

位相シフト透過型干渉顕微鏡とその誤差解析

山田雄一^{*1} 陳 軍^{*2} 遠藤潤二^{*3}

Transmission laser microscope using a phase-shifting technique and its error analysis

Yuichi Yamada^{*1}, Jun Chen^{*2}, Junji Endo^{*3}

We present a new interference microscope for quantitative phase measurement of transparent objects. High precision measurement is achieved by applying the phase-shifting interferometry to an ordinary transmission optical microscope. In the microscope, a bi-prism inserted between a magnifying lens and an observation plane is used as both a beam splitter and a phase shifter. The phase shift required for phase extraction using the phase-shifting technique is introduced by laterally shifting the bi-prism with a piezoelectric transducer. The diffraction caused by the vertex of the bi-prism is avoided by placing a thin wire at the center position of an intermediate image plane. Experimental results for measuring the refractive index distribution of an optical waveguide are presented to demonstrate the usefulness of this method.

1. 背景と目的

微小で透明な物体の位相計測は光学や生物科学などの分野で重要である。例えば、光導波路のコア部の屈折率分布は導波損失や偏光特性に大きな影響を与え、高精度な計測が要求される。¹⁾ 一方、位相シフト干渉法²⁻⁶⁾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方法で、高精度干渉計測法の代名詞として知られている。しかし、一つの光路しか持たない通常の透過型光学顕微鏡には、位相シフト干渉法の適用は困難であった。

そこで我々は複プリズムの横方向移動による位相シフト導入という新しい方法^{6,7)}を考案し、光導波路・光ファイバーなどの透過物体の屈折率分布を高速・高精度で計測するシステムの確立を目的として研究に取り組んだ。

2. 理論

図1に複プリズムを用いた干渉計の概念図を示す。この干渉計は対物レンズと拡大レンズの間に複プリズムを挿入したものである。被検試料は入射平

面波の半分の部分に挿入され、残りの半分は参照光として用いる。サンプルを透過した物体光と参照光は複プリズムによって曲げられて、観察面上で重なり合って干渉する。位相シフト干渉法による位相導出に必要な位相シフトは複プリズムを横に移動させることで導入する。

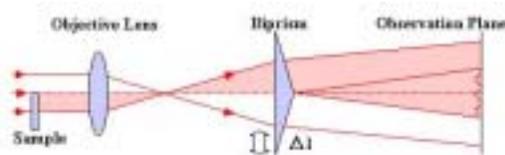


図1 複プリズムを用いた干渉計の概念図

複プリズムの移動量と導入される位相シフトの関係について考える。観察面上において、光軸方向にz軸、上向きにx軸をとると、物体光と参照光は

$$u_o(x, y) = a_o(x, y) \exp\{i[k(x \sin \theta + z \cos \theta) + \phi(x, y)] + \delta/2\} \quad (1)$$

$$u_r(x, y) = a_r(x, y) \exp\{i[k(-x \sin \theta + z \cos \theta)] - \delta/2\} \quad (2)$$

^{*1} 東京工芸大学大学院工学研究科光工学専攻 ^{*2} 東京工芸大学工学部光情報メディア工学科助教授

^{*3} エフケー光学株式会社
2003年9月10日 受理

となる。ただし、 $a_o(x, y)$ と $a_r(x, y)$ はそれぞれ物体波と参照波の振幅で、 k は伝播数、 $\phi(x, y)$ は被検試料による位相変調、 θ は複プリズムによる偏向角、 δ は複プリズムの横移動による位相シフトである。観察面で検出される干渉縞の強度分布は

$$I(x, y) = a_o(x, y)^2 + a_r(x, y)^2 + 2a_o(x, y)a_r(x, y)\cos\{[2kx\sin\theta + \phi(x, y) + \delta]\} \quad (3)$$

となる。

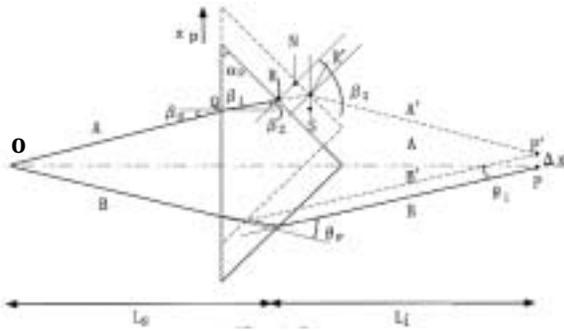


図2 複プリズムの横移動による位相シフトの導入

次に、複プリズムを光軸と複プリズムの稜線に垂直に移動させたとき、2 光束間の光路差を解析する。

図 2 に複プリズムを移動させた時の光路長の変化の様子を示した。図 1 の対物レンズの焦点に対応する O 点からの光の内、光路 A と光路 B を通ってきた光は複プリズムで曲げられ互いに干渉し、観察面上の点 P に結ぶ。プリズムへの入射角 β_0 と角 β_1 、 β_2 、 β_3 の間には

$$\beta_1 = \sin^{-1}[(1/n)\sin\beta_0] \quad (4)$$

$$\beta_2 = \alpha_p - \beta_1 \quad (5)$$

$$\beta_3 = \sin^{-1}(n\sin\beta_2) = \sin^{-1}[n\sin(\alpha_p - \beta_1)] \quad (6)$$

のような関係がある。ここで、 n は複プリズムの屈折率で、 α_p は複プリズムの頂角である。複プリズムが x_p だけ上方向に移動させたとき、光路 OQRP は OQR'P' に変化する。複プリズムの移動によって導入された位相シフトは物体光と参照光の光路差

から算出することができる。図 2 より、光路長 RS と RR' は次のように表される。

$$\overline{RR'} = \frac{\overline{RN}}{\cos\beta_2} = x_p \frac{\sin\alpha_p}{\cos(\alpha_p - \beta_1)} \quad (7)$$

$$\overline{RS} = \overline{RR'} \frac{\cos\beta_1}{\cos(\beta_3 - \alpha_p)} \quad (8)$$

このとき、光路 A、光路 B に導入される位相シフトは

$$\delta = 2 \times 2\pi \left(\frac{\overline{RR'}}{\lambda'} - \frac{\overline{RS}}{\lambda} \right) = \frac{4\pi x_p}{\lambda} \frac{\sin\alpha_p}{\cos(\alpha_p - \beta_1)} \left[n - \frac{\cos\beta_1}{\cos(\beta_3 - \alpha_p)} \right] \quad (9)$$

と与えられる。ここで、 λ と λ' は各々空気中と複プリズム中の波長である。式(9)は複プリズムの横移動によって導入された物体光と参照光の間の位相シフトである。入射角 β_0 とプリズムの頂角 α_p が小さいので式(9)は

$$\delta = \frac{4\pi x_p}{\lambda} (n-1)\alpha_p \quad (10)$$

と近似できる。

複プリズムを段階的に移動させて、

$$\delta_j = \frac{2\pi j}{N} \quad (j=1, 2, 3, \dots, N) \quad (11)$$

のように位相シフトを導入すると、 $\phi(x, y)$ は位相シフト干渉法の位相導出アルゴリズムを用いて、

$$2kx\sin\theta + \phi(x, y) =$$

$$\tan^{-1} \left[\frac{\sum_{j=1}^N I(x, y; j) \sin[\frac{2\pi j}{N}]}{\sum_{j=1}^N I(x, y; j) \cos[\frac{2\pi j}{N}]} \right] \text{ mod } 2\pi \quad (12)$$

と求めることができる。ここで、 $I(x, y; j)$ は干渉縞画像 j 番目の強度分布である。位相つなぎなどの手続きのあと、波面の傾きに相当する位相分布 $2kx\sin\theta$ は計算機で算出でき、取り除くことができる。

3. 位相シフト干渉顕微鏡のシステム

本研究で開発した干渉顕微鏡システムの光学系は透過型光学顕微鏡の結像系に屋根型の複プリズムを挿入したもので、その構成を図3に示す。光源には強度安定化 He-Ne レーザ (SpectraPhysics, Model 117、発振波長: 632.8nm) を用いた。入射ビームの片側に試料を挿入し、反対側は参照光として用いる。

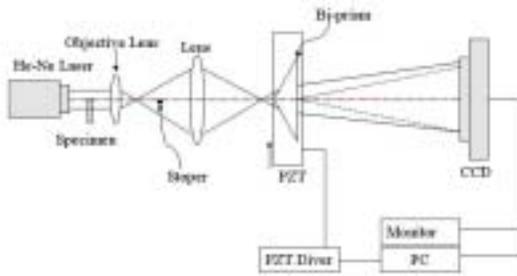


図3 透過型位相シフト干渉顕微鏡

物体光と参照光はともに対物レンズ(20×, N.A.=0.4)によって拡大される。この像は拡大レンズ($f = 50\text{mm}$)によってさらに拡大され、CCD (SonyXC77) 面上に結像する。総合倍率は300倍になり、観察領域は試料上において $29\mu\text{m} \times 22\mu\text{m}$ である。物体波と参照波は拡大レンズと CCD カメラの間に挿入した複プリズム(BK7)に曲げられて干渉する。複プリズムのサイズは $30\text{mm} \times 30\text{mm} \times 2\text{mm}$ で、プリズムの頂角は2度である。光軸と複プリズム稜線に垂直な方向に動かすために複プリズムを piezo素子(PZT, PiezoSystem, Jena, PXY100NV)に取り付けた。piezo装置の非線形性を補償するための回路を装備している。複プリズムの稜線で発生するフレネル回折を防ぐため、中間像面上に幅 0.7mm のストッパーを複プリズムの稜線に平行になるように配置した。

干渉像は $640 \times 480\text{pixels} \times 8\text{bits}$ でデジタル化され、画像ボード (Precision Digital Image Corporation, PCI-Select MM) を介してコンピュータ (Power Macintosh G3) に蓄積される。複プリズムの移動量は GPIB を介して、コンピュータで制御される。ここで、インターフェースには National Instruments,

PCI-GPIB、直流電源供給器には Advantest R6142 を使用した。

位相計測を行う前に、複プリズムの移動量と piezo制御装置に加える電圧の関係を得るために、システムの校正を行う必要がある。干渉縞にある小さい窓を設定し、その窓の中で平均化された光強度値で計算する。piezo制御装置に加える電圧を変化させると、光強度値は正弦波に沿うように変化する。光強度 B と印加電圧 V の関係は次のように与えられる。

$$B = C + A \sin[(2\pi V / V_0) + D] \quad (13)$$

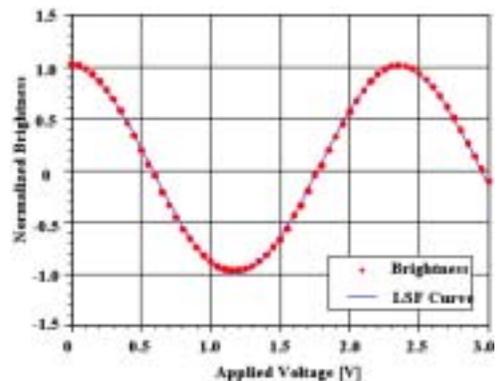


図4 複プリズムの移動量の校正曲線例

ここで、 V_0 は物体光と参照光における2の位相シフトに相当する電圧である。最小二乗適合法 (LSF) を用いて、 C 、 A 、 V_0 、 D を100組の値 B と値 V から求める。電圧ステップの量は V_0/M のように与えられる。ここで、 M は測定回数である。実際に2の位相シフトを与えるには 2.35V の電圧を要し、そのときのバイプリズムの移動量は $18\mu\text{m}$ であった。目立った非線形性と印加電圧に対する複プリズムの移動の不規則性は観察されなかった。

4. 実験結果

開発した干渉顕微鏡システムを用いて光導波路のコア部の屈折率分布を計測した。実験に用いた導波路は石英基板に火炎堆積法を用いて作製されたもので、 TiO_2 添加のコアのサイズは $7\mu\text{m}$ 角である。導波路の構造を図5に示す。導波路の断面内の屈折率分布を計測するため、導波路から厚さ $100\mu\text{m}$ の部分を切り出し、2枚のカバーガラスの間に挟んで計

測を行った。計測結果を図6 - 図8に示す。

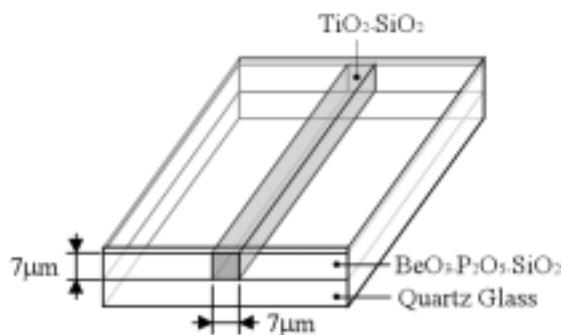


図5 光導波路の構造

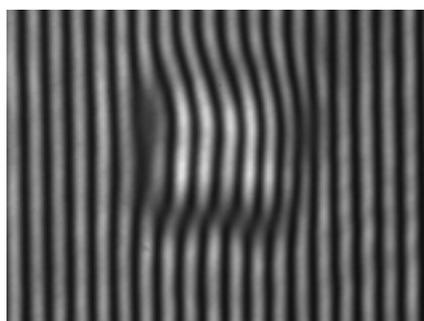


図6 干渉縞パターン

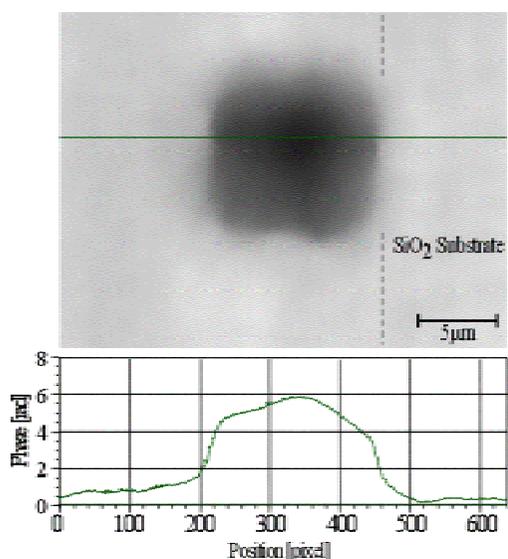


図7 光導波路の位相分布

図6は導波路サンプルを挿入したときの干渉縞

パターンで、図7は実験で得られた位相分布を示す。図8は図7に示すものと同様の位相分布を等高線表示したものである。等高線間隔は $\pi/10$ の位相差に相当する。光導波路のわずかな屈折率の差がはっきりと観察された。図8において、サブミクロン領域で $\pi/50$ 以下の位相差でもはっきりと観察することができる。この値は屈折率差0.006%に相当する。

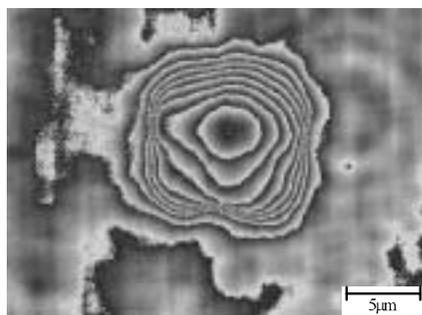


図8 光導波路の内部と外部の屈折率分布

計測で得られた位相分布は導波路の屈折率と

$$\phi(x, y) = 2\pi t \frac{n_2(x, y) - n_1}{\lambda_0} \quad (14)$$

のような関係がある。ここで、 λ_0 はレーザの波長、 t は試料の厚さ、 n_1 と $n_2(x, y)$ はそれぞれクラッドとコアの屈折率である。クラッドの屈折率は一定と見なせるので、コアの屈折率分布は

$$n_2(x, y) = \frac{\lambda_0}{2\pi t} \phi(x, y) + n_1 \quad (15)$$

と得られる。

5. 誤差解析

5.1 プリズムの移動による位相シフト誤差

位相シフト干渉法を用いた位相計測では、位相シフト誤差は計測に誤差をもたらすため、観察面の全面にわたって正確に位相シフトを与える必要がある。しかし、プリズムの横移動によって導入される位相シフト量は光線のプリズムへの入射角によって変化する。そこで、位相シフト量がプリズムへの入射角によってどのくらい影響を受けるのか式(9)式を用いて計算した。その結果を図9に示す。

実際に実験で使用するプリズムへの入射角は最

大で4.6度である。その範囲における位相シフト誤差は約 1/1000 であり、ほとんど無視できることがわかった。

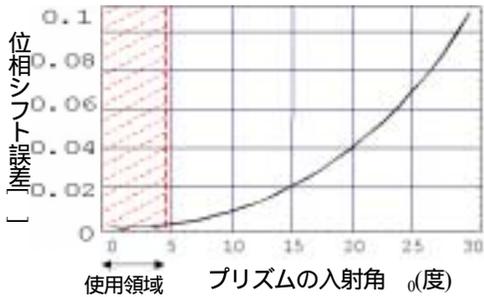


図9 プリズムの移動による位相シフト誤差

5.2 プリズムの移動に伴う像の移動量

図2において、プリズムを移動したとき、光路RPはR'P'に移動し、観察面上の像もx方向に動く。像の移動量 xは次のように与えられる。

$$\begin{aligned} \Delta x &= R'S \\ &= RR'\sin\beta_1 + RR'\cos\beta_1 \tan(\beta_3 - \alpha_p) \\ &= x_p \frac{\sin\alpha_p}{\cos(\beta_1 - \alpha_p)} \left[\sin\beta_1 + \cos\beta_1 \tan(\beta_3 - \alpha_p) \right] \end{aligned} \tag{15}$$

ここで、屈折率nは1.513である。像面上において、プリズムを横に移動させたとき、異なる入射角の光線に対応する像の移動量を計算し、その結果を図10に示す。実験でプリズムへの最大入射角は4.6度で、そのときの像の移動量は最大で0.006μmである。また、使用したCCD一画素のサイズが8μmなので、この移動量はほとんど無視できることが分かった。

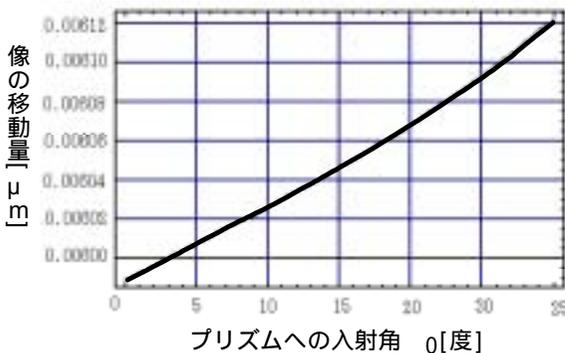


図10 プリズムへの入射角に対する像の移動量

6. 結論

我々は複プリズムの横方向移動を用いた透過型位相シフト干渉顕微鏡を開発した。ビームストッパーを用いることでフレネル回折波の影響を最小限に抑えた。また、誤差解析において、位相シフト誤差が約 1/1000、像の移動量が 1/1000 画素であり、ほとんど無視することができるという結論に達した。光導波路の屈折率分布の計測実験で、開発したシステムの有効性を確かめた。本手法は光導波路だけでなく、透明な生物試料などの位相物体の計測にも適用でき、幅広い応用が期待できる。

本研究でサンプルとして用いた光導波路は日立電線株式会社から提供されたもので、関係者にこころから感謝する。

参考文献

- 1) Meint K. Smit and Cor Van Dam, "IEEE J. of Selected topics in Quantum Electronics", **2**, pp. 236-250, 1996.
- 2) J. H. Bruning, D. R. Herriott, J. E. Gallagher, D. P. Rosenfeld, A. D. White, and J. Brangaccio, *Appl. Opt.* **13**, pp. 2693-2703, 1974.
- 3) K. Creath, "Phase-measurement interferometry Techniques", in *Progress in Optics*, E. Wolf, ed. (Elsevier, Amsterdam), Vol. **26**, pp. 349-393, 1988.
- 4) J. F. Biegen and R. A. Smythe, *Proc. of SPIE* vol. **1009**, Surface Measurement and Characterization, pp. 35-44, 1988.
- 5) J. Chen, N. Baba, and K. Murata, *Appl. Opt.* **28**, pp. 1615-1617, 1989.
- 6) Y. Ishii, J. Chen, R. Onodera, T. Nakamura, *Opt. Engineering*, Vol.42, No.1, pp.60-67 (2003).
- 7) J. Chen, J. Endo, Y. Niino, and H. Fujita, *Proc. of SPIE*, **4416**, Opt. Eng. for Sensing and Nanotechnology, pp. 158-161, 2001.
- 8) J. Endo, J. Chen, D. Kobayashi, Y. Wada, and H. Fujita, *Appl. Opt.* **41**, pp. 1308-1314, 2002.