

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6448408号
(P6448408)

(45) 発行日 平成31年1月9日(2019.1.9)

(24) 登録日 平成30年12月14日(2018.12.14)

(51) Int.Cl.

F I

G O 2 B 6/02 (2006.01)

G O 2 B 6/02 4 1 1

請求項の数 4 (全 17 頁)

(21) 出願番号 特願2015-32026 (P2015-32026)
 (22) 出願日 平成27年2月20日 (2015.2.20)
 (65) 公開番号 特開2016-153850 (P2016-153850A)
 (43) 公開日 平成28年8月25日 (2016.8.25)
 審査請求日 平成30年1月30日 (2018.1.30)

特許法第30条第2項適用 一般社団法人日本物理学会
 、日本物理学会講演概要集、第69巻第2号(2014
 年秋季大会)第2分冊、9pA Z-11、平成26年8
 月22日 Optics Express、Vol. 2
 2、Issue 23、pp. 28427-28436
 (2014)、平成26年11月7日

(73) 特許権者 899000068
 学校法人早稲田大学
 東京都新宿区戸塚町1丁目104番地
 (74) 代理人 100137800
 弁理士 吉田 正義
 (74) 代理人 100148253
 弁理士 今枝 弘充
 (74) 代理人 100148079
 弁理士 梅村 裕明
 (72) 発明者 青木 隆朗
 東京都新宿区戸塚町1丁目104番地 学
 校法人早稲田大学内
 (72) 発明者 永井 隆太郎
 東京都新宿区戸塚町1丁目104番地 学
 校法人早稲田大学内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 テーパ光ファイバの製造方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

テーパウエスト部の両端に一对のテーパ遷移部が形成され、前記テーパウエスト部に向
 かって前記テーパ遷移部のファイバ径が漸減するテーパ光ファイバの製造方法において、
 光ファイバに対する加熱位置を前記光ファイバの長手方向に沿って所定の走査長で移動
 する加熱走査を行うことにより加熱された前記光ファイバを長手方向に引っ張ることによ
 って延伸する延伸工程と、

前記延伸工程に先立って行なわれ、テーパ光ファイバの局所的なファイバ半径を r 、テ
 ーパ角を θ とし、また前記ファイバ半径 r についての断熱基準角を $\theta_c(r)$ 、最適化係数
 F を $0 < F < 1$ としたときに、 $\theta < F \cdot \theta_c(r)$ を満たし、かつ前記テーパウエスト部と
 前記一对のテーパ遷移部との長さの合計 X を最小にする前記各加熱走査の前記走査長をそ
 れぞれ求める走査長決定工程と

を有し、

前記延伸工程は、前記加熱位置を前記光ファイバの長手方向に沿った第1の走査方向に
 移動する加熱走査と前記第1の走査方向と逆向きの第2の走査方向に移動する加熱走査と
 を交互に行い、前記加熱走査による加熱中に前記光ファイバの両端部を互いに離れる方向
 にそれぞれ移動させることで前記光ファイバを引っ張り、前記光ファイバの引っ張りでは
 前記光ファイバの両端部をそれぞれ一定な速さ V_1 で移動し、かつ前記加熱走査では加熱
 位置を一定な速さ V_2 で移動する

ことを特徴とするテーパ光ファイバの製造方法。

【請求項 2】

前記走査長決定工程は、 k を $1 \sim n$ として、 k 回目の加熱走査の走査長を L_k とし、また 2 以上の k について k 回目の加熱走査で形成されるテーパ光ファイバの局所的なファイバ半径 r を r_k 、テーパ角を θ_k としたときに、前記長さの合計 X を式 (I) により求め、テーパ角 θ_k を式 (II) に基づいて求めることを特徴とする請求項 1 に記載のテーパ光ファイバの製造方法。

【数 9】

$$X = \left(\frac{V_2 + V_1}{V_2} \right) L_1 + \sum_{i=2}^n \frac{2V_1}{V_2} L_i \quad \dots (I)$$

10

$$\tan \theta_k = \frac{r_{k-2} - r_k}{\left(\frac{V_2 + V_1}{V_2} L_{k-1} + \frac{V_1}{V_2} L_k \right) - L_k} \quad \text{但し、} k \geq 2 \quad \dots (II)$$

【請求項 3】

前記走査長決定工程は、走査長 L_k を、 k を変数とした高次の多項式で表される関数とし、

複数個の特定の k に対応する走査長 L_k を最小化する際の変数とし、残りの k に対応する走査長 L_k については、前記特定の k に対応する走査長 L_k との複数の組み合わせに基づいて決まる前記関数の値とすることを特徴とする請求項 2 に記載のテーパ光ファイバの製造方法。

20

【請求項 4】

前記最適化係数 F が 0.4 であることを特徴とする請求項 1 ~ 3 のいずれか 1 項に記載のテーパ光ファイバの製造方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、テーパ光ファイバの製造方法に関するものである。

30

【背景技術】

【0002】

テーパ光ファイバ (Tapered optical fiber、以下 T O F という) は、ファイバ半径が光の波長よりも細いテーパウエスト部と、このテーパウエスト部の両端にそれぞれ設けられテーパウエスト部に向かってファイバ半径が漸減するテーパ遷移部とを有している。T O F は、強い光の閉じ込め効果や、大きいエバネッセント場を有するため、光工学や量子光学などの分野で利用されている。

【0003】

T O F は、利用される分野にもよるが、一般的には微弱な光を扱うことから高い透過率が要求されることが多い。T O F の透過率を低下させる原因の 1 つとして、テーパ遷移部の形状に起因した基本モードと高次モードとの結合による損失がある。この損失は、テーパ遷移部の局所的なテーパ角をそのファイバ半径に応じて調整することによって低減でき、この損失が十分小さいとみなせる条件は断熱条件として知られている (例えば、非特許文献 1 参照)。また、断熱条件をみたすテーパ角の上限は、断熱基準角として知られており、断熱基準角はファイバ半径に依存した関数として表すことができる。

40

【0004】

テーパ遷移部からテーパウエスト部に向かってテーパ角が指数関数的に増大する指数関数形状とした T O F が知られている (例えば、非特許文献 2 を参照)。この非特許文献 2 では、減衰定数を 10 mm としている。また、テーパ遷移部のテーパ角を 2 mrad で一定にした形状の T O F が知られている (例えば、非特許文献 3 を参照)。これら T O F は

50

、テーパ遷移部のテーパ角を、断熱基準角以下とすることにより、損失を抑え高い透過率を確保している。例えば非特許文献 2 に記載された T O F の透過率は 99.4%、非特許文献 3 の T O F の透過率は 99.95% に達している。

【0005】

このような T O F の製造手法の 1 つとして、フレームブラシ法が知られている（特許文献 1 を参照）。フレームブラシ法では、光ファイバの長手方向にトーチなどの加熱手段を往復動させて光ファイバに対する加熱位置を移動させる加熱走査を行いながら、加熱されて軟化した光ファイバをその長手方向に引っ張って延伸するものである。例えば、加熱位置の移動幅を一定にしながら光ファイバを一定の速度で引っ張ることにより、指数関数形状とした T O F を作製することができる。また、加熱位置の移動幅を制御しながら光ファイバを一定の速度で引っ張ることにより、テーパ遷移部のテーパ角を 2 m r a d で一定にした T O F を作製することができる。

10

【0006】

また、加熱手段の移動に代えて、光ファイバをその長手方向に往復動させながら加熱する製造方法も知られている（特許文献 2 を参照）。特許文献 2 の製造方法では、光ファイバの往復動の幅やその速度、光ファイバの引っ張り量（拡張幅）などの各種パラメータを制御することにより、多様な形状を持つ T O F（細径化光ファイバ）を製造可能としている。

【先行技術文献】

【特許文献】

20

【0007】

【特許文献 1】特開 2008-003605 号公報

【特許文献 2】特開 2013-246329 号公報

【非特許文献】

【0008】

【非特許文献 1】J. D. Love, W. M. Henry, W. J. Stewart, R. J. Black, S. Lacroix, and F. Gonthier, "Tapered single-mode fibres and devices. Part 1: Adiabaticity criteria," IEE Proc. Vol.138, Issue 5, 343 - 354 (1991).

【非特許文献 2】T. Aoki, "Fabrication of Ultralow-Loss Tapered Optical Fibers and Microtoroidal Resonators," Jpn. J. Appl. Phys.49, 118001 (2010).

30

【非特許文献 3】J. E. Hoffman, S. Ravets, J. A. Grover, P. Solano, P. R. Kordell, J. D. Wong-Campos, L. A. Orozco, and S. L. Rolston, "Ultrahigh transmission optical nanofibers," AIP Adv. 4, 067124 (2014).

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0009】

ところで、T O F は、極小共振器に結合する場合、機械的安定性を考慮すると全長がより短いことが望まれる。また、例えばクライオスタットの狭い真空室などに收容される場合には、T O F の長さが制限される。このような背景から T O F を透過する光の損失を抑えながら、その全長をより短くした T O F が望まれている。しかしながら、非特許文献 2 に記載された T O F のように、損失を抑えるために、いずれのファイバ半径に対しても断熱基準角以下の角度としながらテーパ角を一定にした場合には、損失をかなり小さくすることができる反面、T O F の全長がかなり長くなってしまふ。また、非特許文献 1 に記載された指数関数形状の T O F では、テーパ角を一定にした場合と比べて T O F の全長を短くすることができるが、それでも十分に短くなっているとはいえなかった。

40

【0010】

なお、特許文献 2 では、損失を抑えながら T O F の全長を短くするための形状を含め、所望とする T O F の形状についての設計手法や、設計された形状の T O F を作製するために必要となる各種パラメータの決定手法などが記載されていない。

【0011】

50

本発明は、上記事情に鑑みてなされたものであり、T O Fを透過する光の損失を抑えながら、全長をより短くすることができるテーパ光ファイバの製造方法を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0012】

上記課題を解決するために、本発明では、テーパウエスト部の両端に一对のテーパ遷移部が形成され、テーパウエスト部に向かってテーパ遷移部のファイバ径が漸減するテーパ光ファイバの製造方法において、光ファイバに対する加熱位置を光ファイバの長手方向に沿って所定の走査長で移動する加熱走査を行うことにより加熱された光ファイバを長手方向に引っ張ることによって延伸する延伸工程と、延伸工程に先立って行なわれ、テーパ光ファイバの局所的なファイバ半径を r 、テーパ角を θ とし、またファイバ半径 r についての断熱基準角を $\theta_c(r)$ 、最適化係数 F を $0 < F < 1$ としたときに、 $\theta < F \cdot \theta_c(r)$ を満たし、かつテーパウエスト部と一对のテーパ遷移部との長さの合計 X を最小にする各加熱走査の走査長をそれぞれ求める走査長決定工程とを有するものである。

10

【発明の効果】

【0013】

本発明によれば、テーパ光ファイバの局所的なファイバ半径 r 、テーパ角 θ 、ファイバ半径 r についての断熱基準角を $\theta_c(r)$ とし、最適化係数 F を $0 < F < 1$ としたときに、 $\theta < F \cdot \theta_c(r)$ を満たし、テーパ光ファイバの全長を最小にする加熱走査ごとの走査長を求め、求めた走査長で各加熱走査を行うから、T O Fでの損失を抑えながら全長をより短くしたテーパ光ファイバを製造することができる。

20

【図面の簡単な説明】

【0014】

【図1】テーパ光ファイバの外観を示す平面図である。

【図2】本発明を実施したT O F製造装置の概略を示すブロック図である。

【図3】テーパ光ファイバの形成モデルを示す説明図である。

【図4】 k 回目の加熱走査後の状態を形成モデルで示す説明図である。

【図5】断熱基準角とファイバ半径の関係の一例を示すグラフである。

【図6】走査長のプロファイルを示すグラフである。

【図7】ファイバ半径に対する計算上のテーパ角を示すグラフである。

30

【図8】実施例1～4及び比較例1，2で作製されたテーパ光ファイバの透過率を示すグラフである。

【図9】実施例1～3及び比較例1で作製されたテーパ光ファイバの透過率を拡大して示すグラフである。

【図10】実施例2及び比較例1で作製されたテーパ光ファイバの形状を示すグラフである。

【発明を実施するための形態】

【0015】

図1において、テーパ光ファイバ(Tapered optical fiber、以下T O Fという)10は、光の波長よりも径が小さいテーパウエスト部11と、このテーパウエスト部11の両端にそれぞれ形成されたテーパ遷移部12とを有している。テーパウエスト部11及びテーパ遷移部12は、断面が円形であり、テーパ遷移部12は、テーパウエスト部11に向かってその径が漸減した形状である。この例では、T O F 10は、光ファイバ14の一部を加熱しながら引っ張って延伸する延伸工程によって製造される。

40

【0016】

図2において、T O F 10を製造するT O F製造装置20は、詳細を後述するように走査長を求める演算工程と、光ファイバ14を延伸する延伸工程とを行ってT O F 10を光ファイバ14に形成する。延伸工程は、光ファイバ14に対する加熱位置を移動する加熱走査工程と、加熱走査による加熱で軟化した光ファイバ14を長手方向に沿って両方向に引っ張る引っ張り工程とを含んでおり、T O F製造装置20は、いわゆるフレームブラシ

50

法でTOFを製造する。光ファイバ14としては、ガラス製、プラスチック製などを用いることができる。このTOF製造装置20は、コントローラ21、移動部22、23、加熱部24、演算部25を備える。コントローラ21は、移動部22、23と加熱部24との移動を制御する。

【0017】

移動部22、23は、光ファイバ14を引っ張るための引っ張り手段を構成している。移動部22は、クランプ26と、このクランプ26が固定された移動ステージ27とを備える。クランプ26は、光ファイバ14の一端を挟み込んで把持する。移動ステージ27は、モータ27aによって作動する1軸移動ステージである。移動部23についても、移動部22と同様であり、クランプ26と、モータ27aで作動される移動ステージ27とを備え、クランプ26は、光ファイバ14の他端を把持する。各移動ステージ27は、光ファイバ14の長手方向（矢印Z方向）と平行に移動するように調整してある。

10

【0018】

TOF10の製造時には、コントローラ21の制御下でモータ27aを駆動することによって、移動部22、23のクランプ26同士が互いに離れる方向に移動する。これにより、光ファイバ14を引っ張る。各クランプ26は、それぞれ一定な引っ張り速さ V_1 で継続的に移動される。

【0019】

加熱部24は、加熱手段としてのトーチ28と、移動ステージ29とを備えている。トーチ28は、例えば水素ガスを燃料として燃焼させた炎で光ファイバ14を加熱する。トーチ28としては、光ファイバ14の長手方向についての炎の幅が十分に小さいものを用いている。トーチ28は、移動ステージ29に取り付けられている。移動ステージ29は、モータ29aによって作動する1軸移動ステージであり、移動部22、23が把持した光ファイバ14の長手方向に沿ってトーチ28を往復動するように調整されている。なお、加熱手段は、トーチ28に限定されるものではない。

20

【0020】

TOF10の製造時には、コントローラ21の制御下でモータ29aを駆動することにより、トーチ28を一定の走査速さ V_2 で移動する。これにより、トーチ28による加熱位置を光ファイバ14の長手方向に沿って移動させる加熱走査を複数回行う。1回の加熱走査は、図中右方向と左方向のいずれか一方向への加熱位置の移動であり、続く次の1回の加熱走査では逆方向に加熱位置を移動する。加熱走査による加熱位置の移動方向と走査長とは、コントローラ21によって制御される。加熱走査の回数については後述する。

30

【0021】

引っ張り速さ V_1 と走査速さ V_2 との比(V_1/V_2)を小さくするほど、加熱走査の回数 n が多くなるがTOF10の特にテーパ遷移部12におけるファイバ半径の変化をより滑らかにしたテーパ形状を得ることができる。なお、引っ張り速さ V_1 は、走査速さ V_2 よりも小さく($V_1 < V_2$)設定される。

【0022】

演算部25は、1回目～ n 回目の加熱走査における走査長 $L_1 \sim L_n$ を求め（演算工程）、求めた走査長 $L_1 \sim L_n$ をコントローラ21にセットする。既に製造したTOF10と同じ条件でTOF10を製造する場合に、同じ条件で前回求めた走査長 $L_1 \sim L_n$ をコントローラ21にセットしてもよい。この演算部25は、損失を抑えながらTOF10の全長 X を短くしたTOF10を製造するための走査長 $L_1 \sim L_n$ を求める。TOF10の全長 X は、テーパウエスト部11と一对のテーパ遷移部12との長さの合計である。なお、走査長 $L_1 \sim L_n$ の算出の詳細については後述する。

40

【0023】

上記TOF製造装置20を用いたTOF10の形成過程について図3の形成モデルを参照して説明する。図3では、光ファイバ14の両端を把持したクランプ26等の部材の図示を省略している。また、形成モデルでは、トーチ28の炎の幅が光ファイバ14の長さについて無視できるほど十分に小さいものとしている。

50

【 0 0 2 4 】

図 3 (A) のように、1 回目の加熱走査では、トーチ 2 8 は、走査速さ V_2 で走査長 L_1 だけ図中右方向に移動する。このトーチ 2 8 の移動で、一対のクランプ 2 6 の間の光ファイバ 1 4 上で加熱位置が走査速さ V_2 で走査長 L_1 だけ移動する。また、この加熱走査の開始と同時に、移動部 2 2 , 2 3 によって光ファイバ 1 4 の両端がそれぞれ引っ張り速さ V_1 で移動するように光ファイバ 1 4 が引っ張られる。これにより、トーチ 2 8 によって加熱された光ファイバ 1 4 の加熱領域 H_1 が延伸され、図 3 (B) のように、光ファイバ 1 4 の初期のファイバ半径 r_1 よりも小さなファイバ半径 r_2 の円柱形状の延伸領域 E_2 が形成される。

【 0 0 2 5 】

ここで、TOF 1 0 を構成するものではないが、便宜上、延伸領域 E_2 の左側の光ファイバ 1 4 に微小領域 S_0 が、また延伸領域 E_2 の右側の光ファイバ 1 4 に微小領域 S_1 がそれぞれ仮想的に形成されているものとする。また、微小領域 S_0 , S_1 のファイバ半径は、TOF 1 0 の製造に用いる光ファイバ 1 4 のファイバ半径 R と同じであるが、それぞれ r_0 , r_1 とする。

【 0 0 2 6 】

1 回目の加熱走査後、トーチ 2 8 が移動方向を反転して 2 回目の加熱走査が開始される。この 2 回目の加熱走査では、トーチ 2 8 の移動により光ファイバ 1 4 の加熱位置が走査長 L_2 だけ図中左方向に移動する。この 2 回目及びこれ以降の加熱走査においても、走査速さは V_2 である。光ファイバ 1 4 の両端は、継続的にそれぞれ引っ張られている。このため、延伸領域 E_2 の右端から始まる長さ L_2 の加熱領域 H_2 が加熱される。そして、この加熱領域 H_2 が延伸されて、図 3 (C) のように、延伸領域 E_2 よりも小さなファイバ半径 r_3 の円柱形状の延伸領域 E_3 が形成される。また、延伸領域 E_3 の左側には、円柱形状の微小領域 S_2 が形成されている。微小領域 S_2 は、延伸領域 E_2 のうち 2 回目の加熱走査で加熱・延伸されずに残った領域である。したがって、微小領域 S_2 のファイバ半径は、延伸領域 E_2 と同じファイバ半径 r_2 である。

【 0 0 2 7 】

2 回目の加熱走査後、トーチ 2 8 が移動方向を反転して 3 回目の加熱走査が開始される。この 3 回目の加熱走査により、延伸領域 E_3 の左端から始まる加熱領域 H_3 が加熱され、この加熱領域 H_3 が延伸される。加熱領域 H_3 の長さは、3 回目の加熱走査の走査長と同じ L_3 である。これにより、図 3 (D) のように、延伸領域 E_3 よりも小さなファイバ半径 r_4 の円柱形状の延伸領域 E_4 が形成され、延伸領域 E_4 の左側に円柱形状の微小領域 S_3 が形成される。微小領域 S_3 は、延伸領域 E_3 のうち 3 回目の加熱走査で加熱・延伸されずに残った領域であり、延伸領域 E_3 と同じ r_3 である。

【 0 0 2 8 】

3 回目の加熱走査後、トーチ 2 8 が移動方向を反転して 4 回目の加熱走査が開始される。この 4 回目の加熱走査により、延伸領域 E_4 の右端から始まる加熱領域 H_4 が加熱される。加熱領域 H_4 の長さは、4 回目の加熱走査の走査長と同じ L_4 である。そして、この加熱領域 H_4 が延伸され、図 3 (E) のように、延伸領域 E_4 よりも小さなファイバ半径 r_5 の円柱形状の延伸領域 E_5 が形成され、さらに延伸領域 E_5 の左側には、ファイバ半径 r_4 の円柱形状の微小領域 S_4 が形成される。同様にして、 n 回目の加熱走査までを順次に行う。

【 0 0 2 9 】

上記形成モデルにおいては、2 回目以降の加熱走査ごとに微小領域 S_2 , S_3 , \dots , S_n が形成される。そして、その加熱走査ごとに加熱走査の終端側に、例えば右方向への加熱走査ごとに図中右側にファイバ半径が漸減する微小領域 S_3 , S_5 , \dots が順次に形成される。また、左方向への加熱走査ごとに図中左側にファイバ半径が漸減する微小領域 S_2 , S_4 , \dots が順次に形成される。これによって、一対のテーパ遷移部 1 2 が形成される。テーパウエスト部 1 1 は、形成モデルにおいては n 回目の加熱走査によって形成される延伸領域 E_{n+1} である。なお、後述するように、加熱走査が追加される場合に

10

20

30

40

50

は、その追加された最後の加熱によって形成される延伸領域である。

【 0 0 3 0 】

加熱走査の順番を示す走査番号を k ($= 1, 2, \dots, n$) として、形成モデルにおいては、微小領域 S_k を円柱形状としているが、実際には、トーチ 28 の炎の幅が有限であることや軟化した光ファイバ 14 の粘性等により、そのファイバ半径が漸減する形状であり、テーパ角を有するものとなる。この形成モデルにおける微小領域 S_k が T O F 10 の局所であり、そのファイバ半径 r_k が局所的なファイバ半径、テーパ角 θ_k が局所的なテーパ角となる。さらに、形成モデルでは、延伸領域 E_k を円柱形状としているが、実際の延伸領域 E_k は、長手方向中央に向かってファイバ半径が指数関数的に小さくなる指数関数形状になる。したがって、テーパウエスト部 11 についても同様の形状となる。

10

【 0 0 3 1 】

上記演算部 25 は、次の式 (1) を目的関数として最適化を行う。すなわち、全長 X を最小にする走査長 $L_1 \sim L_n$ を求める。演算部 25 は、最適化には滑降シンプレックス法を用いた演算処理を行う。この最適化の際には、T O F 10 を透過する光の損失を抑えるために式 (2) で示される第 1 の制約条件が与えられる。なお、最適化のアルゴリズムとしては、滑降シンプレックス法に限定されるものではない。なお、式 (2) 中の F は、後述する最適化係数であり、 (r_k) は、ファイバ半径 r_k についての断熱基準角である。

【 0 0 3 2 】

【数 1】

20

$$X = \left(\frac{V_2 + V_1}{V_2} \right) L_1 + \sum_{i=2}^n \frac{2V_1}{V_2} L_i \quad \dots (1)$$

$$\theta_k < F \cdot \Omega(r_k) \quad (k \geq 2) \quad \dots (2)$$

以下、式 (1)、式 (2) について図 4 を参照して説明する。図 4 は、形成モデルにおいて、 k 回目の加熱走査後の光ファイバ 14 の一部の状態を示している。なお、図 4 では、 k 回目の加熱走査開始時の加熱位置を原点とし、 k 回目の加熱走査においてトーチ 28 が移動する方向を正とした Z 軸を記し、各部の位置 (Z 座標) を示してある。

30

【 0 0 3 3 】

k 回目の加熱走査では、光ファイバ 14 の加熱領域 H_k が加熱されて延伸されることにより、延伸領域 E_{k+1} が形成される。加熱領域 H_k の長さは、 k 回目の加熱走査の走査長 L_k 、走査速さ V_2 、引っ張り速さ V_1 を用いて「 $\{(V_2 - V_1) / V_2\} \cdot L_k$ 」として求められる。また、加熱領域 H_k は、それが $k - 1$ 回目の加熱走査で形成された延伸領域 E_k の一部であるから、延伸領域 E_k と同じファイバ半径 r_k である。延伸領域 E_k の長さは、「 $\{(V_2 + V_1) / V_2\} \cdot L_k$ 」として求められる。

【 0 0 3 4 】

T O F 10 の全長 X は、1 回目の加熱走査による延伸領域 E_2 の長さ、2 回目以降の加熱走査ごとの長さの増分の合計として求めることができる。延伸領域 E_2 の長さ X_2 は、次の式 (3) によって表される。また、2 回目以降の加熱走査ごとの長さの増分 X は、加熱領域 H_{k-1} と延伸領域 E_k との差であるから、式 (4) で表せる。これら式 (3)、(4) より式 (1) が得られる。

40

【 0 0 3 5 】

【数 2】

$$X_2 = L_1 + \frac{V_1}{V_2} L_1 \quad \dots (3)$$

$$\Delta X = \sum_{i=2}^n \frac{2V_1}{V_2} L_i \quad \dots (4)$$

TOF10の任意の位置における局所的なファイバ半径 r について、その位置の局所的なテーパ角 θ が断熱基準角 $\theta_c(r)$ 以下であれば、その局所において基本モードと高次モードの光の結合による損失の影響が十分に小さくなり、断熱条件が満たされることになる。断熱基準角 $\theta_c(r)$ は、 HE_{11} モード（基本モード）の伝搬定数を β_1 、高次モードの1つである HE_{12} モードの伝搬定数を β_2 としたときに、次の式（5）で求められる。式（5）は、 HE_{11} モードと HE_{12} モードとの結合の損失に着目したものであり、その他の高次モードとの結合の損失は無視できる程度に十分に小さいものと想定している。

10

【0036】

【数 3】

$$\Omega(r) = \frac{r}{2\pi} (\beta_1(r) - \beta_2(r)) \quad \dots (5)$$

20

k 回目の加熱走査で形成される微小領域 S_k のファイバ半径 r_k は、次の式（6）のように表すことができる。微小領域 S_k のファイバ半径 r_k は、 $k-1$ 回目の加熱走査で形成される延伸領域 E_k のものと同じであり、その延伸領域 E_k は、加熱領域 H_{k-1} を延伸したものであるから、延伸領域 E_k と加熱領域 H_{k-1} との体積が同じになることに基づいて式（6）が導き出される。

【0037】

【数 4】

$$r_k = \sqrt{\frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1}} (r_{k-1}) \quad \dots (6)$$

30

k 回目の加熱走査で形成される微小領域 S_k のテーパは、図4に示されるように、微小領域 S_k と微小領域 S_{k-2} との段差部分により形成される斜面として近似できる。このため、 k 回目の加熱走査で形成されるテーパ角 θ_k は、式（6）に基づいて得られるファイバ半径 r_{k-2} 、 r_k を用いて、次の式（7）に基づいて求めることができる。なお、1回目の加熱走査では、微小領域が形成されないでテーパ角を求める必要はないので、2回目以降の加熱走査で形成されるテーパ角 θ_k 、すなわち $k \geq 2$ の場合についてのテーパ角 θ_k を求めればよい。

【0038】

【数 5】

$$\tan \theta_k = \frac{r_{k-2} - r_k}{\left(\frac{V_2 + V_1}{V_2} L_{k-1} + \frac{V_1}{V_2} L_k \right) - L_k} \quad (k \geq 2) \quad \dots (7)$$

40

最適化係数 F は、ファイバ半径 r の増減に対して断熱基準角度 $\theta_c(r)$ が変化することに着目し、この断熱基準角度 $\theta_c(r)$ の変化に沿った新たなテーパ角の上限（以下、最適化上限角という）である「 $F \cdot \theta_c(r)$ 」を設定するために導入している。最適化上限角でテーパ角 θ を制限して、式（1）を最適化することにより、損失を抑えながら、短い全

50

長 X の $TOF10$ を製造するための走査長 $L_1 \sim L_n$ を決定することができる。

【0039】

最適化係数 F は、「 $0 < F < 1$ 」の範囲内で設定する。最適化係数 F を小さくするほど損失が抑えられて高い透過率が得られる。最適化係数 F を小さくしていくと、基底モードと高次モードとの結合による損失よりも、埃等の付着などの影響を受けた外因性の損失が支配的になり、透過率に顕著な違いが出なくなる場合がある。このような場合に、過度に最適化係数 F を小さくすると、透過率の向上の効果がほとんどない状態で全長 X が増大してしまうので、製造環境等を含めて最適化係数 F を選択するのがよい。

【0040】

上記ファイバ半径 r_k 、テーパ角 θ_k などの算出の基になる $TOF10$ の形成モデルは、 k 回目の加熱走査によって有限な長さの微小領域 S_k を形成することを前提としている。すなわち、加熱位置は、 k 回目の加熱走査において微小領域 S_{k-2} に達しないことが前提である。原点 O からの k 回目の加熱走査完了時における微小領域 S_{k-2} までの距離 D_{k-2} は、次の式(8)となるから、走査長 L_k に関して式(9)が第2の制約条件として最適化の際に与えられる。

$$D_{k-2} = \frac{V_2 + V_1}{V_2} L_{k-1} + \frac{V_1}{V_2} L_k \quad \dots(8)$$

$$L_k < \left(\frac{V_2 + V_1}{V_2 - V_1} \right) L_{k-1} \quad \dots(9)$$

式(1)の最適化の際の自由度を抑え、演算処理数を減らして演算時間の短縮を図るために、走査長 L_k が走査番号 k についての関数であり、その関数が走査番号 k の増減に対して滑らかな変化を示すものとして、走査長 L_k に関する第3の制約条件を加えている。これは、連続的に変化するファイバ半径 r に対して断熱基準角 $\theta(r)$ がなめらかな変化を示す関数となることに基づいている。

【0042】

すなわち、走査長 L_k を、 k を変数とした高次の多項式で表される関数とし、複数の特定の k に対応する走査長 L_k を最小化(式(1)の最適化)の際の変数とし、残りの k に対応する走査長 L_k については、特定の k と対応する走査長 L_k との組み合わせに基づいて決まる関数の値とする。

【0043】

具体的には、 m を n よりも小さい3以上の自然数とし、走査長 L_k は、走査番号 k を変数とする $(m-1)$ 次元の多項式の関数(以下、走査長関数という)で表されるとする。 n 個の走査長 L_k のうちの m 個の特定の走査番号 k に対応する走査長 L_k については、式(1)を最適化する際の変数として扱う。また、特定の走査番号 k とこれに対応する走査長 L_k の m 個の組み合わせを用い、補間法により、残りの $(n-m)$ 個の走査番号 k に対応する各走査長 L_k を求める。すなわち、特定の走査番号 k とこれに対応する走査長 L_k の m 個の組み合わせを満たす走査長関数が得られるが、残りの $(n-m)$ 個の走査番号 k に対応する各走査長 L_k は、その走査長関数の値として求め、式(1)を最適化する際の走査長 L_k として用いる。なお、特定の走査番号 k に対応する走査長 L_k が変数として扱われるから、走査長関数は、変数である走査長 L_k に応じて変化する。

【0044】

本例においては、補間法としてはラグランジェ補間法を用い、特定の走査番号 k として、 $9 (=m)$ 個の走査番号 k を $1 \sim n$ の間で等間隔に設定した。 m の値は、適宜設定可能であるが、本例で用いた滑降シンプレックス法では、一般的に変数が比較的少ない場合、例えば10個程度以下の場合に有効とされているため、 $m=9$ としている。 m の値は、

10

20

30

40

50

式(1)を最適化するアルゴリズムに適した個数に設定することが好ましい。

【0045】

走査長 L_k については、上限値 L_{upper} と下限値 L_{lower} が第4の制約条件としてさらに与えられる。上限値 L_{upper} は、TOF製造装置20による加熱走査の機械的な限界として設定される。下限値 L_{lower} は、トーチ28の炎の有限幅を考慮したものである。この例では、上限値 L_{upper} は40000 μm 、下限 L_{lower} は400 μm である。

【0046】

【数7】

$$L_k \leq L_{upper} \quad \dots(10)$$

10

$$L_k \geq L_{lower} \quad \dots(11)$$

断熱基準角 (r) が急激に増大する特定ファイバ半径以下になるファイバ半径 r_k に対応する加熱走査については、その走査長 L_k を L_{lower} に固定する第5の制約条件を加えることも好ましい。走査長関数として $(m-1)$ 次元の多項式の関数を使うことで最適化の自由度を制限しているが、この第5の制約条件により、この制約を加えずに全ての走査長 L_k を最適化した場合に比べて、断熱基準角 (r) が急激に増大する領域を除かれることによって、より真の最適解に近い解(走査長)が得られる。延伸領域(または加熱領域)のファイバ半径が特定ファイバ半径以下となる加熱走査の回数は、上記式(6)に示される r_k と r_{k-1} の関係と、光ファイバ14の初期のファイバ半径 (R) とを用いて導き出すことができる。

20

【0047】

加熱回数 n は、次の式(12)に基づいて求めることができる。式(12)中の値 r_w は、最終的に作製するテーパウエスト部11の目標のファイバ半径であり、値 r_0 は、上記の仮想的な微小領域 S_0 のファイバ半径であり、TOF10の製造に用いる光ファイバ14のファイバ半径 R と同じである。なお、式(12)は、上記式(6)の関係に基づいて導き出せる。

【0048】

【数8】

$$r_w = r_0 \left(\frac{I - \frac{V_1}{V_2}}{I + \frac{V_1}{V_2}} \right)^{\frac{n}{2}} \quad \dots(12)$$

30

光ファイバ14の長手方向についてのトーチ28の炎の幅、すなわち加熱位置で光ファイバ14が加熱される幅が走査長 L_k の下限値 L_{lower} に比べて無視できない場合がある。この場合には、実際に作製されるテーパウエスト部11のファイバ半径が、形成モデルから求められるファイバ半径よりも太くなる。このような場合には、上述の各種制約条件下で求められる走査長 L_k のプロファイルを修正する。この修正では、 n 回の加熱走査の後に加熱走査を追加して、テーパウエスト部11を必要とするファイバ半径にする。追加する加熱走査の回数は、例えば計算によりあるいは実験的に決めることができる。また、シングルモードで導波するのに必要なファイバ半径のテーパウエスト部11のファイバ半径を得る場合では、 n 回の加熱走査後に、製造中のTOF10の透過光強度の測定結果に基づいてテーパウエスト部11によるシングルモードでの導波が確認されるまで加熱走査を追加してもよい。製造中のTOF10の透過光強度を測定するには、例えばレーザダイオード等の光源からの光を、TOF製造装置20にセットされている光ファイバ14の一端に入射させ、その光ファイバ14の他端から射出される光をフォトディテクタ(光強度測定装置)で検出することで測定できる。シングルモードで導波になった否かは、透過光強

40

50

度の振動が消失することで確認できる。これは高次モードと基本モードの干渉状態が延伸によって変化し、透過光強度の振動が生じることを利用している。なお、追加する加熱走査の走査長 L_k は、下限値 L_{lower} とすればよい。

【0049】

次にTOF製造装置20の作用について説明する。TOF10を製造する場合には、製造に用いる光ファイバ14の両端を一对のクランプ26に把持する。続いて、光ファイバ14のファイバ半径 R 、伝搬定数 n_1 、 n_2 、テーパウエスト部11の目標とするファイバ半径 r_w や、最適化係数 F をパラメータとして演算部25に設定する。テーパウエスト部11の目標とするファイバ半径 r_w としては、例えばシングルモードで導波するのに必要なファイバ半径を入力する。TOF10全長 X と透過率（損失）との関係は、入力した最適化係数 F によって決まるため、ファイバ半径 r_k やテーパ角 θ_k に関するプロファイル等の詳細な情報を入力する必要はない。なお、テーパウエスト部11をシングルモードで導波させる場合には、ファイバ半径 r_w を、カットオフ条件を満たしてシングルモードで導波するファイバ半径以下とする。

【0050】

パラメータの設定が完了すると、演算部25は、設定されたパラメータと、光ファイバ14のファイバ半径 r_0 ($= R$) 及びテーパウエスト部11のファイバ半径 r_w とから、式(12)に基づいて走査回数 n を決定する。滑降シンプレックス法により式(1)を最適化するための演算を行う。設定された最適化係数 F が代入された第1の制約条件、及び第2～第5の制約条件の下で式(1)が最適化されて、1番目～ n 番目の加熱走査についての走査長 $L_1 \sim L_n$ が求められる。第1の制約条件を加えているため、走査長 L_k の自由度が十分に抑えられており、演算部25の演算は短い。なお、式(1)に滑降シンプレックス法を適用するにあたって、初期値として与える特定の9個の走査番号 k に対応する走査長 L_k によって異なる走査長 $L_1 \sim L_n$ が求められる場合があるので、複数組の初期値を与えて、初期値ごとに式(1)の最適化を行って得られる走査長 $L_1 \sim L_n$ のうちから、最適な1組の走査長 $L_1 \sim L_n$ を選択してもよい。

【0051】

演算部25は、求めた走査長 $L_1 \sim L_n$ をコントローラ21にセットする。コントローラ21は、トーチ28の点火後、光ファイバ14の長手方向に速さ V_2 でトーチ28の移動を開始して、1回目の加熱走査を行う。この1回目の加熱走査では、走査長 L_1 だけトーチ28が移動する。1回目の加熱走査の開始と同時に、光ファイバ14の長手方向に一对のクランプ26が互いに離れる方向に速さ V_1 で移動を開始する。以降は、図3に示される形成モデルを用いて説明したように、2～ n 回目の加熱走査が順次に行われる。

【0052】

そして、1～ n 回目の加熱走査の間には、加熱で軟化した光ファイバ14が一对のクランプ26の移動で引っ張られる。このため、トーチ28の走査方向の一方の下流端には、ファイバ半径が順次漸減する微小領域 S_2 、 S_4 、 \dots が順次に形成されるようにしてテーパ遷移部12が形成される。また、走査方向の他方の下流端にも、やはりファイバ半径が順次漸減する微小領域 S_3 、 S_5 、 \dots が順次に形成されるようにしてもう1つのテーパ遷移部12が形成される。そして、これら一对のテーパ遷移部12の間には、テーパウエスト部11が形成される。なお、トーチ28の炎の幅が走査長 L_k の下限値 L_{lower} に比べて無視できない大きさの場合では、上述のように加熱走査を追加して光ファイバ14を延伸し、所望のファイバ半径のテーパウエスト部11を形成する。

【0053】

上記のようにして製造されたTOF10は、クランプ26から取り外される。製造されたTOF10は、式(1)及び式(2)に基づいて決められた走査長 $L_1 \sim L_n$ による1回目～ n 回目の加熱走査で製造されているので、損失が抑えられ、かつ全長 X が短くなっている。

【0054】

この例では、加熱走査のためにトーチ28を移動させているが、トーチ28を固定して

10

20

30

40

50

おき、光ファイバ 14 の長手方向に移動部 22, 23 を一体に移動させてもよい。また、光ファイバ 14 を引っ張る際には、移動部 22, 23 の一方を固定しておき他方だけを移動させてもよい。さらに、延伸工程として、加熱走査工程と引っ張り工程とを同時に行う例について説明したが、例えば 1 回あるいは複数回の加熱走査からなる加熱走査工程ごとに引っ張り工程を行って、光ファイバを延伸してもよい。この場合には、そのような手順での T O F 10 の形成モデルに基づいて、作製される T O F 10 の全長を求める式を導出すればよい。

【実施例】

【0055】

[実施例 1 ~ 4]

実施例 1 ~ 4 では、T O F 製造装置 20 により、T O F 10 を作製した。実施例 1 ~ 4 では、最適化係数 F が異なる他は、同じ条件で T O F 10 を作製した。実施例 1 では、最適化係数 F を 0.2 とした。また、実施例 2 では、最適化係数 F を 0.4 とし、実施例 3 では 0.6, 実施例 4 では 0.8 とした。

【0056】

光ファイバ 14 としては、市販のステップインデックス型シングルモードの (Thorlabs 製, SM800) を用いた。この光ファイバ 14 の波長 852 nm に対するコアの屈折率は 1.4574、クラッドの屈折率は 1.4525 である。また、コアの半径は $2.4 \mu\text{m}$ 、クラッドの半径 ($=R$) は $62.5 \mu\text{m}$ である。

【0057】

走査長 L_k の演算では、複数組の初期値を与えて、初期値ごとに式 (1) を滑降シンプレックス法で最適化した。そして、得られる 10 組の走査長 $L_1 \sim L_n$ のうちから、最適な 1 組を選択したものを用いた。

【0058】

第 1 の制約条件では、断熱基準角 (r) については、コア、クラッド、及び空気からなる 3 層構造を考慮して、波長 852 nm に対して計算したものを用いた。この計算された断熱基準角 (r) のグラフを図 5 に示す。第 4 の制約条件における上限値 L_{upper} を $40000 \mu\text{m}$ 、下限値 L_{lower} を $400 \mu\text{m}$ とした。第 5 の制約条件については、上記のように計算された断熱基準角 (r) に基づいて、特定ファイバ半径を $4 \mu\text{m}$ とした。このような制約条件の下で、演算により得られる 4 種類の最適化係数 F についての走査長 L_k のプロファイルを図 6 に示す。

【0059】

また、テパウエスト部 11 がシングルモードで導波するのに必要なファイバ半径 (300 nm) を得るために、加熱走査される回数を多くした。具体的には、実施例 1 ~ 4 について当初の最適化の演算で用いた走査回数 n は、いずれも 288 回であるが、テパウエスト部 11 を必要なファイバ半径とするために、288 回の加熱走査の後に、加熱走査を追加した。追加した加熱走査は、光ファイバ 14 を透過した光の透過光強度の振動の消失によってテパウエスト部 11 がシングルモードでの導波になることが確認されるまで繰返し行った。光ファイバ 14 の透過光強度の測定は後述する。

【0060】

T O F 製造装置 20 は、クラス 100000 のクリーンフード内に設置して、T O F 10 の作製を行った。移動部 22, 23 は、ステッパモータで駆動される直動ステージ (駿河精機株式会社製, KX1250) 上にファイバクランプ (Thorlabs 製, T711/M250) を取り付けしたものとした。これらファイバクランプで光ファイバ 14 の両端を把持した。引っ張り速さ V_1 は、 $15 \mu\text{m}/\text{秒}$ とした。

【0061】

トーチ 28 としては、ステンレス鋼製のものであり、ノズル内径が $135 \mu\text{m}$ の 1 つ穴のものを用いた。トーチ 28 には、純粋な水素ガス (酸素を予混合していないもの) を供給し、このガス流量を $10 \text{ mL}/\text{分}$ に調整した。ガス流量の調整には、精密ニードルバルブ付流量計 (コフロク株式会社製, RK1250) を用いた。また、トーチ 28 は、ス

10

20

30

40

50

テッパーマータで駆動される直動ステージ上に取り付け、走査速さ V_2 を $750\text{ }\mu\text{m}/\text{秒}$ とした。

【0062】

実施例1～4について作製されるTOF10のテーパ角とファイバ半径 r との計算上の関係を図7に示す。なお、図7では、テーパ角とファイバ半径 r との計算上の関係を実線で示し、それぞれ対応する最適化係数 F を付してある。なお、破線で示す曲線は、断熱基準角(r)と、断熱基準角(r)に最適化係数 F を乗じた最適化上限角(0.2 , 0.4 , 0.6 , 0.8)を示している。

【0063】

実施例1～4では、それぞれ5本のTOF10のサンプルを作製し、各サンプルの透過率を測定した。透過率の測定のために、出力波長が 852 nm のレーザダイオードからの光をビームスプリッタで分割し、ビームスプリッタの99%出力ポートを、クランプ26に把持されている光ファイバ14の一端に溶融接続した。また、ビームスプリッタの1%出力ポートからのレーザ出力に基づいてレーザダイオードの出力をフィードバック制御し、出力を $\pm 0.1\%$ 以内に安定させた。光ファイバ14の他端をフォトディテクタ装置(自作)に接続し、TOF10の透過光強度(透過率)を製造段階から完成時まで継続的に測定した。

【0064】

完成したTOF10の各サンプルの透過率を図8に示す。実施例1～3($F = 0.2$, 0.4 , 0.6)の各サンプルの透過率については、拡大して図9に示す。なお、透過率における相対誤差は $\pm 0.1\%$ であり、これは測定に用いたレーザ出力の安定性に依存するものである。最適化係数 F が 0.2 のTOF10のサンプルと、最適化係数 F が 0.4 のTOF10のサンプルとでは、透過率に顕著な違いはない。これは、実施例1, 2のTOF10において、基本モードと高次モードとの結合による損失が十分に抑制されているためと考えられる。また、これらのサンプルでは、外因性の損失が支配的になっているものと考えられる。

【0065】

実施例2の全長、透過率を表1に示す。なお、TOF10の全長は、SEM(Scanning Electron Microscope、走査型電子顕微鏡)で測定した5本のサンプルの全長の平均値とした。また、透過率についても5本のサンプルの透過率の平均値とした。なお、表1には、実施例1, 3, 4についてのTOF10の全長の予想値を括弧付で示す。TOF10の全長の予想値は、形成モデルから計算されるTOF10の全長に、追加した加熱走査で延伸されたTOF10の長さの増加分の予想値を加えた値とした。長さの増加分の予想値は、 $F = 0.4$ とした場合の形成モデルから計算された全長(19 mm)と、実施例2によって作製されたTOF10の実測値(23) mm との差を用いた。

【0066】

【表1】

		全長(mm)	透過率(%)
実施例1	$F = 0.2$	(40)	99.4
実施例2	$F = 0.4$	23	99.6
実施例3	$F = 0.6$	(17)	98.3
実施例4	$F = 0.8$	(15)	83.9
比較例1	$\theta = 2\text{ mrad}$	63	99.4
比較例2	指数関数形状	(36)	91.8

10

20

30

40

50

【 0 0 6 7 】

また、T O F 1 0 の各サンプルのうち実施例 2 ($F = 0.4$) の 1 本のサンプルについて、その形状を S E M を用いて測定した。測定した T O F 1 0 のサンプルの形状を図 1 0 に示す。図 1 0 では、横軸が T O F 1 0 の長手方向 (延伸方向) の距離であり、縦軸がファイバ半径である。横軸に示される距離は、長手方向における T O F 1 0 の中心からの距離である。また、図 1 0 には、作製される T O F 1 0 の計算上の形状を実線で示してある。さらに、上記実施例 2 ($F = 0.4$) の 1 本のサンプルについて、測定したファイバ半径とテーパ角との関係を図 7 中に印で示す。

【 0 0 6 8 】

[比較例 1 , 2]

比較例 1 として、テーパ遷移部のテーパ角が一定な T O F を作製し、比較例 2 として、ファイバ半径が指数関数的に変化する T O F を作製した。比較例 1 , 2 についても、5 本のサンプルの T O F をそれぞれ作製した。比較例 1 , 比較例 2 では、T O F 製造装置 2 0 を用い、それぞれの T O F の形状を形成すべく、トーチ 2 8 の走査長や引っ張り速さ V_1 、走査速さ V_2 等を調整した他は、実施例 1 ~ 4 と同じである。

【 0 0 6 9 】

比較例 1 では、テーパ遷移部のテーパ角を 2 mrad とし、テーパウエスト部については、ファイバ半径の変化が指数関数形状となるようにした。なお、テーパウエスト部の長さは $400 \mu\text{m}$ である。比較例 2 では、テーパウエスト部は、ファイバ半径の変化が減衰定数 3 mm の指数関数形状とした。比較例 1 , 2 について作製される T O F のテーパ角とファイバ半径 r との計算上の関係を、二点鎖線、一点鎖線で図 7 に示す。比較例 1 の T O F のグラフには「 2 mrad 」を、比較例 2 の T O F については「 \exp 」を付してある。また、比較例 1 の T O F のサンプルの 1 本について測定したファイバ半径とテーパ角との関係を図 7 中に印で示す。

【 0 0 7 0 】

比較例 1 , 2 の各サンプルについて測定した透過率を図 8 に示し、比較例 1 のサンプルの透過率については図 9 にも示す。また、比較例 1 の T O F のサンプルの形状を S E M で測定した結果を図 1 0 に示す。さらに、比較例 1 , 2 の T O F の全長、透過率を上記表 1 に示す。なお、比較例 2 の T O F の全長は、実施例 1 等と同様に予想値である。

【 0 0 7 1 】

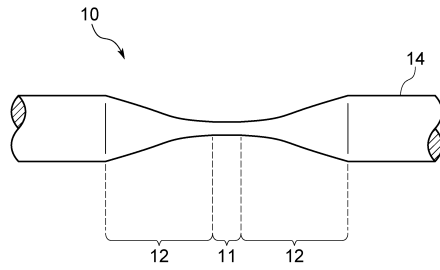
実施例 1 , 2 の T O F 1 0 は、その透過率が極めて高く、すなわち損失が極めて小さくなっているにもかかわらず、その全長 X は、ほぼ同じ透過率となる比較例 1 の T O F よりもかなり短くなっている。また、実施例 3 の T O F 1 0 は、全長 X は比較例 1 の T O F の全長の $1/3$ に満たないにもかかわらず、透過率は比較例 1 に比べて僅かに低いだけである。実施例 1 ~ 3 の T O F 1 0 の透過率は、比較例 2 に比べてかなり高いが、全長 X は比較例 2 と同等もしくは比較例 2 よりも十分に短くなっている。実施例 4 の T O F 1 0 は、例えば比較例 1 , 2 の T O F に比べて全長 X がかなり短くなっているが、それでもなお損失が抑えられているため 80% 以上の透過率を有している。

【 符号の説明 】

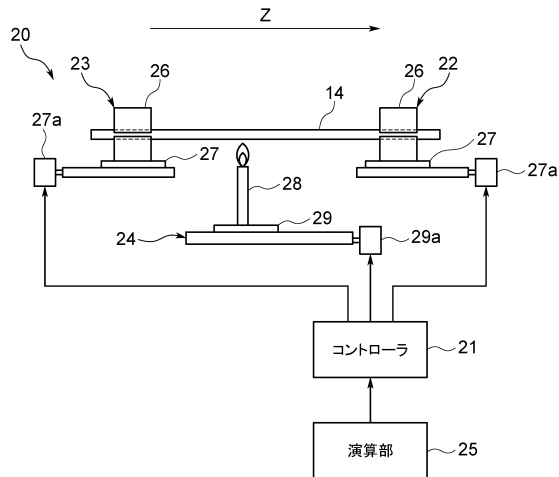
【 0 0 7 2 】

- 1 0 テーパ光ファイバ
- 1 1 テーパウエスト部
- 1 2 テーパ遷移部
- 1 4 光ファイバ
- 2 1 コントローラ
- 2 5 演算部
- 2 8 トーチ
- L_k 走査長
- r_k ファイバ半径
- θ_k テーパ角

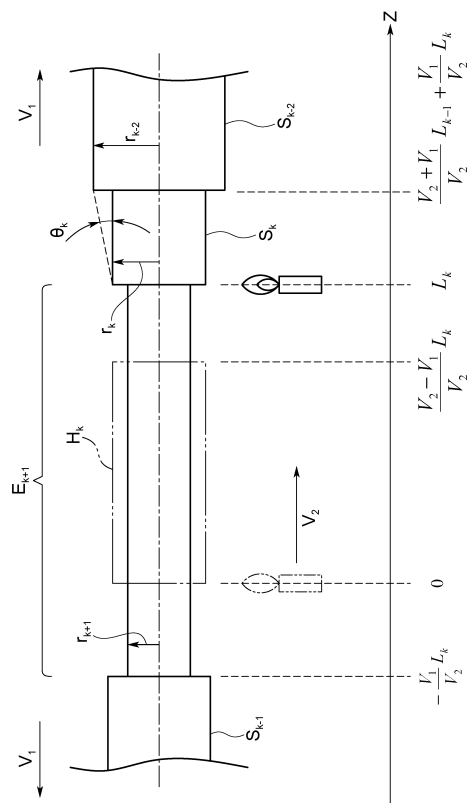
【図 1】



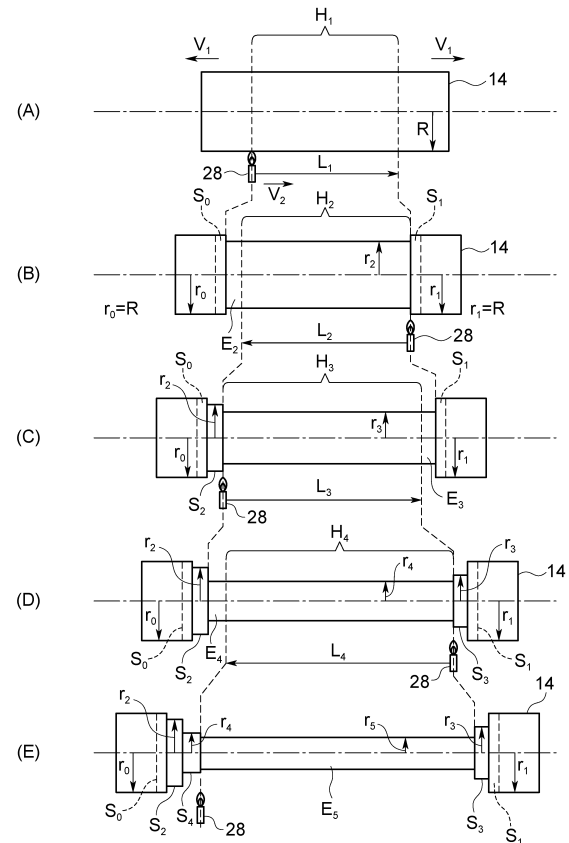
【図 2】



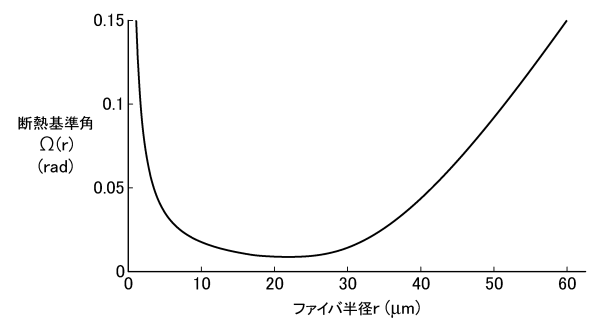
【図 4】



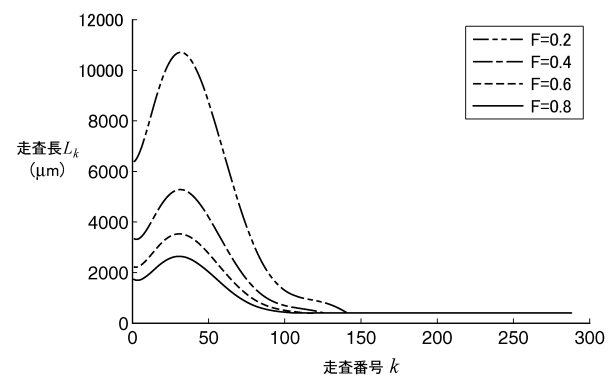
【図 3】



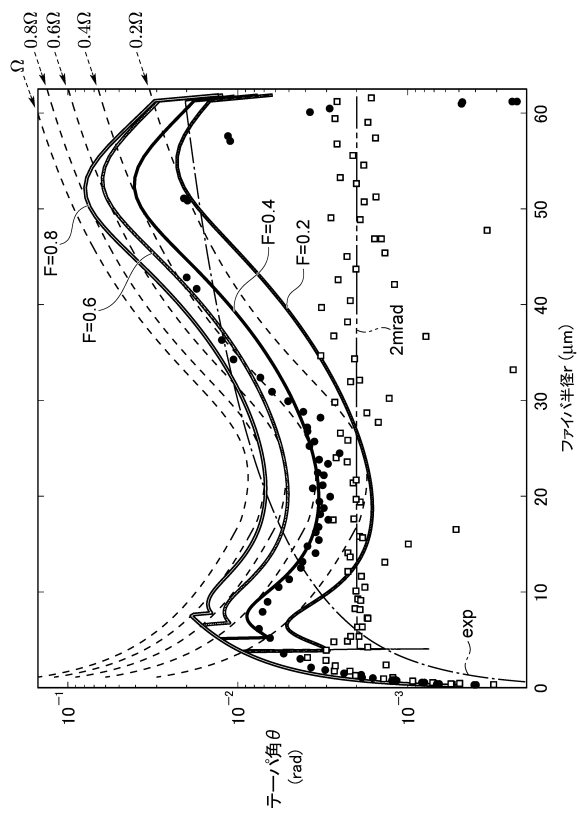
【図 5】



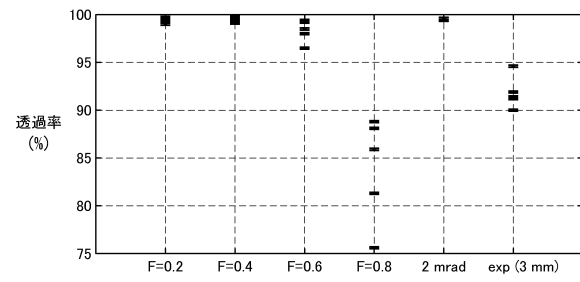
【図 6】



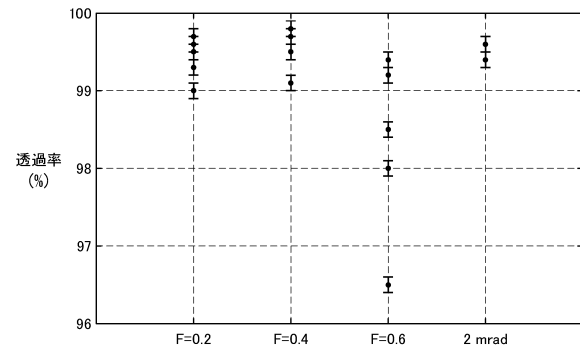
【図 7】



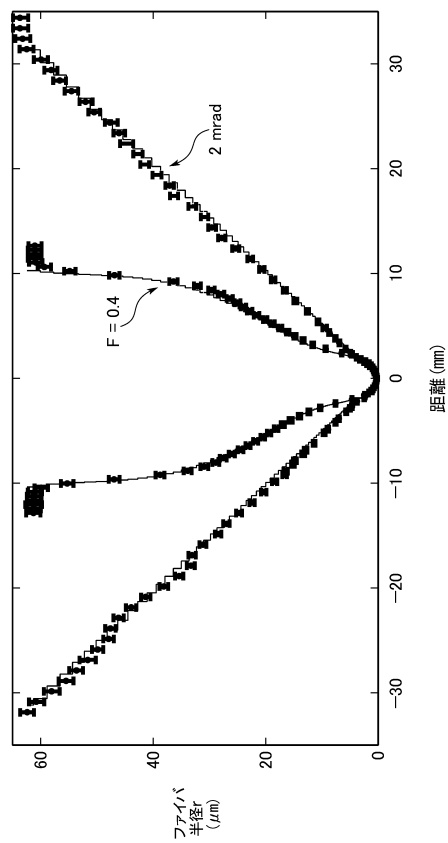
【図 8】



【図 9】



【図 10】



フロントページの続き

審査官 廣崎 拓登

(56)参考文献 特開平05-232322(JP,A)

米国特許第05708740(US,A)

中国特許出願公開第103383477(CN,A)

Takao Aoki, "Fabrication of ultralow-loss tapered optical fibers and microtoroidal resonators", Jpn.J.Appl.Phys., 日本, 日本応用物理学会, 2010年11月22日, Vol.49, 118001

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G02B 6/02

JSTPlus(JDreamIII)

Science Direct

IEEE Xplore