

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第6835697号
(P6835697)

(45) 発行日 令和3年2月24日(2021.2.24)

(24) 登録日 令和3年2月8日(2021.2.8)

(51) Int.Cl.

G01M 11/02 (2006.01)
G01N 21/41 (2006.01)

F 1

G01M 11/02
G01N 21/41H
Z

請求項の数 12 外国語出願 (全 20 頁)

(21) 出願番号 特願2017-206251 (P2017-206251)
 (22) 出願日 平成29年10月25日 (2017.10.25)
 (65) 公開番号 特開2018-77220 (P2018-77220A)
 (43) 公開日 平成30年5月17日 (2018.5.17)
 審査請求日 令和2年7月21日 (2020.7.21)
 (31) 優先権主張番号 16195864.0
 (32) 優先日 平成28年10月26日 (2016.10.26)
 (33) 優先権主張国・地域又は機関
　　歐州特許庁 (EP)

早期審査対象出願

(73) 特許権者 507332918
　　ヘレウス クヴァルツグラース ゲゼル
　　シャフト ミット ベシュレンクテル ハ
　　フツング ウント コンパニー コマンデ
　　イートゲゼルシャフト
　　Heraeus Quarzglas G
　　mbH & Co. KG
　　ドイツ連邦共和国 ハーナウ クヴァルツ
　　シュトラーセ 8
　　Quarzstrasse 8, D-6
　　3450 Hanau, Germany
(74) 代理人 100114890
　　弁理士 アインゼル・フェリックス=ライ
　　ンハルト

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】円柱状の光学的な対象物、特に光ファイバのプリフォームの屈折率プロファイルを求める方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

円柱状の光学的な対象物の半径方向の屈折率プロファイルを求める方法であって、前記光学的な対象物は、円柱 - 長手方向軸線を有しており、前記円柱 - 長手方向軸線を中心には、半径方向に対称に、層半径 r_k と層屈折率 n_k を有する少なくとも 1 つの層 k が延在し、偏向角度分布 (y) が測定され、前記偏向角度分布から、モデルに基づいて前記屈折率プロファイルが再構築され、偏向角度 y は、前記長手方向軸線に垂直な面における、前記光学的な対象物からの出射ビームと前記光学的な対象物への入射ビームとの間の角度として規定されており、前記面は、前記出射ビームおよび前記入射ビームを備え、前記出射ビームおよび前記入射ビームを備える前記面における y は、前記光学的な対象物への前記入射ビームの入射点と前記長手方向軸線を通り前記入射ビームに平行な線との間の間隔として規定されている方法において、

前記モデルは、以下の措置、すなわち、

- (a) 前記偏向角度分布の極値特定を含んでいる、測定された前記偏向角度分布 (y) の処理であって、ここで、処理された偏向角度分布 $'(y)$ が得られ、
- (b) 前記処理された偏向角度分布 $'(y)$ の、処理された屈折率プロファイル $n'(r)$ への変換
- (c) 前記層半径に対するオリエンテーション値 r^*_k と、仮説の屈折率プロファイル $n^*(r)$ の前記層屈折率に対するオリエンテーション値 n^*_k と、を含む、オリエンテーション値を定めるための、前記処理された屈折率プロファイル $n'(r)$ の評価

10

20

(d) 前記オリエンテーション値 $r^*_{k'}$ および $n^*_{k'}$ を有する前記仮説の屈折率プロファイル $n^*(r)$ をベースにした、シミュレートされた偏向角度分布 $\gamma'(y)$ の作成およびシミュレートされた屈折率プロファイル $n'_{\gamma}(r)$ への前記偏向角度分布の変換

(e) 措置 (d) での前記オリエンテーション値 $r^*_{k'}$ と $n^*_{k'}$ との繰り返しの整合による、前記シミュレートされた屈折率プロファイル $n'_{\gamma}(r)$ の、前記処理された屈折率プロファイル $n'_{\gamma}(r)$ へのフィットであって、ここで、フィットされた、シミュレートされた屈折率プロファイル $n^*(r)_{fit}$ が得られ、前記屈折率プロファイルは、整合されたパラメータ $r^*_{k, fit}$ および $n^*_{k, fit}$ によって規定されており、

(f) 前記整合されたパラメータ $r^*_{k, fit}$ および $n^*_{k, fit}$ を有する前記仮説の屈折率プロファイルとしての、前記屈折率プロファイルの取得
10 を含んでいる、

方法。

【請求項 2】

措置 (a) の前記極値特定は、複数の種々の平滑化パラメータを用いたスプライン関数を用いた、前記測定された偏向角度分布の平滑化である、

請求項 1 記載の方法。

【請求項 3】

前記極値特定では、最も内側の右側の極値 $y_{k, rechts}$ と、最も内側の左側の極値 $y_{k, links}$ と、が求められる、

請求項 2 記載の方法。
20

【請求項 4】

措置 (c) に従った前記処理された屈折率プロファイル $n'_{\gamma}(r)$ の前記評価時に、前記求められた極値 $y_{k, rechts}$ と $y_{k, links}$ とが、前記オリエンテーション値 $r^*_{k'}$ を定めるために使用される、

請求項 3 記載の方法。

【請求項 5】

前記求められた極値 $y_{k, rechts}$ と $y_{k, links}$ とが、層半径 $r_{k, rechts}$ または $r_{k, links}$ に再計算され、前記層半径が、前記オリエンテーション値 $r^*_{k'}$ を定めるために使用される、

請求項 3 記載の方法。
30

【請求項 6】

前記測定された偏向角度分布の前記処理は、修正を含んでおり、前記修正では、前記偏向角度分布の原点が調整される、

請求項 1 から 5 までのいずれか 1 項記載の方法。

【請求項 7】

前記偏向角度分布の前記原点の調整は、座標系の y 軸方向における、前記屈折率プロファイルの最も内側の右側の極値 $y_{k, rechts}$ と、最も内側の左側の極値 $y_{k, links}$ と、の間の中心へのシフトを含んでいる、

請求項 6 記載の方法。

【請求項 8】

前記偏向角度分布の前記原点の調整は、座標系の z 軸方向におけるオフセット分のシフトを含んでおり、前記オフセットは、最小二乗和法によって最も内側の右側の極値 $y_{k, rechts}$ と、最も内側の左側の極値 $y_{k, links}$ と、の間の中心にフィットされた直線と前記座標系のゼロ線との間の位置の差として計算される、
40

請求項 6 記載の方法。

【請求項 9】

措置 (b) での前記処理された屈折率プロファイル $n'_{\gamma}(r)$ の前記変換を、アーベル変換を用いて行う、

請求項 1 から 8 までのいずれか 1 項記載の方法。

【請求項 10】

10

20

30

40

50

「最小絶対残差」または「最小二乗法」に基づいて計算された、前記シミュレートされた屈折率プロファイル $n^{''}(r)$ と、前記処理された屈折率プロファイル $n'(r)$ との間の偏差が、所定の閾値を下回っている場合、フィットされた、シミュレートされた屈折率プロファイル $n^*(r)_{fit}$ が存在する、

請求項 1 から 9 までのいずれか 1 項記載の方法。

【請求項 1 1】

ステップ (e) による、前記シミュレートされた屈折率プロファイル $n^{''}(r)$ の、前記処理された屈折率プロファイル $n'(r)$ へのフィットに加えて、付加的に、措置 (d) の際に、前記パラメータ r^*_{k} および n^*_{k} の繰り返しの整合によって、前記シミュレートされた偏向角度分布 ${}^*(y)$ が、前記処理された偏向角度分布 ${}'(y)$ へフィットされ、ここで、フィットされた、シミュレートされた偏向角度分布 ${}^*(y)_{fit}$ が得られ、前記偏向角度分布は、整合されたパラメータ $r^*_{k, fit}$ および $n^*_{k, fit}$ によって規定されており、ここで、重み付け係数 G を有する、前記フィットされた、シミュレートされた屈折率プロファイル $n^*(r)_{fit}$ が、重み付け係数 ($1 - G$) を有する、前記フィットされた、シミュレートされた偏向角度分布 ${}^*(y)_{fit}$ と組み合わされることによって前記屈折率プロファイルがステップ (f) に従って得られ、ここで $0 \leq G \leq 1$ が有効である、

請求項 1 から 10 までのいずれか 1 項記載の方法。

【請求項 1 2】

前記整合されたパラメータ $r^*_{k, fit}$ および $n^*_{k, fit}$ が、プリフォーム製造プロセスの整合のために使用される、

請求項 1 から 11 までのいずれか 1 項記載の方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、円柱状の光学的な対象物、特に光ファイバのプリフォームの半径方向の屈折率プロファイルを求める方法に関する。ここでこの光学的な対象物は、円柱 - 長手方向軸線を有しており、この円柱 - 長手方向軸線を中心に、対称に、層半径 r_k と層屈折率 n_k とを有する少なくとも 1 つの層 k が延在している。ここでは偏向角度分布 (y) が測定され、ここから、モデルに基づいて、屈折率プロファイルが再構築される。

【0002】

この種の円柱状の光学的な対象物は、例えばファイバプリフォーム、光ファイバ、導光路または円柱レンズである。この種の対象物の重要な特性のうちの 1 つはその屈折率および屈折率の空間的な分布であり、特に半径方向の屈折率分布である。この半径方向の屈折率分布は以降で「屈折率プロファイル」とも称される。したがって例えばファイバプリフォームの屈折率プロファイルは、このプリフォームから線引きされる光ファイバの導波路特性を決める。ここで重要な光学的な対象物は、均一な、または階段状の屈折率プロファイルを有している。これは特に、ステップインデックスプロファイルを有する光学的なプリフォームであり、ここでは、比較的高い屈折率を有するコアが、より低い屈折率を有している少なくとも 1 つのクラッド層によって包囲されている。

【0003】

しかし屈折率分布は、直接的に測定可能ではない。したがってこれは、通常、間接的に、光学的な要素の体積領域を通して照明していく光ビームの偏向または干渉として求められる。ここでこの少しづつ、通して行われる照明を以降で「スキャン」と称する。ビーム入射箇所（入射ビーム）での放射方向に関する、出射する光ビーム（出射ビーム）の干渉または偏向から、元来の原因、すなわち、光学的な要素における空間的な屈折率分布を推測することができる。光ビームのスキャン時に、円柱 - 長手方向軸線に対して横向きに（ y 方向において）測定された偏向角度の群は、ここでは、偏向角度分布 (y) とも称される。より分かりやすくするためおよびより明確にするために、幾何学形状的な関係が図 3 に概略的に示されている。偏向角度 θ は、出射ビーム 33 と入射ビーム 32 との間の角度

10

20

30

40

50

として規定されており、 y は、円柱 - 長手方向軸線 Lと入射ビーム 3 2 の入射点 Eとの間の間隔として規定されている。屈折率のステップインデックス分布を有する半径対称の対象物に対して、これは以下の式(1)に基づいて、数学的に計算可能である。

【0004】

【数1】

$$\Psi_m(y) = \begin{cases} 2 \cdot \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^j \left[\arcsin\left(\frac{y}{r_k} \cdot \frac{n_0}{n_{k-1}}\right) - \arcsin\left(\frac{y}{r_k} \cdot \frac{n_0}{n_k}\right) \right], & r_{j+1} \cdot \frac{n_{j+1}}{n_0}, r_{j+1} \cdot \frac{n_j}{n_0} \leq |y| < r_j \cdot \frac{n_j}{n_0} \text{ の場合} \\ 2 \cdot \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^{j-1} \left[\arcsin\left(\frac{y}{r_k} \cdot \frac{n_0}{n_{k-1}}\right) - \arcsin\left(\frac{y}{r_k} \cdot \frac{n_0}{n_k}\right) \right] + 2 \cdot \arccos\left(\frac{y}{r_j} \cdot \frac{n_0}{n_{j-1}}\right), & r_{j+1} \cdot \frac{n_{j+1}}{n_0} \leq |y| < r_{j+1} \cdot \frac{n_j}{n_0} \text{ の場合} \\ 0, & |y| \geq r_1 \text{ の場合} \end{cases} \quad (1)$$

10
20

【0005】

ここで、以下の記号は次のことを意味している。

m 対象物の層の数

n_0 周囲に存在する媒体の屈折率

n_k k 番目の層の屈折率

r_k k 番目の層の半径

【0006】

式(1)に従って、測定データに基づく「偏向角度分布」(y)から屈折率プロファイルを計算するために、既知の数学的な方法は、いわゆる「アーベル変換」に基づく。

【0007】

【数2】

$$n[r(y)] = n_0 \cdot \exp\left(\frac{1}{\pi} \cdot \int_y^R \frac{\Psi(t)dt}{\sqrt{t^2 - y^2}}\right) \quad (2)$$

ここで r は、ビーム経過に対する対象物の円柱 - 長手方向軸線の最も短い間隔であり、すなわち：

【数3】

$$r(y) = y \cdot \exp\left(-\frac{1}{\pi} \cdot \int_y^R \frac{\Psi(t)dt}{\sqrt{t^2 - y^2}}\right)$$

であり、

R は、屈折率分布に対する基準点、すなわち基準屈折率(対象物外の大気またはインデックス液体)の半径方向の位置であり、

は、/ t の代わりに用いられている。

【背景技術】

【0008】

米国特許第4227806号明細書(US 4,227,806 A)には、光ファイバのためのプリ

30

40

50

フォームのパラメータを、非破壊特定するための方法が記載されている。ここで、プリフォームは、コア - クラッド構造体内へ横断して入射するレーザービームによってスキャンして読み出され、出射ビームの偏向角度が測定され、これに続いて、屈折率分布が既知であるプリフォームの理論的または経験的な偏向角度分布と比較される。測定時には、プリフォームは、浸し液が入れられた槽内に位置しており、これによって、偏向角度が過度に大きくなることはない。

【0009】

米国特許第4441811号明細書(US 4,441,811 A)は、円柱状の、透明な光学的なプリフォームの屈折率分布を特定するための方法および装置を記載している。ここでも、
10 浸し液内に入れられているプリフォームが、光軸に対して垂直に延在する、横断して入射するレーザービームによってスキャンして読み出される。ここでこのレーザービームは、プリフォームのガラスによって偏向され、レンズによって、位置付け可能な検出器上に結像される。偏向角度分布から、屈折率プロファイルが、数値的な積分を用いて計算される。別のプリフォームパラメータ、例えばプリフォーム直径、コア直径、離心率およびCCR
DR値(Cladding to Core Diameter Ratio)もここから特定することができる。

【0010】

アーベル変換を用いて、横断方向に測定された偏向角度分布から屈折率プロファイルを再構築する方法は、米国特許第4744654号明細書(US 4,744,654 A)、米国特許第5078488号明細書(US 5,078,488 A)および米国特許第4515475号明細書(US 4,515,475 A)においても読み取られる。以下の2つの専門書も、この種の方法を説明している。MICHAEL R. HUTSEL AND THOMAS K. GAY LORD「Concurrent three-dimensional characterization of the refractive-index and residual-stress distributions in optical fibers」、APPLIED OPTICS, OPTICAL SOCIETY OF AMERICA, WASHINGTON, DC; US, 第51巻, Nr. 22, 2012年8月1日(2012-08-01), 5442-5452頁(ISSN: 0003-6935, DOI: 10.1364/AO.51.005442)およびFLEMING S. ET AL:「Nondestructive Measurement for Arbitrary RIP Distribution of Optical Fiber Preforms」, JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, IEEE SERVICE CENTER, NEW YORK, NY, US, 第22巻, Nr. 2, 2004年2月1日(2004-02-01), 478-486頁(ISSN: 0733-8724, DOI: 10.1109/JLT.2004.824464)。

【0011】

しかし、式(2)に従った、アーベル変換を用いた、横断方向で測定された偏向角度分布からの、屈折率プロファイル $n(r)$ の容易な再構築によって、実際の屈折率プロファイルに対する、無視できない相違が生じてしまう。これに対する原因是、透明な対象物と周辺との間の境界面もしくは半径方向の屈折率段階の境界面での屈折率不連続性の際に生じる既知の測定アーチファクトである。図2に基づいてより詳細に説明されるように、屈折率変化の境界面での、低い屈折率から高い屈折率への(内から外への観察時の)測定時には、光学的な対象物の境界面近傍の体積領域において、基本的に測定不可能な領域が生じる。再構築された屈折率プロファイル、例えばグレーディングプロファイルの典型的な相違および誤りは、プロファイル経過の丸めおよび過度に低い段階高さである。タイトル「Index profile reconstruction of fiber preforms from data containing a surface refraction component(Applied Optics 29(1990), 7月, Nr. 19, 2899-2907)」を有する、Werner

10

20

30

40

50

J. Glaatschning著の専門記事が、測定不可能な領域のこの問題を扱っている。不連続性直前の、偏向角度分布の内部の3つの測定点に基づいた補間によって、測定不可能な領域における、元来欠如している偏向角度を、ほぼ補填することを提案する。

【0012】

しかし、3つの測定点に基づいたこの補間は、全てのケースにおいて良好な結果をもたらすわけではない。この問題を解決するために、米国特許第8013985号明細書(US 8,013,985 B2) (公報 米国特許出願公開第2010/245805号明細書(US 2010/245805 A1))は、このような再構築方法の変形を提案する。これは、透明な円柱状の対象物、例えばファイバプリフォームの屈折率プロファイルを測定するために、ビーム偏向角度関数が測定され、屈折率プロファイルが、測定されたデータから、近軸の放射理論に基づいて数学的に再構築され、アーベル関数に逆アーベル変換を加えることによって再構築されることによって行われる。測定時には、測定されるべきファイバプリフォームは、レーザーと変換レンズとの間に配置される。プリフォームは、中央軸と、円柱クラッド面とを有しており、これらはプリフォーム半径Rを規定する。円柱クラッド面に、高さxにおいて入射する入射ビームは、プリフォームにおいて偏向され、出射ビームとして、別の角度で再び出射する。これは光検出器を用いて検出され、制御部によって処理される。偏向角度は、出射ビームと入射ビームとの間の角度として規定され、これはレーザービームの高さxを変えることによって変えられ、偏向角度分布mが測定される。測定された偏向角度分布に、数値的なモデルを用いて、見込まれる屈折率プロファイルが整合される。これは、実際の屈折率プロファイルにとって重要である。

10

20

【0013】

このために、測定された偏向関数で対称相関が行われ、これによって中央座標が規定される。測定された偏向関数は、この中央座標を中心に2つの半部に分けられ、2つの半部のそれぞれに対して、屈折率ハーフプロファイルが計算され、これによって各半部に対して、結果として生じる、見込まれる、インデックスプロファイルが得られる。屈折率プロファイル計算にとって重要なパラメータは、プリフォーム半径Rと、プリフォームの屈折率である。目標角度分布tは、測定された偏向関数に、繰り返し、整合される。ここで測定点は、境界面(屈折率不連続性)の近傍において、プリフォーム内で、またはプリフォームの縁部で、空けておかれる。数学的な関数の計算による繰り返しの整合のこの方法は、以降で「フィッティング」または「フィット」と称される。米国特許第8013985号明細書(US 8,013,985 B2)では、このフィットは次のことによって行われる。すなわち、上記の式(1)において(しかし、式の第2行に挙げられた横断部分を考慮することなく)、屈折率プロファイルの未知のパラメータが代入され、すなわち、プリフォーム半径R(もしくは屈折率不連続性の半径)に対する値ならびに未知の屈折率値_iが代入されることによって行われ、ここでこれらの未知のパラメータは次のように変えられる。すなわち、ここで得られた目標角度分布tが、測定されるべき偏向角度分布mに最良に整合するように変えられる。したがって目標角度分布tは、未知のパラメータRおよび_iによって、測定された偏向角度分布mに整合される(フィットされる)。

30

【0014】

このようにして整合された、シミュレートされた目標角度分布tをベースにして、再構築された屈折率プロファイル_i^{*}(r)が計算される。これは、内部の対象領域の半径R_{FIT}よりも大きい、再構築されたプリフォーム半径R^{*}まで達する。その屈折率プロファイルが少なくとも1つの不連続性を有している円柱状の対象物に対して、それぞれ不連続性によって規定されている種々の対象物領域に対する方法が使用される。

40

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0015】

この方法では、測定された偏向角度分布mに、シミュレートされた目標角度分布tが、未知のパラメータのフィットによって整合され、シミュレートされた目標角度分布から、屈折率プロファイルのさらに外側に位置する不連続性の境界面まで達し得る半径方向の

50

屈折率分布が計算される。

【0016】

したがって、複数の、半径方向において、屈折率不連続性によって分断されている層を有している光学的な対象物の完全な屈折率プロファイルの検出は、外から内への、各不連続性によって規定されている層の連続的な測定、計算および見込みを必要とする。シミュレートされた目標角度分布 t のフィット時にも、再構築された屈折率プロファイル $n^*(r)$ へのその再計算時にも、体系的かつ数的な誤りが生じ得る。

【0017】

さらに、偏向角度分布同士の比較、すなわち、シミュレートされた偏向角度分布と測定された偏向角度分布との比較は、特に分かりやすいものではなく、フィッティングが最適であるか、場合によってはフィッティングがどの程度最適であるかを確認するために、または後からの修正またはさらなる変更が必要であるか、場合によっては後からの修正またはさらなる変更のどのような値が必要であるかを確認するために、高い程度の経験が必要であることが判明している。

【0018】

したがって本発明の課題は、妥当性、正確性および再現可能性に関して改善されている、半径方向に対称のまたは類似的に半径方向に対称の屈折率分布を有する円柱状の透明な対象物の屈折率プロファイルを求めるための方法を提供することである。

【課題を解決するための手段】

【0019】

上述の課題は、冒頭に記載した方法に基づいて、本発明に相応して、モデルが以下の措置、すなわち、

(a) 偏向角度分布の極値特定を含んでいる、測定された偏向角度分布 y の処理であって、ここで、処理された偏向角度分布 y' が得られ、

(b) 処理された偏向角度分布 y' の、処理された屈折率プロファイル $n'(r)$ への変換

(c) 層半径に対するオリエンテーション値 r^*_k と、仮説の屈折率プロファイル $n^*(r)$ の層屈折率に対するオリエンテーション値 $n^*_{k'}$ を含む、オリエンテーション値を定めるための、処理された屈折率プロファイル $n'(r)$ の評価

(d) オリエンテーション値 r^*_k および $n^*_{k'}$ を有する仮説の屈折率プロファイル $n^*(r)$ をベースにした、シミュレートされた偏向角度分布 y'' の作成およびシミュレートされた屈折率プロファイル $n''(r)$ への偏向角度分布の変換

(e) 措置 (d) でのパラメータ r^*_k と $n^*_{k'}$ の繰り返しの整合による、シミュレートされた屈折率プロファイル $n''(r)$ の、処理された屈折率プロファイル $n'(r)$ へのフィットであって、ここで、フィットされた、シミュレートされた屈折率プロファイル $n''(r)$ が得られ、このプロファイルは、整合されたパラメータ $r^*_{k,f_i t}$ および $n^*_{k,f_i t}$ によって規定されており、

(f) 整合されたパラメータ $r^*_{k,f_i t}$ および $n^*_{k,f_i t}$ を有する仮説の屈折率プロファイルとしての、屈折率プロファイルの取得を含んでいることによって解決される。

【0020】

偏向角度分布 y は、通常、いわゆるプリフォーム分析機によって求められる。ここで、このプリフォームは、浸し液が入っている測定セルに入れられ、偏向角度分布が測定される。

【0021】

「アーベル変換」を使用することを当業者に促す従来技術とは異なり、本発明はステップ (e) から (f) によるこのような方法の変形を教示する。ここでこれらのステップは、シミュレートされた屈折率プロファイル ($n''(r)$) の、第2の屈折率プロファイル ($n'(r)$) への繰り返しのフィットを規定している。

【0022】

10

20

30

40

50

処理された偏向角度分布' (y)

本発明の方法では、このように測定された偏向角度分布 (y) から、第 1 のステップにおいて、処理された偏向角度分布' (y) が得られる。この目的のために、測定された偏向角度分布 (y) が分析され、極値が特定される。このような極値は、内部の境界面または光学的な対象物の円柱クラッド面等の屈折率変化の領域において生じる。分かりやすくするために、以降の説明は、ステップインデックスプロファイルを有する光学的なプリフォームに関する。これは少なくとも 2 つの層と、これに従って、1 つまたは複数のこの種の屈折率変化を有している。その下には、プリフォームの円柱クラッド面が位置している。

【0023】

10

半径方向に対称な対象物の偏向角度分布を少なくとも 2 つの極値を示し、これらは、同一の層 k での屈折率変化によって生起される。このような極値特定の際に、測定された偏向角度分布の極値 $y_{k, \text{max}}$ の位置が特定される。この位置は、既に近似的に、屈折率変化が生じる両側のエッジ（該当する層の半径によって、数的に規定される）である。このような極値特定は以下で、「エッジファインディング」とも称される。

【0024】

ここで、偏向角度分布の測定データがカルテシアン座標系に関連し、ここではこの座標系の y 軸に関連して記載がされており、これに対して、層の半径は、通常、別の座標系（半径系）に関しており、半径 r に関連して記載がされている、ということに留意されたい。屈折率の相違が小さく、屈折が弱い場合には、この差も小さいことがあり、したがって、 y 値と r 値との間に差が生じないことがしばしばある。これは、文献では「Approximations-Methode」、「Straight-Line-Approximation」または「Keine-Brechung-Naeherung」と称される。

20

【0025】

30

エッジファインディングの際には、異常値または測定値ノイズが原因で、エッジが誤って推測されてしまうことはできるだけ回避されるべきである。これには、スプライン関数による、測定された偏向角度分布の平滑化が、複数の種々の平滑化パラメータを用いて行われる手法が特に良好に適していることが判明している。スプライン関数とは、複数の、合成された高次の多項式である。比較的弱い平滑化パラメータを繰り返し使用することによって、その時々の極値は、次第に、各繰り返しの際に、実際の極値の方向へと向かう。

【0026】

このようにして、エッジファインディングの際に、有利には、最も内側の右側の極値 $y_{k, \text{rechts}}$ と、最も内側の左側の極値 $y_{k, \text{links}}$ とが求められる。これらは、上述したように、近似的に、屈折率プロファイルの k 番目の層の相応するエッジに相当する。ここでこれは例えば、コアの外側のエッジまたはクラッド層の外側のエッジである（しかし、屈折率が外側から内側へと増大するという条件のもとでは、全反射は生じない。なぜなら、場合によっては、該当するエッジが実際には測定不可能な領域に位置しているだろうからである）。このようにして求められた右側および左側のエッジは、プリフォームの実際の中央点を定めるのに良好に適している。

40

【0027】

さらに、測定された偏向角度分布の処理は、有利には、修正を含んでいる。ここでは、偏向角度分布の原点が調整される。

【0028】

原点とはここでは、カルテシアン座標系における偏向角度分布の座標原点のことであり、これを通って、($y = 0$ の際に) プリフォームの円柱長手方向軸線が延在するべきである。 y 軸線に沿ったシフトが発生し得る。なぜなら、プリフォーム分析機を用いた偏向角度分布の測定時に、 y 軸線が、測定セルの幾何学的形状を介してのみ定められているからである。しかし測定セルの中心は、必ずしも、プリフォームの長手方向軸線に一致するのではない。

50

【0029】

したがって偏向角度分布の原点の調整は例えば、最も内側の右側の極値 $y_{k, \text{rechts}}$ と、最も内側の左側の極値 $y_{k, \text{links}}$ との間の中心への、座標系の y 軸の方向へのシフトを含んでいる。

【0030】

さらに、全体的な角度分布は、垂直軸線の方向におけるシフト寄与を備える、座標原点のオフセットを有し得る（偏向角度分布の座標系では、これは θ 軸である）。有利には、座標系のゼロ線 ($y = 0$) と直線との間の間隔を求めることによってオフセットが求められる。これは、最小二乗和法を用いて、屈折率プロファイルの最も内側の右側の極値 $y_{k, \text{rechts}}$ と、最も内側の左側の極値 $y_{k, \text{links}}$ との間の中心でフィットされる。オフセットを除去するために、偏向角度分布は、このようにして特定された間隔の分だけ、座標系の θ 軸の方向へとシフトされる。10

【0031】

直線のフィットのために、エッジ間の区間全てが考慮されなければならないのではなく、有利には、区間全体の 20 %よりも短い、比較的短い部分区間が使用される。

【0032】

オフセットを求めるための、択一的な、同様に有利な方法の形態では、最も内側の右側の極値 $y_{k, \text{rechts}}$ と、最も内側の左側の極値 $y_{k, \text{links}}$ との間の中心へ、より高次（例えば 9 次）の多項式がフィットされる。ここでも、エッジ間の部分区間または区間全体が選択可能である。20

【0033】

オフセットを求めるための、別の択一的な、場合によっては有利な方法の形態では、偏向角度分布は次のようにシフトされる。すなわち、全ての等間隔に測定された偏向角度の和が 0 であるようにシフトされる。

【0034】

評価および処理の結果は、自身の原点に関して、座標原点に整合され、処理された偏向角度分布 $n'(y)$ である。

【0035】処理された屈折率プロファイル $n'(r)$

次のステップでは、処理された偏向角度分布 $n'(y)$ から、変換によって、屈折率プロファイルが作成される。これはここでは「処理された屈折率プロファイル $n'(r)$ 」と称される。元来の、測定された偏向角度分布からの屈折率プロファイルの作成は、このためには不要である。30

【0036】

例えばアーベル変換、例えば上述の式 (2) に基づいて行われるこの変換のために、偏向角度分布の原点の事前の整合が非常に役立つ、ということが判明している。整合が行われない場合には、実際の原点の小さい偏差さえ、変換された屈折率分布での誤りを生じさせてしまう。

【0037】

処理された屈折率プロファイル $n'(r)$ には常に、「測定不可能な領域」からの屈折率値および半径値が欠如している。したがって、これは、プリフォームの実際に期待されるべき屈折率プロファイルを表していない。しかし、これは分かりやすいオリエンテーション補助であり、ここから、相対的に一義的に適切なオリエンテーション値が、「仮説の屈折率プロファイル」 $n^*(r)$ に対して導出可能である。これは、後続するステップに対する基礎となる。導出されるべきオリエンテーション値は、層半径に対するオリエンテーション値 r^*_k と、仮説の屈折率プロファイル $n^*(r)$ の層屈折率に対するオリエンテーション値 n^*_k を含んでいる。特に、屈折率に対しては、しばしば、経験値と、データバンク内に格納されているデータとが存在する。これらは付加的に、屈折率の特定のために使用可能である。40

【0038】

最も簡単な場合には、措置(c)にしたがった、処理された屈折率プロファイル $n'(r)$ の評価時に、求められた極値 $y_{k,\text{rechts}}$ と $y_{k,\text{links}}$ とが、オリエンテーション値 r^*_k を定めるために使用される。

【0039】

しかしこれは、上で、Approximations-Methodeと関連して説明されているように、近似的にのみ正しい。したがって、特に有利な方法の形態では、求められた極値 $y_{k,\text{rechts}}$ と $y_{k,\text{links}}$ とが、層半径 $r_{k,\text{rechts}}$ または $r_{k,\text{links}}$ に再計算され、計算された層半径が、オリエンテーション値 r^*_k を定めるために使用される。

【0040】

層半径への極値の再計算は、ここで、有利には、以下の式(3)および(4)に基づいて行われる。

【0041】

$$r^*_k = n_0 / n_{k-1} * y_{k,\text{max}} \quad (3)$$

$$r^*_k = n_0 / n_k * y_{k,\text{max}} \quad (4)$$

ここで、 n_0 = 周辺の媒体の屈折率

n_{k-1} = 層 k に外側に接している層の屈折率

n_k = 層 k の屈折率

$y_{k,\text{max}}$ = 層 k の絶対値的に最大の偏向角度の位置

【0042】

式(3)は、境界面で、 r_k の際に全反射が生じない場合に有効である。そうでない場合には式(4)が有効である。

【0043】

仮説の屈折率プロファイルは、処理された屈折率プロファイル $n'(r)$ と、このプロファイルから導出されたオリエンテーション値に基づいている。これらは同様に、「測定不可能な領域」からの屈折率および半径に対する見込み値を含む。これは既に、プリフォームの実際に予期されるべき屈折率プロファイルを再現している、またはこの屈折率プロファイルに近似している。

【0044】

シミュレートされた屈折率プロファイル $n''(r)$

仮説の屈折率プロファイル $n^*(r)$ から、次のステップにおいて、シミュレートされた偏向角度分布 $n''(y)$ が作成される。この再計算には、例えば、冒頭に記載した式(1)が適している。したがってシミュレートされた偏向角度分布 $n''(y)$ は、プリフォームの屈折率プロファイルの想定(すなわち仮説の屈折率プロファイル $n^*(r)$)に基づいている。これは同様に、処理された屈折率プロファイル $n'(r)$ の元来の測定値の修正および評価の後に導出される。

【0045】

例えば上述の式(2)に基づいた、シミュレートされた偏向角度分布 $n''(y)$ の変換によって、同様に、シミュレートされた屈折率プロファイル $n''(r)$ が得られる。

【0046】

したがって、シミュレーションによる、処理された屈折率プロファイル $n'(r)$ からの、仮説の屈折率プロファイル $n^*(r)$ の補助構築を介して、シミュレートされた屈折率プロファイル $n''(r)$ が得られる。シミュレートされた屈折率プロファイル $n''(r)$ が処理された屈折率プロファイル $n'(r)$ に近似しているほど、仮説の屈折率プロファイル $n^*(r)$ に基づく想定は実際に近づく、すなわち、プリフォームの実際の屈折率プロファイル $n(r)$ に近づく。

【0047】

実際の、再構築された屈折率プロファイル $n(r)$

理想的な場合には、シミュレートされた屈折率プロファイル $n''(r)$ と、処理された屈折率プロファイル $n'(r)$ との一致の際には、これに従って、シミュレーションに基づ

10

20

30

40

50

く仮説の屈折率プロファイル $n^*(r)$ が、プリフォームの実際の屈折率プロファイルを再現するだろう。

【0048】

実際には、正確な一致は実現されない。しかし、処理された屈折率プロファイル $n'(r)$ への、シミュレートされた屈折率プロファイル $n''(r)$ の繰り返しの整合によって、十分に、かつ任意に正確な整合が得られる。繰り返しは、ステップ (d) にしたがったシミュレーションの、少なくとも 1 回の敢行を含んでいる。結果は、十分に正確な、フィットされた、シミュレートされた屈折率プロファイル $n''(r)_{fit}$ であり、これは、できるだけ、または十分に整合されたパラメータ $r^*_{k, fit}$ および $n^*_{k, fit}$ によって規定されている。整合されたパラメータ $r^*_{k, fit}$ および $n^*_{k, fit}$ を伴う、このシミュレーションに正確に基づく仮説の屈折率プロファイルは、したがって、同時に、再構築された、プリフォームの実際の屈折率プロファイルを表している。
10

【0049】

十分にフィットされた、シミュレートされた屈折率プロファイル $n''(r)_{fit}$ が存在しているか否かの数学的な判断基準として、シミュレートされた屈折率プロファイル $n''(r)$ と処理された屈折率プロファイル $n'(r)$ との間の偏差が、所定の閾値を下回っているか否かが計算されてよい。偏差の計算は、有利には、「最小絶対残差」に基づいて、または「最小 - 二乗法」に基づいて行われる。等間隔の半径の場合には、絶対残差はいわゆる補償面に相応する。

【0050】

本発明に従って、最適なパラメータ $r^*_{k, fit}$ および $n^*_{k, fit}$ を見出すこと、および偏向角度分布の面に基づくのではなく、屈折率プロファイルに基づいて、十分に整合された（フィットされた）プロファイルを見出すことによって、測定結果の妥当性、正確性および再現可能性に関して簡易化および改善が実現される。
20

【0051】

理想的な場合には、光学的な対象物の各層は、層半径 r_k 全体にわたって、設定された層屈折率 n_k を示す。しかし実際には、次の偏差が存在する。すなわち、層屈折率 n_k が、公称値を中心に変動することがあり、その経過傾向が一定の値から偏差することがある。屈折率プロファイルの再構築は、本発明の方法に基づいて、理想的なステッププロファイルを前提条件としない。偏差は、実際の層屈折率の中央値に平均化される。これは同様に、事前に設定された屈折率勾配を有する層に対して当てはまる。
30

【0052】

本発明の方法の特に有利な実施形態では、措置 (d) の際に、措置 (e) による、シミュレートされた屈折率プロファイル $n''(r)$ の、処理された屈折率プロファイル $n'(r)$ へのフィットに加えて、パラメータ $r^*_{k, fit}$ および $n^*_{k, fit}$ の繰り返しの整合による、シミュレートされた偏向角度分布 $\alpha^*(y)$ の、処理された偏向角度分布 $\alpha'(y)$ へのフィットが行われる。ここで、フィットされた、シミュレートされた偏向角度分布 $\alpha''(y)_{fit}$ が得られる。これは、整合されたパラメータ $r^*_{k, fit}$ および $n^*_{k, fit}$ によって規定されており、ここで、屈折率プロファイルがステップ (f) に従って得られる。これは、重み付け係数 G を有する、フィットされた、シミュレートされた屈折率プロファイル $n''(r)_{fit}$ が、重み付け係数 ($1 - G$) を有する、フィットされた、シミュレートされた偏向角度分布 $\alpha''(y)_{fit}$ と組み合わされることによって行われる。ここで $0 \leq G \leq 1$ が有効である。
40

【0053】

実際の屈折率プロファイル $n(r)$ の再構築のために、ここでは、重み付けされたパラメータが使用される。これは、一方で、フィットされた、シミュレートされた屈折率プロファイル $n''(r)_{fit}$ からの屈折面の観察によって、および他方で、フィットされた、シミュレートされた偏向角度分布 $\alpha''(y)_{fit}$ に基づく、角度面の観察によって得られる。これによって、予期せぬ測定値変動または再計算誤りが付加的に除去され、このようにして、実際の屈折率プロファイルの再構築時に、より高い精度が得られる。
50

【0054】

実際の屈折率プロファイル $n(r)$ の再構築に基づいて求められたパラメータ、特に、整合されたパラメータ $r^*_{k, fit}$ および $n^*_{k, fit}$ は、有利には、プリフォーム製造プロセスの整合のために使用される。

【0055】

以降で、本発明を、実施例および図面に基づいて詳細に説明する。

【図面の簡単な説明】**【0056】**

【図1】種々の平滑化パラメータ p に対する、これに属するスプライン関数を伴う測定された偏向角度関数の一部

10

【図2】図1の、測定された偏向角度分布 ($p = 1$) から計算された屈折率分布

【図3】測定不可能な領域を示すための均一の屈折率分布を有する、ロッドを通る最大の最小半径 r^* を有する放射経過

【図4】基礎となる偏向角度分布の原点におけるシフトの作用を示すための、種々の屈折率分布を伴うダイヤグラム

【図5】処理された屈折率プロファイル $n'(r)$ と、それを評価することによってモデリングされた、ステッププロファイルを有するプリフォームに対する仮説の屈折率プロファイル $n^*(r)$ とを伴うダイヤグラム

【発明を実施するための形態】**【0057】**

20

本発明の方法は、円柱状の光学的な対象物、例えば光学的なプリフォームの屈折率プロファイルを求めるためのものである。プリフォームの屈折率プロファイルは、直接的に測定可能ではなく、したがって間接的に、プリフォームの体積領域を通して照明する光ビームの偏向として求められる。出射する光ビームの偏向から、プリフォームの屈折率分布が推測可能である。

【0058】

偏向角度分布の測定は、市場で入手可能な、York Technology Ltd 社のプリフォーム分析機 P-102 を用いて行われる。この機器の通常の動作波長は、632.8 nm である。しかし、他の波長も使用可能である。この機器は、偏向角度分布を、いわゆる Dynamik-Spatial-Filting-Technique に基づいてほぼ自動的に求める。ここでは、コリメートされた光が、プリフォームによって屈折され、偏向角度 でこれを離れる。プリフォームの後方に、球面レンズが存在しており、これは、偏向角度 を有する各ビームを、焦点面内の点に結像する。

30

【0059】

ここでは、扇形の空白部分を有する回転ディスクが、間隔 R で、光軸の下方に存在する。プリフォームは、液浸オイルで満たされている測定セル内に取り付けられる。これは、ステップモータを用いて y 方向（測定ビームの主要伝播方向 x に対して垂直かつ高さ方向 z に対して垂直）に動かされ得る。結像面には、フォトダイオードが検出器として位置付けられている。回転ディスクの空白部分は刃のように作用し、各ビームがこれを通過する。これは、十分な屈折（偏向）を有しており、これは結像面において、偏向角度分布の空間的な分布を作成する。プリフォーム分析機 P-102 は、全ての必要な屈折を自動的に実施する。したがって直接的に、偏向角度分布 (y) のデータアレイがプロットされ、出力され、格納され得る。

40

【0060】

図1のダイヤグラムは、典型的な、このようにして測定された偏向角度関数を、プリフォームの例で示している。ここで、コアロッドは、ドーピングされていない石英ガラスから成り、フッ素がドーピングされている石英ガラスからなる内側のクラッド層および同様にドーピングされていない石英ガラスから成る外側のクラッド層によって包囲されている。偏向角度（度）は、 y 軸に沿った位置に対して記入されている（単位は mm）。「 $P = 1$ 」が付けられている曲線は、測定曲線に相当する。ダイヤグラムでは、さらに、複数

50

のスプライン関数が、種々の平滑化パラメータ $p < 1$ に対して記入されている。これらは、種々の平滑化段階の作用を示し、以降でさらに詳細に説明される。

【0061】

偏向角度分布からの、屈折率分布 $n(r)$ の計算は、アーベル変換（上述の式2）を用いて行われる。図2の相応するダイヤグラムでは、相対的な屈折率 $n - n_0$ が、半径 r に対して記入されている（単位はmm）。ここで、例示的にのみ示された曲線は、図1の測定された偏向角度分布（ $p = 1$ ）から、数的な積分によって計算されたものである。領域21における曲線経過はコアロッドを表しており、領域22における曲線経過は内側のクラッド層を表しており、領域23における曲線経過は外側のクラッド層を表している。

【0062】

しかし、このような測定結果は、正しくはない。その理由の1つは、上方への屈折率変化時の、測定方法に起因する測定不可能な領域の発生であり、これは、コアにおいて、内側のクラッド層に比べて高い屈折率を有する光ファイバにとって典型的である。誤りの原因は図3において、簡単なケースに即して示されている。すなわち、屈折率 n_0 を有するインデックス整合液（浸し液）内に入れられている均一な屈折率分布 n_1 を有するロッドに即して示されている。ここで n_0 は n_1 よりも小さい。ロッドのスキャン時には、入射箇所Eに接線に沿って発生するビーム32が、ロッドの中心に向かって屈折され、別の伝播方向を有する出射ビーム33として、再び、ロッドから出射する。したがってビーム経過は、図3に示されたようになる。したがって、この測定の際に、接線に沿って通して照明され得ない領域31が生じる。この結果、領域 $r^* < r < r_1$ において、偏向角度は測定不可能であり、その結果、再構築された屈折率値が、実際の屈折率よりも低くなることは明らかである。

【0063】

測定された偏向角度分布の評価およびモデリングを伴う、以降で説明するプロシージャーの目的は、この体系的な測定誤りの補償であり、実際の屈折率プロファイル $n(r)$ の実質的な再構築である。

【0064】

測定された偏向角度分布の評価および処理

評価を開始するために、測定された偏向角度分布の極値 $y_{k, \max}$ の位置が特定される。ここでこれは既に近似的に、個々の層の半径である。基本的に、コアロッドエッジの正および負のy軸上の正確な位置は、特に、理想的な、消えていかないデータの場合には、手動による簡単な読み出しによって特定される。

【0065】

本発明の方法の実施形態を、以降で、図1に基づいて説明する。これに使用される測定データは、曲線「 $p = 1$ 」に相当する。これによって、誤らずに、エッジが、異常測定点上に、またはノイズによって引き起こされる副極値上に設定されることが保証されるので、最初に、測定された偏向角度分布がスプライン関数によって著しく平滑化される。

【0066】

スプライン関数は、高次の、例えば3次の、複数の合成された多項式のことである。平滑化パラメータ「 p 」は、例えば、その間の妥協である。

$p = 1$: 三乗の多項式の部分的なフィット

$0 < p < 1$: 平滑化された曲線経過の部分的なフィット

$p = 0$: 直線のフィット

【0067】

$p = 0.9$ で、すなわち、強い平滑化で開始される。内側から外側へ、エッジへ向けて、偏向角度は、絶対値的に、別の領域を介して上昇する。著しく平滑化された偏向角度経過は、この領域において、偏向角度の符号に応じて、最大または最小を示す。幾つかの少ない異常値データ点は、もたらしたとしても、僅かな極値しかもたらさない。著しく平滑化された経過では、極値が特定される。したがって、 $p = 0.99$ で平滑化が行われる（より弱い平滑化）。このステップは、 $p = 0.999$; $p = 0.9999$; $p = 0.99$

10

20

30

40

50

999 および最終的に、元来の測定データ ($p = 1$) に対して繰り返される。ここで段階的に、より僅かな平滑化が行われる。第6のおよび最後の繰り返し ($p = 1$) において、平滑化はもはや行われない。 $p = 1$ の選択は三次補間に相応するが、これがプロットのために、まさに支持点で評価される場合、まさに同様に、元来の点が生じる。これに相応して、曲線経過 $p = 1$ は、測定されたデータの一部を表す。

【0068】

このようにして、強い平滑化に基づいて事前に特定された極値は、順次、各繰り返しの際に、偏向角度分布の実際の極値の方向にシフトし、ひいては傾向的に、実際の屈折率エッジの方向にもシフトする。したがって屈折率エッジの実際の位置は、極めて高い平滑化パラメータによって、最もよく近似される。実際のエッジ位置は、下方への屈折率変化の際に、極大値の底部に位置し、その逆で、上方への屈折率変化の際には、極大値の頂上部に位置する。

【0069】

偏向角度分布の、このような評価に基づいて見出された最も内側の極値 y_{k, rech_t} および y_{k, link_s} は、さらなる評価の際に使用され、これは特に、偏向角度分布の原点の修正に用いられる。したがって再度、元来の偏向角度分布は、スプライン関数によって、しかしこの度は、より弱く、 $p = 0.99$ で平滑化される。

【0070】

式(2)を用いた変換が実施される前に、偏向角度分布 (y) の原点が正しく特定される。特に、角度分布の座標系における y 軸は、測定セルの幾何学的形状を介してのみ定められる。ここで、測定セルの中央が必ずしも、プリフォームと一致していないわけではないのではない。これは、 y 軸の方向におけるシフトを生じさせる。さらに、全体的な角度分布は、この座標系の z 方向におけるシフト寄与を有する角度オフセットを有している。これは例えば、測定装置での回転ディスクの角度の正確でない参照によって引き起こされ得る。

【0071】

図4は、基になる偏向角度分布の原点における、ここから計算された屈折率分布へのシフトの作用を示している。このために、式(1)によって、4401個のデータ点から生じる2つの分布が作成され、これに続いて計算が実行される。プロファイル41は、屈折率変化 $n = \pm 0.01$ を有する、想定されるステッププロファイルである。残りの曲線は、屈折率プロファイルの計算を示しており、これは、繰り返し単位(応答単位)における位置 r に対する屈折率の差 ($n(r) - n_0$) として記載されている。

曲線42：正しい偏向角度分布から

曲線43：0.1 mmの y 方向における原点の誤った位置付け

曲線44：-0.02° ($\sim 3.5 \cdot 10^{-4} \text{ rad}$) の角度オフセットを有する原点の誤った位置付け

曲線45：2つのシフトをまとめたもの

【0072】

曲線42は、屈折率プロファイルにおける測定された偏向角度分布の再計算での典型的な体系的な誤りの結果を示している。全体的な屈折率レベルは、実際のレベルよりも格段に下にある。これに、エッジへの屈折率プロファイルの丸めが加わる。曲線43から45は、原点の誤った位置付けの作用を示している。

【0073】

光学的なプリフォームは、実質的に半径方向に対称である。したがって事前に定められたコアロッドのエッジは、偏向角度分布において、特に良好にプリフォーム中央点ひいては座標原点の特定に適している。必要であれば、 y 軸は、相応する区間ぶんシフトされ、したがって、原点は、上述したコアロッドエッジ間のまさに中央に位置する。

【0074】

オフセットの修正は、偏向角度分布を相応に垂直にシフトさせるために実施される。このために、直線が、最小二乗和法によって、最も内側の右側の極値 y_{k, rech_t} お

10

20

30

40

50

より最も内側の左側の極値 $y_{k, \text{left}}$ の間の中心にフィットされる。フィットされるべき領域は、コアロッド直径の最大で 20 % を超えて延在する。測定データは、最終的に、直線の y 軸部分を中心に垂直にシフトされ、この直線は原点を通って延在する。

【0075】

オフセットを定めるための折一的な方法の形態では、最も内側の右側の極値 $y_{k, \text{right}}$ と最も内側の左側の極値 $y_{k, \text{left}}$ との間の中心に、より高次（例えば 9 次）の多項式がフィットされる。ここでも、エッジまたは全体区間の間の部分区間が選択されてよい。オフセットを特定するための別の折一的な方法の形態では、偏向角度分布は次のようにシフトされる。すなわち、全ての、等間隔に測定された偏向角度の和が 0 と等しくなるようにシフトされる。

10

【0076】

評価および処理の結果は、その原点に関して、座標原点の原点に関して整合された、処理された偏向角度分布 $\phi(y)$ である。

【0077】

次のステップでは、処理された偏向角度分布 $\phi(y)$ から、上述の式(2)に従ったアーベル変換によって、処理された屈折率プロファイル $n'(r)$ が作成される。図 4 に基づいて示されているように、ここで偏向角度分布の原点の事前の整合は極めて有用である。なぜなら、このような整合がなければ、実際の原点からの小さい偏差が既に、変換された屈折率分布の際の誤りを生じさせるからである。

20

【0078】

処理された屈折率プロファイル $n'(r)$ は、プリフォームの、実際に予期されるべき屈折率プロファイルを表していないが、これは、分かりやすいオリエンテーション補助であり、ここから、比較的明確に、「仮説の屈折率プロファイル」 $n^*(r)$ に対する適切なオリエンテーション値が導出可能である。これは、後続するステップに対する基礎である。導出されるべきオリエンテーション値は、層半径に対するオリエンテーション値 r_k^* と、仮説の屈折率プロファイル $n^*(r)$ の層屈折率に対するオリエンテーション値 n_k^* とを含んでいる。特に、この屈折率に対しては、しばしば、経験値と、データバンク内に格納されているデータとが存在する。これらは、屈折率の特定に対して付加的に使用可能である。

20

【0079】

このような評価の際には、事前に特定された極値 $y_{k, \text{right}}$ および $y_{k, \text{left}}$ も、オリエンテーション値 r_k^* を定めるために使用される。しかしこのような位置は、近似的にのみ、屈折率プロファイルの半径に相当するので、求められた極値 $y_{k, \text{right}}$ および $y_{k, \text{left}}$ は、層半径 $r_{k, \text{right}}$ または $r_{k, \text{left}}$ に再計算され、計算されたこの層半径は、オリエンテーション値 r_k^* を定めるために使用される。層半径への極値の再計算は、ここで、境界面で、 r_k において、全反射が生じない場合には式(3)に基づいて、行われ、さらに、境界面で、 r_k において、全反射が生じる場合には、式(4)に基づいて行われる。

30

【0080】

図 5 のダイヤグラムでは、簡単なステッププロファイルを有するプリフォームに対して、処理された屈折率プロファイル $n'(r)$ と、それを評価することによってモデリングされた仮説の屈折率プロファイル $n^*(r)$ とが示されている。屈折率は、インデックス整合液の屈折率に関する相対値として示されている ($n_0 = 1.446$)。

40

【0081】

仮説の屈折率プロファイル $n^*(r)$ は既に、プリフォームの実際に予期されるべき屈折率プロファイルを表す、または、この屈折率プロファイルに近似する。これは、処理された屈折率プロファイル $n'(r)$ およびこのプロファイルから導出されたオリエンテーション値に基づく。これらは同様に、「測定不可能な領域」からの屈折率および半径に対する見込み値を含んでいる。

【0082】

50

式(1)を用いた再計算によって、仮説の屈折率プロファイル $n^*(r)$ から、次のステップにおいて、シミュレートされた偏向角度分布 $\gamma'(y)$ が作成される。このようにして得られたシミュレートされた偏向角度分布 $\gamma^*(y)$ は、したがって、プリフォームの屈折率プロファイルの想定（すなわち、仮説の屈折率プロファイル $n^*(r)$ ）に基づいている。これは同様に、元来の測定値の修正および評価に従って、処理された屈折率プロファイル $n'(r)$ から導出される。

【0083】

上述した式(2)に基づいたシミュレートされた偏向角度分布 $\gamma'(y)$ の変換によって、同様に、シミュレートされた屈折率プロファイル $n'(r)$ が得られる。これには、図5において、このような参照符号が付けられている。クラッド領域52とコア領域51との間で、このプロファイルは、丸みが付けられた領域53を示している。丸みが付けられたこの領域53を除くと、シミュレートされた屈折率プロファイル $n'(r)$ は、処理された屈折率プロファイル $n'(r)$ とほぼ同一である。想定された屈折率分布 $n^*(r)$ がこれとは著しく異なっているということを考慮すると、これは相当のものである。この類似性は、仮説の屈折率プロファイル $n^*(r)$ に基づく想定が、プリフォームの実際の屈折率プロファイル $n(r)$ に既に極めて近似しており、すなわち、図5における仮説の屈折率プロファイル $n^*(r)$ が、実際の屈折率プロファイル $n(r)$ を正確に、または少なくとも十分に正確に表している、ということを示唆している。

【0084】

実際には、シミュレートされた屈折率プロファイル $n'(r)$ と、処理された屈折率プロファイル $n'(r)$ とは正確に一致しない。しかし、処理された屈折率プロファイル $n'(r)$ への、シミュレートされた屈折率プロファイル $n'(r)$ の繰り返しのフィットによって、十分かつ任意に正確な整合が得られる。

【0085】

繰り返しのフィット時に、パラメータ $r_{k_f_i_t}^*$ および $n_{k_f_i_t}^*$ は、十分に正確な、フィットされた、シミュレートされた屈折率プロファイル $n'(r)_{f_i_t}$ が得られるまで変えられる。ここで使用されているパラメータ $r_{k_f_i_t}^*$ および $n_{k_f_i_t}^*$ は、これに相応した仮説の屈折率プロファイル $n^*(r)$ に基づき、したがってこの仮説の屈折率プロファイルは、これらのパラメータとともに、同時に、プリフォームの再構築された、実際の屈折率プロファイルを表している。

【0086】

十分にフィットされた、シミュレートされた屈折率プロファイル $n^*(r)_{f_i_t}$ が存在するか否かに関する判断基準は、シミュレートされた屈折率プロファイル $n'(r)$ と、処理された屈折率プロファイル $n'(r)$ との間の差における最小値であり、この最小値は例えば、「最小絶対残差の和」に基づいて求められる。

【0087】

本発明の測定方法は、8つの層を有するプリフォームのより複雑な屈折率プロファイルの場合にも、良好な結果をもたらす。層パラメータのフィットはここで有利には、外側の層から始まり、内側の層へと向かう。

【0088】

図5のプリフォームの実際の屈折率プロファイルを再構築するための上述したモデルでは、シミュレートされた屈折率プロファイル $n'(r)$ は、処理された屈折率プロファイル $n'(r)$ にフィットされる。再構築のためのこの手順の逸脱時には、付加的に、重み付けされたパラメータが利用されていた。これは一方で、フィットされた、シミュレートされた屈折率プロファイル $n'(r)_{f_i_t}$ から屈折率面を観察することによって、他方で、フィットされた、シミュレートされた偏向角度分布 $\gamma^*(y)_{f_i_t}$ に基づいて角度面を観察することによって得られる。これによって、予期せぬ測定値変動または再計算誤りが付加的に除去され、このようにして、実際の屈折率プロファイルの再構築時に、より高い精度が得られる。

【0089】

10

20

30

40

50

ここで付加的にシミュレートされた偏向角度分布 $n^*(y)$ が、処理された偏向角度分布 $n'(y)$ にフィットされる。このフィットはここで、パラメータ r_k^* および n_k^* の繰り返しの整合に基づく。これらのパラメータは、十分に正確な、フィットされた、シミュレートされた偏向角度分布 $n'(r)_{fit}$ が得られるまで変えられる。この際に使用された、最適に整合されたパラメータ r_k^*, n_k^* および n_k^*, n_{fit} は、相応する仮説の屈折率プロファイル $n^*(r)$ に基づくが、最適に整合されたパラメータ値 r_k^*, n_k^* および n_k^*, n_{fit} とは異なる。このようにして付加的に得られた情報は、屈折率プロファイルの再構築時に、付加的に考慮される。これは、重み付け $G = 0.5$ を有する、フィットされた、シミュレートされた屈折率プロファイル $n^*(r)_{fit}$ を、フィットされた、シミュレートされた偏向角度分布 $n^*(y)_{fit}$ (同様に $G = 0.5$) と組み合わせることによって行われる。

【0090】

個々の層の屈折率 n_k および半径 r_k を、正確に特定することを可能にするために、最小二乗法または最小絶対残差法を用いて、フィットが提供される。

【0091】

最大の問題は、フィット関数 $n(r)$ が、分析による表現を有していない、ということである。したがって、フィット関数の作成のために、迂回路が取られる。繰り返しにおいてはその都度、パラメータ n_k および r_k が変化し、ここから、式(1)を用いて偏向角度分布が作成される。これは、最終的に、得られたプロファイル $n(r)$ を最小二乗基準を用いて、または最小絶対残差法を用いて、測定の屈折率分布と比較するために、式(2)を用いて変換を実行する。したがって変換の計算は、各繰り返しの固定の構成部分であり、これは、計算時間を長くする。

【0092】

比較的短い時間内でのフィットを保証することを可能にするために、以下の制限が行われ得る。

・原点の修正

原点の修正によって、 x 方向におけるオフセットと、 y 方向における移動が省かれる。これらはそうでない場合には、依存しないフィットパラメータであろう。依存しないフィットパラメータの数がこれによって 2 つ減る。

・面毎のフィット

フィットにおける半径対称性に関するプリフォーム内の最小の偏差も考慮されるように、正および負の y 軸に対する種々の層パラメータ n_k および r_k が、層内で許容される。しかしこのフィットは、それぞれ半分の数の自由なフィットパラメータしか有していない 2 つのフィットに分かれる。これは、必要な繰り返しの格段の低減ひいては時間の削減に関する。

・層毎のフィット

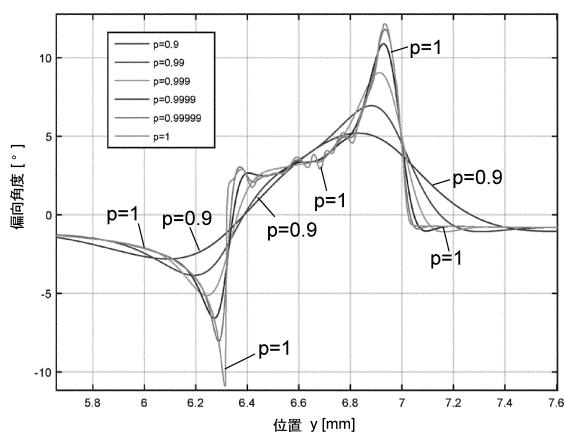
多数の自由なパラメータを有するフィットを、より少ない自由なパラメータを有する複数のフィットに分割する基本的な考えに基づいて、面毎のフィットの他に、付加的に層毎のフィットが行われる。しかしここでは、特定されるべきパラメータ n_k および r_k が外側から内側へと特定されなければならない、ということが考慮されなければならない。したがって観察される層の数は次々に増大する。同様に、フィットの、観察される領域は、層毎に増大する。上述した面毎のフィットとともに、 k 個の層を有するプリフォームの場合には、それぞれ 2 つの未知の、特定されるべきパラメータを有する $2 \cdot k$ 個のフィットが、特定されるべき $4 \cdot k$ 個パラメータを有する 1 つのフィットの代わりに生じる。必要な計算時間は、これによって格段に低減される。

・自由なフィットパラメータとしての半径 r_k の低減

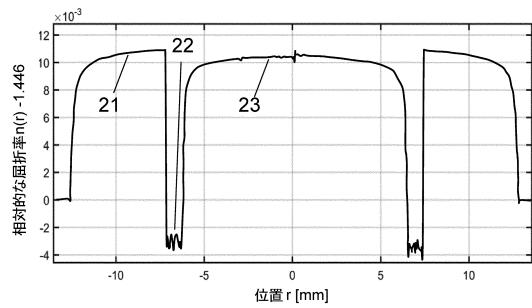
標準的なフィットプロシージャーに従って、半径 r_k は、自由なフィットパラメータである。これに対して択一的に、これは、式(3)および(4)を用いてパラメータ化される。ここで n_0 は、基準屈折率である。上で説明した方法に基づいて特定された極値 $y_{k, max}$ は固定されており、したがって半径 r_k は、屈折率 n_k の変化によってのみ変え

られる。このようにして、必要な計算時間が、秒の範囲で低減され得る。

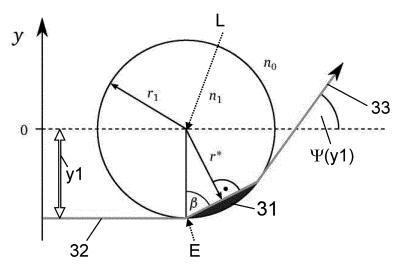
【図 1】



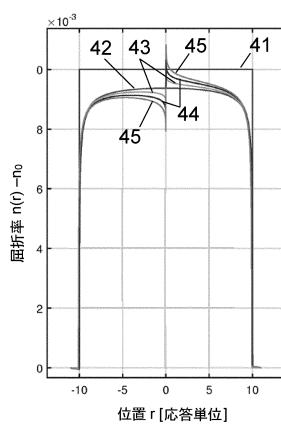
【図 2】



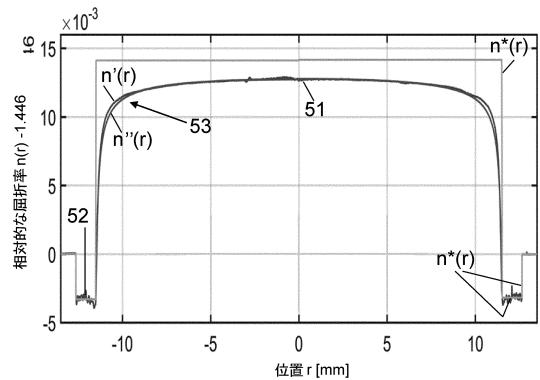
【図 3】



【図 4】



【図5】



フロントページの続き

(74)代理人 100098501
弁理士 森田 拓
(74)代理人 100116403
弁理士 前川 純一
(74)代理人 100135633
弁理士 二宮 浩康
(74)代理人 100162880
弁理士 上島 類
(72)発明者 マクシミリアン シュミット
ドイツ連邦共和国 ディープアク アム リンケンビュール 12
(72)発明者 ボード キューン
ドイツ連邦共和国 ゲルンハウゼン アウエシュトラーセ 7ア-

審査官 小野寺 麻美子

(56)参考文献 特開2007-086055(JP,A)
特開昭61-070436(JP,A)
特開平02-275334(JP,A)
特表昭57-500263(JP,A)
米国特許出願公開第2010/0245805(US,A1)
ZHAO et al., Nondestructive Measurement for Arbitrary RIP Distribution of Optical Fiber Preforms, JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, 2004年, Vol. 22, No. 2, pp. 478-486
HUTSEL et al., Concurrent three-dimensional characterization of the refractive-index and residual-stress distributions in optical fibers, APPLIED OPTICS, Vol. 51, No. 22, p. 5442-5452

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
G01M 11/02
G01N 21/41
JSTPlus/JST7580/JSTChina(JDreamIII)