

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6933218号
(P6933218)

(45) 発行日 令和3年9月8日(2021.9.8)

(24) 登録日 令和3年8月23日(2021.8.23)

(51) Int.Cl.	F I
CO3B 37/018 (2006.01)	CO3B 37/018 B
CO3B 37/014 (2006.01)	CO3B 37/014 Z
GO2B 6/02 (2006.01)	GO2B 6/02 356A

請求項の数 11 (全 22 頁)

(21) 出願番号	特願2018-531920 (P2018-531920)	(73) 特許権者	000002130
(86) (22) 出願日	平成29年8月1日(2017.8.1)		住友電気工業株式会社
(86) 国際出願番号	PCT/JP2017/027891		大阪府大阪市中央区北浜四丁目5番33号
(87) 国際公開番号	W02018/025857	(74) 代理人	100088155
(87) 国際公開日	平成30年2月8日(2018.2.8)		弁理士 長谷川 芳樹
審査請求日	令和2年4月21日(2020.4.21)	(74) 代理人	100113435
(31) 優先権主張番号	特願2016-151766 (P2016-151766)		弁理士 黒木 義樹
(32) 優先日	平成28年8月2日(2016.8.2)	(74) 代理人	100136722
(33) 優先権主張国・地域又は機関	日本国(JP)		弁理士 ▲高▼木 邦夫
		(74) 代理人	100174399
			弁理士 寺澤 正太郎
		(72) 発明者	榎本 正
			神奈川県横浜市栄区田谷町1番地 住友電気工業株式会社横浜製作所内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 光ファイバ母材製造方法および光ファイバ製造方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

中心軸に沿って延びるとともに光ファイバ母材の一部を構成し、かつ、前記中心軸に直交する断面上においてその半径方向に沿って規定される屈折率分布が所定形状に調整されたコア母材を製造するため、前記コア母材となるべきガラス母材として、前記中心軸に一致する方向に沿って延びたガラス堆積対象物の内周面上または外周面上に、屈折率調整剤Mの添加量を調整しながら合成されたガラス微粒子を順次積み重ねることにより、前記コア母材の断面に一致するとともに前記中心軸を取り囲むように複数のガラス層が同心円状に配置された断面を有するガラス母材を製造するガラス合成工程を備えた光ファイバ母材製造方法であって、

当該光ファイバ母材製造方法は、

過去に製造されたm(2以上の整数)個のコア母材サンプルのうちi(=1~m)番目のコア母材サンプルの断面および前記i番目のコア母材サンプルとなったi番目のガラス母材サンプルを構成する前記ガラス層の層数のうち一方について、任意に設定された調節領域を前記半径方向に沿ってn(2以上の整数)個の区間に分割するとともに、他方について、前記n個の分割区間に一対一に対応するよう、前記調節領域に対応する領域を前記半径方向に沿って分割し、

屈折率分布データとして前記i番目のコア母材サンプルにおけるk(=1~n)番目の分割区間の比屈折率差の実測データと、製造条件データとして前記i番目のガラス母材サンプルにおけるk番目の分割区間に添加された前記屈折率調整剤Mの添加量データを含む

ガラス合成実績データを作成し、

前記 m 個のコア母材サンプルそれぞれの前記 k 番目の分割区間のガラス合成実績データから、目標値に対する前記比屈折率差の実測データの偏差と前記屈折率調整剤 M の添加量データとの相関を算出し、

前記 m 個のコア母材サンプルそれぞれの前記 k 番目の分割区間における前記相関から、前記偏差の絶対値が最小になるような前記屈折率調整剤 M の理論添加量を求める、前記ガラス合成工程に先立って行われる前処理工程を更に備え、

前記ガラス合成工程は、

前記ガラス微粒子の合成時に供給される前記屈折率調整剤 M の添加量を前記理論添加量に調整した状態で、前記 m 個のコア母材サンプルそれぞれの前記 k 番目の分割区間に相当する k 番目のガラス合成区間に属する 1 またはそれ以上のガラス層を、前記ガラス堆積対象物の内周面上または外周面上へ順次形成する、

光ファイバ母材製造方法。

【請求項 2】

前記 i 番目のコア母材サンプルにおける前記 k 番目の分割区間を表す指標となる前記 k 番目の分割区間の外周半径 r_k と、前記 i 番目のガラス母材サンプルにおける k 番目のガラス合成区間 l_k は、所定の関数 f により以下の式 (1) の関係を満たし、

【数 1】

$$\begin{cases} r_k = f(l_k) \\ l_k = f^{-1}(r_k) \end{cases} \quad \dots (1)$$

前記 i 番目のコア母材サンプルそれぞれのガラス合成実績データとして、前記 i 番目のコア母材サンプルの前記 k 番目の分割区間における前記屈折率調整剤 M の添加量を $M(r_k)_i$ 、前記 i 番目のコア母材サンプルの前記 k 番目の分割区間における前記比屈折率差の偏差を $(r_k)_i$ とするとき、前記コア母材の、製造されるべき k 番目の分割区間における前記屈折率調整剤 M の理論添加量 $M(r_k)_{opt}$ は以下の式 (2) で与えられ、

【数 2】

$$M(r_k)_{opt} = \frac{\left(\sum_{i=1}^m M(r_k)_i^2 \right) \left(\sum_{i=1}^m \varepsilon(r_k)_i \right) - \left(\sum_{i=1}^m M(r_k)_i \right) \left(\sum_{i=1}^m M(r_k)_i \cdot \varepsilon(r_k)_i \right)}{\left(\sum_{i=1}^m M(r_k)_i \right) \left(\sum_{i=1}^m \varepsilon(r_k)_i \right) - m \left(\sum_{i=1}^m M(r_k)_i \cdot \varepsilon(r_k)_i \right)} \quad \dots (2)$$

前記コア母材となるべきガラス母材の、製造されるべき k 番目のガラス合成区間 l_k における前記屈折率調整剤 M の理論添加量 $M(l_k)_{opt}$ は、前記式 (1) によって l_k と関係付けられる r_k における前記屈折率調整剤 M の理論添加量 $M(r_k)_{opt}$ で与えられることを特徴とする請求項 1 に記載の光ファイバ母材製造方法。

【請求項 3】

前記屈折率調整剤 M は、1 種類の添加剤を含むことを特徴とする請求項 1 または 2 に記載の光ファイバ母材製造方法。

【請求項 4】

前記屈折率調整剤 M は、ゲルマニウムを含むことを特徴とする請求項 1 ~ 3 の何れか一項に記載の光ファイバ母材製造方法。

【請求項 5】

前記屈折率調整剤 M は、1 種類の第 1 添加剤と 1 またはそれ以上の種類の第 2 添加剤を含み、

前記ガラス合成工程は、n 個のガラス合成区間を形成している期間中、前記第 2 添加剤の添加条件を固定した状態で、形成するガラス合成区間ごとに前記第 1 添加剤の添加量を調整することを特徴とする請求項 1 または 2 に記載の光ファイバ母材製造方法。

【請求項 6】

10

20

30

40

50

前記屈折率調整剤Mは、ゲルマニウム、リン、フッ素、ボロンから選択された2種類以上の添加剤を含むことを特徴とする請求項5に記載の光ファイバ母材製造方法。

【請求項7】

前記第1添加剤は、ゲルマニウムを含むことを特徴とする請求項6に記載の光ファイバ母材製造方法。

【請求項8】

前記ガラス合成工程により製造されたガラス母材を透明にするために前記ガラス母材を焼結する焼結工程を、さらに備えることを特徴とする請求項1～7の何れか一項に記載の光ファイバ母材製造方法。

【請求項9】

前記ガラス堆積対象物は、中空のガラス管を含み、

前記ガラス合成工程は、前記ガラス管の内周面上に、前記複数のガラス層を順次堆積させることを特徴とする請求項1～8の何れか一項に記載の光ファイバ母材製造方法。

【請求項10】

請求項1～9の何れか一項に記載の光ファイバ母材製造方法により製造されたコア母材を含む光ファイバ母材を用意し、

前記光ファイバ母材の一端を加熱しながら線引きすることにより、前記中心軸に沿って伸びたコアと、前記コアの外周面を前記中心軸に沿って覆うクラッドとを備えた光ファイバであって、当該光ファイバのコアにおける屈折率分布の、目標屈折率分布からの偏差は、純粋シリカガラスの屈折率に対する比屈折率差で0.002%以下である光ファイバを製造する光ファイバ製造方法。

【請求項11】

請求項1～9の何れか一項に記載の光ファイバ母材製造方法により製造された、前記中心軸に直交する半径方向に沿って乗分布に従った屈折率分布を有するコア母材を含む光ファイバ母材を用意し、

前記光ファイバ母材の一端を加熱しながら線引きすることにより、前記中心軸に沿って伸びたコアと、前記コアの外周面を前記中心軸に沿って覆うクラッドとを備えたマルチモード光ファイバであって、乗分布の形状を規定する値は、1.9～2.3の範囲内に収まっており、かつ、800～1000nmの範囲に含まれる何れかの波長(nm)における実効帯域EMB()は、 $-20 \cdot + 21700 \text{ MHz} \cdot \text{km}$ 以上であるマルチモード光ファイバを製造する光ファイバ製造方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明の実施形態は、光ファイバ母材製造方法および光ファイバ製造方法に関するものである。

【背景技術】

【0002】

一般に、光ファイバ母材は、線引き後にコアとなるべきコア母材の製造工程と、該コア母材の外周面上に設けられ、線引き後にクラッドとなるべきクラッド母材(外周部)の製造工程とで構成された母材製造方法により製造される。

【0003】

コア母材の製造工程は、ガラス合成工程と、該ガラス合成工程に続いて行われる、脱水、焼結(コラップス含む)、延伸などの後処理工程とにより構成される。特に、ガラス合成工程では、一例として、複数のガラス層を積み重ねることによりガラス母材が製造される。このガラス母材の製造方法としては、ガラス堆積対象物の外周面上にガラス層を形成していく外付けCVD(Cheical Vapor Deposition)法と、ガラス堆積対象物の内周面上にガラス層を形成していく内付けCVD(Cheical Vapor Deposition)法がある。

【0004】

特に、外付けCVD法としては、例えば特許文献1に開示されたOVD(Outside Vapo

10

20

30

40

50

r phase Deposition) 法が知られており、ガラス堆積対象物として用意された心棒の外周面上に供給されたガラス生成ガスを、酸水素パーナで火炎加水分解反応させることにより、該心棒の外周面上に合成されたガラス微粒子を堆積させることにより複数のガラス層が積み重ねられる。

【0005】

一方、内付けCVD法としては、例えば特許文献2に開示されたMCVD(Modified Chemical Vapor Deposition)法や、特許文献3に記載されたPCVD(Plasma-activated Chemical Vapor Deposition)が知られている。MCVD法およびPCVD法の何れも、ガラス堆積対象物として中空ガラス管が用いられ、該ガラス管内に導入されたガラス生成ガスを酸化反応させることにより、合成されたガラス微粒子がガラス管の内周面上に堆積される。なお、ガラス管内での酸化反応は、MCVD法の場合、酸水素パーナによりガラス管を加熱することにより促進され、PCVD法の場合、ガラス管外に配置された高周波キャピティにより該ガラス管内にプラズマを発生させることにより促進される。

10

【0006】

なお、上述のガラス合成工程を経て、所望の 乗分布に従った屈折率分布を有するコア母材が得られ、該コア母材を含む光ファイバ母材を線引きすることにより、所望の光学特性を有するマルチモード光ファイバ(以下、「MMF」と記す)が得られる。

【0007】

例えば、特許文献4には、 乗分布に従ったコアの屈折率分布を僅かに修飾することで、より広帯域な特性を有するMMFを得る技術が開示されている。特許文献5には、コアにおける屈折率分布と 乗分布の偏差を0.0015%未満に制御することにより、800nm以上の波長範囲に含まれる何れかの波長において5000MHz・km以上の帯域特性を有するMMFを得る技術が開示されている。さらに、特許文献6には、コア母材の、半径方向に沿った屈折率分布の形状(フィッティング形状)に基づき、線引き張力やコア径の調整の他、クラッド合成の調整を行う、MMFの製造方法が開示されている。

20

【先行技術文献】

【特許文献】

【0008】

【特許文献1】米国特許第8,815,103号

【特許文献2】米国特許第7,155,098号

【特許文献3】米国特許第7,759,874号

【特許文献4】米国特許第6,292,612号

【特許文献5】米国公開第2014/0119701号公報

【特許文献6】米国公開第2013/0029038号公報

30

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0009】

発明者らは、従来の光ファイバ母材製造方法について検討した結果、以下のような課題を発見した。すなわち、上記特許文献1~6に開示された製造方法は何れも、製造されたコア母材における屈折率分布の形状を理想曲線に高精度に合わせ込むのには長い時間を要していた。具体的には、母材製造者が経験則に則って屈折率調整剤の添加量を調整することが多く、添加量の調整自体が曖昧なものであった。さらに、基本となる製造条件が異なると、屈折率調整剤の添加量調節のため、改めて多数のデータ(経験)を蓄積する必要があった。

40

【0010】

本発明の実施形態は、上述のような課題を解決するためになされたものであり、コア母材における屈折率分布の形状を高精度にかつ短時間に理想曲線に合わせ込むことを可能にするための構造を備えた光ファイバ母材製造方法、および該光ファイバ母材を利用する光ファイバ製造方法を提供することを目的としている。

【課題を解決するための手段】

50

【0011】

上記目的を達成すべく本実施形態に係る光ファイバ母材製造方法は、コア母材を製造するため、ガラス合成工程と、該ガラス合成工程に先立って実施される前処理工程とを、少なくとも備える。ガラス合成工程では、中心軸に沿って延びるとともに光ファイバ母材の一部を構成し、かつ、中心軸に直交する断面上においてその半径方向に沿って規定される屈折率分布が所定形状に調整されたコア母材が製造される。

【0012】

特に、ガラス合成工程では、コア母材となるべきガラス母材として、中心軸に一致する方向に沿って延びたガラス堆積対象物の内周面上または外周面上に、屈折率調整剤Mの添加量を調整しながら合成されたガラス微粒子が順次積み重ねられる。これにより、コア母材の断面に一致するとともに中心軸を取り囲むように複数のガラス層が同心円状に配置された断面を有するガラス母材が製造される。また、前処理工程では、過去に製造されたコア母材サンプルの任意に設定された調節領域について、屈折率調整剤Mの添加量制御単位となる分割区間の設定、ガラス合成実績データの作成、および関連の算出が行われるとともに、ガラス合成工程における屈折率調整剤Mの理論添加量の決定が行われる。分割区間の設定では、過去に製造された m （2以上の整数）個のコア母材サンプルのうち i （ $= 1 \sim m$ ）番目のコア母材サンプルの断面および i 番目のコア母材サンプルとなった i 番目のガラス母材サンプルを構成するガラス層の層数のうち一方について、調節領域が半径方向に沿って n （2以上の整数）個の区間に分割されるとともに、他方について、上述のように分割された n 個の分割区間に一対一に対応するよう、調節領域に対応する領域が半径方向に沿って分割される。ガラス合成実績データには、屈折率分布データとして i 番目のコア母材サンプルにおける k （ $= 1 \sim n$ ）番目の分割区間の比屈折率差の実測データと、製造条件データとして i 番目のガラス母材サンプルにおける k 番目の分割区間に添加された屈折率調整剤Mの添加量データが含まれる。関連の算出では、 m 個のコア母材サンプルそれぞれの k 番目の分割区間のガラス合成実績データから、目標値に対する比屈折率差の実測データの偏差と屈折率調整剤Mの添加量データとの相関が算出される。理論添加量の決定では、 m 個のコア母材サンプルそれぞれの k 番目の分割区間における相関から、偏差の絶対値が最小になるような屈折率調整剤Mの理論添加量が求められる。

【0013】

ガラス合成工程では、ガラス微粒子の合成時に供給される屈折率調整剤Mの添加量を理論添加量に調整した状態で、 m 個のコア母材サンプルそれぞれの k 番目の分割区間に相当する k 番目のガラス合成区間に属する1またはそれ以上のガラス層が、ガラス堆積対象物の内周面上または外周面上へ順次形成される。

【0014】

なお、本発明に係る各実施形態は、以下の詳細な説明及び添付図面によりさらに十分に理解可能となる。これら実施例は単に例示のために示されるものであって、本発明を限定するものと考えべきではない。

【0015】

また、本発明のさらなる応用範囲は、以下の詳細な説明から明らかになる。しかしながら、詳細な説明及び特定の事例はこの発明の好適な実施形態を示すものではあるが、例示のためにのみ示されているものであって、本発明の範囲における様々な変形および改良はこの詳細な説明から当業者には自明であることは明らかである。

【発明の効果】

【0016】

本実施形態によれば、コア母材における屈折率分布の形状を高精度にかつ短時間に理想曲線に合わせ込むことが可能になる。また、製造された光ファイバ間において、目的とする光学特性のパラッキが抑制されるため、光ファイバの製造歩留まりが改善され得る。

【図面の簡単な説明】

【0017】

【図1A】光ファイバ母材の構造を示す図である。

10

20

30

40

50

【図 1 B】図 1 A の光ファイバ母材の半径方向に沿った屈折率分布である。

【図 1 C】図 1 A の光ファイバ母材の線引き工程を示す図である。

【図 1 D】図 1 C の線引き工程を経て得られた光ファイバの断面構造を示す図である。

【図 2】本実施形態に係る光ファイバ母材製造方法におけるコア母材製造工程 S T 1 0 0 を説明するためのフローチャートである。

【図 3】図 2 に示されたコア母材製造工程 S T 1 0 0 における後処理 S T 1 3 0 を説明するためのフローチャートである。

【図 4 A】コア母材用のガラス母材を得るための外付け C V D 法として O V D 法によりガラス合成工程 S T 1 2 0 を実施するための O V D 製造装置の構造を示す図である。

【図 4 B】図 4 A の O V D 製造装置における材料ガス供給システムの構造を示す図である

10

【図 5 A】ガラス合成工程 S T 1 2 0 後のガラス母材の断面と、該ガラス母材に対して後処理工程 S T 1 3 0 を行うことにより得られるコア母材の断面との対応関係を示す図である。

【図 5 B】図 5 A のガラス母材の断面における分割区間と図 5 A のコア母材の断面における分割区間との対応関係の一例を示す図である。

【図 6 A】光ファイバ母材、特にコア母材用のガラス母材を内付け C V D 法 (M C V D 法、 P C V D 法) により製造するための内付け C V D 製造装置の構造を示す図である。

【図 6 B】図 6 A の内付け C V D 製造装置における材料ガス供給システムの構造を示す図である。

20

【図 7 A】図 6 A の内付け C V D 製造装置において M C V D 法を実施するための加熱システムの構造を示す図である。

【図 7 B】図 6 A の内付け C V D 製造装置において P C V D 法を実施するための加熱システムの構造を示す図である。

【図 8】図 2 に示されたコア母材製造工程 S T 1 0 0 における前処理工程 S T 1 1 0 を説明するためのフローチャートである。

【図 9 A】前処理 S T 1 1 0 において作成されるガラス合成実績データの構造を示す図である (その 1) 。

【図 9 B】前処理 S T 1 1 0 において作成されるガラス合成実績データの構造を示す図である (その 2) 。

30

【図 1 0】図 9 B のガラス合成実績データに基づいた G e の理論添加量の算出を説明するための図である。

【図 1 1】図 2 に示されたコア母材製造工程 S T 1 0 0 におけるガラス合成工程 S T 1 2 0 を説明するためのフローチャートである。

【発明を実施するための形態】

【 0 0 1 8 】

[本願発明の実施形態の説明]

最初に本願発明の実施形態の内容をそれぞれ個別に列挙して説明する。

【 0 0 1 9 】

(1) 本実施形態に係る光ファイバ母材製造方法は、コア母材を製造するため、その一態様として、ガラス合成工程と、該ガラス合成工程に先立って実施される前処理工程とを、少なくとも備える。ガラス合成工程では、中心軸に沿って延びるとともに光ファイバ母材の一部を構成し、かつ、中心軸に直交する断面上においてその半径方向に沿って規定される屈折率分布が所定形状に調整されたコア母材となるべきガラス母材が製造される。

40

【 0 0 2 0 】

特に、ガラス合成工程では、ガラス母材として、中心軸に一致する方向に沿って延びたガラス堆積対象物の内周面上または外周面上に、屈折率調整剤 M の添加量を調整しながら合成されたガラス微粒子が順次積み重ねられる。これにより、コア母材の断面に一致するとともに中心軸を取り囲むように複数のガラス層が同心円状に配置された断面を有するガラス母材が製造される。また、前処理工程では、過去に製造されたコア母材サンプルの任

50

意に設定された調節領域について、屈折率調整剤Mの添加量制御単位となる分割区間の設定、ガラス合成実績データの作成、および相関の算出が行われるとともに、ガラス合成工程における屈折率調整剤Mの理論添加量の決定が行われる。分割区間の設定では、過去に製造された m （2以上の整数）個のコア母材サンプルのうち i （ $= 1 \sim m$ ）番目のコア母材サンプルの断面および i 番目のコア母材サンプルとなった i 番目のガラス母材サンプルを構成するガラス層の層数のうち一方について、調節領域が半径方向に沿って n （2以上の整数）個の区間に分割されるとともに、他方について、上述のように分割された n 個の分割区間に一対一に対応するよう、調節領域に対応する領域が半径方向に沿って分割される。なお、調節領域は、半径方向に沿ってコア母材サンプルの全範囲が設定されても、一部が設定されてもよい。設定された調節領域における分割区間は等分割された区間であつても、半径方向に沿ってサイズが異なる区間であつてもよい。また、複数の調節領域が連続してまたは離間した状態で設定されてもよい。複数の調節領域のうち或る調節領域の分割区間サイズと、他の調節領域の分割区間サイズとは一致する必要はない。この場合、製造されるべきコア母材の中心軸側において粗い添加量調節（分割サイズが大きく設定される）が行われる一方、外側において細かい添加量調節（分割サイズが小さく設定される）が行われることも可能になる。

【0021】

ガラス合成実績データには、屈折率分布データとして i 番目のコア母材サンプルにおける k （ $= 1 \sim n$ ）番目の分割区間の比屈折率差の実測データと、製造条件データとして i 番目のガラス母材サンプルにおける k 番目の分割区間に添加された屈折率調整剤Mの添加量データが含まれる。相関の算出では、 m 個のコア母材サンプルそれぞれの k 番目の分割区間のガラス合成実績データから、目標値に対する比屈折率差の実測データの偏差と屈折率調整剤Mの添加量データとの相関が算出される。理論添加量の決定では、 m 個のコア母材サンプルそれぞれの k 番目の分割区間における相関から、偏差の絶対値が最小になるような屈折率調整剤Mの理論添加量が求められる。

【0022】

ガラス合成工程では、ガラス微粒子の合成時に供給される屈折率調整剤Mの添加量を理論添加量に調整した状態で、 m 個のコア母材サンプルそれぞれの k 番目の分割区間に相当する k 番目のガラス合成区間に属する1またはそれ以上のガラス層が、ガラス堆積対象物の内周面上または外周面上へ順次形成される。

【0023】

（2）本実施形態の一態様として、 i 番目のコア母材サンプルにおける k 番目の分割区間を表す指標となる k 番目の分割区間の外周半径 r_k と、 i 番目のガラス母材サンプルにおける k 番目のガラス合成区間 l_k は、所定の関数 f により以下の式（1）の関係を満たすのが好ましい。

【数1】

$$\begin{cases} r_k = f(l_k) \\ l_k = f^{-1}(r_k) \end{cases} \quad \dots (1)$$

加えて、 i 番目のコア母材サンプルそれぞれのガラス合成実績データとして、 i 番目のコア母材サンプルの k 番目の分割区間における屈折率調整剤Mの添加量を $M(r_k)_i$ 、 i 番目のコア母材サンプルの k 番目の分割区間における比屈折率差の偏差を $(r_k)_i$ とすると、コア母材の、製造されるべき k 番目の分割区間における屈折率調整剤Mの理論添加量 $M(r_k)_{opt}$ は以下の式（2）で与えられ、コア母材となるべきガラス母材の、製造されるべき k 番目のガラス合成区間 l_k における屈折率調整剤Mの理論添加量 $M(l_k)_{opt}$ は、上記式（1）によって l_k と関係付けられる r_k における屈折率調整剤Mの理論添加量 $M(r_k)_{opt}$ で与えられるのが好ましい。

【数2】

$$M(r_k)_{opt} = \frac{\left(\sum_{i=1}^m M(r_k)_i^2 \right) \left(\sum_{i=1}^m \varepsilon(r_k)_i \right) - \left(\sum_{i=1}^m M(r_k)_i \right) \left(\sum_{i=1}^m M(r_k)_i \cdot \varepsilon(r_k)_i \right)}{\left(\sum_{i=1}^m M(r_k)_i \right) \left(\sum_{i=1}^m \varepsilon(r_k)_i \right) - m \left(\sum_{i=1}^m M(r_k)_i \cdot \varepsilon(r_k)_i \right)} \quad \dots (2)$$

【0024】

(3) 本実施形態の一態様として、屈折率調整剤Mは、1種類の添加剤を含むのが好ましい。また、本実施形態の一態様として、屈折率調整剤Mは、ゲルマニウムを含むのが好ましい。

10

【0025】

(4) 本実施形態の一態様として、屈折率調整剤Mは、1種類の第1添加剤と1またはそれ以上の種類の第2添加剤を含んでもよい。この場合、ガラス合成工程では、n個のガラス合成区間を形成している期間中、第2添加剤の添加条件を固定した状態で、形成されるガラス合成区間ごとに第1添加剤の添加量が調整されるのが好ましい。本実施形態の一態様として、屈折率調整剤Mは、ゲルマニウム、リン、フッ素、ボロンから選択された2種類以上の添加剤を含むのが好ましい。本実施形態の一態様として、第1添加剤は、ゲルマニウムを含むのが好ましい。

【0026】

(5) 本実施形態の一態様として、当該光ファイバ母材製造方法は、ガラス合成工程により製造されたガラス母材を透明にするためにガラス母材を焼結する焼結工程を、さらに備えてもよい。

20

【0027】

(6) 本実施形態に係る光ファイバ製造方法は、一態様として、上述の当該光ファイバ母材製造方法により製造されたコア母材を含む光ファイバ母材を用意し、該光ファイバ母材の一端を加熱しながら線引きすることにより、所望の光ファイバを製造する。この場合、製造される光ファイバは、中心軸に沿って伸びたコアと、コアの外周面を中心軸に沿って覆うクラッドとを備える。加えて、当該光ファイバのコアにおける屈折率分布の、目標屈折率分布からの偏差は、純粋シリカガラスの屈折率に対する比屈折率差で0.002%以下であるのが好ましい。

30

【0028】

(7) また、本実施形態に係る光ファイバ製造方法は、一態様として、上述の当該光ファイバ母材製造方法により製造された、中心軸に直交する半径方向に沿って乗分布に従った屈折率分布を有すコア母材を含む光ファイバ母材を用意し、該光ファイバ母材の一端を加熱しながら線引きすることによりMMFを製造してもよい。この場合、製造されるべきMMFは、中心軸に沿って伸びたコアと、コアの外周面を中心軸に沿って覆うクラッドとを備える。また、広帯域光伝送を保証するため、当該MMFにおいて、乗分布の形状を規定する値は、1.9~2.3の範囲内に収まっているのが好ましい。加えて、800~1000nmの範囲に含まれる何れかの波長(nm)における実効帯域EMB()は、-20. +21700MHz·km以上であるのが好ましい。

40

【0029】

以上、この[本願発明の実施形態の説明]の欄に列挙された各態様は、残りの全ての態様のそれぞれに対して、または、これら残りの態様の全ての組み合わせに対して適用可能である。

【0030】

[本願発明の実施形態の詳細]

本発明の実施形態に係る光ファイバ母材製造方法および光ファイバ製造方法の具体例を、以下に添付の図面を参照しながら詳細に説明する。なお、本発明の実施形態は、これら例示に限定されるものではなく、特許請求の範囲によって示され、特許請求の範囲と均等の意味および範囲内での全ての変更が含まれることが意図されている。また、図面の説明

50

において同一の要素には同一の符号を付し、重複する説明を省略する。

【0031】

図1Aは、光ファイバ母材の構造を示す図であり、図1Bは、図1Aの光ファイバ母材の半径方向に沿った屈折率分布であり、図1Cは、図1Aの光ファイバ母材の線引き工程を示す図であり、図1Dは、図1Cの線引き工程を経て得られた光ファイバの断面構造を示す図である。

【0032】

図1Aに示された光ファイバ母材100は、中心軸AXに沿って伸びた、半径aを有するコア母材10と、コア母材10の外周面上に設けられたクラッド母材(外周部)20から構成されている。なお、コア母材10は、当該光ファイバ母材100を線引きすることにより得られる光ファイバ110のコア110A(図1D)に相当し、クラッド母材20は、光ファイバ110のクラッド110B(図1D)に相当する。

10

【0033】

また、図1Bに示されたように中心軸AXに直交する断面上でその形状が規定される、コア母材10の屈折率分布150は、乗分布に従った形状を有する。なお、以下の説明において、ある領域の屈折率をnとして、その領域の比屈折率差は、純粋シリカガラスの屈折率をn₀として、以下の式(3)で表される。

【数3】

$$\Delta = \left\{ 1 - (n_0/n)^2 \right\} / 2 \quad \dots (3)$$

20

【0034】

また、乗分布とは、中心軸AXを原点とする半径をr、コア半径をa、中心軸AX上での比屈折率差を Δ_0 、コア外縁での比屈折率差を Δ_{0e} 、クラッド110Bでの比屈折率差を Δ_1 として、コア110Aおよびクラッド110Bの比屈折率差が以下の式(4)で表される屈折率分布を指す。なお、製造上生じる添加物濃度のバラツキや不純物の混入による屈折率のバラツキがあったとしても、式(4)におおよそ従っていれば乗分布とみなしてよい。

【数4】

$$\Delta(r) = \begin{cases} \Delta_0 \left\{ 1 - (r/a)^\alpha \right\} + \Delta_{0e} & (r \leq a) \\ \Delta_1 & (a < r) \end{cases} \quad \dots (4)$$

30

【0035】

なお、図1Bの例では、中心軸AX上におけるコア110Aの屈折率はn₁であり、クラッド110Bの屈折率はn₀であり、コア外縁とクラッド110Bの屈折率は一致している。したがって、図1Bの例では、 $\Delta_{0e} = \Delta_1 = 0$ である。

【0036】

以上のような構造を有する光ファイバ110の一端が、図1Cに示されたように、ヒータ300により加熱されることにより軟化される。このとき、軟化した一端を矢印S1で示された方向に線引きすることにより、中心軸AXに沿って伸びたコア110Aと、コア110Aの外周面上に設けられたクラッド110Bを備えた光ファイバ110が得られる。このとき、光ファイバ110のコア110Aにおける屈折率分布の、目標屈折率分布からの偏差は、純粋シリカガラスの屈折率に対する比屈折率差で0.002%以下である。また、得られた光ファイバ110は、図1Bに示されたように乗分布に従ったGI(Graded-Index)型の屈折率分布を有するMMFとなる。このとき、広帯域光伝送を保証するため、乗分布の形状を規定する値は、1.9~2.3の範囲内に収まっているのが好ましい。加えて、800~1000nmの範囲に含まれる何れかの波長(nm)における実効帯域EMB()は、-20. +21700MHz·km以上であるのが好ましい。なお、好ましい実効帯域が波長に依存する形になっているのは、材料分散を考慮して

40

50

いるためである。波長800～1000nmにおいては、材料分散は波長の増加によりほぼ直線的に減少するため、波長が長いほど実効帯域は小さくて良い。

【0037】

なお、MMFの帯域は、MMFの複数の導波モードが光源によってどのように励振されるかに依存する。近距離情報通信における光源として広く用いられている面発光型半導体レーザー(VCSSEL:Vertical Cavity Surface Emitting Laser)で励振されたときの典型的な帯域を表す指標として、実効モード帯域(EMB:Effective Mode Bandwidth)が定義されている。EMBは、MMFの差動群遅延(DMD:Differential Mode Delay)を測定した結果から、計算最小実効モード帯域(minEMBc:calculated minimum Effective Mode Bandwidth)を計算し、以下の式(5)によって得られる。なお、これらの計算方法の詳細は、IEC 60793-1-49:2006およびIEC 60793-2-10:2011に規定されている。

10

【数5】

$$EMB = 1.13 \times \min EMBc \quad \dots (5)$$

【0038】

次に、図2は、本実施形態に係る光ファイバ母材製造方法を説明するためのフローチャートである。

【0039】

本実施形態に係る光ファイバ母材製造方法は、コア母材製造工程ST100と、該コア母材製造工程ST100を経て得られたコア母材10の屈折率分布データを取得する実測工程ST200と、得られたコア母材10の外周面上にクラッド110Bとなるべきクラッド母材20を形成する外周部製造工程(クラッド母材製造工程)ST300と、外周部製造工程ST300を経て得られた光ファイバ母材100を図1Cに示されたように線引きする線引き工程ST400を備える。なお、外周部製造工程ST300は、実測工程ST200を経たコア母材10の外周面上にガラス微粒子を堆積させるスス付工程ST310と、後処理工程ST320を備える。

20

【0040】

コア母材製造工程ST100は、前処理工程ST110と、ガラス合成工程ST120と、後処理工程ST130を備える。前処理工程ST110では、予め分割され、それぞれがガラス合成工程ST120での屈折率調整剤の添加量制御単位となるn(2以上の整数)個のガラス合成区間の設定、ガラス合成区間ごとに添加されるべき屈折率調整剤の添加量を決定するためのガラス合成実績データ500の作成、過去の添加量データとその偏差(目標値に対する添加量の誤差)の相関の算出、ガラス合成区間ごとの屈折率調整剤の理論添加量の決定が行われる。なお、ガラス合成実績データ500は、過去に製造されたm(2以上の整数)個のコア母材サンプルそれぞれについて実測工程ST200で測定された屈折率分布データ520と、これらm個のコア母材サンプルとなったm個のガラス母材サンプルの製造条件データ510で構成されている。本明細書では、既にそれらの製造条件データが後述する制御部のメモリ(図4A等参照)に格納された、過去に製造されたm個のガラス母材を「ガラス母材サンプル」といい、該m個のガラス母材サンプルに対して後述する後処理工程を施すことにより得られ、かつ、既にそれらの屈折率分布データが制御部のメモリに格納されたm個のコア母材を、過去に製造されたコア母材として「コア母材サンプル」という。

30

40

【0041】

ガラス合成工程ST120では、コア母材10となるべきガラス母材として、中心軸AXに一致する方向に沿って延びたガラス堆積対象物の内周面上または外周面上に、屈折率調整剤の添加量を調整しながら合成されたガラス微粒子が順次積み重ねられる。これにより、コア母材10の断面に一致するとともに中心軸AXを取り囲むように複数のガラス層が同心円状に配置された断面を有するガラス母材が製造される。なお、屈折率調整剤の添加量制御単位となる各ガラス合成区間は、1またはそれ以上のガラス層により構成される。また、ガラス合成工程ST120における各ガラス合成区間の屈折率調整剤の添加量は

50

、過去のデータとともに製造条件データ510に追加される。

【0042】

図3は、図2に示されたコア母材製造工程ST100における後処理ST130を説明するためのフローチャートである。後処理工程ST130では、図3に示されたように、ガラス合成工程ST120を経て得られたガラス母材200に対して脱水処理が施される。脱水処理されたガラス母材200は、透明になるよう焼結処理が施される。具体的には、ヒータ350を矢印S2で示された方向に移動させながらガラス母材200が加熱される。なお、ガラス母材200が中空構造を有する場合にはコラップス（中実化）も施される。なお、ガラス合成工程ST120に内付けCVD法が適用される場合、該ガラス合成工程ST120ではガラス層を堆積するごとに該堆積されたガラス層の透明化が行われるため、該ガラス合成工程ST120の後に脱水処理工程は不要である。さらに、透明化された母材は、所望の外径になるよう延伸処理が施されることにより、コア母材10が得られる。得られたコア母材10は、実測工程ST200により屈折率分布が測定され、この測定データも過去のデータとともに屈折率分布データ520に追加される。外周部製造工程ST300における後処理ST320においても、スス付工程ST310を経てコア母材10の外周面上に形成されたスス付層（ガラス層）に対し、上述の後処理工程ST130と同様の処理が行われ、クラッド母材20が得られる。

10

【0043】

ガラス合成工程ST120におけるガラス母材200の製造は、例えば図4Aおよび図4Bに示された製造装置により行われる。なお、図4Aには、ガラス堆積対象物の外周面上にガラス層を形成していく外付けCVD法として、OVD法によりガラス合成工程ST120を実施するためのOVD製造装置の構造が示されており、図4Bには、図4AのOVD製造装置における材料ガス供給システムの構造が示されている。

20

【0044】

図4AのOVD製造装置600Aは、作業台610A、心棒620A、酸水素バーナ630A、材料ガス供給システム640A、燃料ガス供給システム650A、および制御部660Aを備える。心棒620Aは、ガラス堆積対象物である。酸水素バーナ630Aは、火炎中で合成されたガラス微粒子を心棒620Aの表面に堆積させることにより、該心棒620Aの外周面上に複数のガラス層で構成された中間ガラス母材200Aが生成される。作業台610Aは、心棒620Aを支持しながら矢印S3Aで示された方向に回転させるとともに、酸水素バーナ630Aを支持しながら矢印S4Aa、S4Abで示された方向に移動させる。材料ガス供給システム640Aは、酸水素バーナ630Aにガラス生成ガス（ SiCl_4 、 GeCl_4 等）を供給する。燃料ガス供給システム650Aは、酸水素バーナ630Aに火炎形成のための燃料ガス（ H_2 、 O_2 ）を供給する。制御部660Aは、作業台610A、材料ガス供給システム640A、および燃料ガス供給システム650Aをそれぞれ制御する。なお、制御部660Aは、過去に製造されたm個のコア母材サンプルのガラス合成実績データ500を格納するためのメモリ670Aを有する。

30

【0045】

図4Bに示されたように、材料ガス供給システム640Aは、 O_2 タンク、ガラス合成材料である SiCl_4 が格納された SiCl_4 タンク、屈折率調整剤となるGe化合物が格納された GeCl_4 タンク等を有し、これらタンクが混合弁641Aを介して接続されている。制御部660Aは、これら混合弁641Aの開閉と図示していない流量調節器を制御することにより、ガラス生成ガスの流量、特に、屈折率調整剤の流量（添加量）を調整している。なお、図4Bの例では、屈折率調整剤としてゲルマニウム（Ge）が示されているが、ゲルマニウム（Ge）、リン（P）、フッ素（F）、ボロン（B）から選択された2種類以上の添加剤を含んでもよい。また、該Geを第1添加剤として、その他の屈折率調整剤（P、F、B等）を第2添加剤として用意し、各ガラス合成区間を形成している期間中、制御部660Aが、第2添加剤の添加条件を固定した状態で、形成されるガラス合成区間ごとに第1添加剤の添加量を調整してもよい。

40

【0046】

50

一方、燃料ガス供給システム650Aは、図4Bに示されたように、 O_2 タンク、 H_2 タンクを有し、混合弁651Aと図示していない流量調節器を介して制御部660Aが O_2 の流量および H_2 の流量をそれぞれ調整している。

【0047】

以上のような構造を有するOVD製造装置600Aにより製造されたガラス母材200は、図5Aの左側に示されたように、中央に空間(心棒620Aが取り除かれた空間)210を有し、複数のガラス層201が同心円上に積み重ねられた断面構造を有する。このような断面構造を有するガラス母材200に対して後処理工程ST130を施すことにより、図5Aの右側に示されたような断面構造を有するコア母材10が得られる。なお、図5Bには、ガラス合成工程ST120後のガラス母材200の断面における分割区間と、該ガラス母材200に対して後処理工程ST130を行うことにより得られるコア母材10の断面における分割区間との対応関係の一例を示す図である。なお、以下の説明では、区間分割される調節領域が、半径方向に沿ってコア母材10の全範囲に設定されている例について言及するものとする。

【0048】

本実施形態に係る光ファイバ母材製造方法において、ガラス合成工程ST120では、上記調節領域として、屈折率調整剤の添加量調整区間(ガラス合成区間)の全域が n 個に分割され、該分割されたガラス合成区間ごとに制御部660Aによる $GeCl_4$ の流量(Ge 添加量)の最適化制御が行われる。なお、各ガラス合成区間は、過去に製造された m 個のガラス母材サンプル200それぞれの断面において、1またはそれ以上のガラス層201で構成された層領域に相当する。また、ガラス合成区間は、製造されたガラス母材サンプル200を構成するガラス層201の層数(例えば500層)を半径方向に沿って n 個に等分割した区間であっても、また、過去に製造された m 個のコア母材サンプル10の断面半径を n 個に等分割してもよい。図5Bには、ガラス母材サンプル200の断面を半径方向に n 個に等分割したときの、ガラス合成区間 l_k ($k=1\sim n$)と、該ガラス母材200から得られたコア母材サンプル10の半径区間 r_k ($k=1\sim n$)の対応関係を示すグラフが示されている。なお、ガラス母材サンプルのガラス合成区間とコア母材サンプルの半径区間との対応関係は、ガラス母材サンプルの中心部と周辺部とで焼結時の収縮率が異なるため、図5Bに示されたように線形ではないと考えられる。また、 r_k は、コア母材サンプル10における各半径区間の外周径であり、該各半径区間を表す指標でもある。したがって、 m 個のコア母材サンプル10のうち i ($=1\sim m$)番目のコア母材サンプルにおける k ($=1\sim n$)番目の分割区間を表す外周半径 r_k と、該 i 番目のコア母材サンプルとなった i 番目のガラス母材サンプルにおける k 番目のガラス合成区間 l_k は、所定の関数 f により上記式(1)の関係を満たす。ここで、 r_k と l_k の相互変換の容易性を考慮すれば、関数 f は逆関数が求め易い関数であることが望ましい。

【0049】

ガラス合成工程ST120を実施する上述のOVD製造装置600Aは、いわゆる外付けCVD法によりガラス母材200を製造する装置であるが、コア母材用のガラス母材200の製造は、MCVD法やPCVD法に代表される内付けCVD法により製造することも可能である。図6Aは、内付けCVD製造装置の構造を示す図であり、図6Bは、図6Aの内付けCVD製造装置における材料ガス供給システムの構造を示す図である。また、図7Aは、図6Aの内付けCVD製造装置においてMCVD法を実施するための加熱システムの構造を示す図であり、図7Bは、図6Aの内付けCVD製造装置においてPCVD法を実施するための加熱システムの構造を示す図である。

【0050】

図6Aの内付けCVD製造装置600Bは、作業台610B、中空ガラス管620B、加熱システム630B、材料ガス供給システム640B、および制御部660Bを備える。中空ガラス管620Bは、その内周面上に複数のガラス層が積層されるガラス堆積対象物である。加熱システム630Bは、後述するMCVD法とPCVD法とで異なる構造を備えるが、何れの方法によっても中空ガラス管620B内で合成されたガラス微粒子を該

10

20

30

40

50

中空ガラス管 620B の内周面上に堆積させることにより、複数のガラス層で構成された中間ガラス母材 200B が生成される。作業台 610B は、中空ガラス管 620B を支持しながら矢印 S3B で示された方向に回転させるとともに、加熱システム 630B を支持しながら矢印 S4Ba、S4Bb で示された方向に移動させる。材料ガス供給システム 640B は、加熱システム 630B にガラス生成ガス (SiCl_4 、 GeCl_4 等) を供給する。制御部 660B は、加熱システム 630B、作業台 610B、および材料ガス供給システム 640B をそれぞれ制御する。なお、制御部 660B は、過去に製造された m 個のコア母材サンプルのガラス合成実績データ 500 を格納するためのメモリ 670B を有する。

【0051】

図 6B に示されたように、材料ガス供給システム 640B は、 O_2 タンク、ガラス合成材料である SiCl_4 が格納された SiCl_4 タンク、屈折率調整剤となる Ge 化合物が格納された GeCl_4 タンク等を有し、これらタンクが混合弁 641B を介して接続されている。制御部 660B は、これら混合弁 641B の開閉と図示していない流量調節器を制御することにより、ガラス生成ガスの流量、特に、屈折率調整剤の流量 (添加量) を調整している。なお、図 6B の例では、屈折率調整剤としてゲルマニウム (Ge) が示されているが、図 4B の例と同様に、ゲルマニウム (Ge)、リン (P)、フッ素 (F)、ボロン (B) から選択された 2 種類以上の添加剤を含んでもよい。また、該 Ge を第 1 添加剤として、その他の屈折率調整剤 (P、F、B 等) を第 2 添加剤として用意し、各ガラス合成区間を形成している期間中、制御部 660B が、第 2 添加剤の添加条件を固定した状態

で、形成されるガラス合成区間ごとに第 1 添加剤の添加量を調整してもよい。

【0052】

図 6A の内付け CVD 製造装置 600B が MCVD 法によりガラス母材 200 を製造する場合、図 7A に示されたような加熱システム 630Ba を備える。すなわち、加熱システム 630Ba は、作業台 610B により支持されながら矢印 S4Ba、S4Bb で示された方向に移動させられる酸水素バーナ 652 と、該酸水素バーナ 652 に火炎形成のための燃料ガス (H_2 、 O_2) を供給するための O_2 タンク、 H_2 タンクを有する。制御部 660B は、混合弁 651B と図示していない流量調節器を介して O_2 および / または H_2 の流量を調整している。これにより、中空ガラス管 620B 内で合成されたガラス微粒子が、該中空ガラス管 620B の内周面上に堆積され、その結果、中間ガラス母材 200B が生成される。

【0053】

一方、図 6A の内付け CVD 製造装置 600B が PCVD 法によりガラス母材 200 を製造する場合、図 7B に示されたような加熱システム 630Bb を備える。すなわち、加熱システム 630Bb は、作業台 610B により支持されながら矢印 S4Ba、S4Bb で示された方向に移動させられる高周波キャビティ 653 を有する。高周波キャビティ 653 は、中空ガラス管 620B の外周を取り囲むように配置されており、制御部 660B からの制御信号に従って、該中空ガラス管 620B 内にプラズマ 654 を発生させることができる。これにより、中空ガラス管 620B 内で合成されたガラス微粒子が、該中空ガラス管 620B の内周面上に堆積され、その結果、中間ガラス母材 200B が生成される。

【0054】

図 8 は、図 2 に示されたコア母材製造工程 ST100 における前処理工程 ST110 を説明するためのフローチャートである。前処理工程 ST110 は、制御部 660A、660B により実行される工程であり、この前処理工程 ST110 では、屈折率調整剤の添加量制御単位となる分割区間ごとの屈折率調整剤の添加量を決定するため、ガラス合成実績データの作成 (ST111)、相関の算出 (ST112)、および、屈折率調整剤の理論添加量の決定 (ST113) が行われる。分割区間の設定は、図 5B の例に従って設定されている。工程 ST111 では、ガラス母材サンプル群 250 を構成する、過去に製造された m 個のガラス母材サンプル 200 の製造条件データ 510 (メモリ 670A、670

10

20

30

40

50

Bに格納)と、コア母材サンプル群15を構成し、かつ、実測工程ST200を経て得られた、過去に製造されたm個のコア母材サンプル10の屈折率分布データ520から、図9Aに示されたようなガラス合成実績データ500が作成される。例えばi番目のガラス合成実績データ500は、ガラス合成時に添加される屈折率調整剤がGeの場合の例であり、パーティションNo.および記号 l_k で示されるガラス合成区間ごとに、i番目のガラス母材サンプル200の製造条件データ510としてのガラス合成時のGe流量($Ge(l_k)_i$)、ガラス合成区間 l_k に対応する半径区間 r_k におけるGe流量($Ge(r_k)_i$)、半径区間 r_k における比屈折率差の目標値($sp(r_k)$)、実測工程ST200により測定された半径区間 r_k における比屈折率差の実測値($pv(r_k)_i$)、半径区間 r_k における比屈折率差の偏差($(r_k)_i = pv(r_k)_i - sp(r_k)$)で構成されている。なお、Ge流量の単位は、「slm」である。

10

【0055】

工程ST112では、ガラス合成区間ごとに、上述のように作成されたm個のガラス合成実績データ500それぞれの同一ガラス合成区間のガラス合成実績データを纏める。例えば、図9Bの例では、m個のコア母材サンプル10それぞれにおけるk番目のガラス合成区間のガラス合成実績データに纏められる。そして、この工程ST112では、図9Bの例のように新たに纏められたガラス合成実績データのうちk番目の半径区間 r_k における比屈折率差の偏差($(r_k)_{i=1 \sim m}$)とGe流量($Ge(r_k)_{i=1 \sim m}$)について、各データの相関を算出する。図10は、Ge流量(slm)をx座標成分、偏差($(r_k)_i$)をy座標成分とする各データを、二次元座標系にプロットした図である。この図10に示された点 $P_1 \sim P_5$ が、相関算出用の各データを示す。なお、図10の例では、 $m=5$ の場合(5個のコア母材サンプル)の相関が、5つの点 $P_1(Ge(r_k)_{i=1}, (r_k)_{i=1}) \sim P_5(Ge(r_k)_{i=5}, (r_k)_{i=5})$ によって示されているが、 $m > 5$ の場合は、 $P_1(Ge(r_k)_{i=1}, (r_k)_{i=1}) \sim P_m(Ge(r_k)_{i=m}, (r_k)_{i=m})$ のm個の点によって表される。

20

【0056】

工程ST113では、図10に示された相関を直線近似することで、k番目のガラス合成区間 l_k におけるGeの理論添加量が決定される。すなわち、任意の点(x_i, y_i)と直線 $y = Ax + B$ (図10中のG1000)との差の二乗和 $S(A, B)$ は、以下の式(6)で表される。

30

【数6】

$$S(A, B) = \sum_{i=1}^m \{(A \cdot x_i + B) - y_i\}^2 \quad \dots (6)$$

【0057】

上記式(6)を展開して二乗和 $S(A, B)$ が最小となる近似直線G1000の傾きAと切片Bを求める。このとき、以下の式(7)で表される2つの偏微分方程式が成り立つ。これら偏微分方程式の一方は、上記二乗和 $S(A, B)$ の展開式を傾きAについて微分した、該傾きAを変数とする一次方程式であり、他方は、上記二乗和 $S(A, B)$ の展開式を切片Bについて微分した、該切片Bを変数とする一次方程式である。したがって、傾きAおよび切片Bを変数とする連立一次方程式から、以下の式(8)に示されたように、傾きAおよび切片Bが得られる。

40

【数7】

$$\begin{cases} \frac{\partial S(A, B)}{\partial A} = 0 \\ \frac{\partial S(A, B)}{\partial B} = 0 \end{cases} \quad \dots (7)$$

【数 8】

$$\left\{ \begin{array}{l}
 A = \frac{m \left(\sum_{i=1}^m x_i \cdot y_i \right) - \left(\sum_{i=1}^m x_i \right) \left(\sum_{i=1}^m y_i \right)}{m \sum_{i=1}^m x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^m x_i \right)^2} \\
 B = \frac{\left(\sum_{i=1}^m x_i^2 \right) \left(\sum_{i=1}^m y_i \right) - \left(\sum_{i=1}^m x_i \right) \left(\sum_{i=1}^m x_i \cdot y_i \right)}{m \sum_{i=1}^m x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^m x_i \right)^2}
 \end{array} \right. \quad \dots (8)$$

10

【0058】

特に、図10に示されたように、近似直線G1000とx軸との交点のx軸成分 $x_{y=0}$ は、以下の式(9)で与えられる。

【数 9】

$$x_{y=0} = \frac{\left(\sum_{i=1}^m x_i^2 \right) \left(\sum_{i=1}^m y_i \right) - \left(\sum_{i=1}^m x_i \right) \left(\sum_{i=1}^m x_i \cdot y_i \right)}{\left(\sum_{i=1}^m x_i \right) \left(\sum_{i=1}^m y_i \right) - m \left(\sum_{i=1}^m x_i \cdot y_i \right)} \quad \dots (9)$$

20

【0059】

上記式(9)中の変数 x_i 、 y_i を、過去に製造されたm個のコア母材サンプルのうちi番目のコア母材サンプルの、k番目の分割区間 r_k におけるGeの添加量 $Ge(r_k)_i$ および偏差 $(r_k)_i$ とそれぞれ設定すれば、 $x_{y=0}$ は、製造されるべきコア母材のk番目の分割区間 r_k におけるGe(屈折率調整剤)の理論添加量 $Ge(r_k)_{opt}$ は以下の式(10)で与えられ、係るコア母材となるべきガラス母材の、製造されるべきk番目のガラス合成区間 l_k におけるGeの理論添加量 $Ge(l_k)_{opt}$ は、上記式(1)によって l_k と関係付けられる r_k におけるGeの理論添加量 $Ge(r_k)_{opt}$ で与えられる。

【数 10】

$$Ge(r_k)_{opt} = \frac{\left(\sum_{i=1}^m Ge(r_k)_i^2 \right) \left(\sum_{i=1}^m \varepsilon(r_k)_i \right) - \left(\sum_{i=1}^m Ge(r_k)_i \right) \left(\sum_{i=1}^m Ge(r_k)_i \cdot \varepsilon(r_k)_i \right)}{\left(\sum_{i=1}^m Ge(r_k)_i \right) \left(\sum_{i=1}^m \varepsilon(r_k)_i \right) - m \left(\sum_{i=1}^m Ge(r_k)_i \cdot \varepsilon(r_k)_i \right)} \quad \dots (10)$$

30

【0060】

図11は、図2に示されたコア母材製造工程ST100におけるガラス合成工程ST120を説明するためのフローチャートである。

【0061】

以上のように前処理工程ST110において各ガラス合成区間におけるGeの理論添加量が決定されると、ガラス合成工程ST100では、処理対象となるガラス合成区間を示すカウンタを初期化し(ST121)、全てのガラス合成区間についてGeの流量制御が行われる(ST122、ST128)。制御部660A、660Bは、処理対象となっているk番目のガラス合成区間 l_k の理論添加量 $Ge(l_k)_{opt}$ となるように材料ガス供給システム640A、640Bの混合弁641A、641Bと流量調節器をそれぞれ制御する(ST123)。そして、k番目のガラス合成区間 l_k に属する1またはそれ以上のガラス層を示すカウンタを初期化し(ST124)、ガラス堆積対象物の内周面上または外周面上に堆積されるガラス層の層数をカウントしながら(ST126、ST127)、ガラス合成が行われる(ST125)。このガラス合成(ST125)はk番目のガラス合成区間 l_k に属する全てのガラス層について行われる(ST126)。全てのガラス

40

50

合成区間に対して上記工程 S T S T 1 2 3 ~ S T 1 2 7 が実行されると、このガラス合成工程 S T 1 2 0 に続いて後処理工程 S T 1 3 0 が行われる。

【 0 0 6 2 】

なお、k 番目のガラス合成区間 l_k に属するガラス層が複数の場合、ガラス合成区間 l_k に属する各ガラス層の G_e の理論添加量は、 $G_e(l_k)_{opt}$ で一定でも良いが、k + 1 番目のガラス合成区間 l_{k+1} に向けて徐々に変化するように、例えば直線的に変化させても良く、滑らかにつながるように任意の関数を用いて曲線状に変化させてもよい。

【 0 0 6 3 】

なお、上述の例では、等分割された分割区間が設定される調節領域が半径方向に沿ってコア母材サンプルの全範囲に設定されている。しかしながら、本実施形態における調節領域の設定は、この例には限定されない。すなわち、半径方向に沿ってコア母材サンプルの一部が調節領域に設定されてもよい。設定された調節領域における分割区間は、半径方向に沿ってサイズが異なる区間であってもよい。また、複数の調節領域が連続してまたは離間した状態で設定されてもよい。複数の調節領域のうち或る調節領域の分割区間サイズと、他の調節領域の分割区間サイズとが異なってもよい。

10

【 0 0 6 4 】

以上の本発明の説明から、本発明を様々に変形しうることは明らかである。そのような変形は、本発明の思想および範囲から逸脱するものとは認めず、すべての当業者にとって自明である改良は、以下の請求の範囲に含まれるものである。

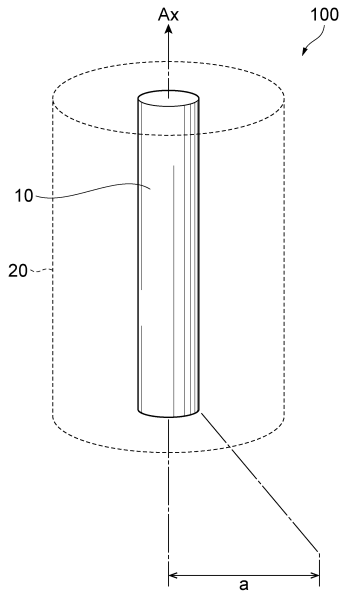
【符号の説明】

20

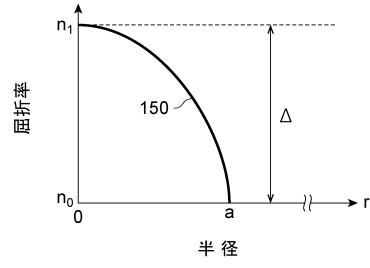
【 0 0 6 5 】

1 0 ... コア母材 (コア母材サンプル)、1 5 ... コア母材サンプル群、2 0 ... クラッド母材 (外周部)、1 0 0 ... 光ファイバ母材、1 1 0 A ... コア、1 1 0 B ... クラッド、1 1 0 ... 光ファイバ、2 0 0 ... ガラス母材 (ガラス母材サンプル)、2 5 0 ... ガラス母材サンプル群、5 0 0 ... ガラス合成実績データ、5 1 0 ... 製造条件データ、5 2 0 ... 屈折率分布データ。

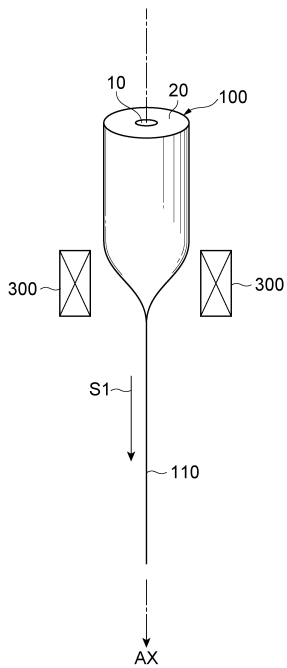
【図 1 A】



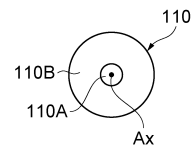
【図 1 B】



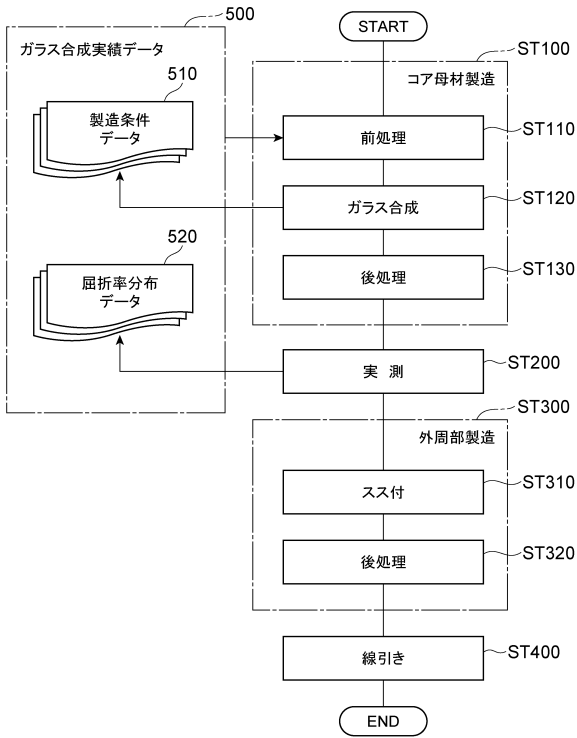
【図 1 C】



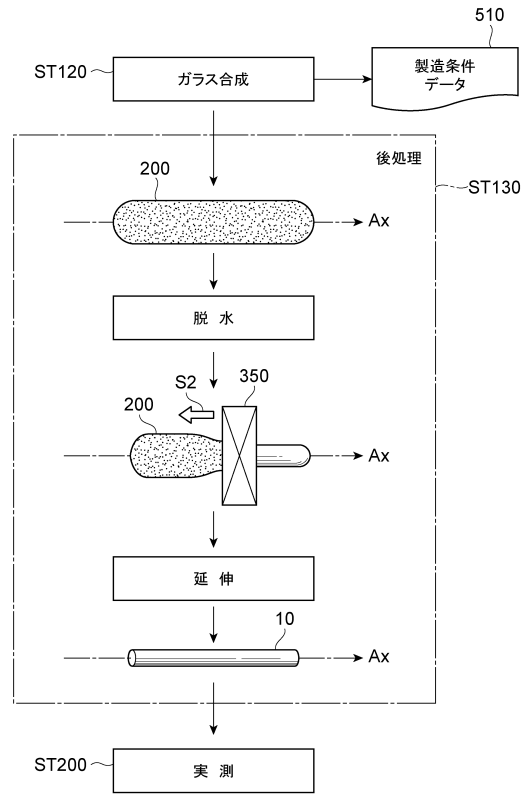
【図 1 D】



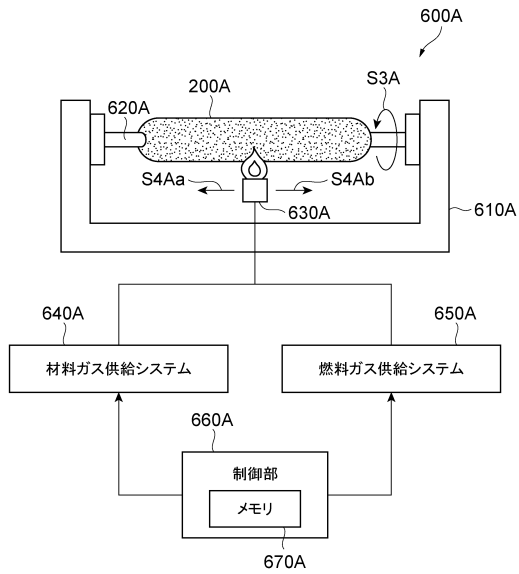
【図2】



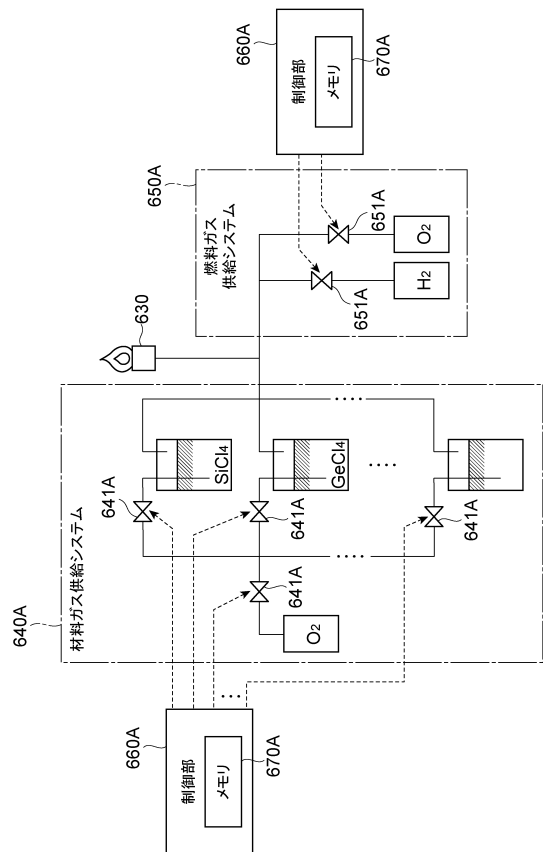
【図3】



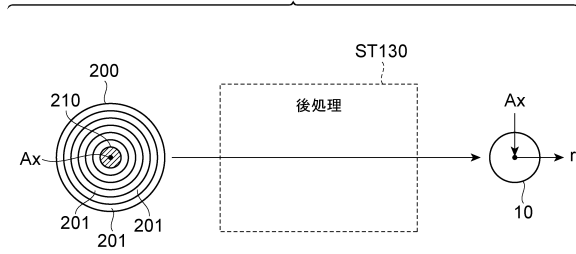
【図4A】



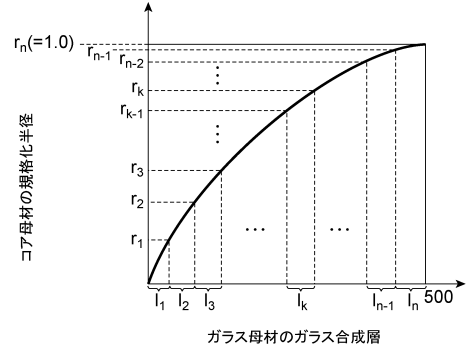
【図4B】



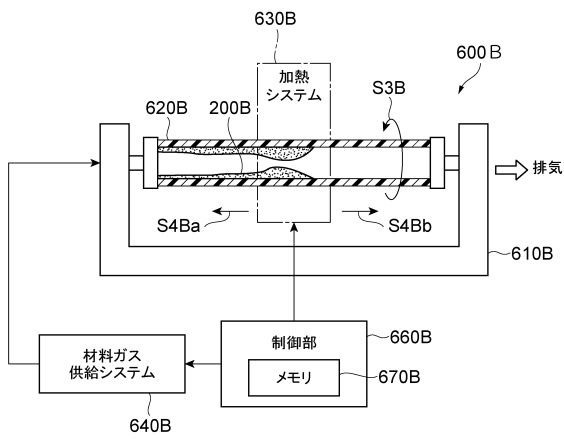
【図5A】



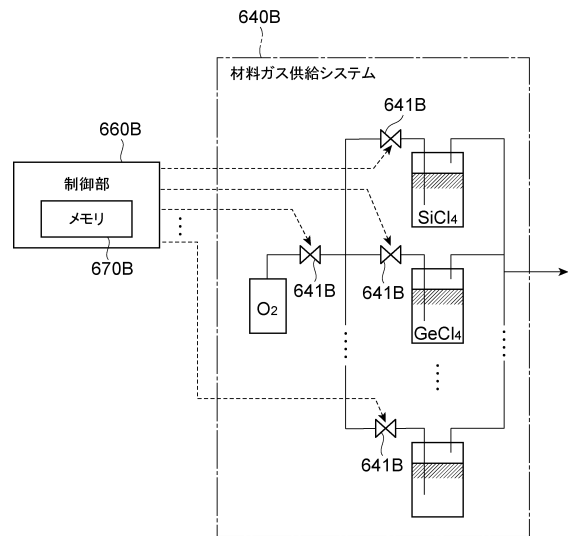
【図5B】



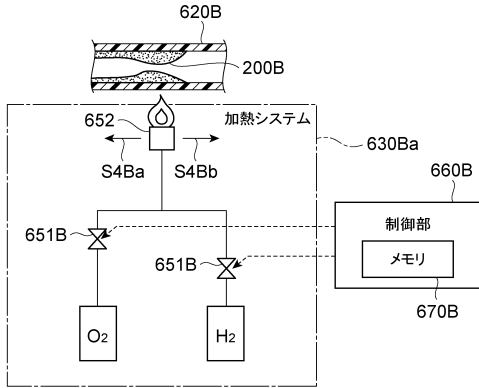
【図6A】



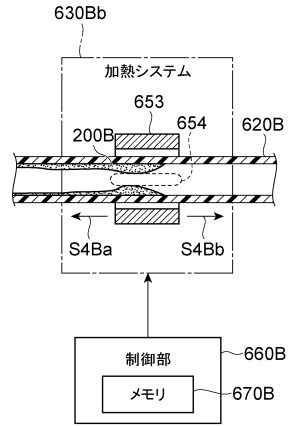
【図6B】



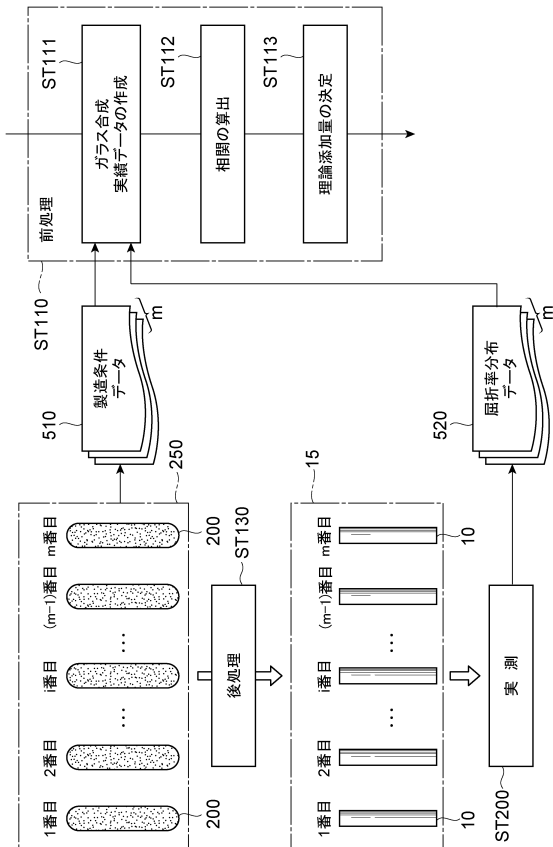
【図7A】



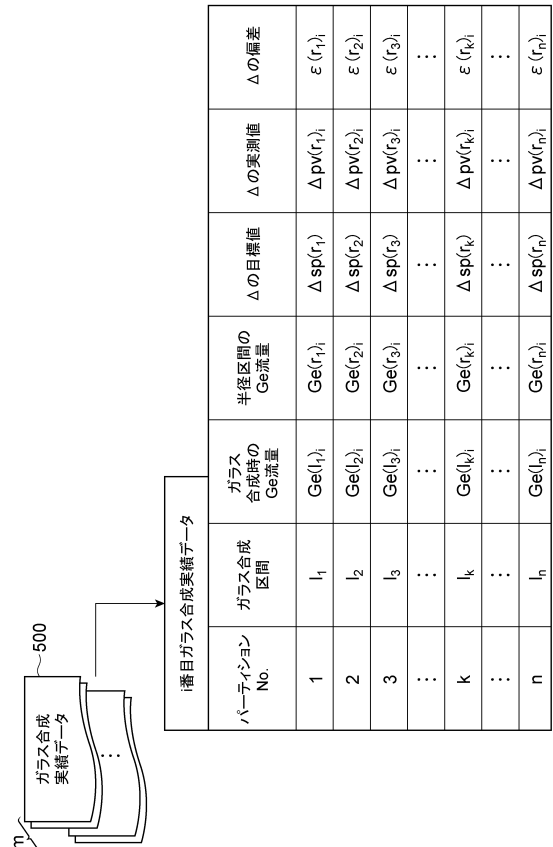
【図7B】



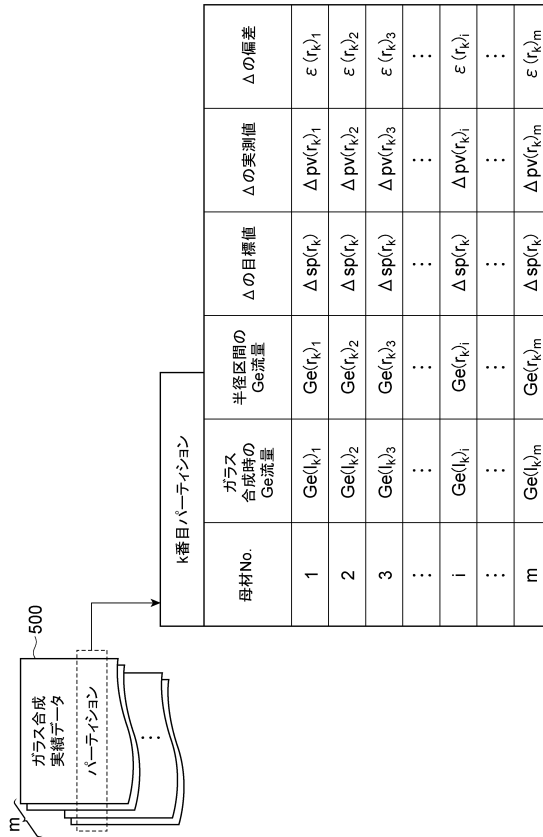
【図8】



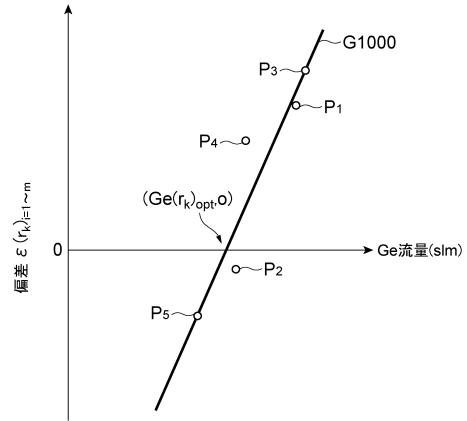
【図9A】



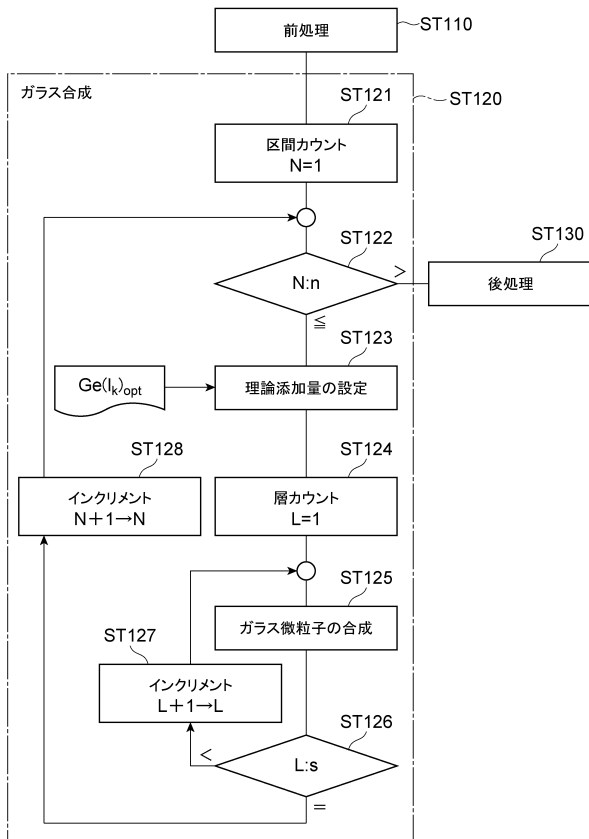
【図9B】



【図10】



【図11】



フロントページの続き

(72)発明者 米沢 和泰

神奈川県横浜市栄区田谷町1番地 住友電気工業株式会社横浜製作所内

審査官 長谷川 真一

(56)参考文献 特開2006-096608(JP,A)

特開昭58-064236(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

C03B 37/018、37/07

C03B 8/04

G02B 6/02、6/028