



干渉計による屈折率分布の高精度測定

松崎 弘・橋本 武・植田 博文・百村 和司・山本 公明

オリンパス光学工業(株)諸隈研究室 〒192 八王子市久保山町 2-3

(1993年2月17日受付, 1993年6月30日受理)

An Accurate Measurement of Gradient Index Profile Using an Interferometer

Hiroshi MATSUZAKI, Takeshi HASHIMOTO, Hirofumi TSUCHIDA,
Kazushi HYAKUMURA and Kimiaki YAMAMOTO

T. Morokuma Research Laboratory, Olympus Optical Co., Ltd.,
2-3, Kuboyama, Hachioji 192

(Received February 17, 1993; Accepted June 30, 1993)

An accurate interferometric measurement method of gradient index profile using a thick object is described. From in-depth analysis of the error related to a sample shape, it is shown that a thick sample is far advantageous over a thin sample for the precise measurement over the refractive index of 10^{-4} . For the error caused by the curve of a ray in a sample, correction is made in such a way that the measured phase profile coincides with the calculated one based on a hypothetical refractive index profile using the least squares method. In the actual measurement by the constructed phase shifting interferometer with the sample scanning which is adopted to cope with dense interference fringes, the resultant accuracy of refractive index is estimated to be 1.3×10^{-4} (P-V).

1. はじめに

屈折率分布型レンズは光学素子として高い潜在能力をもっており単色系から白色系に至る広い光学系で利用が期待されている。この屈折率分布型レンズに対する屈折率分布測定は既に種々の方法¹⁻⁷⁾で行われているが、それらのうち、比較的高精度測定が可能な方法として干渉計を用いる方法^{1,2)}がよく知られている。

この方法は干渉計で試料の透過波面を測定し、その位相変化から屈折率分布を計算するものであるが、試料内部での光線の屈曲が無視できるように試料厚を数百 μm 程度の薄片にして行うのが一般的である。また、試料の面精度誤差の影響を低減するため、試料をマッチングオイルに浸し測定する。

しかし、マッチングオイルの使用は不便である上、たとえ使用しても屈折率分布を持つ試料では屈折率の完全なマッチングは不可能である。また、高精度な面精度を

持つ薄い試料の作製は非常に難しい等の理由で現実的には屈折率分布測定の精度 $\delta(\Delta n)$ を $\delta(\Delta n)/\Delta n$ において 0.001 程度以上を達成することが厳しい状況にある。

光学系によってはより高精度な測定を必要とするが、本研究は試料厚を大きくすることにより試料の表面精度の影響を相対的に小さくし、それ以上の高精度測定を達成する方法を検討したものである。試料の面形状に対する必要精度の検討、試料厚の増大に伴い必要となる試料内の光線屈曲に対する補正法と高密度な干渉縞への対処法および、具体的に試作した測定装置で得られた結果について報告する。

2. 精度検討

干渉計で屈折率分布を測定するときの精度を考える。干渉計中の試料は屈折率が光軸と直角方向に変化している平行平板試料とする。最初に試料内部における光線の屈曲が無視できるとし、試料形状に依存する測定精度

を検討する。

試料透過後の波面の位相差を $2\pi\Delta\Phi(x, y)$ 、試料の厚さを t 、また、測定波長を λ とすると試料の屈折率差 $\Delta n(x, y)$ は、次式で表される。

$$\Delta n(x, y) = \frac{\lambda}{t} \Delta\Phi(x, y) \quad (1)$$

(1)式から、屈折率の測定精度は試料の厚さ t 、および波面の位相差 $\Delta\Phi$ の測定精度に依存する。試料の厚さ精度は実際には、1. 試料の平均厚さ測定精度、2. 試料の平行平面性のずれ、すなわちくさび角 ε 、および3. 表面粗さ δ によって影響を受けるので、これらの要因によって生じる屈折率誤差はそれぞれ以下のように表される。

- 1) 試料の表面粗さ δt による誤差

$$\delta(\Delta n) = \frac{n_0 + \Delta n - n'}{t} \delta t \quad (2)$$

ここで、 n_0 、 n' はそれぞれ基準位置における屈折率、および試料を満たす媒質の屈折率を表す。

- 2) 試料のくさび角 ε による誤差

$$\delta(\Delta n) = \frac{(n_0 + \Delta n - n') \cdot d}{t} \tan \varepsilon \quad (3)$$

ここで、 d は屈折率が n_0 である位置から屈折率差が Δn となる位置までの距離。

- 3) 試料厚の測定誤差 δt による誤差

$$\delta(\Delta n) = \frac{\Delta n}{t} \delta t \quad (4)$$

- 4) 干渉計の位相検出誤差 $\delta(\Delta\Phi)$ による誤差

$$\delta(\Delta n) = \frac{\lambda}{t} \delta(\Delta\Phi) \quad (5)$$

(2)~(5)の諸式から、測定誤差 $\delta(\Delta n)$ は、試料の厚さ t に反比例し、試料の厚さを大きくすることで試料形状に起因する誤差を相対的に低減できることが明らかであるが、以下で従来の数百 μm 程度の薄片試料を用いた場合と厚い試料を用いた場合でどの程度の影響が出るかを試算する。

Table 1 は直径 4 mm、屈折率差約 0.08 の radial 型 GRIN 材料を想定し、試料中心と外周との間で生じる屈折率の最大誤差を計算したものである。

ここで試料の作製精度として、表面粗さ δ および、くさび角 ε に対しそれぞれ 0.1 μm および、 $10''$ を仮定している。また、測定波長は 632.8 nm、試料の厚さ測定精度は 1 μm 、干渉計の測定精度を 0.1 λ としている。**Table 1** から、試料が薄い場合の測定精度は 10^{-3} 程度、厚い場合には $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 程度であり、試料を厚くすることで1~2桁程度精度を高めることが可能なこ

Table 1 Dependence of refractive index errors caused by sample shape errors on the sample thickness.

Thickness	t (mm)	0.1	1.5
Roughness	$\delta = 0.1 \lambda$	8.1×10^{-4}	5.4×10^{-5}
Wedge	$\varepsilon = 10''$	6.2×10^{-4}	4.1×10^{-5}
Thickness error	$\delta t = 1 \mu$	8.0×10^{-4}	5.3×10^{-5}
Phase error	$\delta\Phi = 0.1 \lambda$	6.3×10^{-4}	4.2×10^{-5}

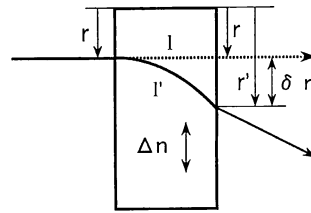


Fig. 1 Curve of a ray in a GRIN medium.

Table 2 Dependence of ray curve in a medium on the sample thickness.

Thickness	t (mm)	0.1	1.5
δr (μm)		0.26	57
δl (λ)		0.0021	7.2
δn		1.3×10^{-5}	3.0×10^{-3}

とがわかる。

次に、試料内の光線の屈曲の影響を考える。**Fig. 1** に示されるように平行平面に研磨された試料に垂直に r の位置から入射した測定光線は、 r からずれた位置 r' から出射する。また、この屈曲のため、試料を透過した光線の試料内における光路長も屈曲がないと仮定したときの光路長 l と異なり l' となる。

この試料内での光線の振舞いは、 s を光線の軌跡の長さとするとき光線方程式、

$$\frac{d}{ds} \left\{ n(\mathbf{r}) \frac{d\mathbf{r}}{ds} \right\} = \nabla n(\mathbf{r}) \quad (6)$$

により決定できるので⁸⁾、実際の光路 l' および、出射位置 r' はこの方程式を数値計算で解くことで求めることができる。

Table 2 はこれらの影響を試料厚 0.1 mm と、1.5 mm に対し計算したものである。**Table 2** において、 δl は(1)式を用いて計算した光路長 l と、(6)式で求められる実際の光路長 l' との差 $\delta l = (l' - l)$ 、 δr は光線の入射位置と出射位置の差、また、 δn は光路長の誤差によって生じる屈折率の誤差を示している。

Table 2 から、試料厚が 1.5 mm になると、光線の屈

曲は屈折率の測定精度に大きく影響を及ぼすことがわかる。それゆえ、厚い試料を用いた測定では光線の屈曲の影響を補正することが不可欠となる。

3. 光線の屈曲補正の原理

媒質の屈折率分布が与えられると試料の任意の位置から入射した光線が、試料から射出するときの位置およびそのときの光路長は(6)式を用いて一意的に決定されるので、複数の位置から入射する多数の光線に対する光線追跡を行えば、試料透過後の波面の位相分布を計算することができる。したがって、測定された波面の位相分布と光線追跡で求められる位相分布をフィッティングさせることで試料の屈折率分布を求めることが可能となる。

フィッティング法として、最小二乗法による最適化を適用し、屈折率分布係数を求める方法を考案した。具体的なアルゴリズムのフローチャートを Fig. 2 に示す。

Fig. 2 の屈曲補正手順の具体的内容は以下のとおりである。

1) 干渉計で得た波面の測定値 $\{\Delta\Phi_i\}$ ($i=1\sim L$, L : 測定点数) を(1)式より屈折率差 $\{\Delta n_{0,i}\}$ に変換する。測定方向に沿った正、負を取り得る1次元座標 r を設定し、基準屈折率 $n_{0,0}$ と $\{\Delta n_{0,i}\}$ で示される屈折率分

布 $n_0(r)$ を最小二乗法により、

$$n_0(r) = \sum_{k=0}^K n_{0,k} \cdot r^k$$

なる K 次の多項式で近似する。そのときの係数 $\{n_{0,k}\}$ を最適屈折率分布係数 $\{n_k\}$ を求める際の初期値とする。

2) 光線追跡により計算される試料射出位置での波面 $\{\Delta\Phi_{rt,i}\}$ と測定波面 $\{\Delta\Phi_i\}$ との誤差の二乗和 Ψ が最小になるように最小二乗法を用いて最適屈折率分布係数 $\{n_k\}$ を求める。

3) 最適屈折率分布係数 $\{n_k\}$ を基に光線追跡により計算された波面と、測定波面との誤差の二乗和 Ψ の収束の判断を行い、十分収束していればそのときの $\{n_k\}$ を試料の屈折率分布係数と決定する。収束が不十分であれば2)に戻し再度最小二乗法による最適化を繰り返す。

4. 測定装置

4.1 測定方法および装置の構成

試作した測定装置の構成を Fig. 3 に示す。本装置はいわゆる縞走査型⁹⁾の干渉計であり、ピエゾ素子により干渉計の一方の反射鏡を微小に振動させ位相測定を行う。

薄い試料の測定では測定面内に現れる干涉縞の数が少ないので、通常の縞走査干渉計のように各縞走査ごとに測定面全体を一度に撮像し位相計算を行うことが可能であるが、本研究のように試料厚が大きき場合には、撮像素子の画素間隔に対し素子上に結像される干涉縞の密度が高くなり過ぎ、同様の方法をとることが不可能である。そのため本装置では、撮像素子上の1画素のみを使用し、試料を横方向に微小に走査しながら、各試料走査ごとに縞走査を行い位相分布を測定する方法を採用した。試料走査は撮像素子の画素の大きさよりも小さな移動量で行うため、画素の大きさ以下の分解能を得ることができ、高密度の干涉縞にも対応することができる。

試料を走査することで、測定時間は長くなるものの、以下に述べるように、高精度測定に障害となるいくつかの誤差要因を排除することも可能となっている。

1) 測定面全体の同時測定では、測定光束を測定面より広くする必要があり、測定光束の波面収差を考慮する必要が生じる。しかし、本方法によれば、1点の測定光束上を試料が走査され測定が行われるため、測定光束の波面収差を考慮する必要はない。

2) 測定面を撮像素子上に結像させるため、一般には結像レンズの収差を考慮する必要があるが、試料を走査

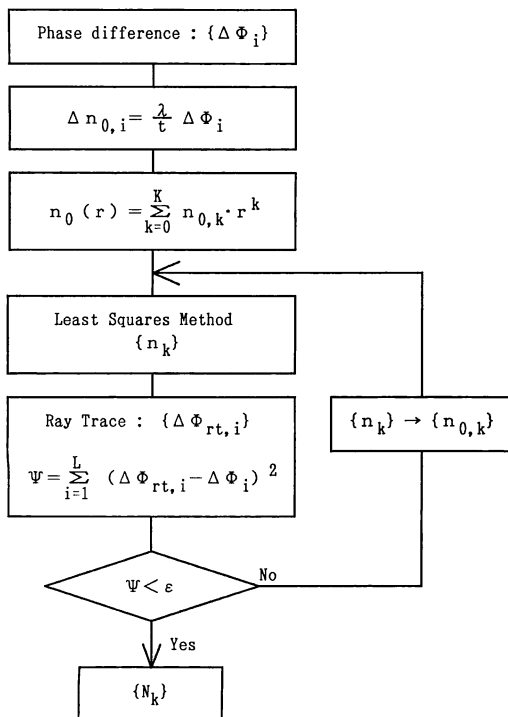


Fig. 2 Algorithm for ray curve correction.

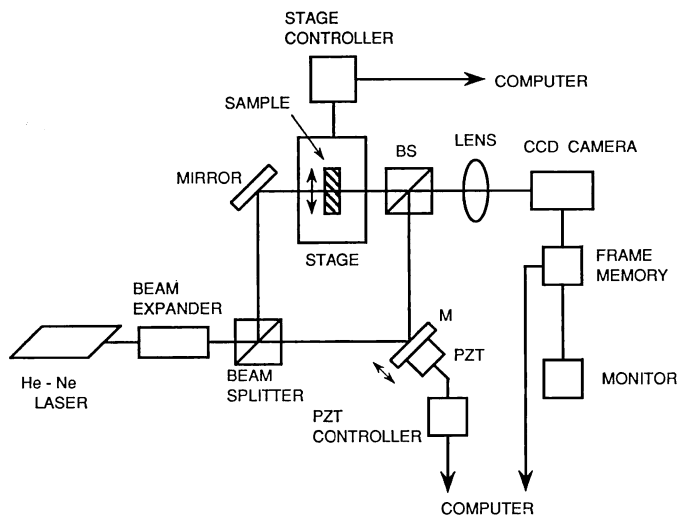


Fig. 3 Schematic diagram of the index-profile measuring interferometer.

する場合には、測定され得る点が常に同一点上に位置するため、結像レンズの収差による誤差は無関係となる。

3) 干渉縞全体を検出器上に投影する場合には、試料上の測定位置と検出器上の位置とを対応付けるため正確な結像倍率を考慮する必要がある。しかし、試料を走査すれば、撮像素子上の検出位置に結像される測定位置は常に同一点であるため、結像倍率が未知であっても試料走査の量を正確に知れば試料上の位置と屈折率分布との対応を正確に付けることができ、結像倍率は不必要となる。

なお、縞走査干渉法では一方の光路を λ/M (M は分割数) で変位させる必要があるが、本装置では 4 ステップ法 ($M=4$) を適用している。また、He-Ne レーザーを用いており、測定波長は 632.8 nm である。

4.2 精 度

干渉計の精度に影響を及ぼす大きな誤差要因は、波面の位相測定誤差、試料の走査誤差、および測定光線と試料とのアライメント誤差である。位相測定誤差は均質ガラスを用いた測定では、位相分布がほぼ線形になるとして見積もった。測定位相の直線からのずれを誤差として求め、 0.13λ の精度であることを確認した。

走査誤差は試料走査に用いるステージ精度で決定されほぼ $1\mu\text{m}$ である。アライメント誤差は測定試料からの測定光線の反射光をビームエキスパンダー内のピンホール上で測定し測定光線と試料との直角からのずれが $10''$ 以内であることを確認した。

5. 測 定 結 果

試料として、ピックアップレンズに使用されている radial 型 GRIN レンズを用いた。試料の直径は 4mm 、厚さは 1.384mm である。Fig. 4 に干渉計により測定された位相分布を示す。測定に用いた試料は軸対称性を持つと仮定し、試料中心を原点とする偶数次のみの多項式に近似し、屈曲補正を行い得られた屈折率分布を Fig. 5 に示す。Fig. 6 は、そのときの補正量を示した

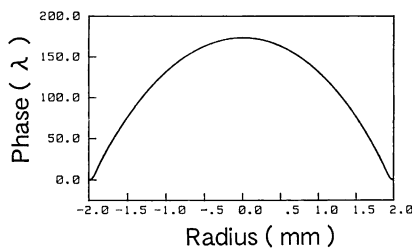


Fig. 4 Phase profile measured by the interferometer.

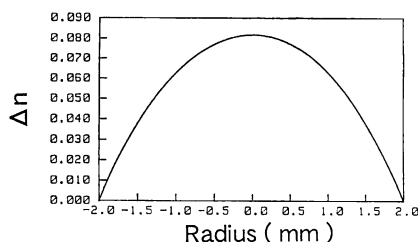


Fig. 5 Index profile corrected by the ray curve correction algorithm.

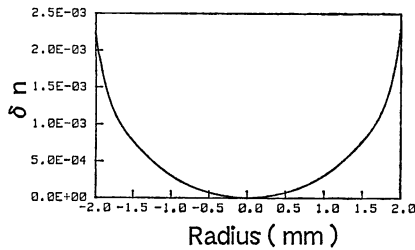


Fig. 6 Difference between corrected and uncorrected index profiles.

Table 3 Refractive index coefficients.

	Measured	Corrected
N 1	-1.9219×10^{-2}	-1.8921×10^{-2}
N 2	3.2867×10^{-4}	2.7487×10^{-4}
N 3	-6.6595×10^{-4}	-5.6858×10^{-4}
N 4	2.4994×10^{-4}	2.0575×10^{-4}
N 5	-3.3076×10^{-5}	-2.6251×10^{-5}

Table 4 Refractive index errors of test sample.

(a) Sample shape dependent errors.

Surface roughness	0.074λ	4.3×10^{-5} (P-V)
Wedge	10"	4.5×10^{-5}
Thickness error	$1 \mu\text{m}$	5.9×10^{-5}
Total		8.6×10^{-5} (P-V)

(b) Equipment dependent errors.

Phase measurement error	0.13λ	5.9×10^{-5} (P-V)
Alignment error of ray	10"	6.9×10^{-5}
Scanning error of sample	1μ	8.0×10^{-5}
Total		1.0×10^{-4} (P-V)

(c) Total error and reproducibility.

Sample shape dependent error	8.6×10^{-5} (P-V)
Error of interferometer	1.0×10^{-4} (P-V)
Fitting error	2.6×10^{-5} (P-V)
Convergence of correction	1.7×10^{-6} (P-V)
Total error	1.3×10^{-4} (P-V)
Reproducibility	2.6×10^{-5} (RMS)

ものである。また、Table 3 に補正前後の屈折率分布係数を示す。

得られた屈折率分布の総合的な精度は(1)試料の形状精度、(2)干渉計の精度、(3)補正を行う際の測定値の多項式への近似誤差、および(4)最適化プログラムの収束性に依存する。(3)には偶数次のみで近似を行ったこ

とによる非軸対称性による誤差も含まれるが本測定においては 2.6×10^{-5} (P-V) であり、特に屈折率分布の非軸対称性は大きくないと考えることができる。また、(4)の影響は 1.7×10^{-6} (P-V) 以下であることを確認している。

試料の形状精度に関し、式(2)~(4)から計算される誤差を Table 4(a) に、また、前節で述べた干渉計の精度が屈折率に及ぼす誤差を Table 4(b) に示す。また、試料形状精度、干渉計精度、近似誤差、および補正の収束性すべてを加味した総合的な精度を Table 4(c) に示す。Table 4(c) から最終的な精度が P-V 値で 1.3×10^{-4} 、また繰り返し精度が 2.6×10^{-5} (RMS) であることがわかる。

6. ま と め

干渉計を用いた屈折率分布の測定において、試料形状と精度との関係を明らかにするとともに、厚い試料を用いた測定精度を向上する方法を開発した。

また、実際に装置を試作し高精度測定が可能なことを確認した。

本研究を進めるにあたり、ご助言をいただきました諸限研究室長に深く感謝いたします。

文 献

- 1) M. Yoshii, T. Serizawa and N. Yamamoto: "A heterodyne interferometry system for refractive-index profile measurement," MOC '87 (1987) pp. 180-183.
- 2) C.E. Saxer and D.T. Moore: "Measurement of chromatic properties of gradient index glasses: Method and results," MOC/GRIN '89 (1989) pp. 200-203.
- 3) 遠山 実, 西 寿巳: "屈折率分布型レンズの収差測定と解析," 光学, **11** (1982) 546-552.
- 4) X. Zhu and K. Iga: "A scanning total reflection method for refractive-index profiling," Jpn. J. Appl. Phys., **28** (1989) 1497-1500.
- 5) T. Hashimoto, H. Matsuzaki, H. Tsuchida and K. Yamamoto: "High-precision measurement for refractive index distribution and dispersion using an improved scanning total reflection method," Jpn. J. Appl. Phys., **31** (1992) 1602-1605.
- 6) 佐々木一正, 初田 健: "光ファイバ母材屈折率分布測定における実測データの演算座標系への高精度変換法," 信学論 C-1, **J74-C-1** (1991) 255-257.
- 7) M. Ikeda, M. Tateda and H. Yoshikiyo: "Refractive index profile of a graded index fiber: Measurement by a reflection method," Appl. Opt., **14** (1975) 814-815.
- 8) A. Sharma, D.V. Kumar and A.K. Ghatak: "Tracing rays through graded-index media: a new method," Appl. Opt., **21** (1982) 984-987.
- 9) 武田光夫: "サブフリンジ干渉計測基礎論," 光学, **13** (1984) 55-65.