

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2008-116410

(P2008-116410A)

(43) 公開日 平成20年5月22日(2008.5.22)

(51) Int.Cl.			F I			テーマコード (参考)		
GO 1 B	11/08	(2006.01)	GO 1 B	11/08	Z	2 F 0 6 5		
GO 1 B	11/14	(2006.01)	GO 1 B	11/14	Z	2 G 0 5 9		
GO 1 B	11/26	(2006.01)	GO 1 B	11/26	Z			
GO 1 N	21/41	(2006.01)	GO 1 N	21/41	Z			

審査請求 未請求 請求項の数 7 O L (全 13 頁)

(21) 出願番号 特願2006-302150 (P2006-302150)
 (22) 出願日 平成18年11月7日 (2006.11.7)

(71) 出願人 504182255
 国立大学法人横浜国立大学
 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79番1号
 (74) 代理人 100094053
 弁理士 佐藤 隆久
 (72) 発明者 但馬 文昭
 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79番1号 国立大学法人横浜国立大学内
 (72) 発明者 西山 善郎
 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79番1号 国立大学法人横浜国立大学内
 Fターム(参考) 2F065 AA22 AA26 AA32 BB06 CC00
 CC23 FF44 FF49 FF65 GG04
 GG22 HH04 HH08 JJ01 MM09
 最終頁に続く

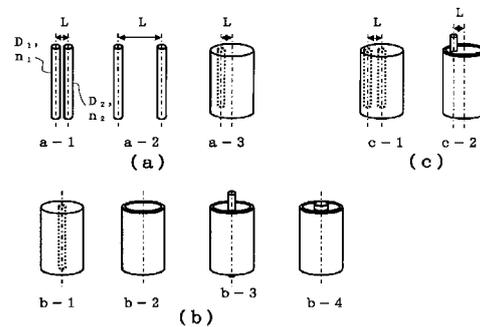
(54) 【発明の名称】 円柱体の直径、屈折率、中心軸間距離及び入射光軸と間隔のなす角の測定方法およびこれを用いた装置

(57) 【要約】

【課題】 nmオーダーの複数の円柱体の直径、屈折率及び中心軸間距離を効率よく同時に測定する測定方法およびその測定方法を用いた装置を提供する。

【解決手段】 中心軸が平行関係を持つ複数の円柱体の長さ方向に対して垂直に偏向された垂直偏光を前記円柱体に投射して得た所定散乱角度の散乱光による測定散乱光強度と前記散乱角度から算出した計算散乱光強度とから、前記複数の円柱体の個々の直径、屈折率、中心軸間距離及び入射光軸と間隔のなす角の関数で表される偏差指標を算出し、前記偏差指標を最小とする前記複数の円柱体の個々の直径、屈折率、中心軸間距離及び入射光軸と間隔のなす角の組み合わせを導出して、前記複数の円柱体の個々の直径、屈折率、中心軸間距離及び入射光軸と間隔のなす角を求める円柱体の直径、屈折率、中心軸間距離入射光軸と間隔のなす角の測定方法である。

【選択図】 図1



【特許請求の範囲】**【請求項 1】**

中心軸が平行関係を持つ複数の円柱体の長さ方向に対して垂直に偏向された垂直偏光を前記円柱体に投射して得た所定散乱角度の散乱光による測定散乱光強度と前記散乱角度から算出した計算散乱光強度とから、

前記複数の円柱体の個々の直径、屈折率、中心軸間距離及び入射光軸と間隔のなす角の関数で表される偏差指標を算出し、

前記偏差指標を最小とする前記複数の円柱体の個々の直径、屈折率、中心軸間距離及び入射光軸と間隔のなす角の組み合わせを導出して、前記複数の円柱体の個々の直径、屈折率、中心軸間距離及び入射光軸と間隔のなす角を求める円柱体の直径、屈折率、中心軸間距離入射光軸と間隔のなす角の測定方法。

10

【請求項 2】

同一の中心軸を持つ複数の円柱体の長さ方向に対して垂直に偏向された垂直偏光を前記円柱体に投射して得た所定散乱角度の散乱光による測定散乱光強度と前記散乱角度から算出した計算散乱光強度とから、

前記複数の円柱体の個々の直径、屈折率、中心軸間距離及び入射光軸と間隔のなす角の関数で表される偏差指標を算出し、

前記偏差指標を最小とする前記複数の円柱体の個々の直径、屈折率、中心軸間距離及び入射光軸と間隔のなす角の組み合わせを導出して、前記複数の円柱体の個々の直径、屈折率、中心軸間距離及び入射光軸と間隔のなす角を求める円柱体の直径、屈折率、中心軸間距離入射光軸と間隔のなす角の測定方法。

20

【請求項 3】

中心軸が平行関係を持つ円柱体と同一の中心軸を持つ円柱体とで構成される複合円柱体の長さ方向に対して垂直に偏向された垂直偏光を前記円柱体に投射して得た所定散乱角度の散乱光による測定散乱光強度と前記散乱角度から算出した計算散乱光強度とから、

前記複合円柱体の個々の直径、屈折率、中心軸間距離及び入射光軸と間隔のなす角の関数で表される偏差指標を算出し、

前記偏差指標を最小とする前記複合円柱体を構成する個々の円柱体の直径、屈折率、中心軸間距離及び入射光軸と間隔のなす角の組み合わせを導出して前記複合円柱体の個々の直径、屈折率、中心軸間距離及び入射光軸と間隔のなす角を求める円柱体の直径、屈折率、中心軸間距離入射光軸と間隔のなす角の測定方法。

30

【請求項 4】

中心軸が平行関係を持つ複数の円柱体の長さ方向に対して水平に偏向された水平偏光を前記円柱体に投射して得た所定散乱角度の散乱光による測定散乱光強度と前記散乱角度から算出した計算散乱光強度とから、

前記複数の円柱体の個々の直径、屈折率、中心軸間距離及び入射光軸と間隔のなす角の関数で表される偏差指標を算出し、

前記偏差指標を最小とする前記複数の円柱体の個々の直径、屈折率、中心軸間距離及び入射光軸と間隔のなす角の組み合わせを導出して、前記複数の円柱体の個々の直径、屈折率、中心軸間距離及び入射光軸と間隔のなす角を求める円柱体の直径、屈折率、中心軸間距離入射光軸と間隔のなす角の測定方法。

40

【請求項 5】

同一の中心軸を持つ複数の円柱体の長さ方向に対して水平に偏向された水平偏光を前記円柱体に投射して得た所定散乱角度の散乱光による測定散乱光強度と前記散乱角度から算出した計算散乱光強度とから、

前記複数の円柱体の個々の直径、屈折率、中心軸間距離及び入射光軸と間隔のなす角の関数で表される偏差指標を算出し、

前記偏差指標を最小とする前記複数の円柱体の個々の直径、屈折率、中心軸間距離及び入射光軸と間隔のなす角の組み合わせを導出して、前記複数の円柱体の個々の直径、屈折率、中心軸間距離及び入射光軸と間隔のなす角を求める円柱体の直径、屈折率、中心軸間距離

50

離入射光軸と間隔のなす角の測定方法。

【請求項 6】

中心軸が平行関係を持つ円柱体と同一の中心軸を持つ円柱体とで構成される複合円柱体の長さ方向に対して水平に偏向された水平偏光を前記円柱体に投射して得た所定散乱角度の散乱光による測定散乱光強度と前記散乱角度から算出した計算散乱光強度とから、前記複合円柱体の個々の直径、屈折率、中心軸間距離及び入射光軸と間隔のなす角の関数で表される偏差指標を算出し、前記偏差指標を最小とする前記複合円柱体を構成する個々の円柱体の直径、屈折率、中心軸間距離及び入射光軸と間隔のなす角の組み合わせを導出して前記複合円柱体の個々の直径、屈折率、中心軸間距離及び入射光軸と間隔のなす角を求める円柱体の直径、屈折率、中心軸間距離及び入射光軸と間隔のなす角の測定方法。

10

【請求項 7】

請求項 1 乃至請求項 6 のいずれかの測定方法を用いた装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、複数の細径円柱体が平行や同軸に配されているナノカーボンチューブ、光ファイバ、めっき線、蒸着線や蜘蛛の糸などにおいて、個々の細径円柱体の直径、屈折率及び、それらの中心軸間距離並びに入射光軸と間隔のなす角を同時にはかる測定方法、およびこの測定方法を用いた装置に関するものである。

20

【背景技術】

【0002】

細径円柱体の直径を求める方法としては、特許文献 1 に、繊維製造時の外径測定を、レーザー光の回折強度の比率を基に求める方法により行い、外径 10 μm 程度の繊維が測定できることが示されている。

又、特許文献 2、3 では、レーザー光による被測定細線のフラウンフォーファ回折像の回折パターンからその外径を算出する方法によって、外径 17.5 μm の細線の測定ができることが開示されている。

【0003】

しかしながら、nm オーダーの細径円柱体の外径測定となると有効な測定方法がなかった。

30

そこで、本発明者らは非特許文献 1 に示すようにレーザー光を被測定物に対して垂直、或いは水平に偏光したレーザー光を用いて、被測定物による散乱強度を測定し、ある式の基に計算した計算値との偏差から、その外径および屈折率を測定する方法を開発した。この方法によれば、外径 240 nm 程度の細い円柱体が測定できることを示した。

【0004】

更に、より細径のナノファイバーの外径及び屈折率を測定する方法として、本発明者らは特許文献 4 に示す測定方法及び測定装置を提案している。この方法を用いることで 90 nm 程度と細いナノファイバーの外径を測定することが可能となっている。

【0005】

40

【特許文献 1】特開平 5 - 45130 号公報

【特許文献 2】特開平 6 - 288723 号公報

【特許文献 3】特開平 6 - 241733 号公報

【非特許文献 1】但馬文昭、西山善郎、「約 120 nm のくもの糸の太さと屈折率の測定の可能性の検討」、平成 16 年春季第 64 回応用物理学会学術講演会講演予稿集、社団法人 応用物理学会、平成 16 年 3 月

【特許文献 4】特開 2006 - 242591 号公報

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

50

前記本発明者らによる特許文献4において提案した外径の測定方法では、特許文献1乃至特許文献3及び非特許文献1に示す測定方法に比べて、より細径のナノファイバーの外径測定が可能である。

しかしながら、ナノカーボンチューブなどのチューブ状の円柱体ではその内径を知ることや、同軸でコア部と外周に配されるクラッド部を持つ光ファイバなどの同軸円柱体では、そのコア部の直径や光ファイバ自体の直径、コアの偏芯度、個々の屈折率などを制御することが特性向上に対する重要な要素であり、これらの値を知ることが必要となっている。更に、めっき線などの外周に被覆層を持つ円柱体のその被覆層厚みなどを直接知る方法、複合構造を採る神経繊維などの生体構造の解明においても、その寸法や屈折率などを知ることが望まれている。

そこで、本発明では、これらを精度良く、且つ効率よく測定する測定方法およびその測定方法を用いた装置を提供するものである。

【課題を解決するための手段】

【0007】

請求項1記載の発明は、中心軸が平行関係を持つ複数の円柱体の長さ方向に対して垂直に偏向された垂直偏光を前記円柱体に投射して得た所定散乱角度の散乱光による測定散乱光強度と前記散乱角度から算出した計算散乱光強度とから、前記複数の円柱体の個々の直径、屈折率、中心軸間距離及び入射光軸と間隔のなす角の関数で表される偏差指標を算出し、前記偏差指標を最小とする前記複数の円柱体の個々の直径、屈折率、中心軸間距離及び入射光軸と間隔のなす角の組み合わせを導出して、前記複数の円柱体の個々の直径、屈折率、中心軸間距離及び入射光軸と間隔のなす角を求める円柱体の直径、屈折率、中心軸間距離入射光軸と間隔のなす角の測定方法である。

【0008】

請求項2記載の発明は、同一の中心軸を持つ複数の円柱体の長さ方向に対して垂直に偏向された垂直偏光を前記円柱体に投射して得た所定散乱角度の散乱光による測定散乱光強度と前記散乱角度から算出した計算散乱光強度とから、前記複数の円柱体の個々の直径、屈折率、中心軸間距離及び入射光軸と間隔のなす角の関数で表される偏差指標を算出し、前記偏差指標を最小とする前記複数の円柱体の個々の直径、屈折率、中心軸間距離及び入射光軸と間隔のなす角の組み合わせを導出して、前記複数の円柱体の個々の直径、屈折率、中心軸間距離及び入射光軸と間隔のなす角を求める円柱体の直径、屈折率、中心軸間距離入射光軸と間隔のなす角の測定方法である。

【0009】

請求項3記載の発明は、中心軸が平行関係を持つ円柱体と同一の中心軸を持つ円柱体とで構成される複合円柱体の長さ方向に対して垂直に偏向された垂直偏光を前記円柱体に投射して得た所定散乱角度の散乱光による測定散乱光強度と前記散乱角度から算出した計算散乱光強度とから、前記複合円柱体の個々の直径、屈折率、中心軸間距離及び入射光軸と間隔のなす角の関数で表される偏差指標を算出し、前記偏差指標を最小とする前記複合円柱体を構成する個々の円柱体の直径、屈折率、中心軸間距離及び入射光軸と間隔のなす角の組み合わせを導出して前記複合円柱体の個々の直径、屈折率、中心軸間距離及び入射光軸と間隔のなす角を求める円柱体の直径、屈折率、中心軸間距離入射光軸と間隔のなす角の測定方法である。

【0010】

請求項4記載の発明は、中心軸が平行関係を持つ複数の円柱体の長さ方向に対して水平に偏向された水平偏光を前記円柱体に投射して得た所定散乱角度の散乱光による測定散乱光強度と前記散乱角度から算出した計算散乱光強度とから、前記複数の円柱体の個々の直径、屈折率、中心軸間距離及び入射光軸と間隔のなす角の関数で表される偏差指標を算出し、前記偏差指標を最小とする前記複数の円柱体の個々の直径、屈折率、中心軸間距離及び入射光軸と間隔のなす角の組み合わせを導出して、前記複数の円柱体の個々の直径、屈折率、中心軸間距離及び入射光軸と間隔のなす角を求める円柱体の直径、屈折率、中心軸間距離入射光軸と間隔のなす角の測定方法である。

10

20

30

40

50

【 0 0 1 1 】

請求項 5 記載の発明は、同一の中心軸を持つ複数の円柱体の長さ方向に対して水平に偏向された水平偏光を前記円柱体に投射して得た所定散乱角度の散乱光による測定散乱光強度と前記散乱角度から算出した計算散乱光強度とから、前記複数の円柱体の個々の直径、屈折率、中心軸間距離及び入射光軸と間隔のなす角の関数で表される偏差指標を算出し、前記偏差指標を最小とする前記複数の円柱体の個々の直径、屈折率、中心軸間距離及び入射光軸と間隔のなす角の組み合わせを導出して、前記複数の円柱体の個々の直径、屈折率、中心軸間距離及び入射光軸と間隔のなす角を求める円柱体の直径、屈折率、中心軸間距離入射光軸と間隔のなす角の測定方法である。

10

【 0 0 1 2 】

請求項 6 記載の発明は、中心軸が平行関係を持つ円柱体と同一の中心軸を持つ円柱体とで構成される複合円柱体の長さ方向に対して水平に偏向された水平偏光を前記円柱体に投射して得た所定散乱角度の散乱光による測定散乱光強度と前記散乱角度から算出した計算散乱光強度とから、前記複合円柱体の個々の直径、屈折率、中心軸間距離及び入射光軸と間隔のなす角の関数で表される偏差指標を算出し、前記偏差指標を最小とする前記複合円柱体を構成する個々の円柱体の直径、屈折率、中心軸間距離及び入射光軸と間隔のなす角の組み合わせを導出して前記複合円柱体の個々の直径、屈折率、中心軸間距離及び入射光軸と間隔のなす角を求める円柱体の直径、屈折率、中心軸間距離入射光軸と間隔のなす角の測定方法である。

20

【 0 0 1 3 】

請求項 7 記載の発明は、請求項 1 乃至請求項 6 のいずれかの測定方法を用いた装置である。

【 発明の効果 】

【 0 0 1 4 】

本発明によれば、投射されたレーザ光が被測定物である複数の円柱体による散乱によって生じる散乱光の散乱光強度及びその散乱角度を基に、被測定物の直径、屈折率及び中心軸間距離及び入射光軸と間隔のなす角の関数となる偏差指標を算出し、適正化することによって、複数の円柱体の直径、屈折率及び中心軸間距離及び入射光軸と間隔のなす角を同時に、効率よく且つ精度良く求めることを可能とするもので、工業上顕著な効果を奏するものである。

30

【 発明を実施するための最良の形態 】

【 0 0 1 5 】

本発明の測定に供される被測定物の形態を図 1 に示す。

図 1 (a) は、中心軸が平行関係を持つ場合の例を示し、a - 1、a - 2 は中心軸間距離 L が異なる 2 本の円柱体で構成されている例、a - 3 は中心軸間距離 L で内部に円柱体を持つ 2 本の円柱体で構成されている例である。図 1 (b) は同一の中心軸を持つ同軸円柱体の例で、b - 1、b - 4 は中実の多重円柱体を示し、光ファイバや外面に被覆層が設けられているめっき線などの例である。b - 2、b - 3 は中空の円柱体（円筒体）の例で、b - 3 は b - 1 の中空内に同軸の円柱体が配されているものである。図 1 (c) は中心軸が平行関係を持つ円柱体と同軸円柱体が存在する場合の例で、c - 1 は b - 1 のような同軸円柱体に偏心軸を持つもう一体の円柱体が加わった構成の例で、c - 2 は b - 4 の内部円柱体の中心軸が偏心している状態の例である。以上のようにいくつかの被測定物の例を示したが、本発明に供される被測定物の形態は本発明の要件を満たしていれば図 1 に限定されない。

40

【 0 0 1 6 】

図 1 に示す形態の被測定物（複数の円柱体からなる）における本発明の直径及び屈折率、並びに中心軸間距離及び入射光軸と間隔のなす角の測定方法は、図 2 のフローチャートに沿って行う。

図 2 の散乱光強度 I_i を測定するために、図 3 に示す直径・屈折率測定装置 1 で、被測定物 2 に対して、光源 3 から波長 λ (446 . 1 nm) のレーザ光 3 a を発光し、そ

50

のレーザー光 3 a が偏向装置 4 で被測定物に対して垂直偏光、或いは水平偏光とされ、検出部 5 上面に支持台 5 b で支持された被測定物 2 に投射される。レーザー光 3 a は、被測定物 2 により一部が反射され、レーザー光 3 a の光軸に対して散乱角度 θ_i に配置された検出器 6 で、その測定散乱光強度 I_i が測定される。この手順で、散乱角度 θ_i ($i = 0 \cdots n$) を変化させてその時の測定散乱光強度 I_i ($i = 0 \cdots n$) を順次測定していく。

又は、図 4 のように複数の検出器 6 (図 4 の場合は 28 基) を、被測定物 2 を支持する支持台 5 b の円周上に配置し、各々の検出器 6 の散乱角度 θ_i で測定散乱光強度 I_i を測定することでも良い。

【0017】

これらの測定した散乱角度 θ_i と測定散乱光強度 I_i は、図 2 に記した直径・屈折率・中心軸間距離及び入射光軸と間隔のなす角同時解析プログラムを搭載したパーソナルコンピュータのような演算部 7 に送られる。

10

この演算部 7 内で計算散乱光強度 I_i が計算される。

本発明では、この計算散乱光強度 I_i を、円柱体の数が 2 の場合には数 1 に表す式を用いて求める。これ以降の直径、屈折率、中心軸間距離及び入射光軸と間隔のなす角の算出において精度の良い値が得られることからこの式では、第 1 種と第 3 種ベッセル関数を用いて表している。その計算散乱光強度 I_i の算出に際しては、垂直偏光で散乱させた場合は、添字 v の式を用いて計算し、水平偏光を散乱させた場合は、添字 h の式を用いて計算を行う。

【0018】

20

【数 1】

$$\sigma_Y(\theta)_{\parallel, \perp} = \lim_{r \rightarrow \infty} r \left| E_Y(r, \theta)_{\parallel, \perp} \right|^2$$

$$E_{YL}(r, \theta) = \sqrt{\frac{2}{\pi k r}} e^{i(kr - \pi/4)} f(\theta, L, \psi),$$

$$f(\theta, L, \psi) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} e^{im(\psi + \pi/2)} e^{im(\theta - \psi - \pi/2)} \left\{ B_1(m) + e^{ikl \cos \psi} B_2(m) e^{-ikl \cos(\theta - \psi)} \right\}$$

$$+ \sum_{\ell=1}^{\infty} \sum_{m_1, \dots, m_{2\ell-1}=-\infty}^{\infty} e^{im_1(\psi + \pi/2)} \sum_{m=-\infty}^{\infty} e^{im(\theta - \psi - \pi/2)} [$$

$$B_1(m_1) H_{m_1 - m_2}^{(1)}(kL) B_2(m_2) H_{-m_2 + m_3}^{(1)}(kL) B_1(m_3) \cdots H_{-m_{2\ell-2} + m_{2\ell-1}}^{(1)}(kL) B_1(m_{2\ell-1})$$

$$\times \left\{ H_{m_{2\ell-1} - m}^{(1)}(kL) B_2(m) e^{-ikl \cos(\theta - \psi)} + \sum_{m_{2\ell}=-\infty}^{\infty} H_{m_{2\ell-1} - m_{2\ell}}^{(1)}(kL) B_2(m_{2\ell}) H_{-m_{2\ell} + m}^{(1)}(kL) B_1(m) \right\}$$

$$+ e^{ikl \cos \psi} B_2(m_1) H_{-m_1 + m_2}^{(1)}(kL) B_1(m_2) H_{m_2 - m_3}^{(1)}(kL) B_2(m_3) \cdots H_{m_{2\ell-2} - m_{2\ell-1}}^{(1)}(kL) B_2(m_{2\ell-1})$$

$$\times \left\{ H_{-m_{2\ell-1} + m}^{(1)}(kL) B_1(m) + \sum_{m_{2\ell}=-\infty}^{\infty} H_{-m_{2\ell-1} + m_{2\ell}}^{(1)}(kL) B_1(m_{2\ell}) H_{m_{2\ell} - m}^{(1)}(kL) B_2(m) e^{-ikl \cos(\theta - \psi)} \right\}]$$

10

20

$$B_{1\parallel}(m) = \frac{J_m(n_{1\parallel} kr_{10}) J_m'(kr_{10}) + n_{1\parallel} J_m'(n_{1\parallel} kr_{10}) J_m(kr_{10})}{-J_m(n_{1\parallel} kr_{10}) H_m^{(1)'}(kr_{10}) + n_{1\parallel} J_m'(n_{1\parallel} kr_{10}) H_m^{(1)}(kr_{10})}$$

$$B_{1\perp}(m) = \frac{n_{1\perp} J_m(n_{1\perp} kr_{10}) J_m'(kr_{10}) - J_m'(n_{1\perp} kr_{10}) J_m(kr_{10})}{-n_{1\perp} J_m(n_{1\perp} kr_{10}) H_m^{(1)'}(kr_{10}) + J_m'(n_{1\perp} kr_{10}) H_m^{(1)}(kr_{10})}$$

$$B_{2\parallel}(m) = \frac{J_m(n_{2\parallel} kr_{20}) J_m'(kr_{20}) - n_{2\parallel} J_m'(n_{2\parallel} kr_{20}) J_m(kr_{20})}{-J_m(n_{2\parallel} kr_{20}) H_m^{(1)'}(kr_{20}) + n_{2\parallel} J_m'(n_{2\parallel} kr_{20}) H_m^{(1)}(kr_{20})}$$

$$B_{2\perp}(m) = \frac{n_{2\perp} J_m(n_{2\perp} kr_{20}) J_m'(kr_{20}) - J_m'(n_{2\perp} kr_{20}) J_m(kr_{20})}{-n_{2\perp} J_m(n_{2\perp} kr_{20}) H_m^{(1)'}(kr_{20}) + J_m'(n_{2\perp} kr_{20}) H_m^{(1)}(kr_{20})}$$

30

$$E_Y(r, \theta) = E_Y(r, \theta)_{\parallel, \perp}$$

$$f(\theta, L, \psi) = f_{\parallel, \perp}(\theta, L, \psi; n_{1\parallel, \perp}, D_1, n_{2\parallel, \perp}, D_2)$$

$$B_I(m) = B_{I\parallel, \perp}(m), \quad B_2(m) = B_{2\parallel, \perp}(m)$$

ここで、図 5 は数 1 における幾何学関係を示し、添字 \parallel は水平偏光によるものを表し添字 \perp は垂直偏光によるものを表す、 k は波数、 r_{10} 、 r_{20} は被測定物の半径 ($D_{10}/2$ 、 $D_{20}/2$)、 $J_m(x)$ は第一種ベッセル関数、 $H_m^{(1)}(x) (= J_m(x) + iY_m(x))$ は第三種ベッセル関数を表し、 m は次数である。

40

【0019】

ところで、数 1 で示した計算散乱光強度の式は、図 1 に示すような被測定物の形態によって適当な式を選択する。例えば、円筒形体で内の円柱体が偏心しているような場合には、数 1 に示す式を数 2 の式に変えることにより、より精度のある結果が得られ、円柱体の数が 3 以上の場合にも、数 1 に示す式を適時拡張することで個々の円柱体の直径、屈折率、中心軸間距離及び入射光軸と間隔のなす角を算出できる。

また、数 1 の式は繊維編素や蜘蛛の糸のような透明性の高い材質の測定に有効であるが、金属系超伝導線のような反射の強い金属などの場合や、カーボンナノチューブなどのような中空試料では、この計算散乱光強度式をより適した式に変えることで、本発明の直径

50

、屈折率、中心軸間距離及び入射光軸と間隔のなす角の同時測定を行うことができる。

【 0 0 2 0 】

【 数 2 】

$$E_{\text{in}}(r, \theta) = \sqrt{\frac{2}{\pi k r}} e^{i(kr - \pi/4)} f(\theta, L, \phi),$$

$$f(\theta, L, \phi) = \sum_{q=1}^{\infty} \left[\sum_{m=0}^{\infty} i^{-2m} \left\{ B_{E/H1(q),c}(m) \cos(m\phi) + B_{E/H2(q),s}(m) \sin(m\phi) \right\} \right. \\ \left. + e^{-ikL \sin(\phi + \psi)} \sum_{m=0}^{\infty} i^{-2m} \left\{ B_{E/H2(q),c}(m) \cos(m\phi_2) + B_{E/H2(q),s}(m) \sin(m\phi_2) \right\} \right] \quad 10$$

$$B_{Ej(q),c/s}(m) = \frac{J_m(n_{\parallel j} k r_{j0}) k^{-1} \partial_{r_j} E_{j(q),c/s}(m; r_{j0}) - n_{\parallel j} J'_m(n_{\parallel j} k r_{j0}) E_{j(q),c/s}(m; r_{j0})}{-J_m(n_{\parallel j} k r_{j0}) H_m^{(1)}(k r_{j0}) + n_{\parallel j} J'_m(n_{\parallel j} k r_{j0}) H_m^{(1)}(k r_{j0})}$$

$$B_{Hj(q),c/s}(m) = \frac{n_{\perp j} J_m(n_{\perp j} k r_{j0}) k^{-1} \partial_{r_j} H_{j(q),c/s}(m; r_{j0}) - J'_m(n_{\perp j} k r_{j0}) H_{j(q),c/s}(m; r_{j0})}{-n_{\perp j} J_m(n_{\perp j} k r_{j0}) H_m^{(1)}(k r_{j0}) + J'_m(n_{\perp j} k r_{j0}) H_m^{(1)}(k r_{j0})}$$

$$E_{1(q),c/s}(m; r_{10}) = \frac{i^m (2 - \delta_{m0})}{2\pi} \sum_{\ell=0}^{\infty} i^{-\ell} \int_0^{2\pi} d\phi \cos / \sin(m\phi) H_{\ell}^{(1)}\{k r_2(r_{10}, \phi)\} \\ \times \left[B_{2(q-1),c}(\ell) \cos\{\ell \phi_2(r_{10}, \phi)\} + B_{2(q-1),s}(\ell) \sin\{\ell \phi_2(r_{10}, \phi)\} \right] \quad (q \geq 2) \quad 20$$

$$E_{2(q),c/s}(m; r_{20}) = \frac{i^m (2 - \delta_{m0})}{2\pi} \sum_{\ell=0}^{\infty} i^{-\ell} \int_0^{2\pi} d\phi_2 \cos / \sin(m\phi_2) H_{\ell}^{(1)}\{k r(r_{20}, \phi_2)\} \\ \times \left[B_{1(q-1),c}(\ell) \cos\{\ell \phi(r_{20}, \phi_2)\} + B_{1(q-1),s}(\ell) \sin\{\ell \phi(r_{20}, \phi_2)\} \right] \quad (q \geq 2)$$

ただし、 $j = 1, 2$ 。上記 $H_{j(q),c/s}$ については、 E を H に読み替える。図 6 は数 2 における幾何学関係を示している。

【 0 0 2 1 】

次に、測定した測定散乱光強度 I_i と測定角度 θ_i から算出した計算散乱光強度 I_i を用いて、数 3 に示す直径 D_j 、屈折率 n_j 、中心軸間距離 L 、入射光軸と間隔のなす角を包含する形式の偏差指標 $U(n_1, D_1, n_2, D_2, L, \psi)$ を作成する。この偏差指標を直径 D_1, D_2 、屈折率 n_1, n_2 と中心軸間距離 L の関数として、偏差指標が最小となる点 $(n_{10}, D_{10}, n_{20}, D_{20}, L_0, \psi_0)$ を求め、その時の直径 D_1 、 D_2 、屈折率 n_1, n_2 、中心軸間距離 L 、入射光軸と間隔のなす角の組み合わせを被測定物の直径及び屈折率、並びに中心軸間距離とする。

【 0 0 2 2 】

まず、この計算は偏差指標が、直径 D_{10}, D_{20} 、屈折率 n_{10}, n_{20} 、中心軸間距離 L_0 の時、 $I_i(\text{opt}) = b_i(n_{10}, D_{10}, n_{20}, D_{20}, L_0, \psi_0)$ の場合に最適分布を示し、この最適分布における最適偏差指標 $U_T(\text{opt})(n_1, D_1, n_2, D_2, L, \psi)$ を数 3 のように表す。

【 0 0 2 3 】

【 数 3 】

$$U_T(n_1, D_1, n_2, D_2, L, \psi) = \left\{ \frac{\sum_i [I_i - b \sigma_Y(\theta_i)]^2}{N} \right\}^{1/2} / \left(\frac{\sum_i I_i}{N} \right)$$

ここで、 N は測定数、 b は入射波強度を表す。

【0024】

次いで、直径 D_1 、 D_2 、屈折率 n_1 、 n_2 、中心軸間距離 L の関数としての偏差指標の集合 G を、 $G = \{ n_1, D_1, n_2, D_2, L, | U_T^{(opt)}(n_1, D_1, n_2, D_2, L,) U_T(n_{10}, D_{10}, n_{20}, D_{20}, L_0, 0) \}$ として、その範囲内において、 n_{min} 、 n_{max} 、 D_{min} 、 D_{max} 、 L_{min} 、 L_{max} を求める。

次に求めた各値と、 n_{10} 、 D_{10} 、 n_{20} 、 D_{20} 、 L_0 との差、直径に関しては $(D_{min} - D_{10}, D_{max} - D_{10})$ 、 $(D_{min} - D_{20}, D_{max} - D_{20})$ 、屈折率に関しては $(n_{min} - n_{10}, n_{max} - n_{10})$ 、 $(n_{min} - n_{20}, n_{max} - n_{20})$ 、中心軸間距離に関しては $(L_{min} - L_{10}, L_{max} - L_{10})$ 、 $(L_{min} - L_{20}, L_{max} - L_{20})$ を不確かさと定義し、この値を最小とする点 $(n_{10}, D_{10}, n_{20}, D_{20}, L_0, 0)$ を求めることにより、被測定物の直径、屈折率、中心軸間距離及び入射光軸と間隔のなす角を算出する。

【実施例】

【0025】

以下に、実施例を用いて本発明を説明する。

被測定物としては、中心軸が平行関係を持ち、中心軸間距離が大きい試料 A (図 1 (a) a - 1 相当) と中心軸間距離が小さい試料 B、C (図 1 (a) a - 2 相当) を用いた

これらの試料を図 2 の直径・屈折率測定装置 1 の支持台 5 b にセットして、波長 $\lambda = 441.6 \text{ nm}$ のレーザ光を投射し、散乱角度 θ_i を 0 度から 150 度の間で、2 度刻みに順次変化させ、その散乱強度を測定し、測定散乱光強度 I_i とした。

【0026】

次にパーソナルコンピュータに先の散乱角度 θ_i と測定散乱光強度 I_i を入力し、散乱角度 θ_i から計算散乱光強度 I_i を求め、測定散乱光強度 I_i と求めた計算散乱光強度 I_i から偏差指標 $U_I(n_1, D_1, n_2, D_2, L,)$ を計算し、 $U_I(n_1, D_1, n_2, D_2, L,)$ を最小とする値を最適値として求め、その時の D_1 、 n_1 、 D_2 、 n_2 、 L を各々直径、屈折率及び中心軸間距離とした。その結果を表 1 に記した。

なお、測定は、垂直偏光及び水平偏光の両者で行なっている。

【0027】

【表 1】

試料	$E_{\parallel} / E_{\perp}$	n_1 [nm]	D_1 [nm]	n_2 [nm]	D_2 [nm]	L [nm]	ψ [deg]	U_I [%]
A	E_{\parallel}	1.554	176	1.544	165	7651	8.47	10.2
	E_{\perp}	1.542	173	1.540	171	7552	6.50	6.64
B	E_{\parallel}	1.667	253	1.739	232	255	70.0	2.56
	E_{\perp}	1.557	246	1.566	250	248	71.0	2.02
C	E_{\parallel}	1.662	199	1.672	224	212	78.3	1.75
	E_{\perp}	1.576	202	1.590	226	214	78.7	2.18

【0028】

表 1 から明らかなように、中心軸が平行関係を持つ 2 つの円柱体からなる試料 A、B、

C (図 1 (a) に示す形態) では、中心軸間距離が nm オーダーでも、 μ m オーダーで離れていても精度良く各円柱体の直径、屈折率が求められていることがわかる。

垂直偏光を用いた場合と水平偏光を用いた場合での得られる精度には大きな差が無いこともわかる。

【図面の簡単な説明】

【0029】

【図1】被測定物の形態例を示す模式図である。

【図2】本発明に係る測定方法フローチャートである。

【図3】直径・屈折率・中心間距離測定装置の一例を示す図である。

【図4】直径・屈折率・中心間距離測定装置の別の一例を示す図である。

【図5】数1の幾何学表示を示す説明図である。

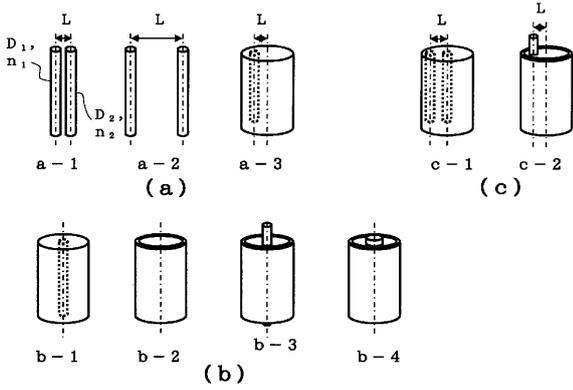
【図6】数2の幾何学表示を示す説明図である。

【符号の説明】

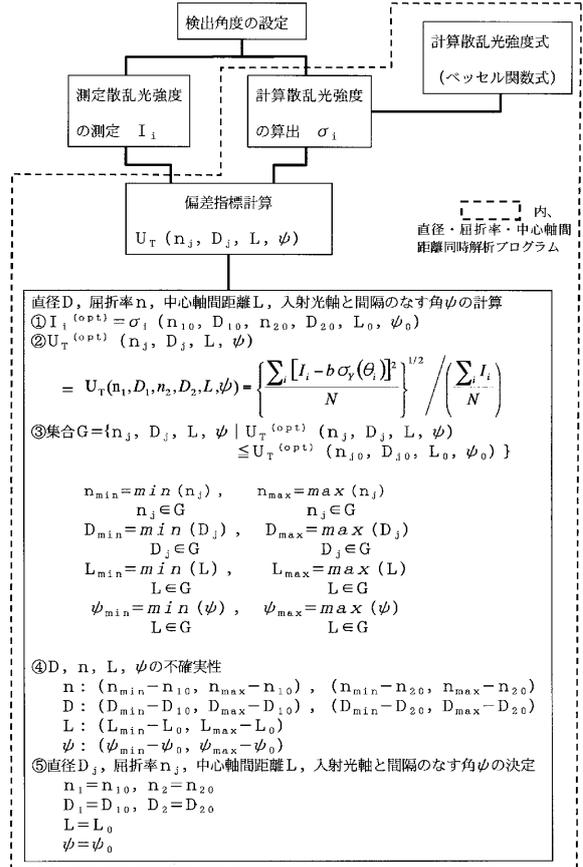
【0030】

1	測定装置	
2	被測定物	
3	光源	
3 a	レーザー光	
3 b	散乱光	
4	偏向装置	20
5 a	検出部	
5 b	支持台	
6	検出器	
7	演算部	
i	散乱角度	
I_i	測定光散乱強度	
i	計算散乱光強度	
D_1 、 D_2	直径	
n_1 、 n_2	屈折率	
L	中心軸間距離	30
	入射光軸と間隔Lのなす角	

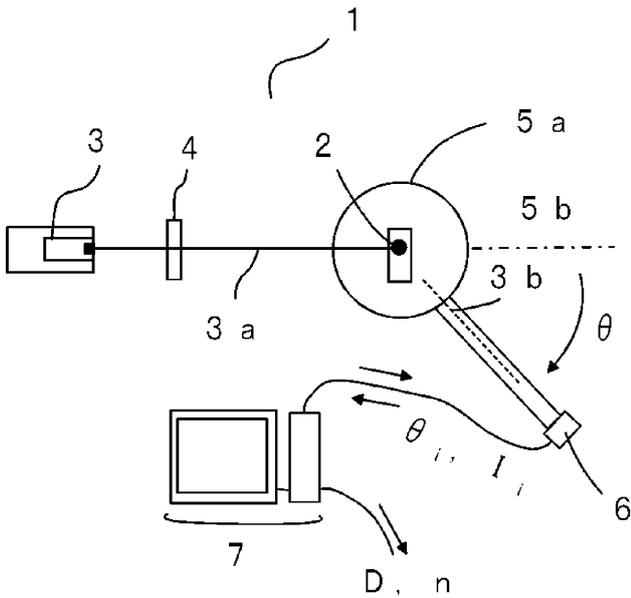
【 図 1 】



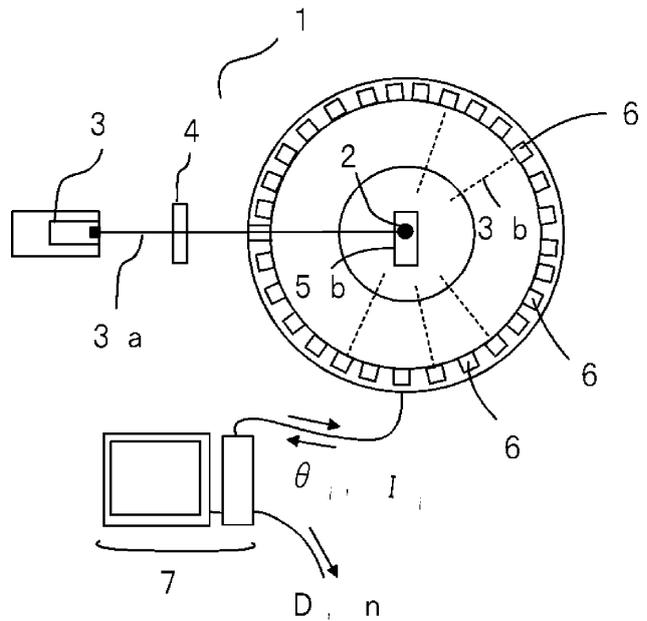
【 図 2 】



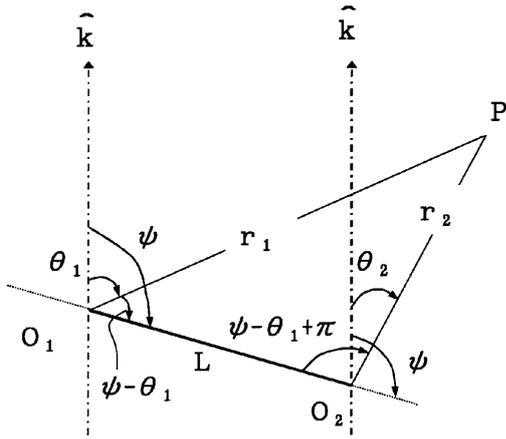
【 図 3 】



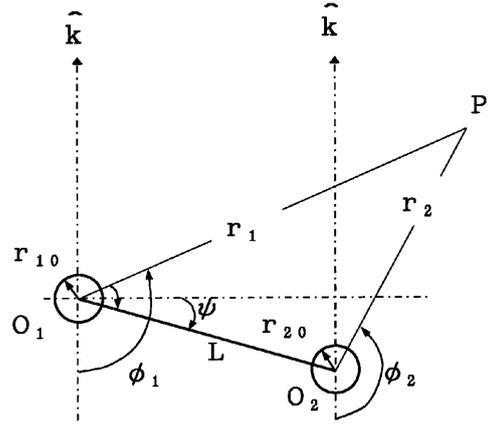
【 図 4 】



【 図 5 】



【 図 6 】



フロントページの続き

Fターム(参考) 2G059 AA02 AA03 BB08 DD13 EE02 EE05 GG01 KK03 MM01 MM02