フォトニック結晶を用いた偏光イメージング センサーと産業応用

佐藤 尚・川嶋 貴之・ローラン ファーブル・井上 喜彦・川上彰二郎

Photonic Crystal Array and Applications to Measurement Systems

Takashi SATO, Takayuki KAWASHIMA, Laurent FABRE, Yoshihiko INOUE and Shojiro KAWAKAMI

We demonstrate polarizing imaging sensors coupled with photonic crystal micro-polarizers or waveplates which are capable of measuring states of polarization in real time. Using these sensors embedded in cameras, we developed simple systems to measure 2D profiles of retardance samples. Measurement of low retardance less than 1 nm and high retardance more than 1000 nm are exemplified. We also show a scanning type ellipsometer using a polarization sensor for point measurement. A speed of more than 1000 points per minute is achieved for high-speed film thickness measurement.

Key words: polarizing imaging, retardance, ellipsometer

偏光という光の性質は、光の流れの制御や物体の性質を 測るために日常的にも工業的にも広く利用されている. そ れを支える偏光計測技術も、これまでにさまざまな研究開 発がなされ、発展してきた. 多くの偏光計測は偏光素子を 回転させたり、偏光を電気的に制御するなどして、時系列 のデータを解析することによって偏光を求める方法であっ たが、これに対して本稿で述べる偏光イメージングは、駆 動部なしで二次元の偏光情報を実時間にて計測する方法で あり、従来の方法とは一線を画している¹⁾. そのコア技術 は、フォトニック結晶という独自の偏光光学素子を利用す ることにある. 本稿では偏光イメージングデバイスについ て述べるとともに、われわれが着目している二次元のリ ターダンス分布を計測するシステムを中心に応用展開につ いて紹介する.

1. 偏光イメージングセンサー

1.1 概 要

図1は偏光イメージングセンサーの概念図である. 微小 偏光子アレイは,われわれのコア技術であるフォトニック 結晶(後述)からなり,同一基板上に高密度集積化された ものである¹⁾. ひとつの領域の大きさはCCDの画素と同じ 約5μmであり,透過軸が45度ずつ異なる4領域が交互に 約100万画素分形成されている. 各偏光子を透過した光の 強度が CCD カメラの出力として得られ, PC で解析をす る. このように可動部なしで偏光画像を取得することが可 能になる.

偏光解析は、隣接する4種類の偏光子に対応する4画素の カメラ出力を1ユニットとして行う. 偏光子の透過軸方位 θ は0°,45°,90°,135°であるので、縦軸に受光強度Iをプ ロットすると図2のように正弦波状に変化する.変動成分の 振幅Aと直流成分Mから楕円率 $\varepsilon = \sqrt{(M-A)/(M+A)}$ が、 また最大値を与える角度から偏光方位 θ が求められる. 今 回実現した偏光イメージングセンサーでは、約25万点か らなる偏光画像を出力する.解析に要する時間は約4ms であり、リアルタイムの表示が可能である.

従来技術においても、カメラの前面で偏光子を回転させ て複数枚の画像を処理することで、偏光画像を得ることが 可能ではあった.しかしながら、同時性がないことや、偏 光子を回転(あるいは液晶など電気的制御も含む)するた めの付帯設備が大掛かりになることなどの問題があった.

⁽株)フォトニックラティス (〒982-0845 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



図1 偏光イメージングセンサーの外観.(a)フォトニック結晶偏光子アレイとCCDピクセルとの集積.(b) 偏光子アレイの SEM 写真.(c) 偏光子アレイを集積した CCD センサの外観.



図2 各方向の偏光子からの透過強度の関係.

今回実現したカメラのインターフェースは USB 2.0 であ り,カメラを直接 PC に繋ぐだけで,きわめて簡便なシス テムでリアルタイムでの偏光イメージングが可能である.

偏光イメージング技術は工業製品の検査,バイオテクノ ロジー,ロボティクス,リモートセンシングなど幅広い分 野において期待されている²⁰.その中でわれわれが着目し ているのは透明材料の内部歪みの評価であり,第2章と第 3章では製品化している二次元複屈折計測システムについ て詳細を述べる.

1.2 フォトニック結晶偏光素子

偏光イメージングセンサーを実現する上で重要なフォト ニック結晶アレイについて説明する.使用波長の二分の一 以下の周期をもつ凹凸パターンを形成した基板の上に,屈 折率の異なる2種類の誘電体材料を交互に積層する.成膜 をスパッタリング法で行うこと,さらに成膜条件を適切に 選ぶことで図3のような三角形状が自己形成され,繰り返 される.われわれはこのプロセスを自己クローニング法と よんでいる.基板表面で起こる堆積とエッチング効果のバ ランスによって三角形状は安定に形成され,これまでに



図3 自己クローニング型フォトニック結晶の構造. (a) 断 面の SEM 写真, (b) 表面の SEM 写真.

100 層以上の積層を実現している.このように複雑に見え る構造でも、フォトニック結晶は再現性の高いプロセスで 製造することができ、工業的な利用を可能にしている.

上記のフォトニック結晶は、凹凸パターンの方向を軸と した構造異方性をもつことから透過特性に偏光依存性を有 する.これにより偏光子と波長板の2つの光学素子に適用 することができる.図4はフォトニック結晶偏光子の透過 スペクトルを表している.TM 波(溝の垂直方向に電界成 分をもつ)が透過し、TE 波(溝の方向に電界成分をもつ) が遮断される(反射される)偏光子として動作する.一 方,波長板は2つの偏光が透過するようにグレーティング の周期,積層方向の周期を選べばよく,積層周期によって 位相差を制御することが可能である.

フォトニック結晶光学素子を従来素子と比べたときの最 大の特徴は、軸方向の異なる微小な素子を一括集積化でき



図4 フォトニック結晶偏光子の動作と透過スペクトル.

ることである. すなわち,領域ごとに方向の異なる凹凸パ ターンを基板に加工すれば,一度の成膜プロセスで実現さ れる. 図1に示したフォトニック結晶アレイの表面 SEM 写真から,境界の幅は 0.1 µm 程度ときわめて狭いことが わかる. これより撮像素子の画素レベルの高密度の集積化 が可能となり,偏光イメージングへの適用が可能となって いる.

2. 二次元リターダンス計測への応用

次に, 偏光イメージングを利用して透明材料(ガラスや プラスチック)の評価や工程管理に用いるための計測シス テムを紹介する.透明材料は均質でないときや,応力を受 けて歪みが生じているときに複屈折が生じる.そのため, 応力の方向に平行/垂直な2つの偏光は,材料を透過する 間に波面に差が生じる.これをナノメートル単位で表した のがリターダンスである.リターダンスは偏光の変化とし て観察することができる.リターダンスを二次元的に測定 することができれば,液晶パネル用ガラスや自動車用ガラ スなどのガラス製品,プラスチックレンズなどの樹脂成型 品など,製造工程中の歪みを定量的に管理したいという ニーズに応えることができ,工業的にも意義は大きい.

図5に、二次元複屈折測定システムを示す。円偏光を照 射する光源の上方に偏光イメージングカメラを配置したシ ンプルな構成である。あらかじめ光源の偏光状態(楕円率 ϵ_0 ,長軸方位 ϕ_0)を計測しておき、次いでサンプルを光源 の上に置き、サンプルを透過してきた光の偏光分布(楕円 率 ϵ_1 ,長軸方位 ϕ_1)を偏光イメージングセンサーで測定す る。それぞれの偏光状態をポアンカレ球上にプロットした ものが図6の点Aと点Bである。AからBへのシフトの方 向から光軸方向 θ が、シフトさせるための回転角 ρ からリ ターダンス(位相差)が求められる。

入射偏光を円偏光にすることで,任意の軸方位の歪みに 対しても位相差と軸方向を1回の測定で同時に求めること



図5 二次元複屈折測定システムの概念.



図6 ポアンカレ球上に図示したリターダンス と主軸方位.

ができる. ノイズ低減には複数の撮影データの平均化を行 うことが望ましいが,数秒のオーダーで25万点(繰り返 し再現性0.1 nm以下)の二次元測定が可能である. 本シス テムでは,楕円偏光の右回りと左回りとを判別できない (S3の符号が判別できない)ことから,リターダンスの測 定範囲は λ/4(約130 nm)に制限されるが,微小なリター ダンスに対する測定感度は高い.

次に測定例を示す.図7(a)はリターダンスが1nm程 度と小さいガラス板を,図7(b)は対照的にリターダンス が大きい自動車ガラスの測定結果である.濃淡がリターダ ンスの大きさを,画像内の線が光軸方向を示している.そ れぞれの特徴的な分布が一目でわかる.特に(a)のガラ ス板のリターダンスは小さいが、ノイズ低減のために画像 の積算数を増やすことで精度よく測定することができる. 一般的に用いられるレーザーを用いたポイント計測機とも 比較し,よい一致を確認している³⁾.ポイント計測では時 間の制約で測定点が限られてしまうが、本手法により空間 的に連続的な分布を得ることができ,これまで見えなかっ た細かい分布を逃さずに検出することが可能になる.オフ ラインでの実用がなされており、インラインに向けての検 証も始まっている.



図7 ガラス板 (a) と自動車用ガラス (b) の測定例.

3. 波長オーダーの二次元リターダンス計測

第2章で紹介した偏光センサーは,楕円偏光については 右回りと左回りとを識別することができず,リターダンス の測定範囲が λ/4 に制約されていた.そのため,それよ りも大きなリターダンスでは一意的には求められなかった (折り返された値が表示される).本章では,改良した偏光 イメージングセンサーを使うことと,複数の波長で測定し 解析することで,波長オーダーの大きなリターダンスの二 次元分布を計測できるシステムを紹介する.

新たに開発した偏光イメージングセンサーの概略を図8 に示す.本センサーは光軸方向が異なるフォトニック結晶 波長板アレイと、均一な軸方向をもつ偏光子とを CCD センサー上で一体化した構造である。波長板を先に配置する ことで、右回りと左回りの楕円偏光とで各画素の受光強度 が異なり、全偏光状態を計測できるイメージングセンサー となる。

偏光の解析は次のように行う⁴⁾. すなわち,4つの領域 の光出力 $I = (I_1, I_2, I_3, I_4)$ と,波長板の位相差を Δ ,偏光子 に対する波長板の軸方向を $\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4$ としたときのミュ ラー行列Mを用いて,偏光を表すストークスパラメー ター $S = (S_0, S_1, S_2, S_3)$ が次式で求められる.

$S = M^{-1}I$					
	$=\frac{1}{2}$	1	$1-(1-\cos\Delta)\sin^2 2\phi_1$	$(1-\cos\Delta)\sin^2 2\phi_1\cos 2\phi_1$	$-\sin\Delta\sin 2\phi_1$
M =		1	$1-(1-\cos\Delta)\sin^2 2\phi_2$	$(1-\cos\Delta)\sin^2 2\phi_2\cos 2\phi_2$	$-\sin\Delta\sin 2\phi_2$
		1	$1-(1-\cos\Delta)\sin^2 2\phi_3$	$(1-\cos\Delta)\sin^2 2\phi_3\cos 2\phi_3$	$-\sin\Delta\sin 2\phi_3$
		1	$1-(1-\cos\Delta)\sin^2 2\phi_4$	$(1-\cos\Delta)\sin^2 2\phi_4\cos 2\phi_4$	$-\sin\Delta\sin 2\phi_4$)

この計算をすべての画素について行うことで、本セン サーでは全偏光状態のイメージングが可能となる(縦 288 ×横 384 画素).

本センサーを用いたリターダンス分布測定システムの構成を図8に示す.光源は白色LEDパネルと円偏光フィルム を組み合わせた円偏光光源である.本システムではカメラ の前にバンドパスフィルターを配置し,複数波長で偏光計 測を行う.先のシステムと同様,光源の偏光状態とサンプ ルの偏光状態を計測し,その変化量を解析することでサン プルのリターダンスと光軸方向の二次元分布を算出する. ただし本センサーを用いることで全偏光状態を測定するこ とができるので,各波長のリターダンスの測定範囲は λ/2 までに拡張されている(サンプルの軸方向は任意とする). さらに波長ごとに同様の測定を行い、求められたリターダ ンスを波長間で比較する.図6のポアンカレ球上に示した リターダンスに相当する角度 ρ は、波長に反比例する関係 がある.したがって波長間で ρ を比較することで $\lambda/2$ 以上 のリターダンスを求めることが可能となっている.

これらの解析方法を検証するために,図9のように $\lambda/4$ フィルムを1枚から9枚重ねたサンプルを測定した.リ ターダンスのグラフはちょうど $\lambda/4$ (=約138 nm)ステッ プの階段状になっており,最大2波長以上(1000 nm以上) のリターダンス分布まで測れていることがわかる.

波長オーダーのリターダンスをもつ実際のサンプルとし



図8 波長オーダーのリターダンスが可能な二次元複屈折測定 システム.

て,光ピックアップ用プラスチックレンズを測定した例を 図10 (a), (b) に示す. (a) はサンプルの外観写真である. 円環が見えている部分は樹脂の流れ口で,ゲートとよばれ る部分である. (b) はリターダンスを三次元表示した結果 である.ゲート付近に歪みが集中しており,リターダンス がん以上であることがわかる.このように本システムを利 用することで,大きなリターダンスまで定量的に測定する ことができる.成形プロセスやアニールの条件に対して, 複屈折がどのように変化するかということを,簡便にかつ 定量的に評価することができるようになる.また,歪みが 集中している箇所から,割れなどの不具合箇所を早期に発 見する手段としても有用である.測定レンジが広いことか ら,光学部品以外の樹脂成形品への適用も期待される.

4. ビーム計測への応用

最後に、フォトニック結晶素子を用いた偏光計測技術と して、ビーム計測の応用であるエリプソメーターを紹介す る⁵⁾.エリプソメーターは基板上の薄膜に斜めに光を入射 させ、その反射光の偏光解析を行うことで膜厚と屈折率を



図9 λ/4フィルムを複数枚重ねたサンプルの測定結果.

測定する装置である.図11に、ここで用いる偏光セン サーの素子構成を示す.フォトニック結晶からなる波長板 と偏光子、そして CCD を組み合わせており、ポイント計 測において高精度の測定を可能となるような素子構成に なっている.このような偏光計測モジュールは駆動部がな く小型・高精度が特徴であり、われわれはこれを移動する サンプルステージと組み合わせた高速マッピング可能なエ リプソメーターを製品化している.

測定例として、6インチの半導体ウェハーに塗布したレジスト膜の厚さ分布を図11に示す。約1万点の測定点数を約10分で測定することができ、従来の20倍の速度を実現している。これまで測定時間の制約でウェハー上で数点でしか測定されていなかったところを、細かくスキャンしながら測定することで、今まで見えなかったわずかな厚さむらを可視化できる。図からは放射状に厚さむらが生じていることが明瞭に示されているが、このような膜厚分布はスピンコートの回転速度や滴下量などにより変化している。



図10 樹脂成形レンズの測定例.



図11 フォトニック結晶を用いた高速マッピングエリプソメーターの概念図(a)と測定例(b).

プロセスの条件出しや工程管理に有用であることが実証さ れており、すでに実用されている.

フォトニック結晶偏光素子はさまざまな分野で利用され ているが、そのひとつが偏光計測である。本稿では独自の 偏光計測デバイスとして,フォトニック結晶集積素子と CCD とを組み合わせた偏光イメージングセンサーを紹介 した。その応用のひとつが、リターダンスの二次元分布を 計測するシステムである.本稿で述べたように1nm以下 の微小なリターダンスや、波長オーダーの大きなリターダ ンスの二次元分布計測を実証しており、さまざまな分野の 製品検査へ適用が可能となっている。一方で、偏光イメー ジングセンサーは可動部なしで偏光画像を取得することの できる簡便なデバイスであることから、バイオテクノロ ジーやロボティクスなどさまざまな分野への展開も期待さ れる。光ビームの偏光計測においても、本稿で紹介したエ リプソメーターのほかに、さまざまな応用展開が進んでい る^{6,7)}. このようにフォトニック結晶を用いた偏光計測技 術は、従来技術の延長線上では実現できなかったことを 実現しつつ、さまざまな産業分野にて市場参入が拡大中で ある.

文 献

- 1) 川上彰二郎: "積層型フォトニック結晶の産業的諸応用", 応用 物理, 77 (2008) 508-514.
- 山本正樹,津留俊英: "正反射による物体表面の傾斜エリプソメトリー―精密実時間形状計測への基本概念―",光学,38 (2009) 204-212.
- 佐藤 尚,千葉貴史,川嶋貴之,川上彰二郎:"偏光イメージ ングを用いた低リターダンス2次元分布の一括計測", Photonics & Optics Japan, 5pD2 (2008) pp. 304-305.
- 4) 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 (2005) 692-699.
- 6) T. Sato, T. Araki, Y. Sasaki, T. Tsuru, T. Tadokoro and S. Kawakami: "Compact ellipsometer employing a static polarimeter module with arrayed polarizer and wave-plate elements," Appl. Opt., 46 (2007) 4963–4967.
- 中田俊彦,渡辺正浩: "フォトニック結晶偏光子を参照ミラー 及び位相シフタに用いた超小形・高感度共通光路位相シフト 干渉計", *Photonics & Optics Japan*, 6aC4 (2008) pp. 468-469.
- N. Hashimoto, Y. Homma, T. Sato, T. Aoyama, T. Chiba, H. Uetsuka and S. Kawakami: "A compact and highly accurate DOP monitor," *Pro. Eur. Conf. Opt. Commun.*, vol. 2 (Glasgow, 2005) p. 177.

(2010年3月17日受理)