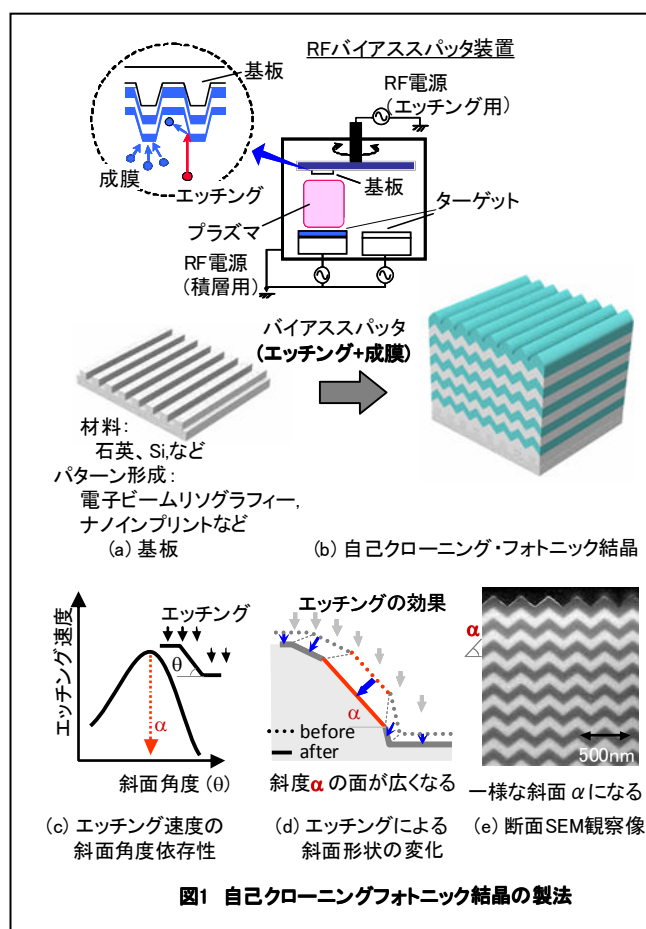
れたが、耐熱性、短波長光への耐性の観点からガラス材料へのナノインプリント技術開発プロジェクトが進行中である。

偏光子機能を実現するためにはワイヤグリッド構造を用いたものがすでに実用化されている<sup>3-4)</sup>。電界がワイヤに平行な場合は大きな電流が流れ、光が反射される。逆に垂直な場合は反射や損失が小さくなり偏光子となる。ワイヤグリッド偏光子は当初赤外域で使われていたが微細加工技術の進展に伴って紫外域(Ultra Violet: UV)での動作が報告されている<sup>5)</sup>。

## 3. 面型フォトリソグラフィ結晶の構造と作製法

膜の面内に二次元的または一次的な凹凸をもつ誘電体膜を図 1 の様に同じ形で数十層、場合によっては百層以上積層した構造が面型フォトリソグラフィ結晶の基本形である。このような構造体は面に垂直に入射する光に対してパスバンド(通過域)、ストップバンド(遮断域)を持つが、そのバンド特性が面内の周期構造によって自由に設計できる。

「役に立つ」ためには再現性よく作れることがポイントとなる。スパッタリングを利用した、自己クローニングと呼ばれる方法がその目的に適している。図 1 (a)のように凹凸加工された基板を用意する(研究開発用・少量生産用には電子ビーム露光+ドライエッチングが、中量以上の生産にはナノインプリント技術が利用できる)。基板の上



う二種類の誘電体をスパッタリングで積層するが、スパッタリング積層するだけでは面の凹凸が隣り合う層間で保存されず崩れてしまう。それを防ぐため、並行してスパッタエッチングを行うのが要点である (図 1 (b))。以下、その機構を単純化して説明する<sup>6)</sup>。

基板の表面を図 1 (c)の断面図のように多角形で表す。基板に垂直にエッチングイオンが入射する。傾き  $\theta$  を持っている面のエッチされる速度は図 1 (c)のようにある角  $\alpha$  で最大値をとる。 $\alpha$  の値は、基板材料やエッチング条件により異なるが普通  $35^\circ \sim 40^\circ$  程度である。エッチングが進むと、角度  $\alpha$  を持つ斜面領域がどんどん広がり支配的になる (図 1 (d))。積層による形の崩れをこの整形作用で補償して一定の形状を繰り返させる。面の形状はほぼ  $\pm \alpha$  をもつ V 字谷の連続したものに漸近する。10 周期近く積層した試料の断面 SEM (走査型電子顕微鏡, Scanning Electron Microscope) 写真を図 1 (e) に示す。下地のコピーではなく定常状態の自動探索であることが納得されるであろう。なお、後述の諸応用において、偏光子や 1/4 波長板では 20 周期 (40 層) 前後、1/2 波長板では 40 周期 (80 層) 程度の積層を日常的に行っている。本プロセスでは、電子ビーム露光またはナノインプリントされた基板の溝形状が正確でなくても、基板と同一の材料を積層・エッチングして断面を所望の形に整えることが出来る。その後に積層しているので再現性、安定性に問題がない。表面加工型では光特性が溝のアスペクト比や側面形状に強く依存するのが生産性の点で懸念されるのは事情が異なる。

次に面型フォトニック結晶偏光子を説明する<sup>7)</sup>。無損失な材料で構成されるので、透過しない光は反射される。一方の偏光はパスバンド内に、他方はストップバンド内に位置させたい。異方性を最大にするため周期的溝列を採用する。図 2 (a)の構造は広義の誘電体多層膜と云えるから、ブラッグ反射があり、パスバンド、ストップバンドがある。溝に平行な電界成分をもつ偏光 (Transverse Electric:TE 波) と他方 (Transverse Magnetic:TM 波) のバンド構造の一例を同図左下に示す。

$\Gamma$  点 ( $k=0$ ,  $\omega/2\pi=0.6$ ) において比較的広い偏光子動作帯域があり、TE 波はストップ、TM 波がパスである。よく用いられる膜構成 ( $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ ) では偏光子動作する帯域幅は中心波長  $\pm 2\%$  程度である。これより広げるためには積層の厚さを少しずつ変えたチャープ構造を用いることが出来る。TM をパス状態に保ったまま、TE のバンドエッジ (パスバンドとストップバンドの境界) をチャープする (徐々にずらす) ことで、中心波長  $\pm 10\%$  程度が実証されている<sup>8)</sup>。

フォトニック結晶波長板もほぼ同様の形状をしているが、構造異方性を利用するため各層の厚さを 1/10 波長程度にしてブラッグ反射を避けているため帯域が広い。リターダンス (二つの偏光間の実効的な光路長の差, 単位は nm) は積層の周期数に比例して増加するから設計、製膜が容易である (図 2 (c))。なお基本回数で使用できるので一定構造のリターダンスは使用波長によらずほぼ一定、位相角は波長に逆比例する。

利用したい波長域用偏光子、波長板が作製出来るかどうかは、その波長域で透明でスパッタ製膜できる材料があるかにかかっている。深紫外 (Deep UV : DUV) から光通信帯までわたる任意の波長域で作製可能である。具体的には次の通り。

低屈折率材料：つねに  $\text{SiO}_2$  ( $n=1.5$ )

高屈折率材料：光通信波長帯では a-Si ( $n=3.5$ )

が屈折率が大きく有利である。可視域では  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  ( $n=2.4$ ),  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  ( $n=2.2$ ) が用いられる。UV 帯では  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  が、DUV では  $\text{HfO}_2$  ( $n=2.0$ ) が用いられる<sup>9)</sup> (但し  $\lambda > 230\text{nm}$  の範囲で。図 2 (b))。DUV 用素子も文献 5) のタイプより消光比、損失、丈夫さの諸点で優れているとされている。

表面ナノ加工光素子とフォトニック結晶とを動作機構で比べると、後者は特性がいわば「内部的」なのが扱いやすさ、特性の良さに結びついている。即ち、厚さ方向に周期的であるから光の透過特性や偏光依存性が積層数で制御できる。

## 4. パタン化について

面型フォトニック結晶の構造は主軸の方向が一樣なものに限定されない。基板の溝を曲線的に形成して、その上に自己クローニング積層すれば主軸が曲線状の構造が得られる。図 3 右上の同心円状の溝列はその一例である。また複数の「一樣な結晶」が隣接して多数設けられた構造も同様に形成される (図 4 (a))。基板表面を多数の隣り合う領域に分割し、それぞれに異なる方向の溝を形成した後で積層するとそれぞれの溝の上にフォトニック結晶が成長する。その界面は基板表面に例外なく垂直に形成される。ヘテロ界面であるから溝が途中で行き止まりになることは常時生ずるが別段特異現象は生じない。

要するに、自然結晶とは異なり軸方位を任意の線で曲げることも、整然とした微結晶アレイを作ることも自由にできる。

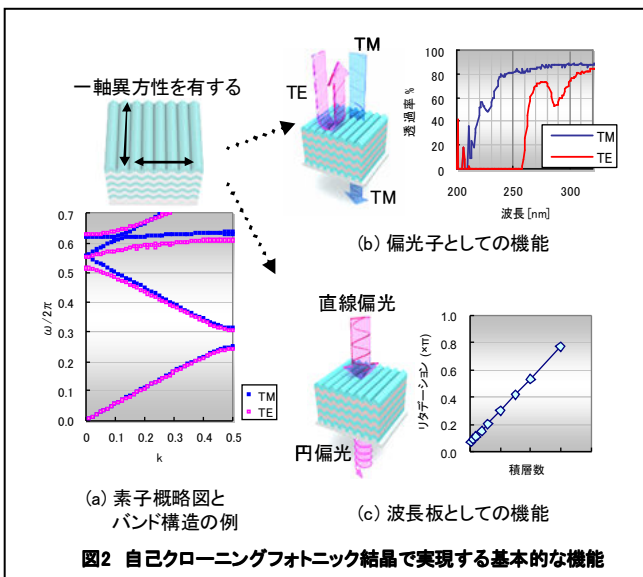


図2 自己クローニングフォトニック結晶で実現する基本的な機能

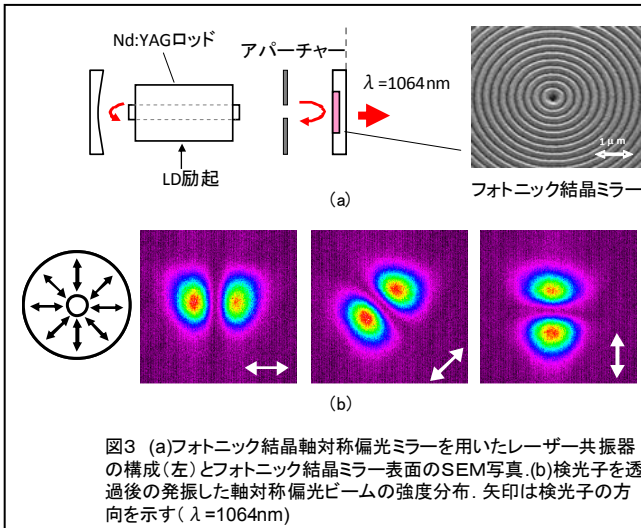
## 5. 複合フォトニック結晶の応用

### 5. 1 光ビーム内で場所により異なる偏光操作を行う技術

偏光子、波長板、波長フィルターなどを空間的に設計通りの連続な・不連続な分布で配置することが可能になる。

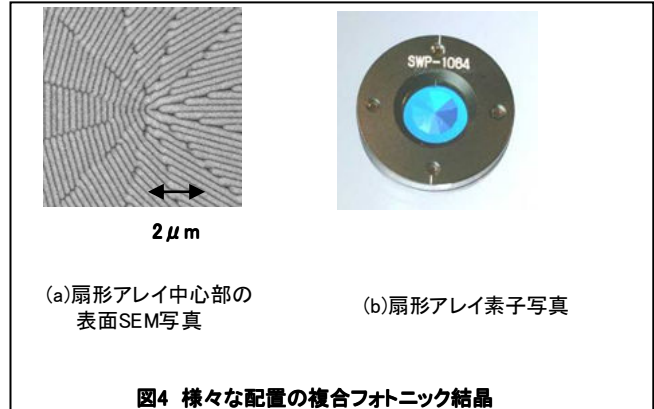
#### 5. 1. 1 軸対称偏光の発生

ビーム光学や導波路光学では直線偏光の電磁界が基本となっているが、近年軸対称偏光した光ビームが注目されている：レーザー加工、レーザートラッピング、特殊顕微鏡には、電界が周回方向成分だけをもつものや径方向に偏光したものの有利性が注目されている。フォトニック結晶を軸対称偏光ビームの発生に利用する試みは文献 10)が発表された後始まり、実験も直ちに成功した。文献 10)に紹介されている軸対称ビームの各種発生法のどれよりもシンプルな手段で確実に軸対称偏光光ビームを発生することができた 11)。



第一の方法は外部共振器形レーザーの反射鏡に周回状の山・谷列をもつフォトニック結晶を用いる。図3(a)のように、溝に電界が平行な波(局所的にTE波)が遮断域それと直交する偏光が透過域になるように設定し、TE波の反射率がレーザー媒質の利得との関係において適切な値になるよう周期数を合わせたものを外部ミラーとして用いれば、周回方向偏光の光ビームがレーザーの固有モードとして発振する。小澤ら 11)はLD励起YAGレーザーにおける周回方向ビーム発生を報告している。またフォトニック結晶のパラメータの設定によりTE透過・TM反射にすることが出来るので、それを用いると図3(b)のように径方向偏光ビームを発生することも容易である。

第二の方法は直線偏光ビームから出発して場所々ごとに偏光分布を変換する方法である。よく知られているように、1/2波長板の主軸(進みまたは遅れ軸)を直線偏光の電界方向から $\theta$ 傾いた方向におけば、出力光の電界方向は $2\theta$ だけ回転する。図4(a),(b)のように平面を多数の扇形に分割し1/2波長板でしきつめると軸対称ビームが容易に得られる 12)。なお、多数の領域間の波面乱れは数度以内である。



#### 5. 1. 2 偏光縦スリット

結像系で、像平面のある微小領域に焦点を結ぶ光だけを選択するにはピンホールやスリットが常用されている。ある焦点の深さに結像する光だけを選ぶには、レンズのNAに頼ってスリットやピンホールを用いるのが普通である(概念的には $\Delta z = \Delta x / \text{NA}$ と書ける(NA: 開口数, Numerical Aperture))。その場合、z方向の選択深さに裾引きが生ずることが避けられない。

多層記録光ディスク系では、信号を十分な層間分離度で読み取ることが求められるから上述の裾引きの小さいことが決定的に重要である。深さ方向の裾のキレが理想的な光学系は2枚の複合フォトニック結晶波長板によって実現できる。

図5(a)の構成で、層2からの光だけ検出器(Photo Diode: PD)に到達させたいとする。結像レンズの焦点の前後に偏光子・複合1/4波長板(進相軸が直交する2枚の1/4波長板を中央で接合したもの)の2枚組・検光子を配置する。

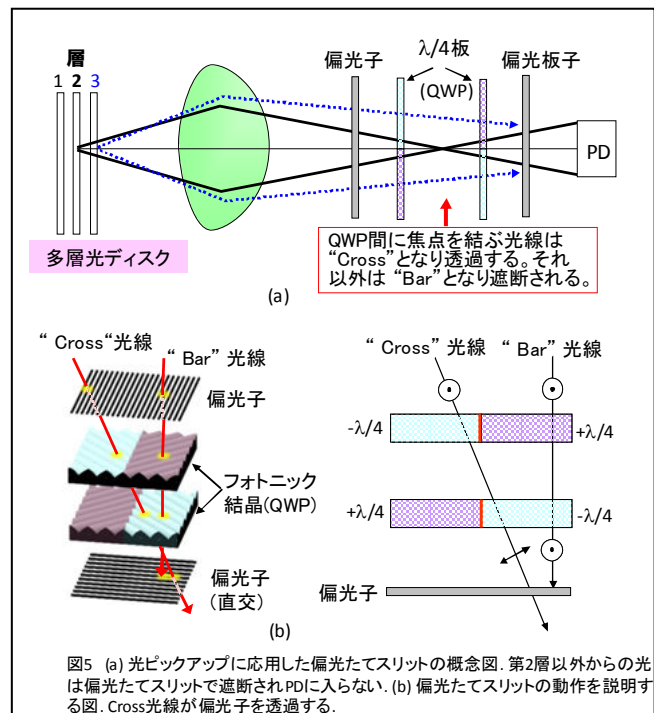


図5(b)に示すように、複合1/4波長板を2回通る光は、

(図中に“Cross”と示した)斜行光は1/2波長板を感じて偏光角が90°回転し, (“Bar”と記した)並進する光は1/4波長板同志が打ち消して光線の偏光は変わらない. 第2層からの光は複合1/4波長板対に関してCross光となり検出器に達する. 第1層, 第3層からの光はBar光となり遮断される. 即ち, 焦点位置が1/4波長板対の内側にあるか外側にあるかにより出力は0%または100%となる. 従来技術では焦点検出にピンホールを用いるが(掘引きが避けられない), それに比して不要光の除去が理想的に行われるので勝っている<sup>13)</sup>.

なお本解説の冒頭で述べたフォトニック結晶の405nmDUVピックアップへの搭載は, 光化学作用の強い青色域で安定な無機材料で出来たフォトニック結晶が十分なコスト競争力をもって生産されている証明である. 次に, 顕微鏡への応用を一例だけ述べる<sup>14)</sup>. 顕微鏡では空間光ビームの諸技法を駆使して対象を観察するので, パターン化光部品の活躍が広いと期待される. 本稿では顕微鏡技術<sup>15)</sup>の詳細に立ち入るよりも, できるだけ一般の光回路技術の枠組で説明する.

### 5. 1. 3 位相差顕微鏡

生体細胞は普通透明であるから通常の顕微鏡で観察しても周囲の組織と明暗の区別がほとんどつかない. 周辺組織との屈折率差, あるいは透過光の位相差を利用して明暗コントラスト像を得るのに位相差顕微鏡が用いられる(図6). その原理を簡単に言うと, 顕微鏡内に複数の光路が存在し, 試料を通った光(パス1)と参照光(パス2)とを, 相互位相差を90°ずらして再度合成・干渉させている.(位相変調通信方式の復調方法として, 搬送波の位相を90°ずらして信号波と重ね合わせて振幅変調に置き換えるのと同じ考え方である.)信号光の方が通常は微弱で振幅変調度が過小になるので参照光を減衰させてから干渉させ, 観察に適したコントラストを得る.

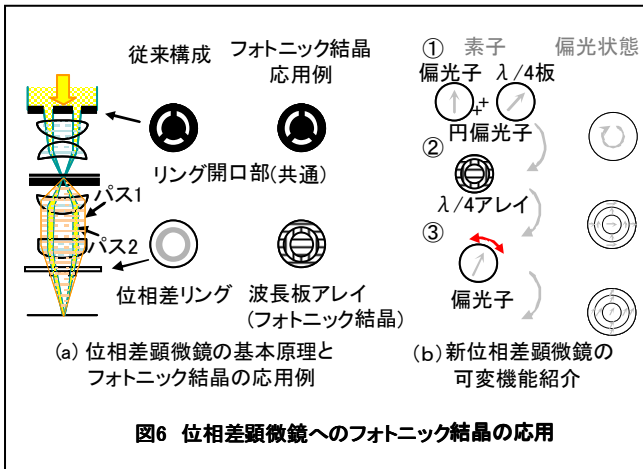


図6 位相差顕微鏡へのフォトニック結晶の応用

2ビームまたは多ビームの干渉系で, 信号チャンネルと参照波チャンネルとで混合比(結合比)を連続的に変化させることは望ましいことであるが, 位相関係を変化させずに振幅比のみ変化させる可変減衰器は容易に得られなかった.

位相差顕微鏡においても, 同一倍率の対物レンズについて参照波の減衰量を変えた数種類を用意して交換しながら鮮明な像が得られる条件をさがすのが常套手段である. それは不便かつ高コストである(図6(a)で位相差リングの色をグレーにしたのは減衰板になっていることを表す). 可変減衰機能を得るために図6(b)の様な2枚のフォトニック結晶偏光子(波長板)を用いることができる. 二つの光路の位相関係を乱さずに振幅比を連続的に変化させることができる.

フォトニック結晶は, 軸対称偏光顕微鏡・微分干渉顕微鏡・共焦点顕微鏡など, いくつかの新しい顕微鏡機能を生み出すことができるが紙数の関係もあり省略する.

### 5. 2 ピクセルとフォトニック結晶を1:1対応させる構造

図7に示すように軸の方位が周期模様をなすフォトニック結晶偏光子または波長板を, 一領域がイメージセンサーの1ピクセル(画素)に正確に対応するように貼り合わせると肉眼には見えない偏光情報を画像化して容易かつ正確にシステムに取り込むことが出来る.

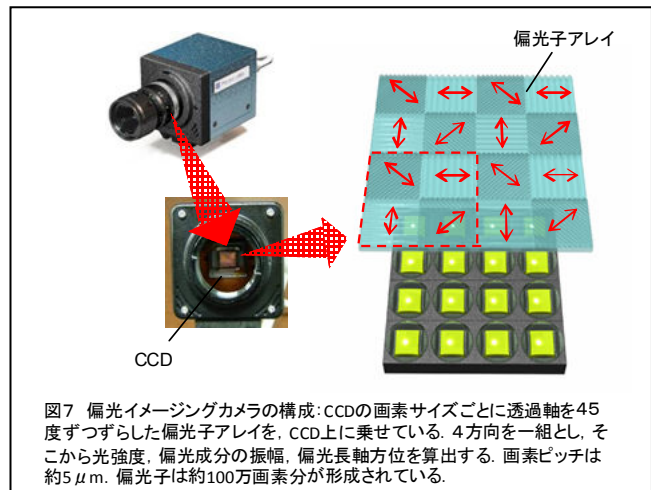


図7 偏光イメージングカメラの構成: CCDの画素サイズごとに透過軸を45度ずつずらした偏光子アレイを, CCD上に乗せている. 4方向を一組とし, そこから光強度, 偏光成分の振幅, 偏光長軸方位を算出する. 画素ピッチは約5μm. 偏光子は約100万画素分が形成されている.

光ビームの偏光状態は四つのストークスパラメータの測定によって定められる.

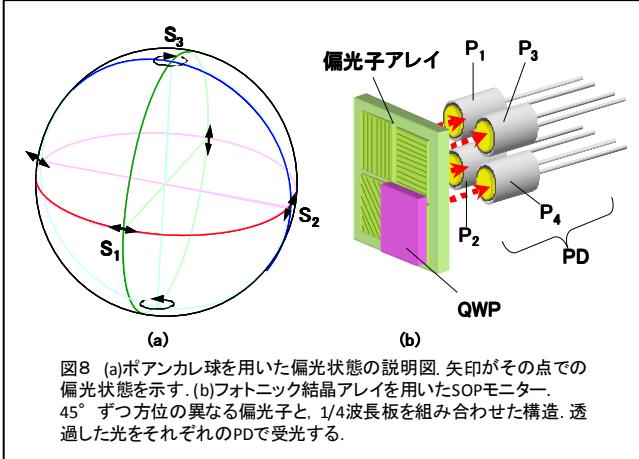
計測の一例を説明する. 図8(a)のようにポアンカレ球のN極からみて

①東経0度, ②90度, ③180度の方向に偏光子, ④東経90度方向に進相(遅相)をもつ1/4波長板とそれに続く90度方向の偏光子を設け, それぞれの通過光をPDで検知する.

その出力を  $P_1, P_2, P_3, P_4$  とすれば(図8(b)を参照),  $S_0 = P_1 + P_3$ ,  $S_1 = P_1 - P_3$ ,  $S_2 = 2P_2 - (P_1 + P_3)$ ,  $S_3 = 2P_4 - (P_1 + P_3)$  と計算できる.  $S_1, S_2, S_3$  を  $S_0$  で割ったものを改めて  $S_1, S_2, S_3$  と記し3次元座標として表示するのが図8(a)のポアンカレ球である.

### 5. 2. 1 SOP モニター

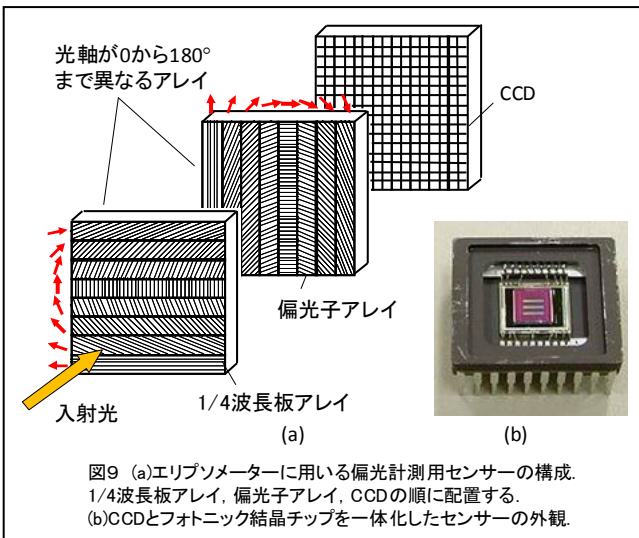
単一モード光ファイバーを伝わる波の偏光状態(State Of Polarization: SOP)モニター (図8 (b)) は最も素直な応用である<sup>16)</sup>。フォトニック結晶の利用によって偏光プリズムを使用するタイプに比べ体積比 1/30 の小型化, 誤差 1/3 程度の高精度化が同時に達成された。



### 5. 2. 2 エリプソメーター

伝統的なエリプソメーターでは、入射光の SOP を決定するために波長板と偏光子を回転して零点を求める。フォトニック結晶を用い図9のように空間並列化することにより小型化, 高速化ができる。(a)には原理の説明, (b)にはフォトニック結晶を実装した CCD チップを示す。

多数のピクセルを用い, 冗長度を持たせることにより精度を向上させることができる<sup>17)</sup>。たとえば光ビームの強度分布が一様でなくガウス状であったり, ビームの中心がずれていたりしても自己診断機能を持たせることができる。さらに, CCDやCMOSイメージャーなどのセンサーは100万個程度の画素数を持っているので, 一つのチップの上に多数個のエリプソメーターセンサー部を設けることができ, 大型の試料をマッピングするのに好適である。



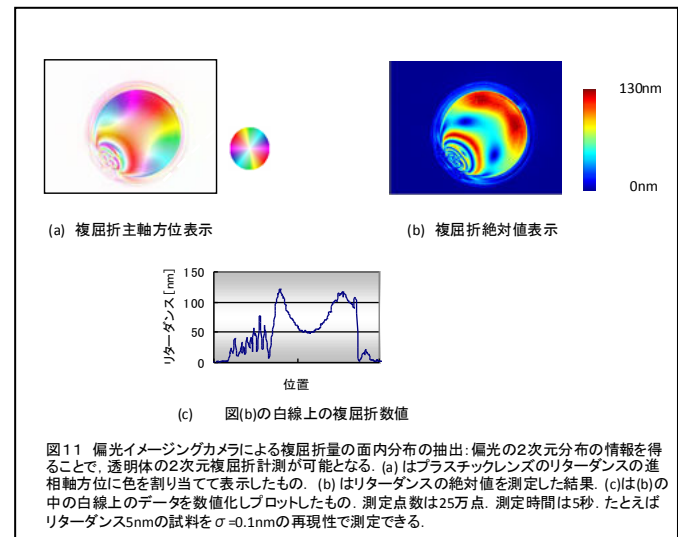
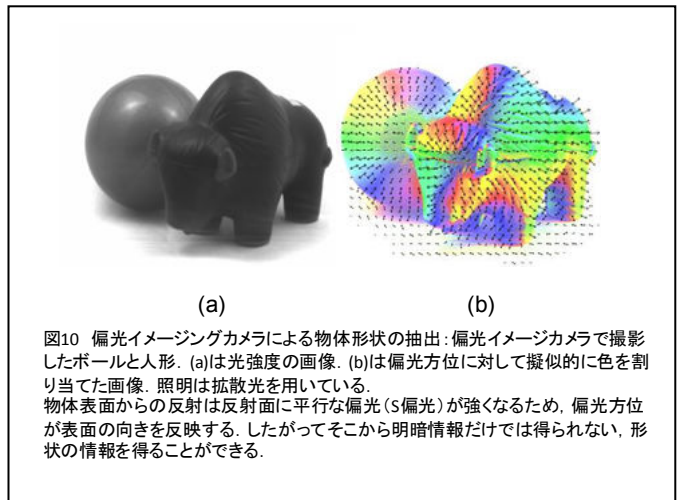
### 5. 2. 3 偏光イメージングカメラ

ここまでは一つの光ビームの偏光状態の計測法を説明した。CCD イメージセンサーの膨大な画素数を活用して,

観察対象の一点々々の偏光情報を画像化することができる<sup>18~19)</sup>。図7に示すように, 4方向の方位をもつ偏光子アレイをイメージセンサーのピクセルと 1:1 に貼り合わせる。

4個一組の CCD 出力からポアンカレ球を南北極方向から平面に写像したデータが得られる。従来の技術では偏光画像を取得するのにカメラレンズの前で偏光子を回転する, あるいは偏光分離して 3 (スリー) CCD カメラを用いる, 等の手段が必要であったが同時性や小型簡便さをもつ偏光イメージングがフォトニック結晶で可能となっている。それが応用されている技術を二例紹介する。

(イ) 立体認識, 面方位認識 自然光で照らされた立体物の表面反射光は面の方位 (法線方向) を反映して偏っている (p 偏光の反射率は s 偏光に比べて小さい)。図10はプラスチックの玩具とボールとを並べて偏光カメラで写した像である。(a)には通常の明暗 (白黒) 画像を示す。(b)は偏光の解析によって面の法線方向を矢印で表示させたものである。矢印の向きと図中のカラーとは 1:1 に対応している。このイメージングは高速に (処理時間は数 ms), ステレオ (双眼) カメラ技術によらず面の向きを検知できるので, ロボットアイや安全運転支援の車載カメラ応用 (路面, 車両の検出) が期待されている。さらに工業製品の表面方位の異常を検知する応用開発が用途ごとに進んでいる。



(ロ) 透明品の検査 偏光イメージングカメラのすでに実用されている応用は観察対象の複屈折性を観測・計測して工業製品の製造プロセス管理に活用することである。射出成形されたプラスチック光学部品や液晶ガラス、液晶機能フィルムの複屈折が図 11 のように像としてリアルタイムで直視できる。従来の検査器ではビームを一点々々掃引して計測しているため全面検査は不可能であった。本計測器は画像情報をリアルタイムで取得・表示・数値化出来るという点が画期的であると多くの業種・企業で評価されており、工程管理に進出している。

#### 5. 2. 4 波長多重イメージング

図 2 (a)の構造ではバンド端の波長は周期構造の面内ピッチで制御できる(偏光を一つに限って)。この性質を使って、エッジ波長の異なる複数種類のエッジフィルター(ある波長を境として片側をパス、他方を遮断する)を作製できる。チャンネル出力の差をとって等価的にバンドパス特性も実現できる<sup>20)</sup>。なお、実用上重要な二三の要素についてコメントする：

①積層に用いる基板の凹凸断面が(たとえば)方形波状であって自己クローニングの定常形状と異なるときは、基板と同一の材料を自己成形スパッタして形をV字列に整えてから積層することにより設計通りの特性を得る。

②反射防止膜。表面を平坦化して通常の反射防止加工をすることも可能であるが、三角波のまま適当な厚さを通常2層積層すれば反射は十分小さくできる。

③積層後、チップを切断・洗浄を行うことへの耐性は通常のスパッタ薄膜と同程度である。

## 6. むすび

斜面角度の大きい(35°~40°)凹凸を持つ誘電体薄膜を、基板面内で軸方位を連続に/不連続に変化させ、厚さ方向には周期を一定に保ち/チャープして/不連続に変化させて製膜することが工業的な意味で可能になっている。波長板または偏光子を高い任意度で集積することができるという高いポテンシャルがあり、それを活かした各種チップ、モジュール、セットが産業に進出しつつある状況を概観した。

文献

- 1) H. Kikuta, H. Toyata and W. Yu: Optical Review 10, No.2,63(2003).
- 2) 日経エレクトロニクス特集記事, No.958, p.77(日経BP社, 東京, 2007).
- 3) J. J. Wang, W. Zhang, X. Deng, J. Deng, F. Liu, P. Sciortino and L. Chen: Optics Letters 30, No.2,195(2005).
- 4) C. Pentico, "New, High Performance, Durable Polarizers for Projection Displays," :Moxtek, Inc., [http://www.moxtek.com/optics\\_publications.html](http://www.moxtek.com/optics_publications.html)
- 5) J. J. Wang, F. Walters, X. Liu, P. Sciortino and X. Deng: Appl.

Phys. Lett. 90, 061104 (2007).

6) T. Kawashima, K. Miura, T. Sato and S. Kawakami: Appl. Phys. Lett. 77, No.16,2613(2000).

7) Y. Ohtera, T. Sato, T. Kawashima, T. Tamamura and S. Kawakami: Electron. Lett. 35,1271(1999).

8) 川嶋貴之, 井上喜彦, 佐藤尚, 川上彰二郎: 第51回応用物理学関係連合講演会講演予稿集, 1170(2004)

9) 井上喜彦, 佐々木昌宣, 川嶋貴之, 川上彰二郎: 第55回応用物理学関係連合講演会講演予稿集, 2008年3月発表予定 30a-ZG-3(2008)

10) 小澤祐市, 佐藤俊一: 光学 35, No.12, 925(2006).

11) Y. Kozawa, S. Sato, T.Sato, Y. Inoue, Y. Ohtera and S. Kawakami, Appl. Phys. Express (APEX), vol.1, No.2 (<http://apex.ipap.jp/link?APEX/1/-22008/>).

12) P.B. Phua, W. J. Lai, Y. L. Lim, B. S. Tan, R. F. Wu, K. S. Lai and H. W. Tan, "High power radially polarized light generated from photonic crystal segmented half-wave-plate," : being submitted.

13) T. Ogata and T. Kawashima: Optical Data Storage Topical Meeting Conference Proceedings, Montreal, MB6, 31(2006).

14) S. Kawakami and Y. Inoue: IEICE TRANSACTIONS on Electronics E90-C, NO.5,1046(2007)

15) Shinya Inoue and Kenneth R. Spring, "ビデオ顕微鏡," (共立出版, 東京, 2001)

16) N. Hashimoto, Y. Homma, T. Sato, T. Aoyama, T. Chiba, H. Uetsuka and S. Kawakami: Proc. ECOC, Glasgow, 2005, Vol.2, 177(2005).

17) T. Sato, T. Araki, Y. Sasaki, T. Tsuru, T. Tadokoro and S. Kawakami: Appl. Opt. 46, No.22,4963(2007).

18) 川上彰二郎, 川嶋貴之, 井上喜彦, 本間洋, 佐藤尚, 太田晋一, 長嶋聖, 青木孝文: 電子情報通信学会論文誌 C J90-C, No.1, 17(2007)

19) 川嶋貴之, 佐々木昌宣, 井上喜彦, 本間洋, 佐藤尚, 太田晋一, 川上彰二郎: 第32回光学シンポジウム講演予稿集, p.7(2007).

20) Y. Ohtera, T. Onuki, Y. Inoue and S.Kawakami: Journal of Lightwave Technology 25, No.2, 499(2007).

川上彰二郎 (かわかみ しょうじろう)

1960年東京大学工学部電気工学科卒。1965年工学博士, 東北大学助手。1979年同教授, 2000年名誉教授。2002年に(株)フォトリテックスを創業, 現在に至る。その間, ミリ波回路, グレーデッドインデクス形およびW形の光ファイバー, 各種マイクロオプティック部品, 積層形フォトリテックス結晶などの研究, 発明, 開発, 実用化を行ってきた。