

高精度位相計測システムを用いた屈折率変調型 光デバイスの計測

遠島 未希¹, 渡邊恵理子², 今井 元¹

¹日本女子大学理学研究科 数理・物性構造科学専攻

²電気通信大学 先端領域教育研究センター

(2011年11月30日受理)

要 旨 無色透明位相物体のミクロ領域での定量計測の要求されている。我々のグループでは閉ループフィードバック制御技術を導入した光干渉計測システムを構築し、光路長変化量が1 nm から数波長を越える透明位相物体を高精度に計測できることを確認している。本システムでは、閉ループフィードバック制御によりピエゾの印加電圧を計測することで、逆関数を利用せずに直接位相変化を算出可能であるため、位相 **unwrapping** 処理を必要とする手法と比べて高精度な計測を可能としている。本稿では構築した位相計測システムの精度に関する検討実験を行い、実証実験として、微細構造をもつ光デバイスの計測を行ったので報告する。

キーワード：位相計測, 干渉計測, 光学デバイス, 生体細胞

1. はじめに

光通信技術の普及に伴い、微細構造を持つ屈折率変調型の光学素子が開発されている。このようなデバイスの性能は微細なコア部の屈折率分布に依存するため、屈折率分布の高分解能・高精度計測が求められている。位相シフト干渉法¹⁾は位相シフトを与えたときの干渉縞の強度分布から被検の位相分布を算出する手法で、光導波路、光ファイバー等の屈折率分布の観察・定量計測に用いられている。しかし、この方法で求められる位相差は $2\pi n$ (n : 整数) の任意性があるため、高さが連続的に変化していると仮定して位相 **unwrapping** 処理を行う必要がある。

また近年、バイオ・医療分野において、非侵襲・非破壊での細胞の定量計測に関心が高まってきている。細胞は可視光をほとんどすべて透過する透明位相物体であるため、相対的な位相情報を強度に変換する位相差顕微鏡や試料に蛍光物質を導入し観察対象となる分子や構造が発する蛍光を観察する蛍光顕微鏡などが用いられている。位相差顕微鏡は細胞試料を透過する光と背景光との光路

差の分布を、相対的な明暗のコントラストで表示するため、培養細胞などの薄い試料の表面観察に適しているが、奥行き方向の位相情報を得ることは困難である。

我々のグループではマッハツェンダー型干渉計に閉ループフィードバック制御技術を導入し、1 nm 以下の微小な光路長変化量から数波長を越える光路長変化量までを非侵襲・非破壊かつ高精度に計測可能な位相計測システムを構築してきた²⁾。本システムでは位相 **unwrapping** 処理を必要としないため、 2π 付近の試料においても精度を維持したままの計測を可能としている。また、非侵襲・非破壊で計測した細胞の位相情報を画像化することにより細胞の品質管理へ応用できる可能性を得ている³⁾。本稿では、高精度位相計測システムの原理と本システムの有用性を確認するための精度評価実験の結果を示し、実際に屈折率変調型光デバイスの計測を行った結果を報告する。

2. 位相計測システム

Fig. 1 にマッハツェンダー型干渉計に閉ループフィードバック制御を導入した位相計測システムを示す。光源には He-Ne レーザ ($\lambda=632.8$ nm) を用い、2 光束に分けた一方を試料にもう一方 (参照光) と干渉させて、試

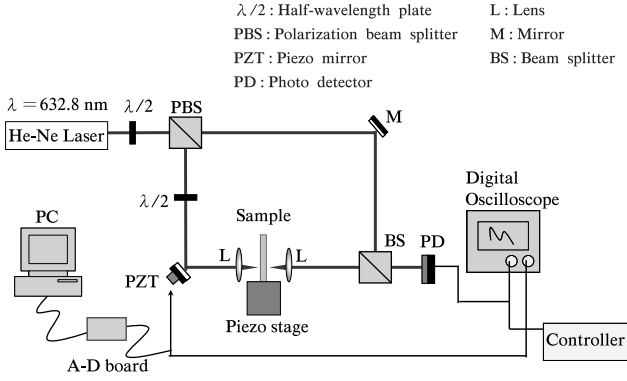


Fig. 1. Experimental setup of phase measurement system.

料を挿入し、位相差を推定する。試料を光軸方向に対して垂直にスキャンすることにより、位相変化の分布を測定している。

フィードバック制御を用いない位相算出方法では、干渉縞の強度分布は (1) 式で表される。

$$P(\phi) = P_0 \frac{1 + \cos(\phi)}{2} \quad (1)$$

ϕ : 位相変化量

試料をスキャンした場合の位相変化量は (1) 式を用いて (2) 式のように表す事ができる。

$$\phi = \arccos \left(\frac{2P(\phi)}{P_0} - 1 \right) \quad (2)$$

この場合、位相変化の折り返しが生じるため、位相 **unwrapping** 処理を行う必要がある。これにより、接続部分で精度が低下してしまう場合があり、さらに多価関数であるために $\Delta\phi$ の値は不定性が残る。

本研究では、高精度な計測を行うためにフォトディテクタでの受光強度が最小になるように閉ループフィードバック制御を施し、光路中に設置したミラーに付けたピエゾ素子への印加電圧を 16bit の AD ボードを用いて取得する。これを予め計測したピエゾの半波長電圧（半波長の光路長変化をもたらす電圧）と比較することにより位相変化量を求めている。フィードバック制御によりピエゾの印加電圧を計測しているため、(1) 式を用いた逆関数を利用せずに直接位相変化を算出することが出来る。これにより、局所的な精度低下はなくなり、均一な測定が可能となる。

微小領域を計測するために、レーザを顕微鏡用対物レンズで試料上に集光させ、透過光をもう一方の対物レンズで平行光に戻している。移動方向の空間分解能は、測定波長と対物レンズの NA より決定する。NA が 0.40

の対物レンズを使用し、光源波長が 632.8 nm の場合、空間分解能は 0.97 μm となる。対物レンズ対により光学分解能までの計測を行っており、さらに短波長・高 NA の対物レンズにすれば高分解能化が可能となる。

上記の従来我々が構築してきた位相計測システムでは定盤上に水平に光学系を組んでいたため、試料を垂直に設置する必要があった。そのため、生体細胞など液中に存在するものの測定は重力の影響により試料がずれてしまったり、形状が変化する可能性があった。そこで、試料を光学顕微鏡観察と同様に水平に設置可能なピエゾ試料ステージを導入することにより、生体細胞などの液中の物体観察に向けた装置の改良を行った。2次元スキャンが可能なピエゾステージにより、最大 100×100 μm^2 の面積内において、自動 2次元計測が可能となった。

3. 精度評価実験

3.1 光路長変化量

細胞など位相変化量が小さい試料においても精度良く計測を行うことが重要であり、それはシステムの光路長分解能に依存している。本システムでは位相変化による干渉縞の強度変化がフォトディテクタで受光強度が最小になるように閉ループフィードバック制御を施し、その際の光路中のピエゾ素子への印加電圧 V_{PZT} を取得している。ピエゾ素子への印加電圧 V_{PZT} と移動距離は比例関係にあると仮定して (3) 式を用いて光路長変化量に変換している。 λ は光源波長、 V_λ は一波長分の印加電圧である。

$$\Delta L = \frac{V_{\text{PZT}} \times \lambda}{V_\lambda} \quad (3)$$

光路長分解能を確かめるために試料を挿入していない状態でどの程度の空気揺らぎや振動によるノイズが生じているのか検討を行った。実験は試料を何も挿入していない状態で、ピエゾ素子への印加電圧を 2 秒間、連続で 10 回取り込んだ。外部の振動による大きなノイズも見られたが平均約 $\pm 0.25 \text{ nm}$ の範囲のノイズとなった。従って、本システムの光路長分解能は 0.5 nm 程度であることを確認した。

3.2 空間分解能

本システムでは、微小領域の計測を行うためにレーザ光を顕微鏡用対物レンズで試料上に集光させ、別の対物レンズで平行光に戻すという対物レンズ対を採用している。NA が 0.40 の対物レンズを用いており、測定波長は 632.8 nm であるため、空間分解能は理論上、0.97 μm となっている。実際の空間分解能を求めるには、より微細な周期構造を持ったデバイスなどを測定する必要がある。

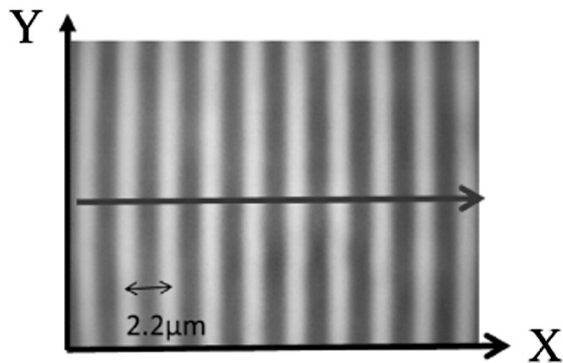


Fig. 2. Photograph of volume phase holographic grating.

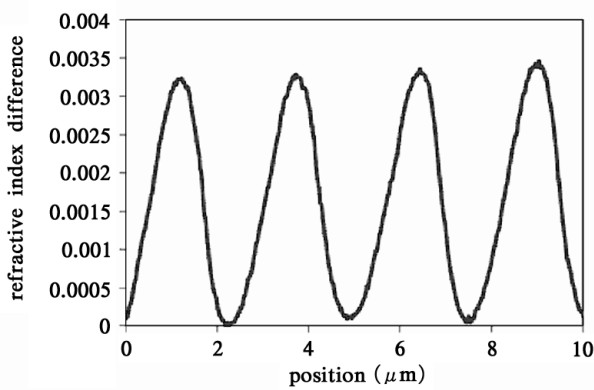


Fig. 3. Measurement results of volume phase holographic grating with 2.2 μm pitch.

屈折率が微細周期で正弦波状に分布している位相変調型光デバイスである体積型屈折率変調格子 (Volume Phase Holographic Grating)⁴⁾ を用いて、空間分解能の測定精度の検討を行った。格子周期 2.2 μm、厚さ 29 μm の体積型屈折率変調格子を屈折率変化がある方向に 0.1 μm 間隔でスキャンした。このとき屈折率変化による光路長変化を補正するために生じたピエゾへの印加電圧 V を検出した。ピエゾへの印加電圧と 1 波長分の印加電圧より光路長変化 L を式 (3) を用いて算出した。さらに光路長変化に試料の厚みを考慮することにより電圧値を屈折率変化に変換した。

測定結果を Fig. 3 に示す。2.2 μm 間隔の正弦波状の屈折率分布を取得した。測定結果に傾きが生じているのは試料が光軸に対して垂直に設置できていないためと考えた。これにより、理論空間分解能に近い 1.1 μm で高精度に測定ができていることを確認した。

4. 実証実験：光学デバイスの計測

4.1 マルチレベルゾーンプレート

マルチレベルゾーンプレートの性能特性解析としては、素子形状観察、シミュレーションあるいは光学実験によ

る結像特性評価が挙げられる。この中でも形状観察としては、微分干渉顕微鏡による表面形状観察、原子間力顕微鏡 (AFM) による断面形状観察が行われている。

本システムを用いて開口 5 mm、ライン幅 3 ~ 7 μm の 8 レベルのマルチレベルゾーンプレート⁵⁾ を 0.5 μm の間隔で測定を行った。体積型屈折率変調格子と同様に光路長変化を補正するために生じたピエゾへの印加電圧と 1 波長分の印加電圧より光路長変化を算出し、BK7 基板の屈折率は 1.51 で一定であることを用いて屈折率変化量 $\Delta n = L/t$ より厚さ t を求めた。測定結果を Fig. 5 に示す。8 レベルのゾーンプレート的一部分 (ライン幅 4 ~ 5 μm) の形状を計測できた。位相差が微小領域で階段状に変化している形状においても測定できていることを確認した。計測したマルチレベルゾーンプレートは一波長を 8 レベルとして設計しており、本システムにて得られた 8 レベル分の位相差は 600 nm 程度であることから、設計値 (一波長 = 632.8 nm) に近い値が得られていると考えられる。また、3 レベル目に見られる突起はゾーンプレートの作成時においてマスクずれにより素子形状が崩れてしまうマスクアライメントエラーであり、本システムにおいてもそのエラー部分がはっきりと計測できていることを確認した。

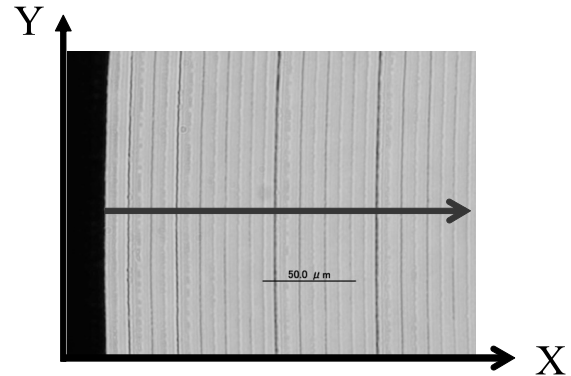


Fig. 4. Photograph of 8 level zone plate.

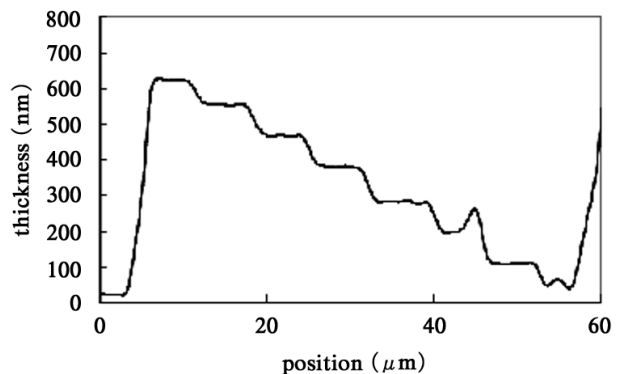
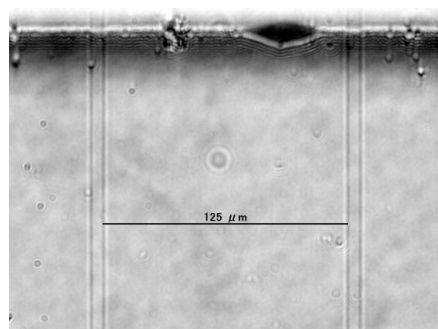


Fig. 5. Measurement results of 8 level zone plate.

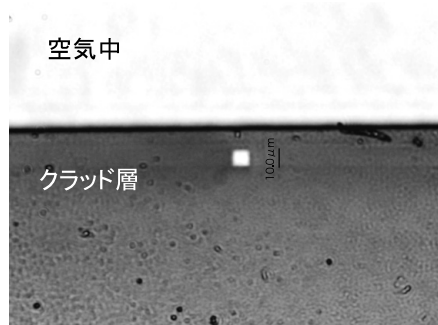
4.2 プレーナ光波回路 (PLC)

光通信ネットワークでは、光分岐・光合分岐・光スイッチ等の光部品が必要であり、石英系プレーナ光波回路 (PLC) は小型量産性・信頼性の点で優れており、アクセス用光スプリッタや波長分割多重用 AWG フィルタ等が開発実用化されている⁶⁾。このような屈折率変調型光デバイスの性能は微細なコア部の屈折率分布に依存するため、屈折率分布の高分解能・高精度計測が求められている。

本システムを用いて、コア幅が $6.1\ \mu\text{m}$ 、比屈折率差 $\Delta 0.769$ の石英系プレーナ光波回路の計測を行った。計測した石英系プレーナ光波回路の顕微鏡写真 (平面・断面図) を Fig. 6 に示す。比屈折率差 Δ とクラッド (石英基板) の屈折率 n_1 が 1.458 であることからコアとクラッドの屈折率変化量 Δn は 0.0113 と算出した。計測したプレーナ光波回路は導波路が $125\ \mu\text{m}$ 間隔で等間隔に並んでいる。



(a) Surface view



(b) Side view

Fig. 6. Optical micrograph of PLC.

構築した位相計測システムを用いて、1つのコアを $0.1\ \mu\text{m}$ 刻みで10往復させて計測した。測定結果を Fig. 7 に示す。測定結果から屈折率変化量 Δn は 0.0122 と算出

した。往復で波形が非対称になっているのはピエゾ素子によるヒステリシスの影響と考えられる。これらの結果から微小な屈折率分布をもつ光デバイスにおいても算出した屈折率変化量に近い計測結果を得られていることを確認した。

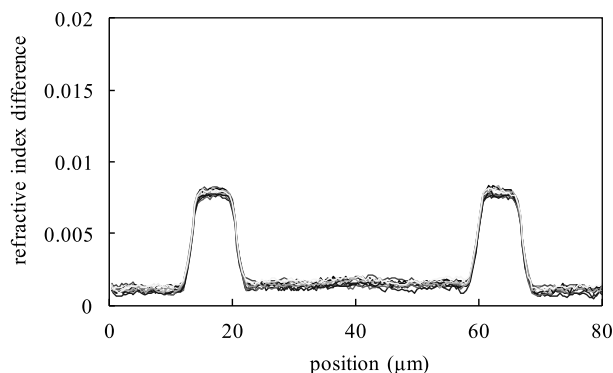


Fig. 7. Measurement results of PLC.

5. ま と め

マッハツェンダー型干渉計に閉ループフィードバック制御技術を導入し、 $1\ \text{nm}$ 以下の微小な光路長変化量から数波長を越える光路長変化量までを非侵襲・非破壊かつ高精度に計測可能な位相計測システムを構築した。構築したシステムの精度評価実験を行った。光デバイスの計測として、マルチレベルゾンプレートとプレーナ光波回路の計測を行い、微小な位相差差や屈折率差を定量的に計測可能であることを確認した。今後は測定結果とシミュレーション計算結果とを突き合わせることで、更なる精度評価を行い、光デバイス計測だけでなく、バイオ・医療分野への応用を検討する。

参考文献

- 1) 前田大輔, 高見澤 晶, 遠藤潤二, 陳 軍: 第58回応用物理学会学術講演会, 講演予稿集, 03-045 (2011).
- 2) E. Watanabe, C. Fujikawa, J. Mizuno, and K. Kodate: *Proc. SPIE*, 6488-6409 (2007).
- 3) 渡邊恵理子, 遠島未希, 今井 元: 第16回画像センシングシンポジウム, IS1-19-1-IS1-19-4 (2010).
- 4) K. Nakajima: *Opt. Rev.*, **14**, 4, 201-207 (2007).
- 5) Y. Komai, K. Oka, W. Klaus, and K. Kodate: *Conference Digest of International Conference on Optical MEMS*, 71-72 (2002).
- 6) T. Tsuda, J. Hasegawa, K. Nara: *OSA Technical Digest*, paper NThA3 (2008).

Measurement of Refractive-index Modulation Type Optical Device Using Phase Measurement System Based on Closed Loop Feed-Back Control

Miki Toshima¹, Eriko Watanabe² and Hajime Imai¹

¹The Graduate School of Science, Division of Mathematical and Material Structure Science,
Japan Women's University

²The University of Electro-Communications

(Received November 30, 2011)

Abstract: The refractive index modulation type optical elements with microstructure, including the optical waveguide devices and the high dispersion Volume Phase Holographic (VPH) grating, are developed with the advancement of optical communications system. Since optical devices are often manufactured using optical sensitization resin, they do not have mechanical structure. Therefore, stylus method and a scanning electron microscope (SEM) can not be used for evaluation. The structure is estimated by comparing the characteristic with simulation results. Therefore, a simple method to directly measure the refractive index distribution is desired. We have measured directly the small-scale variation of optical path lengths in transparent phase objects. The system is an interferometer based on closed loop feed-back control and can measure the changes in optical path length and by scanning the sample across the optical axis evaluate the distribution of optical path length difference. We measured Volume Phase Holographic (VPH) grating and multi level zone plate to evaluate the system.

Key words: Phase measurement, Interference measurement, Optical device, Biological cell