

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2020年1月2日(02.01.2020)



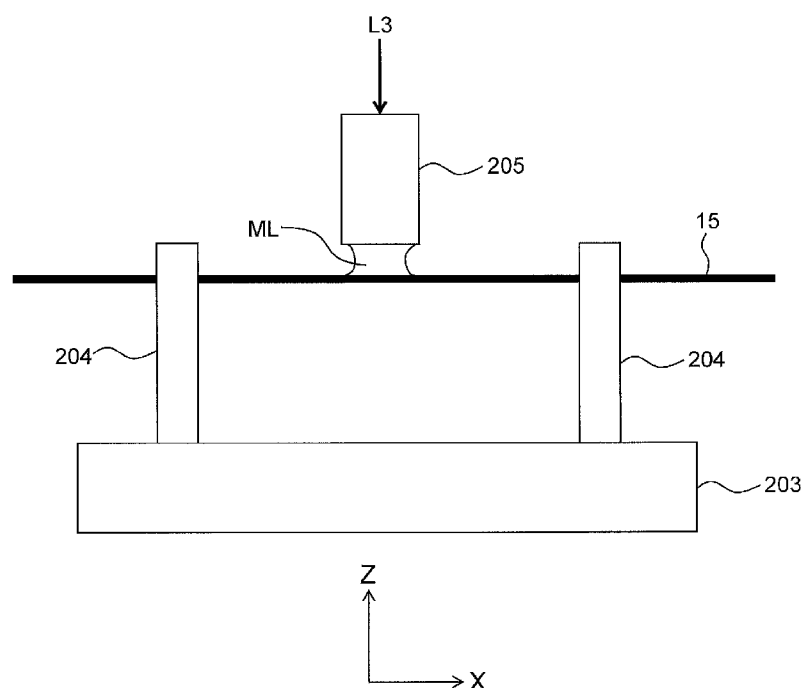
(10) 国際公開番号

WO 2020/003893 A1

- (51) 国際特許分類:
G02B 6/02 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2019/021825
- (22) 国際出願日: 2019年5月31日(31.05.2019)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:
特願 2018-125551 2018年6月29日(29.06.2018) JP
- (71) 出願人: 三星ダイヤモンド工業株式会社 (MITSUBOSHI DIAMOND INDUSTRIAL CO., LTD.) [JP/JP]; 〒5660034 大阪府摂津市香露園3番12号 Osaka (JP). 国立大学法人大阪大学 (OSAKA UNIVERSITY)
- [JP/JP]; 〒5650871 大阪府吹田市山田丘1番1号 Osaka (JP).
- (72) 発明者: 村上 政直 (MURAKAMI, Masanao); 〒5660034 大阪府摂津市香露園3番12号 三星ダイヤモンド工業株式会社内 Osaka (JP). 小西 大介 (KONISHI, Daisuke); 〒5660034 大阪府摂津市香露園3番12号 三星ダイヤモンド工業株式会社内 Osaka (JP). 時田 茂樹 (TOKITA, Shigeki); 〒5650871 大阪府吹田市山田丘1番1号 国立大学法人大阪大学内 Osaka (JP). 上原 日和 (UEHARA, Hiyori); 〒5650871 大阪府吹田市山田丘1番1号 国立大学法人大阪大学内 Osaka (JP). 合谷 賢治 (GOYA,

(54) Title: PRODUCTION METHOD FOR OPTICAL FIBER, AND OPTICAL FIBER

(54) 発明の名称: 光ファイバーの製造方法、及び、光ファイバー



(57) Abstract: The present invention prevents degeneration of an optical fiber during formation of modulated refractive index regions and makes it possible to form modulated refractive index regions that have high reflectivity. A production method for an optical fiber 15 that has modulated refractive index regions HR. The production method includes: a step for arranging a matching layer ML that has a refractive index that is close to the refractive index of a coating layer 155 of an optical fiber 15 between the coating layer 155 and an objective lens 205 that condenses reaction light L3 that is for

Kenji; 〒5650871 大阪府吹田市山田丘 1 番 1 号 国立大学法人大阪大学内 Osaka (JP).

(74) 代理人: 新樹 グローバル・アイピー特許業務法人 (SHINJYU GLOBAL IP); 〒5300054 大阪府大阪市北区南森町 1 丁目 4 番 1 9 号 サウスホレストビル Osaka (JP).

(81) 指定国(表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) 指定国(表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

一 国際調査報告 (条約第21条(3))

changing the refractive index of a core 151; and a step for radiating reaction light L3 toward the inside of the core 151 to form a modulated refractive index region HR.

(57) 要約: 屈折率変調領域の形成中に光ファイバーが劣化することを防止しつつ、高い反射率を有する屈折率変調領域を形成する。屈折率変調領域HRを設けた光ファイバー15の製造方法は、コア151の屈折率を変化させる反応光L3を集光させる対物レンズ205と光ファイバー15のコート層155との間に、コート層155の屈折率と近い屈折率を有するマッチング層MLを配置するステップと、反応光L3をコア151内部に向けて照射して、屈折率変調領域HRを形成するステップと、を含む。

明 細 書

発明の名称：光ファイバーの製造方法、及び、光ファイバー 技術分野

[0001] 本発明は、レーザ発振器に使用される光ファイバーの製造方法に関する。

背景技術

[0002] 従来、光を長さ方向に伝搬させるコアを有する光ファイバーにおいて、当該コアの内部にコアの屈折率よりも高い（又は低い）屈折率を有する複数の領域（屈折率変調領域と呼ぶ）が所定の間隔を空けて形成されたものが知られている。コア内部に光が伝搬するとき、この複数の屈折率変調領域は当該光に対して回折格子として働く。従って、上記のような複数の屈折率変調領域が形成された光ファイバーは、「ファイバーブラッググレーティング（Fiber Bragg Grating、FBG）」と呼ばれる。

[0003] 複数の屈折率変調領域を所定の間隔を空けて形成した光ファイバーに光を伝搬させると、当該光のうち、光ファイバーの屈折率と上記所定の間隔にて決まる波長を有する光を反射光として取り出すことができる。また、例えば、コアに希土類などを添加した光ファイバーの両端近傍に上記所定の間隔で複数の屈折率変調領域を形成し、当該光ファイバーに適切な励起光を導入すると、光ファイバーのコア内を伝搬した発光のうち、上記所定の間隔にて決まる波長を有する光を光ファイバー内で往復させて増幅できる。すなわち、レーザ発振を光ファイバー内にて実現できる。

[0004] 特許文献1には、光ファイバーのコア層にパルスレーザ光を照射して当該コア層において化学反応を起こさせることにより、コア層内に屈折率変調領域を形成する技術が開示されている。特許文献1では、1つの屈折率変調領域を形成した後、光ファイバーをグレーティング周期分だけ移動させ、コア層に再度パルスレーザ光を照射することにより、グレーティング周期だけ間隔を空けて複数の屈折率変調領域を形成している。

先行技術文献

特許文献

[0005] 特許文献1：特許第3426154号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0006] 特許文献1などに開示された従来の屈折率変調領域の形成方法では、光ファイバーのクラッドの外表面に設けられた保護用被膜を剥離した後に、光ファイバーのコア内部にパルスレーザ光を照射していた。この場合、潮解性を有する材料が光ファイバーに用いられていると、空気中の湿度により、屈折率変調領域の形成中に光ファイバーが劣化していた。また、さらなる劣化を防ぐために、屈折率変調領域を形成後に、光ファイバーの外周を保護用被膜などで再度被膜する必要があった。

[0007] また、従来の形成方法では、パルスレーザ光をコア内部に十分に集光できなかったために、コア内部にて弱い反応しか発生できず、高い反射率を有する屈折率変調領域を形成することができなかった。そのため、レーザ発振器の発振媒体として十分な性能を発揮する光ファイバーを製造するために、コア内部に多数の屈折率変調領域を形成する必要があった。

コア内部に多数の屈折率変調領域を形成することは、コアの長さ方向の広範囲にわたって屈折率変調領域を形成することを意味する。従って、コア内部に多数の屈折率変調領域を形成すると、コアの長さ方向の特性変動のために、屈折率変調領域の特性（特に反射率）がコアの長さ方向で異なることとなり、波長選択性の高いレーザ発振を得ることが難しかった。

また、コア内部に多数の屈折率変調領域を形成する場合には、コア内部に繰り返しパルスレーザを照射する必要があるので、レーザ発振器の発振媒体としての光ファイバーの製造に時間がかかっていた。

[0008] さらに、従来の形成方法では、パルスレーザ光をコア内部に十分に集光できなかったために、コア内部に形成される屈折率変調領域の長さ方向の幅が大きくなっていた。そのため、隣接する屈折率変調領域同士が重複しないよう、隣接する屈折率変調領域の間の距離を大きくする必要があった。

一般的に、光ファイバー内で発振できるレーザ光の波長は、隣接する屈折率変調領域の間の距離によって決まる。よって、従来の方法により屈折率変調領域を形成した光ファイバーにおいて短波長のレーザ光を発振させるには、高次の回折による反射を利用する必要がある。高次の回折による反射を利用した場合には、屈折率変調領域は、目的の波長以外の他の波長の光も（強く）反射するため、波長選択性の高いレーザ発振を得ることが難しかった。

[0009] また、隣接する屈折率変調領域の間の距離を大きくするため、十分な反射率を有する光ファイバーを製造するには、コアの長さ方向の広範囲にわたり屈折率変調領域を形成する必要がある、上記と同様の問題を生じる。

[0010] 本発明の目的は、ファイバースラッググレーティングを有する光ファイバーの製造方法において、屈折率変調領域の形成中に光ファイバーが劣化することを防止しつつ、高い反射率を有する屈折率変調領域を形成することにある。

課題を解決するための手段

[0011] 以下に、課題を解決するための手段として複数の態様を説明する。これらの態様は、必要に応じて任意に組み合わせることができる。

本発明の一見地に係る光ファイバーの製造方法は、コア内部に屈折率変調領域を設けた光ファイバーの製造方法である。屈折率変調領域は、コアの屈折率とは異なる屈折率を有する領域である。光ファイバーの製造方法は、以下のステップを含む。

◎対物レンズとコート層との間に、コート層の屈折率と近い屈折率を有するマッチング層を配置するステップ。

◎反応光をコア内部に向けて照射して屈折率変調領域を形成するステップ。

上記において、対物レンズは、コアの屈折率を変化させる反応光を集光させるレンズである。コート層は、光ファイバーの最外周に設けられた樹脂製

の層である。

[0012] 上記の製造方法においては、光ファイバーの最外周のコート層を剥離することなく、反応光のコア内部への照射を行っている。これにより、コア内部に屈折率変調領域を形成中に光ファイバーが劣化することを防止できる。また、屈折率変調領域を形成後に、コート層を再形成する必要がなくなる。

[0013] また、対物レンズとコート層との間にマッチング層が配置されることにより、対物レンズとコート層との間の空間の屈折率を高くできる。その結果、対物レンズの開口数を高くして、コア内部に反応光を小さなスポット径にて集光できる。

反応光をコア内部に小さなスポット径にて集光することにより、コア内部の小さな領域に強度の強い反応光を照射できるので、大きな反射率を有する小さな屈折率変調領域をコア内部に形成できる。その結果、上記の製造方法による光ファイバーにおいては、コア内部の屈折率変調領域の形成数が少なくても十分な光反射を得られる。

また、コア内部の屈折率変調領域の形成数を少なくできるので、コアの長さ方向の広範囲にわたり屈折率変調領域を形成する必要がない。その結果、上記の製造方法による光ファイバーにおいては、光ファイバーの長さ方向の特性のバラツキに起因する屈折率変調領域のバラツキが少なく、発振できるレーザ光の波長選択性が高い。

[0014] さらに、小さな屈折率変調領域をコア内部に形成することにより、互いに隣接する屈折率変調領域の間の距離を小さくしても、これらの屈折率変調領域が重複しない。その結果、上記の製造方法による光ファイバーにおいては、短波長のレーザ光であっても低次の回折により反射できるので、発振できる短波長のレーザ光の波長選択性が高い。

[0015] 上記の製造方法において、反応光は、光ファイバー及びコート層にて吸収されない短波長を有する短パルスレーザ光であってもよい。これにより、コート層などを変質させることなく、反応光をコア内部により小さなスポット径にて集光できる。

[0016] 光ファイバーは、コアとコート層との間に配置され、コアの外周を覆うクラッドを有してもよい。この場合、当該クラッドは、その長さ方向とは垂直な断面形状において、少なくとも一つの直線部分を有してもよい。さらに、反応光は、クラッドの直線部分により形成される曲率を有さない平面に対して垂直に入射されてもよい。

これにより、コア内部で反応光のスポット形状が歪むことを抑制して、コア内部での反応光のスポット径を小さくできる。また、クラッド内部におけるコアの位置が光ファイバーの長さ方向で異なっても、スポット形状を歪ませることなく、反応光をコア内部に集光できる。

[0017] クラッドの断面形状は、D字形状、多角形、又は、D字形状の円周部分の一部を切り取った形状のいずれかであってもよい。これにより、コア内部で反応光のスポット形状が歪むことを抑制して、コア内部での反応光のスポット径を小さくできる。

[0018] マッチング層は液状材料にて形成されてもよい。この場合、マッチング層は、その表面張力により対物レンズとコート層の間に配置されてもよい。

これにより、簡単な方法により、対物レンズとコート層の間にマッチング層を配置できる。

[0019] 上記の製造方法は、反応光をコアに照射した状態で、反応光をコアの長さ方向とは垂直な方向に移動させて屈折率変調領域を形成するステップをさらに含んでもよい。

これにより、コアの長さ方向とは垂直な方向の断面内の広い範囲に屈折率変調領域を形成できる。その結果、屈折率変調領域単位の反射率を高くできる。

[0020] コアは、エルビウムをドープしたZBLANガラスであってもよい。これにより、コアを励起光により励起することで中赤外の波長の光を発生する光ファイバーを製造できる。

[0021] マッチング層は、コート層の屈折率に近い屈折率を有してもよい。これにより、コート層とマッチング層との界面において発生する反応光の屈折を最

小にして、コア内部に反応光を小さなスポット径にて集光できる。

[0022] 本発明の他の見地に係る光ファイバーは、コア内部にコアの屈折率とは異なる屈折率を有する屈折率変調領域を設けた光ファイバーである。この光ファイバーは、以下の方法によって製造される。

◎コアの屈折率を変化させる反応光を集光させる対物レンズと、光ファイバーの最外周に設けられた樹脂製のコート層との間に、コート層の屈折率と近い屈折率を有するマッチング層を配置するステップ。

◎反応光をコア内部に向けて照射して屈折率変調領域を形成するステップ。

[0023] 上記の製造方法により、コア内部に大きな反射率を有する小さな屈折率変調領域を形成できるので、上記の光ファイバーは、コア内部に屈折率変調領域を形成した領域の長さを短くできる。

また、上記の光ファイバーは、屈折率変調領域のバラツキが少ないので、レーザ光の発振効率が高く、かつ、発振できるレーザ光の波長選択性が高い。

さらに、上記の光ファイバーは、短波長のレーザ光であっても低次の回折により反射できる領域を有するので、発振できる短波長のレーザ光の波長選択性を高くできる。

[0024] 光ファイバーは、コアとコート層との間に配置されることでコアの外周を覆い、その長さ方向とは垂直な断面形状において少なくとも一つの直線部分を有するクラッドをさらに備えてもよい。これにより、コア内部に、大きな反射率を有する小さな屈折率変調領域を形成できる。

[0025] クラッドの断面形状は、D字形状、多角形、又は、D字形状の円周部分の一部を切り取った形状のいずれかであってもよい。これにより、コア内部に、大きな反射率を有する小さな屈折率変調領域を形成できる。

[0026] コアは、エルビウムをドープしたZBLANガラスであってもよい。これにより、光ファイバーは、コアを励起光により励起することで中赤外の波長の光を発生できる。

[0027] コアは、複数の屈折率変調領域を有する第1グレーティング領域と、複数の屈折率変調領域を有し第1グレーティング領域から長さ方向に第2間隔を開けて配置される第2グレーティング領域と、を有してもよい。これにより、光ファイバーをレーザ発振器の媒体として用いることができる。

[0028] 第1グレーティング領域及び第2グレーティング領域に形成される互いに隣接する2つの屈折率変調領域は、第1間隔を有してもよい。これにより、光ファイバーは、第1間隔で決定される波長を有するレーザ光を発生できる。

発明の効果

[0029] 屈折率変調領域の形成中に光ファイバーが劣化することを防止しつつ、高い反射率を有する屈折率変調領域を形成できる。

図面の簡単な説明

[0030] [図1]レーザ発振器の構成を示す図。

[図2]レーザ発振器で用いられる光ファイバーの詳細構成を示す図。

[図3A]第1クラッドの断面形状の第1例を示す図。

[図3B]第1クラッドの断面形状の第2例を示す図。

[図3C]第1クラッドの断面形状の第3例を示す図。

[図3D]第1クラッドの断面形状の第4例を示す図。

[図4A]屈折率変調領域の形成装置の全体図。

[図4B]形成装置における対物レンズの近傍の拡大図。

[図5A]評価装置の構成の一例を示す図。

[図5B]評価装置の構成の他の例を示す図。

[図6]光ファイバーの製造方法を示すフローチャート。

[図7]反応光のスポットをコアの直径方向に移動したときに形成される屈折率変調領域の一例を示す図。

[図8]光ファイバーのグレーティング領域の光学顕微鏡像。

[図9]グレーティング領域の形成長さと反射率との関係を示す図。

[図10]グレーティング領域の反射スペクトルを示す図。

[図11A]最適でない条件で形成した屈折率変調領域を含む第1 グレーティング領域の散乱光強度を示す図。

[図11B]最適条件で形成した屈折率変調領域を含む第2 グレーティング領域の散乱光強度を示す図。

[図12]第2 実施形態に係る反応光の入射方法の一例を示す図。

発明を実施するための形態

[0031] 1. 第1 実施形態

(1) レーザ発振器

以下、第1 実施形態に係る、レーザ媒体及び共振器として機能する光ファイバー15の製造方法について説明していく。まず、図1を用いて、本実施形態に係る製造方法により製造される光ファイバー15が用いられるレーザ発振器1を説明する。図1に示すような、光ファイバー15をレーザ媒体及び共振器として用いるレーザ発振器1は、ファイバーレーザとも呼ばれ、レーザ加工装置の光源として使用できる。図1は、レーザ発振器の構成を示す図である。

[0032] レーザ発振器1は、励起光源11と、光導入部13と、光ファイバー15と、コリメータ17と、を備える。

励起光源11は、光ファイバー15のクラッド153（後述）に入射する励起光L2を出力する半導体レーザである。クラッド153に入射された励起光L2がコア151を通過することで、コア151内で励起光L2が吸収される。その後、誘導放出により、コア151内部にて発光が増幅され、さらに光ファイバー15内部を両端のミラーにより反射を繰り返すことにより、レーザ発振に至る。当該レーザ発振により生じる光の波長は、コア151にドーピングされた元素により定まる。

[0033] 光導入部13は、励起光源11から出力した励起光L2を光ファイバー15のクラッド153に導入する。光導入部13は、励起光導波ファイバー131と、導入レンズ133と、を有する。

励起光導波ファイバー131は、励起光源11から出力した励起光L2を

導入レンズ 133 に導波する、例えば光ファイバーである。導入レンズ 133 は、光ファイバー 15 の一端である入口 1 の近傍に配置され、励起光導波ファイバー 131 により導波された励起光 L2 を、クラッド 153 に導入する。

[0034] 光ファイバー 15 は、本実施形態のレーザ発振器 1 において、レーザ媒体及び共振器として機能し、励起光 L2 の照射により発生したレーザ光 L1 を増幅させてレーザ発振させる。コリメータ 17 は、光ファイバー 15 の出口 O から出射したレーザ光 L1 を平行光線とするレンズである。

[0035] (2) 光ファイバー

次に、図 1 及び図 2 を用いて、レーザ発振器 1 のレーザ媒体及び共振器として機能し、本実施形態に係る製造方法にて製造される光ファイバー 15 を説明する。図 2 は、レーザ発振器で用いられる光ファイバーの詳細構成を示す図である。光ファイバー 15 は、コア 151 と、クラッド 153 と、コート層 155 と、グレーティング領域 157 と、を有する。

[0036] コア 151 は、光導入部 13 から導入した励起光 L2 により励起され、コア 151 にドーピングされた物質により決まる波長のレーザ光 L1 を発生する。すなわち、コア 151 は、レーザ発振器 1 のレーザ媒体として機能する。本実施形態において、コア 151 は、希土類元素をドーピングしたフッ化物ファイバーである。具体的には、希土類元素としてエルビウム (Er) をドーピングした ZBLAN ガラスである。ZBLAN ガラスは、ジルコニウム (Zr)、バリウム (Ba)、ランタン (La)、アルミニウム (Al)、ナトリウム (Na) を主成分とするガラスである。

[0037] エルビウムをドーピングした ZBLAN ガラスをコア 151 の材料として用いることにより、コア 151 は、励起光 L2 により励起されることで、中赤外の波長 (具体的には、 $2.8\mu\text{m}$ 近辺) のレーザ光 L1 を発生できる。

[0038] クラッド 153 は、コア 151 の外周においてコア 151 を覆うように形成された、コア 151 の屈折率よりも小さな屈折率を有する層である。本実施形態において、クラッド 153 は、第 1 クラッド 153a と第 2 クラッド

153bにより構成される。

第1クラッド153aは、コア151の外周を覆うZBLANガラスである。第1クラッド153aは、コア151よりも小さな屈折率を有する。そのため、第1クラッド153aは、コア151内部で発生したレーザ光L1を、コア151との界面において反射することで、レーザ光L1をコア151内部に閉じ込める。

[0039] 本実施形態において、図2に示すように、第1クラッド153aは、長さ方向（図2）に垂直な方向の断面において、4辺（4つの直線部分）を有する四角形を有している。

[0040] なお、第1クラッド153aは、長さ方向に垂直な方向の断面形状として四角形を有しているが、これに限られない。例えば、第1クラッド153aを、円形（図3A）、D字形状（図3B）、多角形（例えば、八角形（図3C））、D字形状の円周の一部を切り取った形状（図3D）などの断面形状とすることができる。

図3Aは、第1クラッドの断面形状の第1例を示す図である。図3Bは、第1クラッドの断面形状の第2例を示す図である。図3Cは、第1クラッドの断面形状の第3例を示す図である。図3Dは、第1クラッドの断面形状の第4例を示す図である。

[0041] 第2クラッド153bは、第1クラッド153aの外周を覆う樹脂である。例えば、第2クラッド153bは、低屈折率フッ化物樹脂製である。第2クラッド153bは、第1クラッド153aよりも小さな屈折率を有する。そのため、第2クラッド153bは、クラッド153に入射された励起光L2を、第1クラッド153aとの界面において反射することで、励起光L2を第1クラッド153a及びコア151内部に閉じ込める。これにより、励起光L2を、第1クラッド153a及びコア151内部を複数回通過できる。

[0042] コート層155は、光ファイバー15の最外周に設けられた樹脂（例えば、アクリル樹脂）製の被膜である。コート層155は、潮解性を有する光フ

ファイバー 15（ZBLANガラス製の第1クラッド153a、コア151）と空気中の水分とが接触することを防止する層である。上記のコート層155により、光ファイバー15が劣化することを防止できる。

[0043] （3）グレーティング領域

グレーティング領域157は、コア151を伝搬したレーザ光L1の一部を反射する領域である。本実施形態において、グレーティング領域157は、第1グレーティング領域157aと、第2グレーティング領域157bと、を有する。

第1グレーティング領域157aは、光ファイバー15の励起光L2の入口Iの近傍において、コア151内部に形成される。図2に示すように、第1グレーティング領域157aは、第1間隔D1を空けて形成された複数の屈折率変調領域HRを含む。屈折率変調領域HRは、コア151の屈折率とは異なる屈折率を有する領域である。すなわち、第1グレーティング領域157aにおいては、屈折率が相対的に高い箇所と相対的に低い箇所が交互に配置される。

[0044] グレーティング領域157内のある屈折率変調領域HRからの反射光と、第1間隔D1を空けて配置された隣接する屈折率変調領域HRからの反射光とが同一箇所で同位相となっていれば、これら2つの反射光は、干渉により互いにその強度を強めることとなる。このような反射光の強度の強め合いがグレーティング領域157内で発生し、結果的に光反射が起こる。

[0045] 第2グレーティング領域157bは、光ファイバー15のレーザ光L1の出口O近傍において、コア151内部に形成される。すなわち、第2グレーティング領域157bは、第1グレーティング領域157aから、コア151の長さ方向に、第2間隔D2を空けて形成される。図3に示すように、第2グレーティング領域157bは、第1グレーティング領域157aと同様に、第1間隔D1を空けて形成された複数の屈折率変調領域HRを含む。

[0046] 従って、第2グレーティング領域157bは、第1グレーティング領域157aにおける反射原理と同様の原理にて、コア151を出口O方向に伝搬

してきたレーザ光L1のうち、第1間隔D1にて決まる波長のレーザ光L1の一部を、コア151の入口Iに向けて反射できる。出口O方向に伝搬してきたレーザ光L1のうち、第2グレーティング領域157bを通過したレーザ光L1が、出口Oから出力される。

なお、より多くのレーザ光L1を出口Oから出力するため、第2グレーティング領域157bにおけるレーザ光L1の反射率は、第1グレーティング領域157aにおける反射率よりも小さいことが好ましい。具体的には、第2グレーティング領域157bの形成長さは、第1グレーティング領域157aの形成長さよりも短いことが好ましい。

[0047] 光ファイバー15のコア151が、上記のように、励起光L2の入口I側に第1グレーティング領域157aを有し、レーザ光L1の出口O側に第2グレーティング領域157bを有することで、特定波長を有するレーザ光L1を、第1グレーティング領域157aと第2グレーティング領域157bとの間で増幅できる。すなわち、光ファイバー15のいずれかの端部にミラーなどを配置することなく、コア151内でレーザ光L1のレーザ発振を実現できる。

[0048] また、十分な強度のレーザ発振を実現するために光ファイバー15の端部近傍にミラーなどを配置する必要がないので、本実施形態の光ファイバー15を備えるレーザ発振器1は、損失を少なくできる。その結果、より大きな強度のレーザ光L1を効率よく出力できる。

[0049] (4) 屈折率変調領域の形成装置

以下、本実施形態に係る光ファイバー15の製造方法（屈折率変調領域HRの形成方法）について説明する。まず、図4A及び図4Bを用いて、本実施形態に係る光ファイバー15に屈折率変調領域HRを形成する形成装置200の構成を説明する。図4Aは、屈折率変調領域の形成装置の全体図である。図4Bは、形成装置における対物レンズの近傍の拡大図である。

形成装置200は、反応光源201と、移動台203と、対物レンズ205と、制御部209と、を主に備える。反応光源201は、反応光L3を出

力する光源である。反応光 L_3 は、コア151の当該反応光 L_3 が照射された箇所において化学反応を起こさせて、当該箇所の屈折率を、コア151の屈折率と異ならせる。

[0050] 従って、反応光 L_3 は、コア151に対しては、屈折率を変調させる反応を起こさせるための十分なエネルギーを有することが好ましい。また、反応光 L_3 をコア151内部で小さいスポット径にて集光させるには、反応光 L_3 の波長は短い方が好ましい。

その一方で、反応光 L_3 の経路となっている他の箇所、すなわち、光ファイバー15のクラッド153及びコート層155に対しては、反応光 L_3 は、これらと相互作用して吸収されないことが好ましい。すなわち、反応光 L_3 の波長は、クラッド153及びコート層155と相互作用するような短波長でない方が好ましい。このため、反応光 L_3 として、クラッド153及びコート層155にて吸収され相互作用しない最小の波長を有するものを選択する。

[0051] 本実施形態においては、上記の光ファイバー15に対する反応光 L_3 の条件、及び、反応光源201として使用する光源の入手容易性等を考慮して、一般的な加工用レーザ（YAGレーザ）を反応光源201として用いた。また、当該反応光源201からの光を高調波変換して、波長515nmの反応光 L_3 を出力するようにした。

このように、反応光 L_3 の波長を適切に選択することにより、クラッド153及びコート層155を変質させることなく、反応光 L_3 をコア151内部により小さなスポット径にて集光できる。

[0052] また、反応光源201は、上記波長を有するフェムト秒の短パルスレーザ光（パルス幅：400fs（フェムト秒））を、反応光 L_3 として発生する。さらに、反応光 L_3 の出力強度は、例えば、0.01 μ J～1 μ Jの範囲にて調整される。反応光 L_3 の出力強度は、屈折率変調領域HRを形成する光ファイバー15の種類などに従って適宜調整される。

[0053] 移動台203は、光ファイバー15の長さ方向（図4AではX方向）、及

び、それに垂直な高さ方向（図4 AではZ方向）に移動可能なステージである。移動台203として、ピエゾ素子などを駆動源とした移動台（ステージ）を用いることができる。これにより、光ファイバー15をその長さ方向及び高さ方向に高精度に移動できるので、光ファイバー15のコア151内部の正確な位置に屈折率変調領域HRを形成できる。

[0054] また、移動台203は、その上部に、屈折率変調領域HRを形成する光ファイバー15を配置する。以下、図4 Bを用いて、本実施形態の移動台203における光ファイバー15の配置方法を説明する。

図4 Bに示すように、移動台203の上面には、X方向に並んで一対の保持部材204が固定されている。一対の保持部材204は、X方向（長さ方向）に若干の張力を加えた状態で、光ファイバー15を2箇所保持するクランプである。光ファイバー15の長さ方向（X方向）に張力を加えることにより、光ファイバー15が保持部材204の間で撓んだ状態で保持されることを回避できる。

[0055] 対物レンズ205は、光路変更部材207（例えば、プリズムミラー）を介して、反応光源201から伝搬された反応光L3の焦点をコア151内に結ぶレンズである。また、図4 Bに示すように、対物レンズ205と光ファイバー15のコート層155との間には、マッチング層MLが配置されている。

[0056] マッチング層MLは、例えば、光学顕微鏡において「液浸対物レンズ」を形成するために用いられるイマージョンオイル（カーギル標準屈折液）（液状材料の一例）により形成される。マッチング層MLの屈折率は、空気の屈折率（1.0）よりも大きいことが好ましく、1.3～1.6の範囲がより好ましく、コート層155の屈折率に近い1.5程度が最も好ましい。空気よりも大きい屈折率により、マッチング層MLは、対物レンズ205の開口数を増大できる。本実施形態では、マッチング層MLとして、屈折率が1.5程度であるイマージョンオイルを用いている。

また、イマージョンオイルであるマッチング層MLは、その表面張力によ

り、対物レンズ205及び光ファイバー15のコート層155に保持されている。上記の構成により、対物レンズ205と光ファイバー15のコート層155との間は、空気よりも屈折率が高い状態となる。

[0057] 制御部209は、例えば、CPU、RAM、ROM、記憶装置（SSD、ハードディスクなど）、各種インターフェースを備えたコンピュータシステムと、反応光源201の制御部と、移動台203の制御部と、により構成され、上記の反応光源201、移動台203、及び対物レンズ205を制御する。

なお、反応光源201の制御部、及び、移動台203の制御部は、制御部209のコンピュータシステムにおいてプログラム（当該プログラムは、コンピュータシステムの記憶装置に記憶されている）を実行することにより制御されてもよい。

[0058] 形成装置200は、さらに、光路変更部材207の上部に図示しないカメラを備える。このカメラにより、対物レンズ205を介して、反応光L3により形成された加工痕を観察することができる。その結果、コア151の適切な位置に反応光L3を照射できる。

[0059] また、形成装置200は、光ファイバー15の片側からコア151に白色光を導入する白色光源（図示せず）を備える。白色光をコア151に導入することにより、光ファイバー15の反射あるいは透過スペクトルの観察が可能となる。その結果、形成装置200による製造中に、形成されたグレーティング領域157の品質を確認することが可能となり、製造時間の短縮とともに、グレーティング領域157の品質を安定化させることができる。

[0060] さらに、他の実施形態において、形成装置200において、クラッド153に励起光L2を導入することにより発生したレーザ発振出力を測定することで、形成されたグレーティング領域157の評価を行ってもよい。具体的には、形成装置200に、後述する評価装置300を導入することにより、励起光L2を用いたグレーティング領域157の評価を実行できる。

[0061] さらに他の実施形態において、移動台203はY方向にも移動可能であ

ってもよい。これにより、コア151の断面において二次元形状の屈折率変調領域HRを形成できる。

[0062] 上記の構成を有することにより、本実施形態に係る形成装置200は、移動台203及び／又は対物レンズ205により反応光L3の焦点位置を移動させて、光ファイバー15のコア151内部の任意の位置の屈折率を異ならせることができる。その結果、コア151内部に任意の形態の屈折率変調領域HRを形成できる。

[0063] (5) 光ファイバーの評価装置

以下、図5Aを用いて、上記の形成装置200を用いて形成したグレーティング領域157を有する光ファイバー15の評価装置300を説明する。図5Aは、評価装置の構成の一例を示す図である。

図5Aに示すように、評価装置300は、上記の形成装置200に組み込まれている。従って、評価装置300は、形成装置200にてグレーティング領域157を形成しながら白色光L4をクラッド153に入射し、グレーティング領域157を透過した透過光L1'のスペクトル強度を測定することで、レーザ発振媒体としての光ファイバー15の性能を評価できる。

[0064] 評価装置300は、白色光源301と、光導波ファイバー303と、導入部305と、第1光測定部307と、を備える。白色光源301は、白色光L4を出力する。本実施形態において、白色光L4は、光ファイバー15で励起できる光の波長を含む、1000nm～5000nmの範囲の波長を有する。白色光源301としては、例えば、白色光LED光源、白色電灯などを用いることができる。

[0065] 光導波ファイバー303は、白色光源301から出力した白色光L4を、導入部305に導波する光ファイバーである。導入部305は、光ファイバー15のグレーティング領域157が形成されている一端とは反対側の他端近傍に配置され、白色光L4を当該他端からクラッド153に導入する。第1光測定部307は、グレーティング領域157を通過した透過光L1'のスペクトル強度を測定する、例えば、光スペクトルアナライザである。

[0066] 評価装置300の他の例として、図5Bに示すような、グレーティング領域157にて反射した反射光L1'のスペクトル強度を測定する構成を有するものを使用できる。図5Bは、評価装置の他の例を示す図である。

図5Bに示すように、反射光L1'を測定する評価装置300'においては、導入部305にミラー305aが設けられる。ミラー305aは、ハーフミラー、ダイクロイックミラーなどであり、グレーティング領域157にて反射された反射光L1'を白色光L4とは異なる方向に反射する。その一方、ミラー305aは、白色光L4を透過させる。

[0067] また、評価装置300'は、第2光測定部309を有する。第2光測定部309は、グレーティング領域157にて反射され、ミラー305aにより反射された反射光L1'のスペクトル強度を測定する、例えば、光スペクトルアナライザである。

[0068] (6) 光ファイバーの製造方法

次に、図6を用いて、上記の形成装置200を用いた本実施形態に係る屈折率変調領域HRの形成方法（光ファイバー15の製造方法）を説明する。図6は、光ファイバーの製造方法を示すフローチャートである。

最初に、屈折率変調領域HRを形成する光ファイバー15を、コート層155を剥離することなく、形成装置200の保持部材204にて保持する。すなわち、本実施形態においては、光ファイバー15にコート層155が被膜された状態で、反応光L3をコア151に照射して屈折率変調領域HRを形成する。

[0069] 光ファイバー15を移動台203に設置後、ステップS1において、対物レンズ205を光ファイバー15に近づけて、対物レンズ205と光ファイバー15のコート層155との間にマッチング層MLを配置する。

具体的には、対物レンズ205と光ファイバー15との隙間に、マッチング層MLを形成するためのイメージジョンオイルを注入する。これにより、イメージジョンオイル、すなわち、マッチング層MLは、互いに近接して配置された対物レンズ205と光ファイバー15のコート層155との間に、その

表面張力により保持される。

このように、マッチング層MLを形成する材料を液状とすることで、その表面張力を用いて、対物レンズ205と光ファイバー15のコート層155との間に、屈折率の低い空気の層を形成することなく、簡単にマッチング層MLを形成できる。

[0070] 対物レンズ205と光ファイバー15のコート層155との間にマッチング層MLを配置後、ステップS2において、反応光源201から反応光L3を発生させる。反応光源201が発生した反応光L3は、対物レンズ205を通過後、マッチング層ML内部を伝搬する。マッチング層MLの屈折率は1.5程度と、コート層155（対物レンズ205、クラッド153）の屈折率と近い。従って、マッチング層MLとコート層155との界面における屈折は、マッチング層MLを配置しない場合の空気とコート層155との界面における屈折よりも小さくなる。

[0071] マッチング層MLとコート層155との界面における反応光L3の屈折を小さくすることで対物レンズ205の開口数を大きくできるので、反応光L3を小さなスポット径にてコア151内部に集光できる。

[0072] 反応光L3をコア151内部に照射した状態で、ステップS3において、移動台203をZ方向（コア151の長さ方向とは垂直な方向の一例）に移動させる。これにより、反応光L3のスポットSPが、コア151内部をコア151の直径方向に移動する。

また、反応光L3のスポットSPをZ方向に移動させるときの移動速度は、短パルスの反応光L3を反応光源201から出力する頻度（周波数）、及び／又は、光ファイバー15を構成する材料等に基づいて決定される。本実施形態においては、上記移動速度を30 μm ～3 mm／秒の範囲とした。本実施形態では、反応光L3を上記移動速度にて移動させて、反応光L3をコア151（コア151の径：15 μm ）内をZ方向に1～100回往復させている。

[0073] さらに、反応光L3のZ方向の移動範囲（屈折率変調領域HRの形成範囲

)は、コア151内部のみならず、第1クラッド153aの一部まで及んでいることが好ましい。例えば、コア151からレーザ光L1の半波長分だけ、第1クラッド153a側へ移動範囲を広げることが好ましい。

[0074] スポットSPをZ方向に移動することにより、図7に示すように、コア151の長さ方向とは垂直な断面内(Y-Z平面内)において、Z方向に延びる屈折率変調領域HRを形成できる。その結果、屈折率変調領域HR単位の反射率をより高くできる。図7は、反応光のスポットをコアの直径方向に移動したときに形成される屈折率変調領域の一例を示す図である。

[0075] また、反応光L3のスポットSPをZ方向に移動させるときの移動速度を所定の範囲に設定することにより、Z方向に対して均質な屈折率変調領域HRを形成できる。

なお、スポットSPの移動速度が上記の範囲内にはない場合には、屈折率変調領域HRがZ方向に対して不均質となる。後述するように、不均質な屈折率変調領域HRは、レーザ光L1を散乱してしまい、光ファイバー15内におけるレーザ発振効率を低下させる。

[0076] さらに、反応光L3のZ方向の移動範囲を第1クラッド153aの一部まで広げることで、第1クラッド153aの一部まで屈折率変調領域HRを延ばすことができる。

コア151と第1クラッド153aとの界面でレーザ光L1が反射する際、レーザ光L1は、コア151の外周からレーザ光L1の半波長分程度、第1クラッド153aに漏れ出す。従って、第1クラッド153a側へ屈折率変調領域HRを延ばすことにより、第1クラッド153aに漏れ出したレーザ光L1に対しても、屈折率変調領域HRによる反射をさせることができる。

[0077] 上記ステップS2及びS3を実行して1つの屈折率変調領域HRを形成後、ステップS4において、さらに屈折率変調領域HRを形成するか否かを判断する。

本実施形態では、屈折率変調領域HRの形成を継続するか否かは、屈折率

変調領域 H R の形成数が予め決められた数となったか否かにより決定する。

他の実施形態において、グレーティング領域 1 5 7 が形成された光ファイバー 1 5 にて発生するレーザ発振出力の大きさを、屈折率変調領域 H R の形成を継続するか否かの判断基準としてもよい。

さらに他の実施形態において、グレーティング領域 1 5 7 の反射スペクトルを、屈折率変調領域 H R の形成を継続するか否かの判断基準としてもよい。例えば、グレーティング領域 1 5 7 にて反射された特定の波長を有する光の強度が所望の大きさとなったか否かを、屈折率変調領域 H R の形成を継続するか否かの判断基準としてもよい。その他、当該光のスペクトル形状（当該光のピーク波長、スペクトルの半値幅、サイドローブの有無など）を判断基準としてもよい。

[0078] 上記の判断基準に基づいて、屈折率変調領域 H R の形成を継続しないと決定した場合（ステップ S 4 で「N o」）、屈折率変調領域 H R の形成プロセスを終了する。

一方、屈折率変調領域 H R の形成を継続すると決定した場合（ステップ S 4 で「Y e s」）、ステップ S 5 において反応光 L 3 の照射を停止する。その後、ステップ S 6 において、移動台 2 0 3 を X 方向に移動させて、光ファイバー 1 5 を第 1 間隔 D 1 だけ長さ方向に移動させる。

[0079] 光ファイバー 1 5 を第 1 間隔 D 1 だけ長さ方向に移動後、当該長さ方向の位置にて、上記のステップ S 2 ～ S 4 を実行し、他の屈折率変調領域 H R を形成する。

上記のステップ S 1 ～ S 6 を繰り返し実行することにより、グレーティング領域 1 5 7 において、互いに隣接する屈折率変調領域 H R の間隔を第 1 間隔 D 1 だけ空けて、複数の屈折率変調領域 H R を形成できる。

[0080] (7) 実施例

(7-1) 実施例における屈折率変調領域の形成条件

以下、上記のステップ S 1 ～ S 6 を形成装置 2 0 0 にて実行して製造した光ファイバー 1 5 の実施例について説明する。まず、実施例における屈折率

変調領域HRの形成条件について説明する。

グレーティング領域157を形成する光ファイバー15は、断面形状が四角形であるコア151にエルビウムをドープしたZBLANガラス製のものを用いた。また、実施例で用いた光ファイバー15は、第1クラッド153aがZBLANガラス、第2クラッド153bが樹脂であるダブルクラッドの光ファイバーである。

[0081] マッチング層MLは、低自家蛍光のイメージジョンオイル（屈折率：1.515、粘度：450mm²/s、オリンパス（登録商標）製）を、対物レンズ205と光ファイバー15のコート層155との間に表面張力により保持させた。

[0082] 屈折率変調領域HRは、パルス幅が400fs、波長が515nmである反応光L3を用いて形成した。反応光L3の強度は、反応光L3による照射痕を確認しながら0.5μJ付近にて調整した。

[0083] 互いに隣接する屈折率変調領域HRの間隔（第1間隔D1）を970nmとした。この間隔は、エルビウムドープしたZBLANガラスのコア151にて励起されるレーザ光L1（波長：約2.8μmの中赤外光）を、一次の回折を利用して反射できるものである。また、反応光L3のスポットSPのZ方向の移動速度は、30μm/秒とした。本実施例においては、反応光L3のスポットSPを上記移動速度にてZ方向に1往復させて、屈折率変調領域HRを形成した。

[0084] （7-2）評価結果

（7-2-1）グレーティング領域の光学顕微鏡像

以下、実施例において製造したグレーティング領域157を有する光ファイバー15の評価結果を説明する。まず、図8を用いて、光ファイバー15に形成されたグレーティング領域157の光学顕微鏡像について説明する。図8は、光ファイバーのグレーティング領域の光学顕微鏡像である。

[0085] 図8の光学顕微鏡像において、グレーティング領域157は、コア151の長さ方向とは垂直な線状（縦線状）の明暗が現れている部分に対応する。

グレーティング領域 157 に対応する箇所において縦線状の明暗が明確であることから、上記の製造条件を用いて、コア 151 の直径方向に均質な屈折率変調領域 HR が形成されていることが分かる。

[0086] 上記のように、光学顕微鏡観察により、グレーティング領域 157 の形成状態を視覚的に確認することができる一方、グレーティング領域 157 及び屈折率変調領域 HR の微視的な構造を精度よく特定することは困難である。

グレーティング領域 157 及び屈折率変調領域 HR の微視的な構造を特定する方法としては、例えば、電子顕微鏡観察などが考えられるが、これらを電子顕微鏡観察するにはコア 151 の一部を外部に取り出す必要がある。コア 151 の一部を外部に取り出すためには、クラッド 153 の剥離などが必要であり、電子顕微鏡観察までの作業により、グレーティング領域 157 及び屈折率変調領域 HR の微視的な構造は破壊される可能性が大きい。また、ZBLAN ガラスなどの潮解性を有する材料で形成された光ファイバーの場合には、屈折率変調領域 HR を外部に取り出すまでに屈折率変調領域 HR が変質してしまい、その構造が変化する。

[0087] 以上のように、屈折率変調領域 HR の構造を特定することには不可能・非実際の事情があるので、本実施形態では、グレーティング領域 157 の光学特性に基づく性能評価をすることにより、形成した屈折率変調領域 HR を評価した。

[0088] (7-2-2) グレーティング領域の形成長さと反射率との関係

次に、グレーティング領域 157 の形成長さと、グレーティング領域 157 によるレーザ光 L1 の反射率との関係を用いて、上記の条件にて製造したグレーティング領域 157 の性能評価を行った。

グレーティング領域 157 の形成長さとグレーティング領域 157 によるレーザ光 L1 の反射率との関係は、上記の評価装置 300 を用いて得た。具体的には、屈折率変調領域 HR を形成装置 200 により形成しながら、白色光 L4 をクラッド 153 に入射し、形成されたグレーティング領域 157 を透過した白色光 L4 のうち、レーザ光 L1 に対応する波長 ($2.8 \mu\text{m}$) の

光成分の強度を第1光測定部307により測定し、透過前の白色光L4のレーザ光L1に対応する波長の光成分の強度と、第1光測定部307にて測定したレーザ光L1に対応する波長の光成分の強度との差分を、透過前の白色光L4のレーザ光L1に対応する波長の光成分の強度にて除算することで反射率を算出した。

[0089] 実施例における、グレーティング領域157の形成長さとレーザ光L1の反射率との関係を、図9に示す。図9に示すように、形成長さが2.0mm程度であっても、グレーティング領域157の反射率は1近くになっている。これは、上記の屈折率変調領域HRの形成条件を用いることで、グレーティング領域157に含まれる1つの屈折率変調領域HRが有する反射率を高くできることを示している。また、形成長さが短いグレーティング領域157でも、十分な強度のレーザ光L1を得られることを示している。

[0090] (7-2-3) グレーティング領域の透過スペクトル

次に、グレーティング領域157を透過する白色光L4のスペクトル（グレーティング領域の透過スペクトル）による、グレーティング領域157の性能評価を行った。グレーティング領域157の反射スペクトルは、上記の評価装置300を用いて得た。具体的には、グレーティング領域157を透過した白色光L4に含まれる各波長の成分強度を第1光測定部307により測定し、透過前の白色光L4に含まれる各波長の成分強度と、第1光測定部307にて測定した白色光L4の対応する波長成分の強度との商を、当該波長における透過率として算出した。その後、上記透過率の算出を、白色光L4に含まれる全波長に対して繰り返し実行して透過スペクトルとした。

[0091] 実施例における、グレーティング領域157の透過スペクトルを、図10に示す。図10に示すように、特定の1つの波長（2.8 μ m）のみににおいて、グレーティング領域157の透過率が顕著に小さくなっていることが分かる。すなわち、1つの波長においてグレーティング領域157の反射率が顕著に大きくなっている。これは、上記の屈折率変調領域HRの形成条件を用いることで、反射する光の波長選択性が高いグレーティング領域157を

形成できることを示している。

[0092] すなわち、実施例のグレーティング領域 157 は、 $2.8\ \mu\text{m}$ の波長を有するレーザ光 L1 を、一次の回折を使用した反射にて反射できていることを示している。さらに言い換えると、互いに隣接する屈折率変調領域 HR の第 1 間隔 D1 を、上記波長のレーザ光 L1 を一次の回折を使用して反射できる間隔 ($970\ \text{nm}$) としても、隣接する屈折率変調領域 HR 同士が重複することなく、屈折率変調領域 HR が適切に形成されていることを示している。

[0093] (7-2-4) 屈折率変調領域の均質性評価

グレーティング領域 157 に形成された屈折率変調領域 HR の均質性の形成条件依存性について、光学顕微鏡像以外の方法で評価した。具体的には、図 2 に示す光ファイバー 15 の第 1 グレーティング領域 157a において、反応光 L3 のフルエンス（反応光 L3 の強度／スポット径）を過剰に大きくした最適でない条件にて屈折率変調領域 HR を形成した。その一方、第 2 グレーティング領域 157b において、上記の最適条件で屈折率変調領域 HR を形成した。その後、第 1 グレーティング領域 157a 側（入口側）から赤色光（波長： $650\ \text{nm}$ ）を入射してコア 151 中を伝搬させて、各グレーティング領域 157a、157b における上記赤色光の散乱光強度を測定した。

[0094] 図 11A に、最適でない条件で形成した屈折率変調領域 HR を含む第 1 グレーティング領域 157a の散乱光強度を示す。また、図 11B に、最適条件で形成した屈折率変調領域 HR を含む第 2 グレーティング領域 157b の散乱光強度を示す。

[0095] 図 11A に示すように、上記の第 1 グレーティング領域 157a では、入射した赤色光の散乱が顕著であった。一方、図 11B に示すように、上記の第 2 グレーティング領域 157b では、赤色光の散乱が見られなかった。図 11A に示すように、光が散乱することは、コア 151 の長さ方向以外の方向にも光が反射されていることを意味し、屈折率変調領域 HR が不均質に形成されていると予測される。このように、屈折率変調領域 HR の形成条件が

最適化されておらず、屈折率変調領域HRがコア151内部で不均質であると、グレーティング領域157でレーザ光L1が散乱して、コア151内部を伝搬できるレーザ光L1の割合が減少することが分かる。すなわち、屈折率変調領域HRがコア151内部において不均質であると、レーザ光L1の発振効率が低下する。

[0096] その逆に、図11Bに示すように、光の散乱がほとんど見られないことは、コア151の長さ方向以外の光反射が少ないことを意味し、屈折率変調領域HRが均質に形成されていると予測される。このように、屈折率変調領域HRの形成条件を最適化することで、屈折率変調領域HRをコア151内部で均質にできると、グレーティング領域157でレーザ光L1が散乱せず、コア151内部を伝搬できるレーザ光L1の割合を大きくできる。すなわち、屈折率変調領域HRがコア151内部において均質であると、レーザ光L1の発振効率を高くできる。

[0097] (8) まとめ

上記の評価結果から、本実施形態に係る屈折率変調領域HRの形成方法は、従来の方法と比較して、以下のような有利点があることが分かる。上記のように、本実施形態においては、光ファイバー15にコート層155が被膜された状態で、対物レンズ205とコート層155との間にマッチング層MLを配置することで、レーザ媒体及び発振器として十分な性能を有する光ファイバー15を製造できている。

コート層155を剥離することなく屈折率変調領域HRを形成することで、コア151内部に屈折率変調領域HRを形成中に、光ファイバー15が劣化することを防止できる。また、屈折率変調領域HRを形成後に、コート層155を再形成する必要がなくなる。

[0098] また、本実施形態では、屈折率変調領域HRの形成において、対物レンズ205と光ファイバー15のコート層155との間に、屈折率が1.5程度のマッチング層MLを配置することにより、対物レンズ205の開口数を大きくして、反応光L3のコア151内部でのスポット径を小さくできる。

さらに、反応光L 3の波長として、コート層1 5 5及びクラッド1 5 3にて吸収されない最小の波長である5 1 5 nmを選択することで、コート層1 5 5及びクラッド1 5 3を反応光L 3により劣化させることなく、反応光L 3をさらに小さなスポット径にてコア1 5 1内部に集光できる。

[0099] 上記のようにして反応光L 3を小さなスポット径にてコア1 5 1内部に集光することは、コア1 5 1内部に大きなフルエンスの反応光L 3を照射できることを意味する。すなわち、上記のようにして反応光L 3を小さなスポット径にてコア1 5 1内部に集光することによって、コア1 5 1の反応光L 3が照射された部分に、屈折率を変化させる反応を集中的に強く発生させることができる。その結果、高い反射率を有し、かつ、サイズの小さな屈折率変調領域HRをコア1 5 1内部に形成できる。

[0100] 高い反射率を有し、かつ、サイズの小さな屈折率変調領域HRをコア1 5 1内部に形成できると、グレーティング領域1 5 7における屈折率変調領域HRの形成数を少なくしても、レーザ発振させるには十分な反射率を有するグレーティング領域1 5 7を形成できる。

[0101] 上記のように、本実施形態に係る製造方法を用いた場合、形成長さが少なくとも1. 5 mm〜2. 0 mm程度のグレーティング領域1 5 7を有する光ファイバー1 5であれば、ファイバーレーザのレーザ媒体及び共振器として十分な性能を有する。グレーティング領域1 5 7の形成長さを短くできれば、グレーティング領域1 5 7を有する光ファイバー1 5の製造時間を短縮できる。

[0102] また、グレーティング領域1 5 7の形成長さを短くできることにより、品質の安定したグレーティング領域1 5 7を形成できる。なぜなら、グレーティング領域1 5 7の形成長さが長くなると、光ファイバー1 5の構造のゆがみ（捻れ、コア1 5 1の位置の偏りなど）の影響を受けて、グレーティング領域1 5 7の特性が長さ方向の位置によって異なることがあるからである。

[0103] さらに、サイズの小さな屈折率変調領域HRをコア1 5 1内部に形成できる本実施形態に係る方法は、従来の方法と比較して、隣接する屈折率変調領

域HR同士がコア151の長さ方向において重複することを回避できる。その結果、隣接する屈折率変調領域HRの間隔（第1間隔D1）を、中赤外のレーザ光L1を一次の回折を使用して反射させるための間隔（1 μ m程度）としても、隣接する屈折率変調領域HRが重複しない。

[0104] 隣接する屈折率変調領域HRの第1間隔D1を、一次の回折を使用して反射させるための間隔としても屈折率変調領域HRが重複しないことにより、第1間隔D1で決まる特定の波長のみを有するレーザ光L1を発振できる。すなわち、スペクトル特性に優れた理想的なレーザ光を出力できる。

[0105] また、本実施形態に係る製造方法は、均質な屈折率変調領域HRをコア151内部に形成できる。その結果、屈折率変調領域HRにおいてレーザ光L1の散乱が生じないので、指向性が強く、かつ、スペクトル特性に優れた理想的なレーザ光を出力できる。

[0106] 2. 第2実施形態

上記の第1実施形態においては、第1クラッド153aの長さ方向に垂直な方向の断面形状として、円形、D字形状、多角形、星形などの任意の断面形状とすることができるとしていたが、これに限られない。コア151に屈折率変調領域HRを形成する反応光L3は、図12に示すように、第1クラッド153aの曲率を有さない平面から垂直に入射させることが好ましい。図12は、第2実施形態に係る反応光の入射方法の一例を示す図である。

[0107] 従って、第1クラッド153aに曲率を有さない平面を形成するために、第1クラッド153aは、長さ方向に垂直な方向の断面形状において、少なくとも1つの直線部分を有することが好ましい。すなわち、第1クラッド153aの断面形状は、D字形状、多角形（例えば、四角形、八角形など）などが好ましい。

[0108] 第1クラッド153aの曲率を有さない平面から垂直に反応光L3を入射することで、コア151内部で反応光L3のスポット形状が歪むことを抑制して、コア151内部における反応光L3のスポット形状を小さくできる。また、第1クラッド153a内部におけるコア151の位置が、光ファイバ

ー 1 5 の長さ方向で異なっている、スポット形状を歪ませることなく、反応光 L 3 をコア 1 5 1 内部に適切に集光できる。

[0109] 3. 実施形態の共通事項

上記第 1 実施形態及び第 2 実施形態は、下記の構成及び機能を共通に有している。

光ファイバー 1 5（光ファイバーの一例）の製造方法は、コア 1 5 1（コアの一例）内部に、コア 1 5 1 の屈折率とは異なる屈折率を有する屈折率変調領域 H R（屈折率変調領域の一例）を設けた光ファイバーの製造方法である。光ファイバー 1 5 の製造方法は、以下のステップを含む。

◎コア 1 5 1 の屈折率を変化させる反応光 L 3（反応光の一例）を集光させる対物レンズ 2 0 5（対物レンズの一例）と光ファイバー 1 5 の最外周に設けられた樹脂製のコート層 1 5 5（コート層の一例）との間に、コート層 1 5 5 の屈折率と近い屈折率を有するマッチング層 M L（マッチング層の一例）を配置するステップ（例えば、ステップ S 1）。

◎反応光 L 3 をコア 1 5 1 内部に向けて照射して、屈折率変調領域 H R を形成するステップ（例えば、ステップ S 2 ～ S 6）。

[0110] 上記の製造方法においては、光ファイバー 1 5 の最外周のコート層 1 5 5 を剥離することなく、反応光 L 3 のコア 1 5 1 内部への照射を行っている。これにより、コア 1 5 1 内部に屈折率変調領域 H R を形成中に光ファイバー 1 5 が劣化することを防止できる。また、屈折率変調領域 H R を形成後に、コート層 1 5 5 を再形成する必要がなくなる。

[0111] また、対物レンズ 2 0 5 とコート層 1 5 5 との間にマッチング層 M L が配置されることにより、対物レンズ 2 0 5 とコート層 1 5 5 との間の空間の屈折率を空気よりも高くできる。その結果、対物レンズ 2 0 5 の開口数を高くして、コア 1 5 1 内部に反応光 L 3 を小さなスポット径にて集光できる。

反応光 L 3 をコア 1 5 1 内部に小さなスポット径にて集光することにより、コア 1 5 1 内部の小さな領域に強度の強い反応光 L 3 を照射できるので、大きな反射率を有する小さな屈折率変調領域 H R を、コア 1 5 1 内部に形成

できる。その結果、上記の製造方法による光ファイバー 15 においては、コア 151 内部の屈折率変調領域 HR の形成数が少なくても十分な光反射を得られる。

[0112] また、コア内部の屈折率変調領域の形成数を少なくできるので、コアの長さ方向の広範囲にわたり屈折率変調領域 HR を形成する必要がない。その結果、上記の製造方法による光ファイバー 15 においては、光ファイバー 15 の長さ方向の特性のバラツキに起因する屈折率変調領域 HR のバラツキが少なく、発振できるレーザ光の波長選択性が高い。

[0113] さらに、小さな屈折率変調領域 HR をコア 151 内部に形成できることにより、互いに隣接する屈折率変調領域 HR の間の距離を小さくしても、これらの屈折率変調領域 HR が重複しない。その結果、上記の製造方法による光ファイバー 15 においては、短波長のレーザ光であっても低次の回折により反射できるので、発振できる短波長のレーザ光の波長選択性が高い。

[0114] 4. 他の実施形態

以上、本発明の一実施形態について説明したが、本発明は上記実施形態に限定されるものではなく、発明の要旨を逸脱しない範囲で種々の変更が可能である。特に、本明細書に書かれた複数の実施形態及び変形例は必要に応じて任意に組み合わせ可能である。

例えば、レーザ発振器 1 にて出力したいレーザ光 L1 の波長に応じて、光ファイバー 15 の材料、及び、互いに隣接する屈折率変調領域 HR 間の第 1 間隔 D1 を、適宜変更できる。また、光ファイバー 15 の材料の光学的特性などに応じて、屈折率変調領域 HR の形成条件（例えば、反応光 L3 の波長、照射時間、強度など）を適宜変更できる。

[0115] (A) 上記の第 1 実施形態及び第 2 実施形態に係る屈折率変調領域 HR を形成する方法は、例えば、反応光 L3 により屈折率変調を誘起できるものであれば、フッ化物ファイバー以外にも適用できる。例えば、光ファイバーに限らず様々な光導波路へも応用できる。

[0116] (B) 移動台 203 は、光ファイバー 15 の長さ方向（X 方向）、及び、

高さ方向（Z方向）に加えて、光ファイバー15の直径方向（Y方向）にも移動可能であってもよい。この場合、コア151に屈折率変調領域HRを形成中に、反応光L3を光ファイバー15の高さ方向及び直径方向（すなわち、Y-Z平面内）に二次元的に移動させてもよい。これにより、光ファイバー15の長さ方向に垂直な断面において二次元的な屈折率変調領域HRを形成できる。

産業上の利用可能性

[0117] 本発明は、光ファイバーをレーザ媒体及び共振器とするレーザ発振器に広く適用できる。

符号の説明

- [0118] 1 レーザ発振器
- 1 1 励起光源
 - 1 3 光導入部
 - 1 3 1 励起光導波ファイバー
 - 1 3 3 導入レンズ
 - 1 5 光ファイバー
 - 1 5 1 コア
 - 1 5 3 クラッド
 - 1 5 3 a 第1クラッド
 - 1 5 3 b 第2クラッド
 - 1 5 5 コート層
 - 1 5 7 グレーティング領域
 - 1 5 7 a 第1グレーティング領域
 - 1 5 7 b 第2グレーティング領域
 - 1 7 コリメータ
 - 2 0 0 形成装置
 - 2 0 1 反応光源
 - 2 0 3 移動台

204 保持部材
205 対物レンズ
207 光路変更部材
209 制御部
300、300' 評価装置
301 白色光源
303 光導波ファイバー
305 導入部
305a ミラー
307 第1光測定部
309 第2光測定部
D1 第1間隔
D2 第2間隔
HR 屈折率変調領域
I 入口
L1 レーザ光
L1' 透過光
L1'' 反射光
L2 励起光
L3 反応光
L4 白色光
ML マッチング層
O 出口
SP スポット

請求の範囲

- [請求項1] コア内部に前記コアの屈折率とは異なる屈折率を有する屈折率変調領域を設けた光ファイバーの製造方法であって、
- 前記コアの屈折率を変化させる反応光を集光させる対物レンズと前記光ファイバーの最外周に設けられた樹脂製のコート層との間に、前記コート層の屈折率と近い屈折率を有するマッチング層を配置するステップと、
- 前記反応光を前記コア内部に向けて照射して前記屈折率変調領域を形成するステップと、
- を含む、光ファイバーの製造方法。
- [請求項2] 前記反応光は、前記光ファイバー及び前記コート層にて吸収されない短波長を有する短パルスレーザー光である、請求項1に記載の光ファイバーの製造方法。
- [請求項3] 前記光ファイバーは、前記コアと前記コート層との間に配置され前記コアの外周を覆うクラッドを有し、
- 前記クラッドは、その長さ方向とは垂直な断面形状において、少なくとも一つの直線部分を有し、
- 前記反応光は、前記直線部分により形成される曲率を有さない平面に対して垂直に入射される、請求項1又は2のいずれかに記載の光ファイバーの製造方法。
- [請求項4] 前記クラッドの断面形状は、D字形状、多角形、又は、D字形状の円周部分の一部を切り取った形状のいずれかである、請求項3に記載の光ファイバーの製造方法。
- [請求項5] 前記マッチング層は液状材料にて形成され、その表面張力により前記対物レンズと前記コート層の間に配置される、請求項1～3のいずれかに記載の光ファイバーの製造方法。
- [請求項6] 前記反応光を前記コアに照射した状態で、前記反応光を前記コアの長さ方向とは垂直な方向に移動させて前記屈折率変調領域を形成する

ステップをさらに含む、請求項 1 ～ 4 のいずれかに記載の光ファイバーの製造方法。

[請求項7] 前記コアは、エルビウムをドープした ZBLAN ガラスである、請求項 1 ～ 6 のいずれかに記載の光ファイバーの製造方法。

[請求項8] 前記マッチング層は、前記コート層の屈折率に近い屈折率を有する、請求項 1 ～ 7 のいずれかに記載の光ファイバーの製造方法。

[請求項9] コア内部に前記コアの屈折率とは異なる屈折率を有する屈折率変調領域を設けた光ファイバーであって、

前記コアの屈折率を変化させる反応光を集光させる対物レンズと前記光ファイバーの最外周に設けられた樹脂製のコート層との間に、前記コート層の屈折率に近い屈折率を有するマッチング層を配置するステップと、

前記反応光を前記コア内部に向けて照射して前記屈折率変調領域を形成するステップと、

を含む、製造方法によって製造されてなる光ファイバー。

[請求項10] 前記コアと前記コート層との間に配置されることで前記コアの外周を覆い、その長さ方向とは垂直な断面形状において少なくとも一つの直線部分を有するクラッドをさらに備える、請求項 9 に記載の光ファイバー。

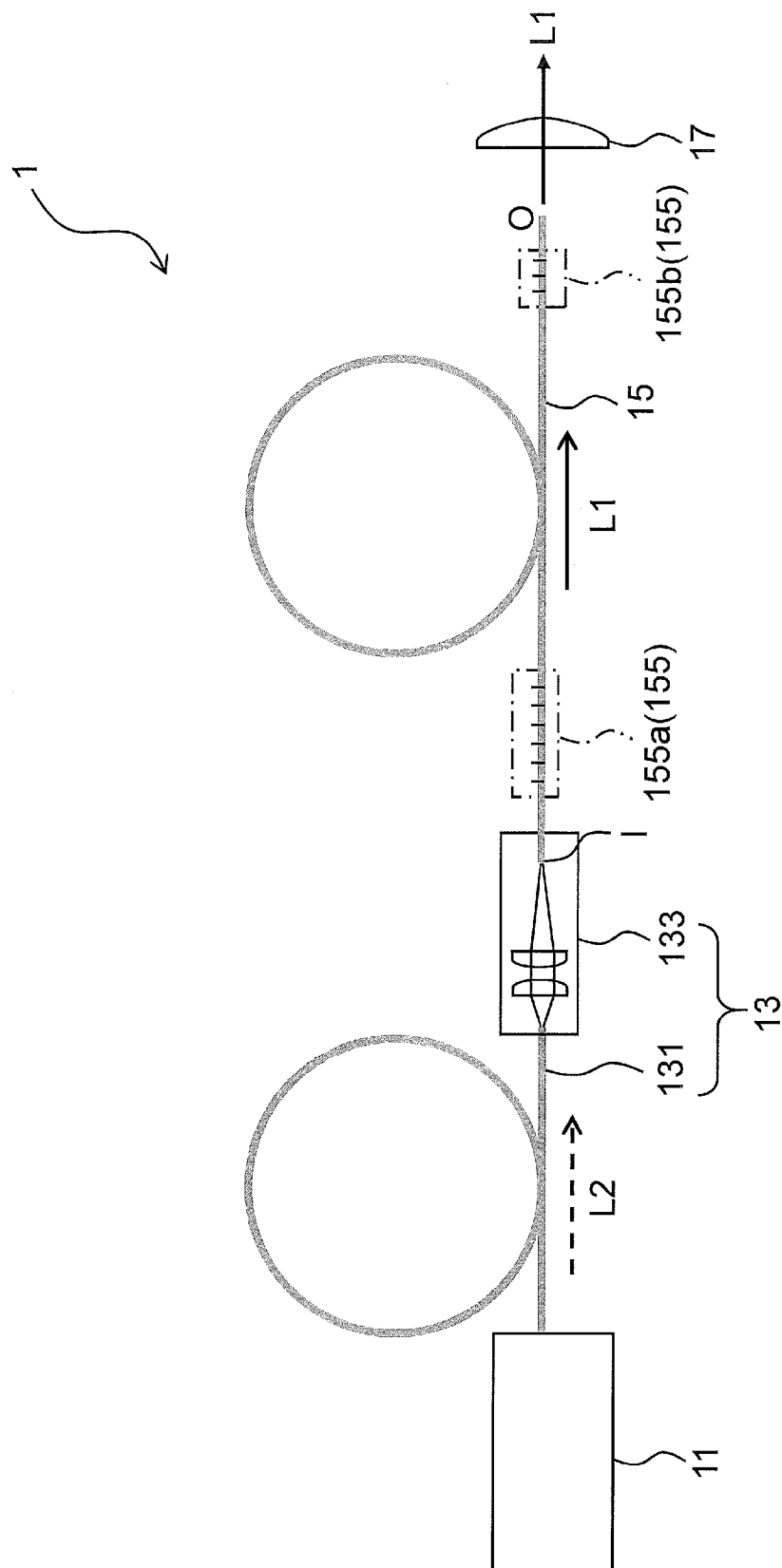
[請求項11] 前記クラッドの断面形状は、D 字形状、多角形、又は、D 字形状の円周部分の一部を切り取った形状のいずれかである、請求項 10 に記載の光ファイバー。

[請求項12] 前記コアは、エルビウムをドープした ZBLAN ガラスである、請求項 9 ～ 11 のいずれかに記載の光ファイバー。

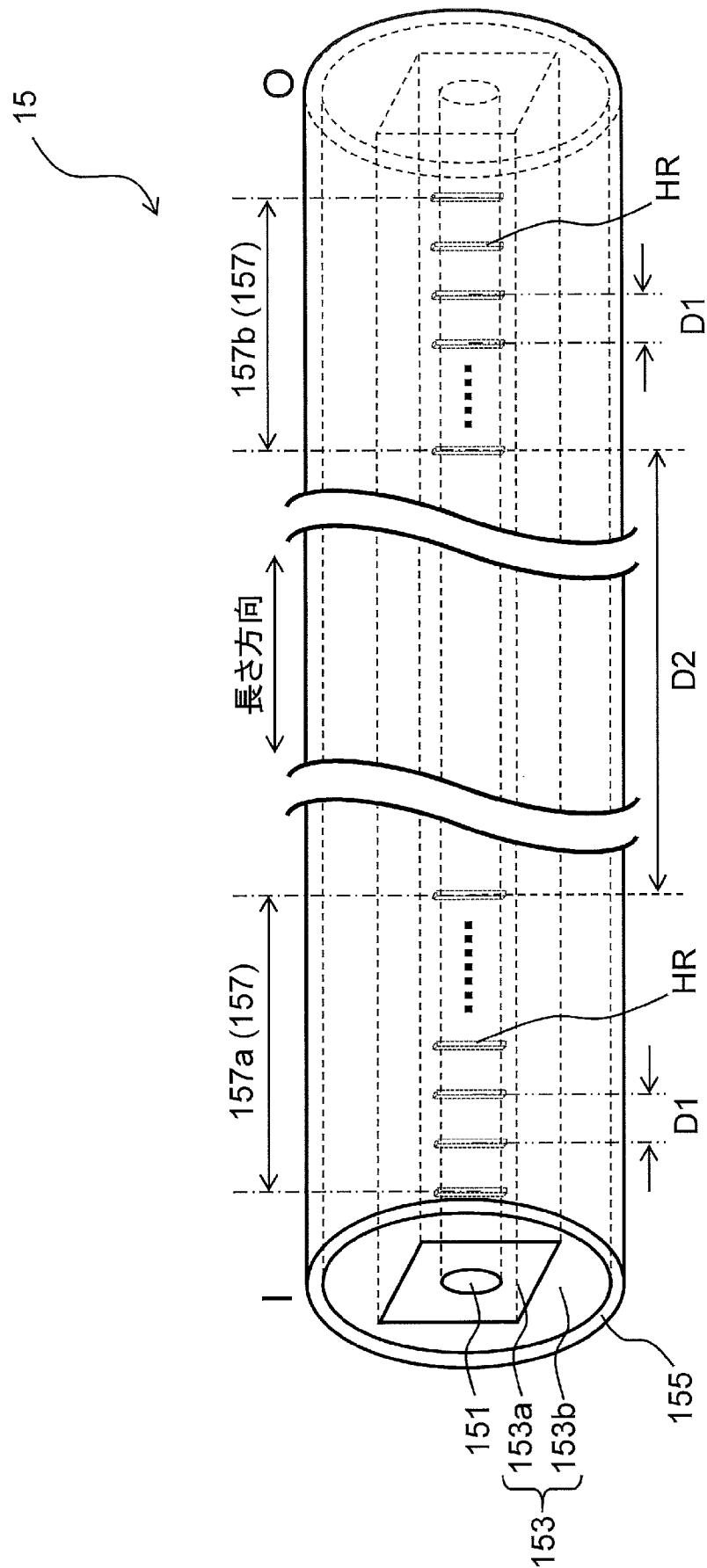
[請求項13] 前記コアは、複数の前記屈折率変調領域を有する第 1 グレーティング領域と、複数の前記屈折率変調領域を有し前記第 1 グレーティング領域から長さ方向に第 2 間隔を開けて配置される第 2 グレーティング領域と、を有する請求項 9 ～ 12 のいずれかに記載の光ファイバー。

[請求項14] 前記第1 グレーティング領域及び前記第2 グレーティング領域に形成される互いに隣接する2つの前記屈折率変調領域は第1 間隔を有する、請求項9～13のいずれかに記載の光ファイバー。

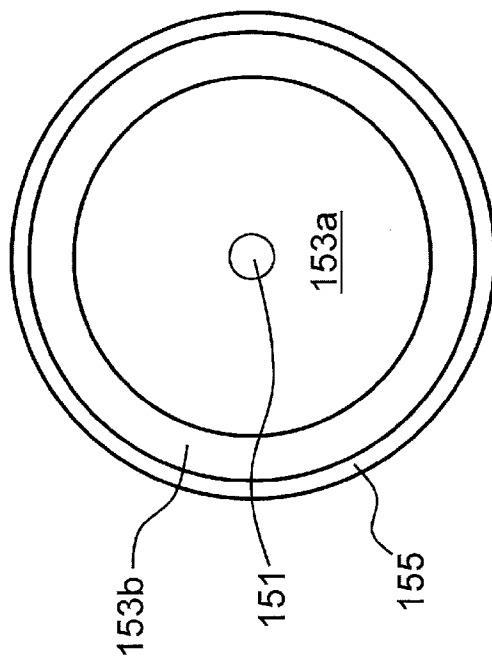
[図1]



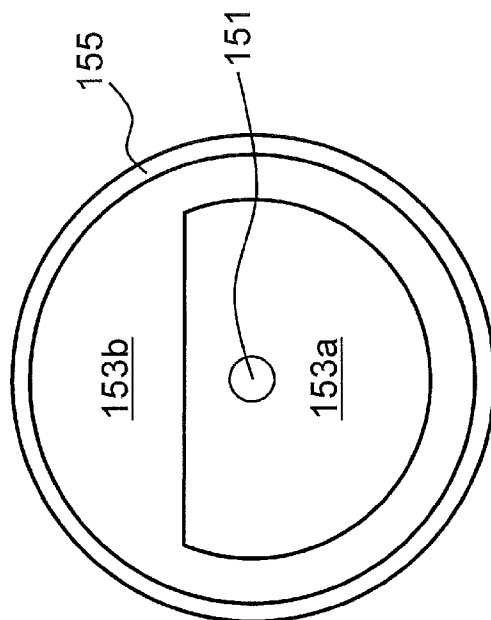
[図2]



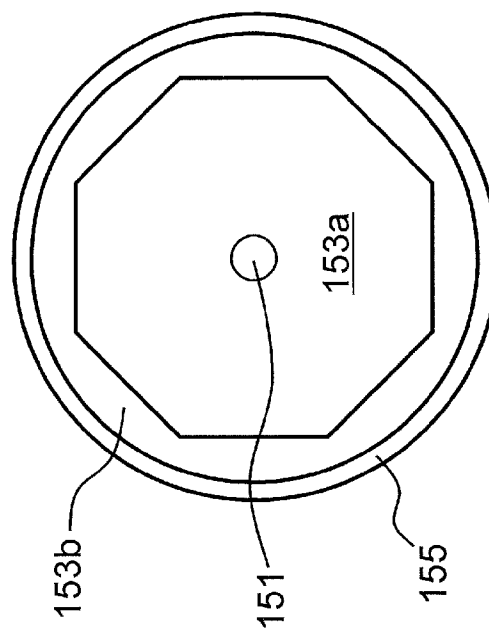
[図3A]



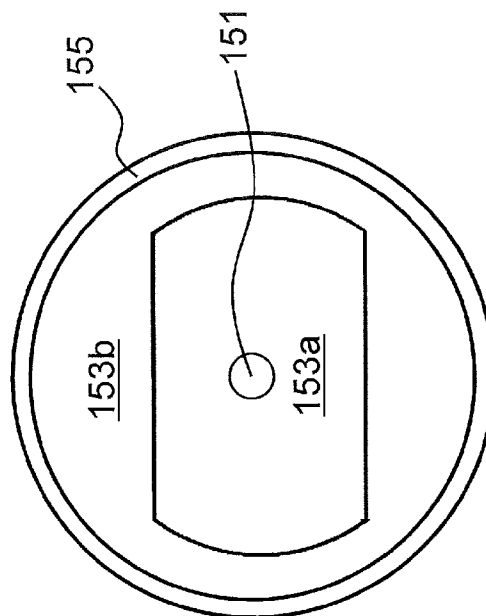
[図3B]



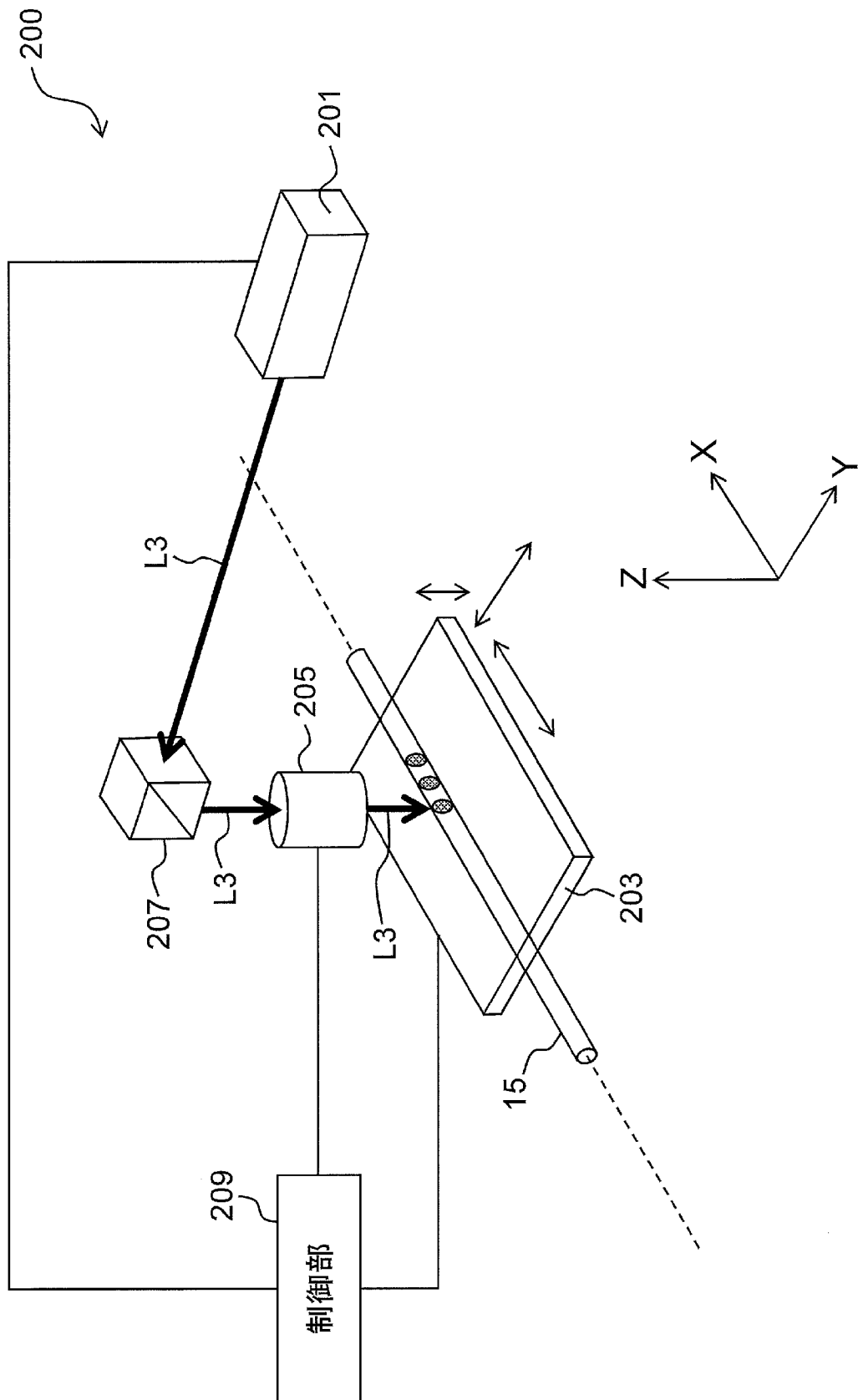
[図3C]



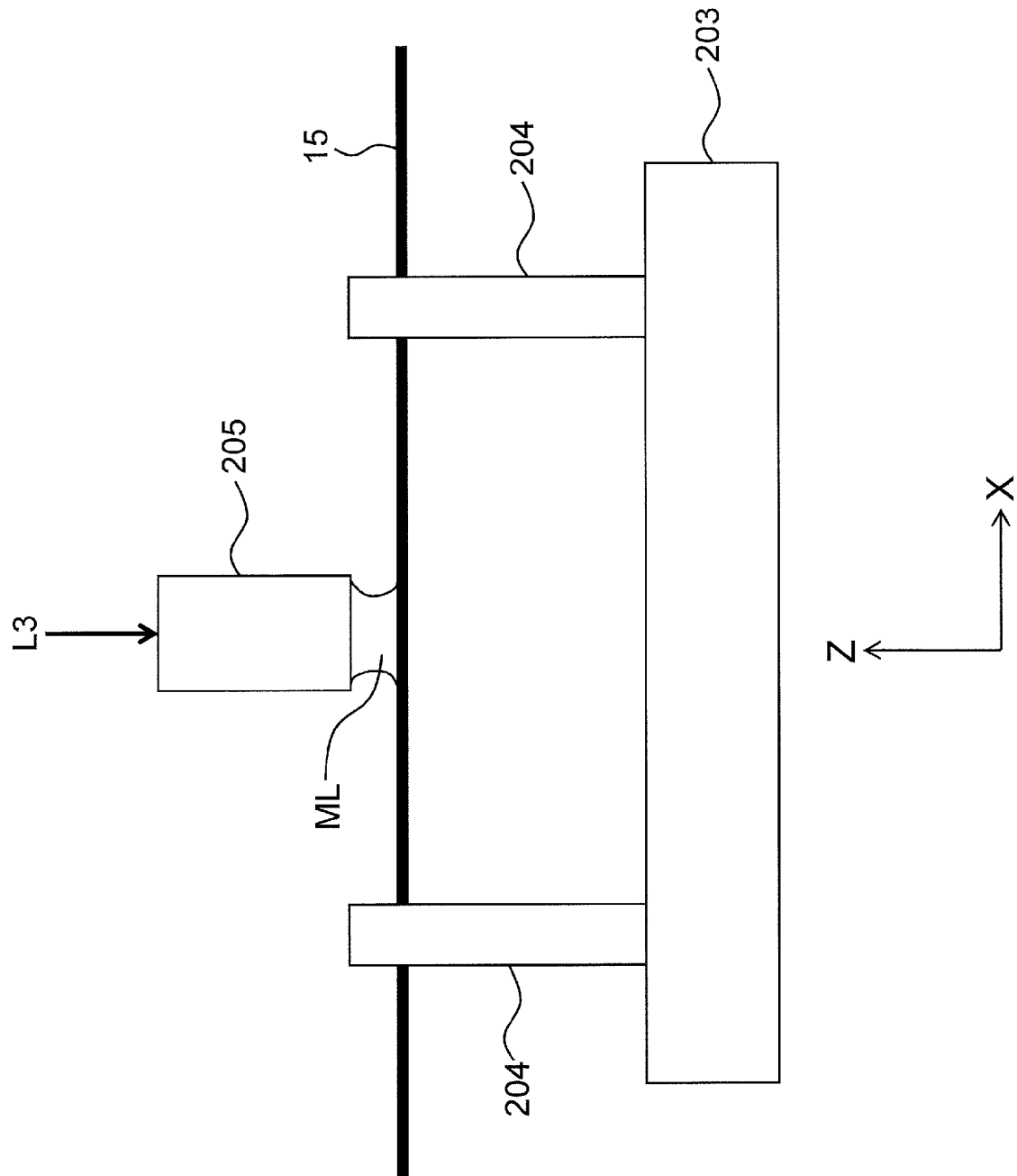
[図3D]



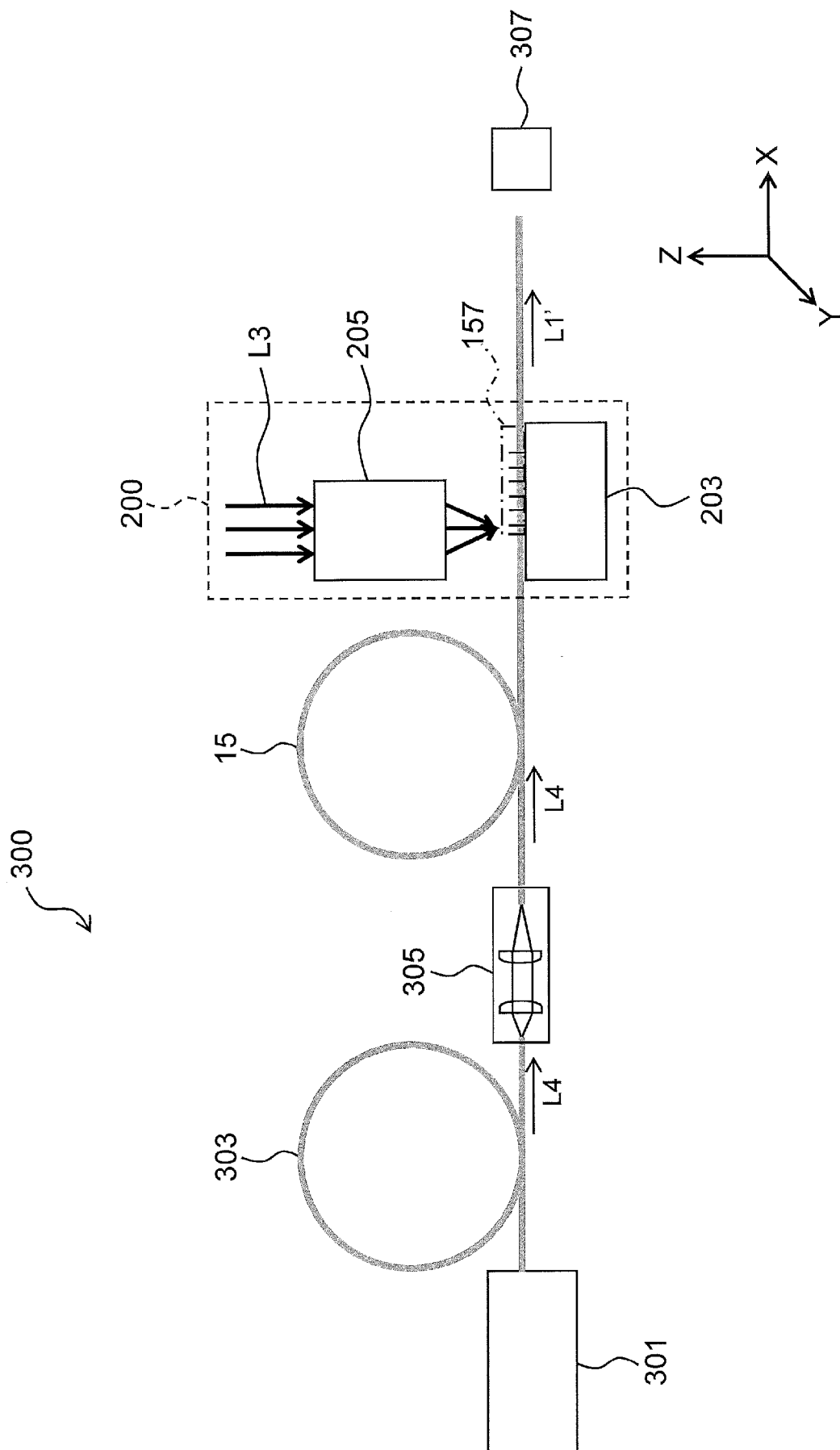
[図4A]



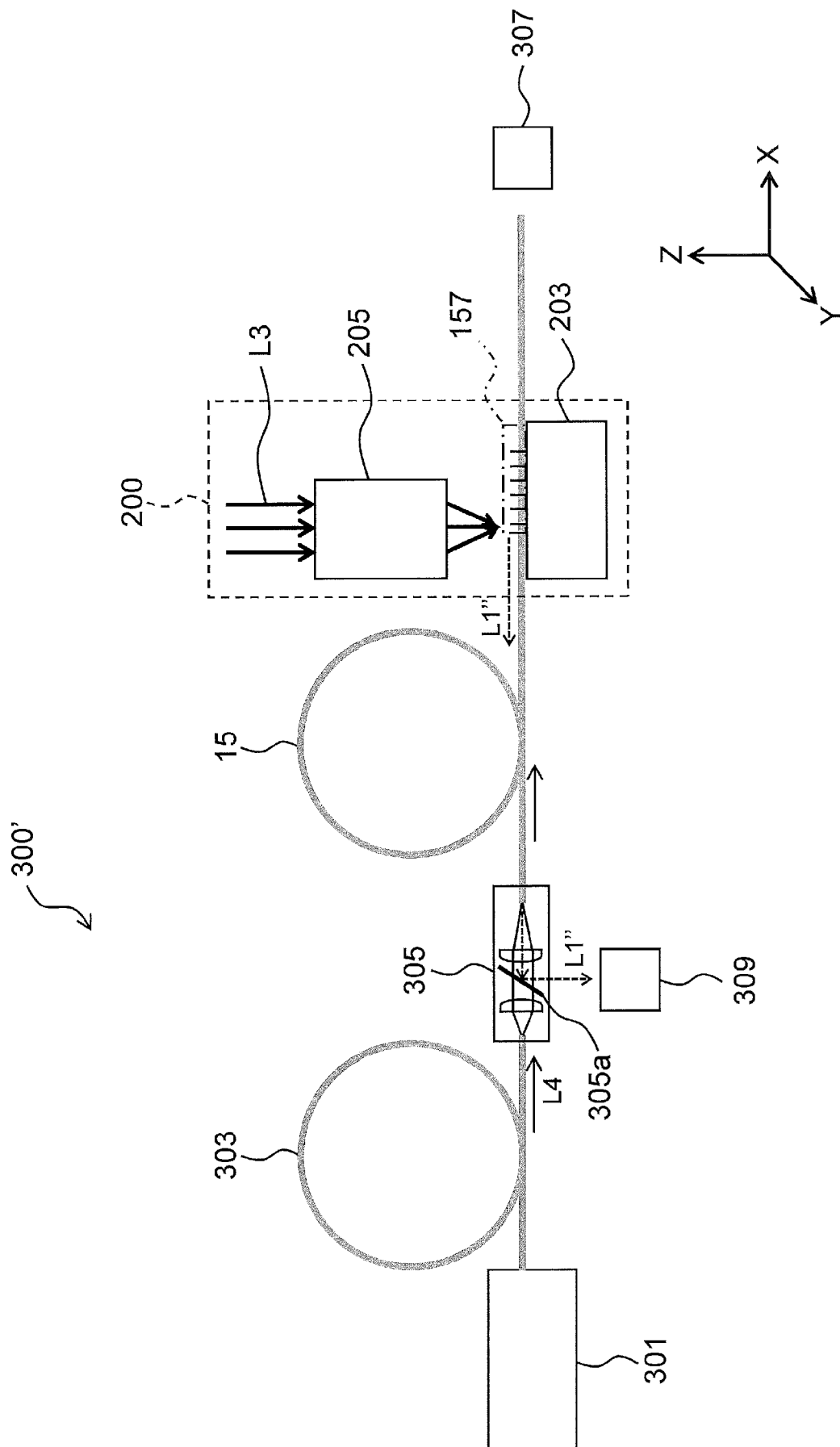
[図4B]



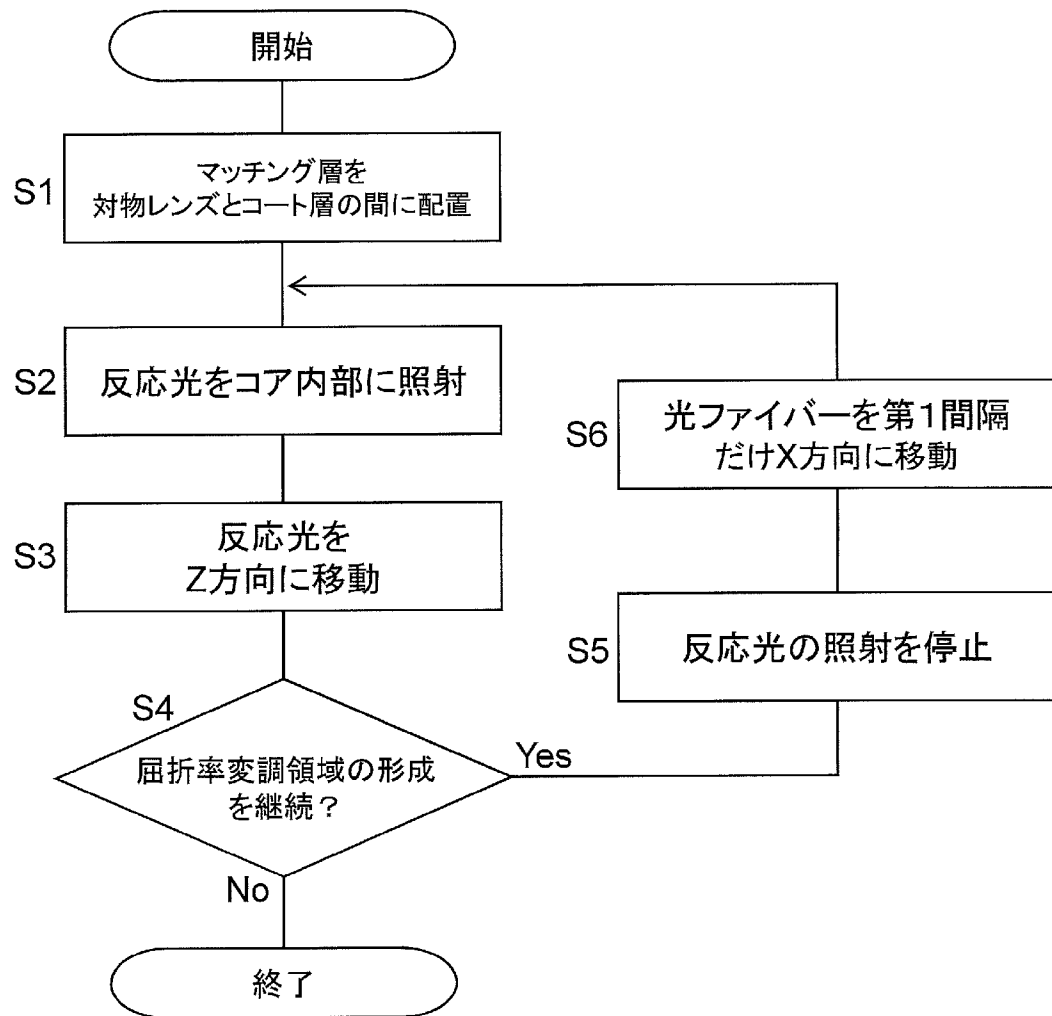
[図5A]



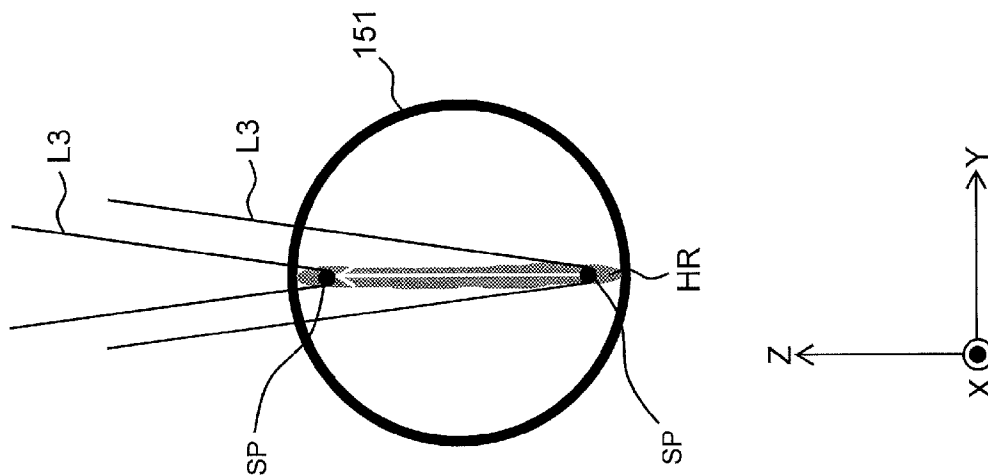
[図5B]



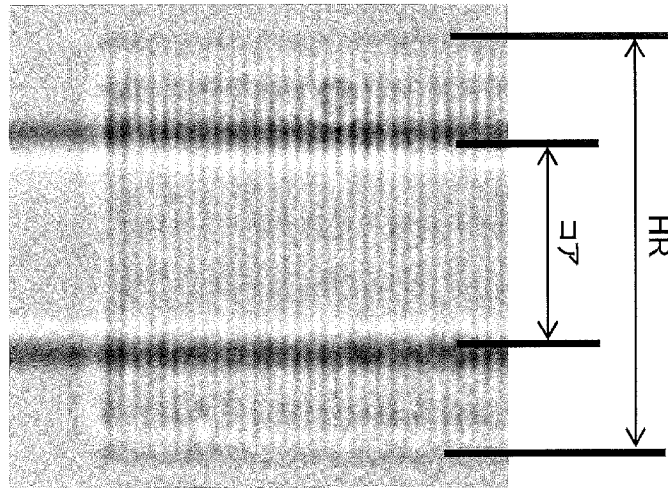
[図6]



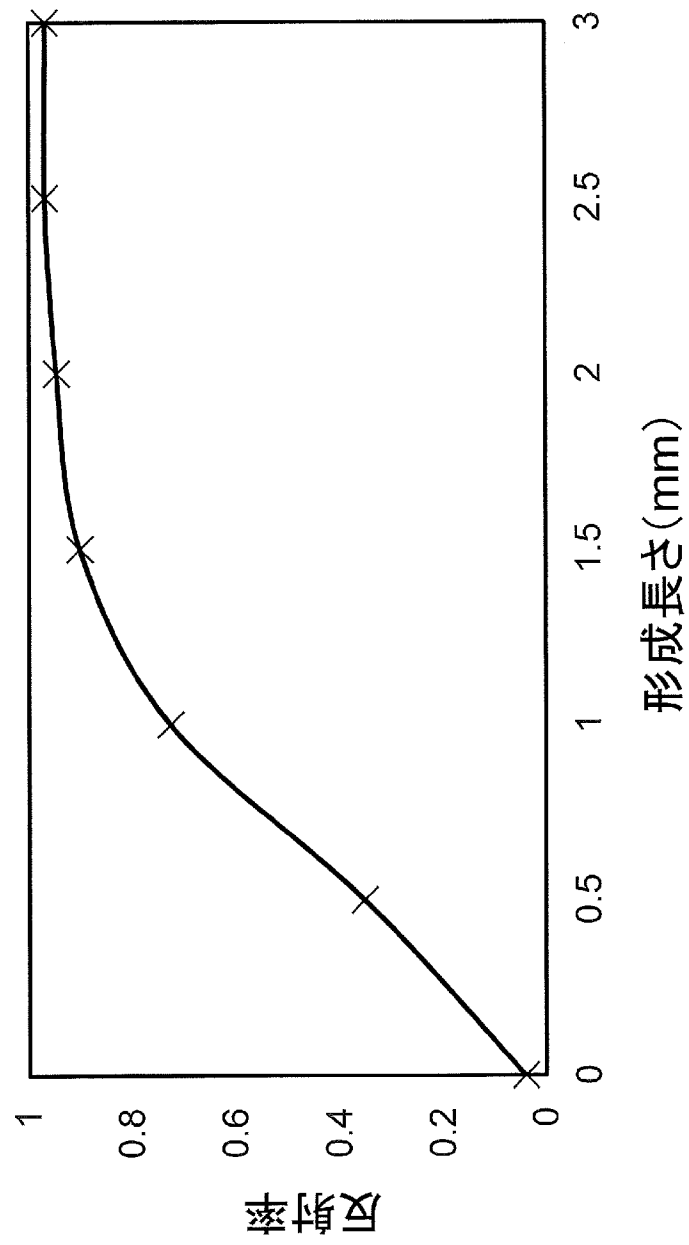
[図7]



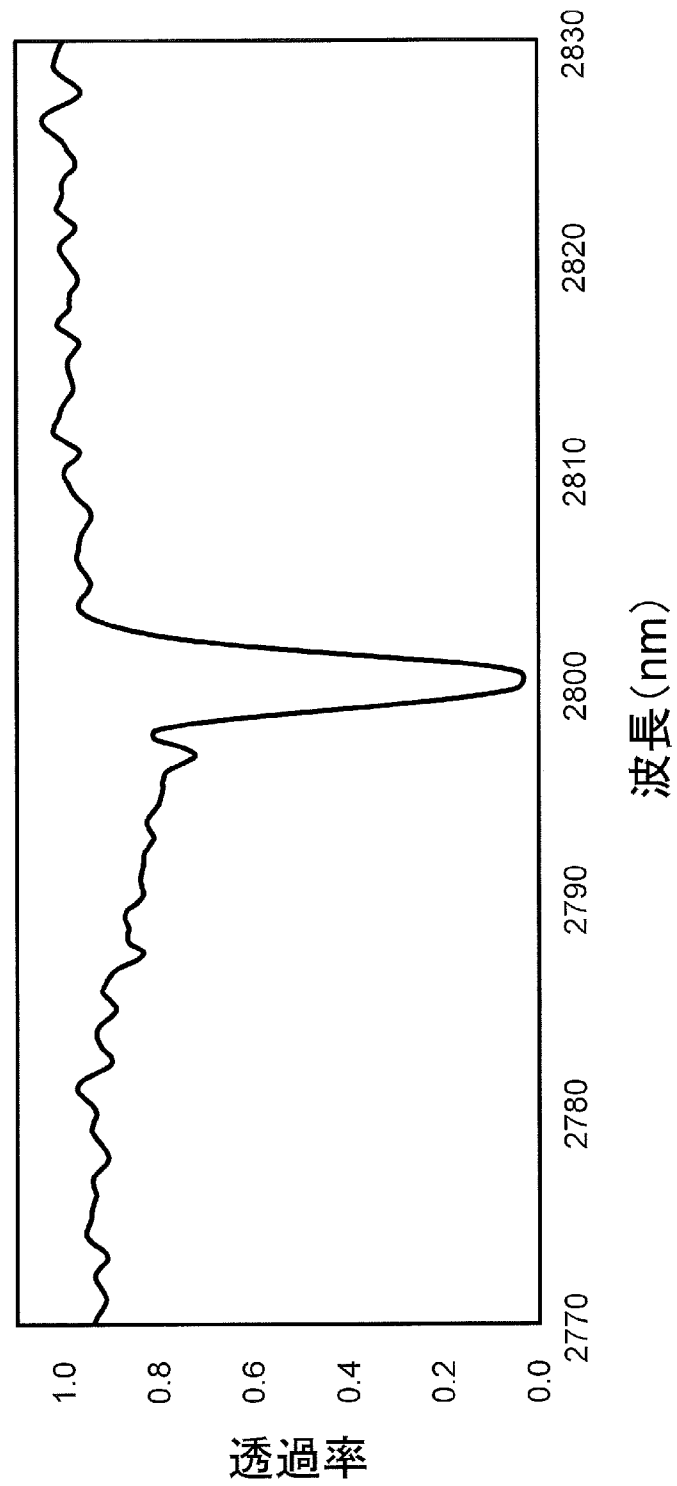
[図8]



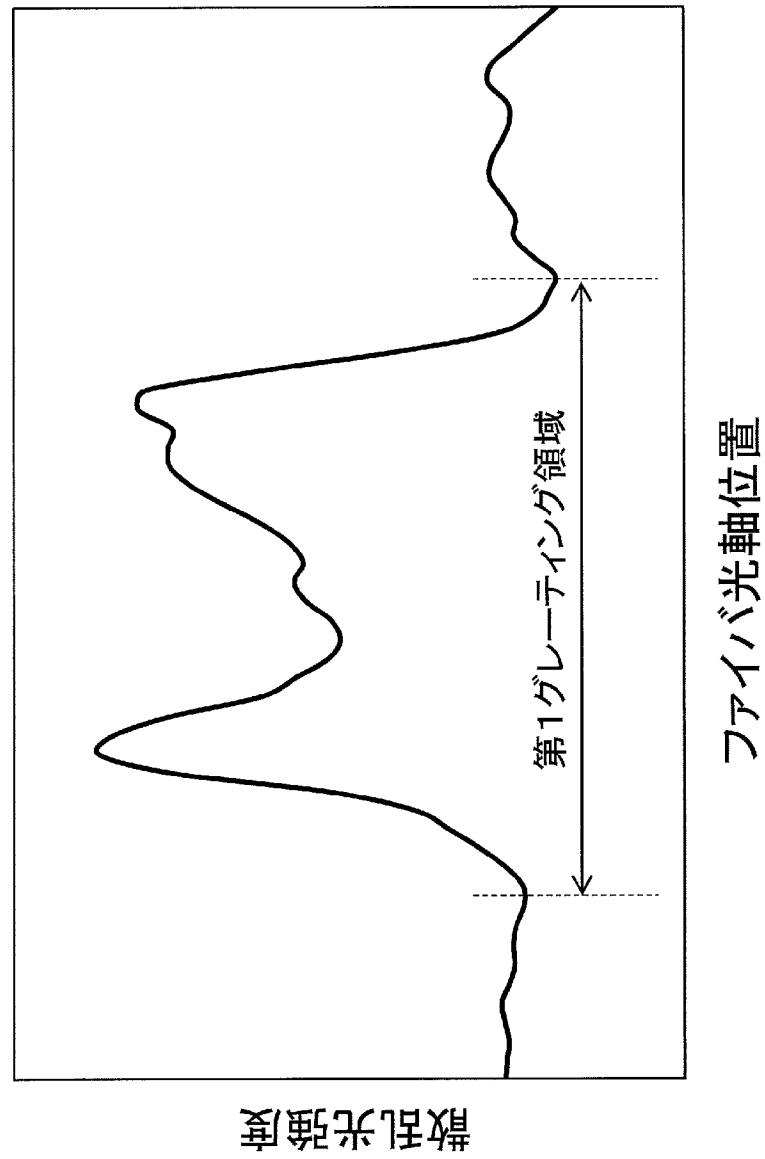
[図9]



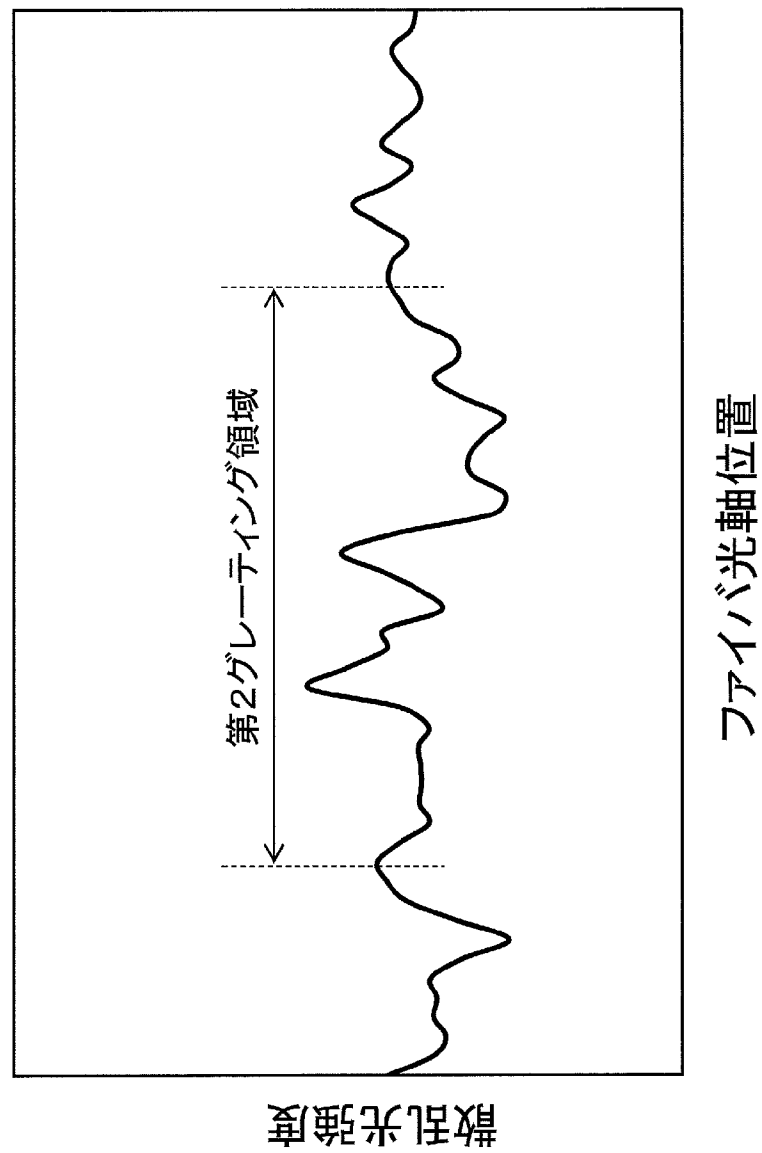
[図10]



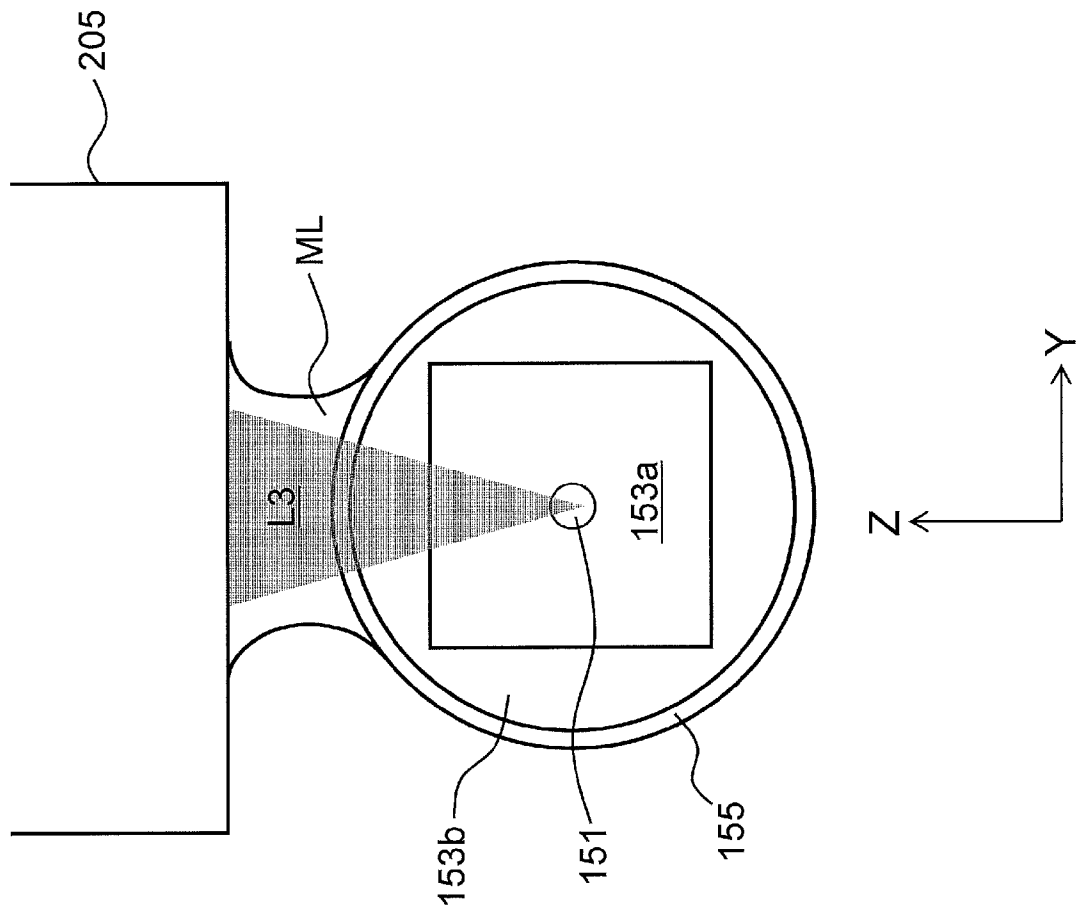
[図11A]



[図11B]



[図12]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2019/021825

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

Int. Cl. G02B6/02 (2006.01) i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

Int. Cl. G02B6/02

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Published examined utility model applications of Japan 1922-1996

Published unexamined utility model applications of Japan 1971-2019

Registered utility model specifications of Japan 1996-2019

Published registered utility model applications of Japan 1994-2019

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	BHARATHAN et al., Direct inscription of Bragg gratings into coated fluoride fibers for widely tunable and robust mid-infrared lasers, OPTICS EXPRESS, 16 November 2017, vol. 25, no. 24, pp. 30013-30019	1-4, 6-14
Y		5
Y	LIN et al., Fiber surface Bragg grating waveguide for refractive index measurements, OPTICS LETTERS, 20 April 2017, vol. 42, no. 9, pp. 1684-1687	5
A	JP 2009-103786 A (DAINIPPON PRINTING CO., LTD.) 14 May 2009, entire text, all drawings (Family: none)	1-14



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
12.06.2019

Date of mailing of the international search report
25.06.2019

Name and mailing address of the ISA/
Japan Patent Office
3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku,
Tokyo 100-8915, Japan

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2019/021825

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	WO 2016/123719 A1 (GRENIER, Jason R.) 11 August 2016, entire text, all drawings (Family: none)	1-14

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC））

Int.Cl. G02B6/02 (2006.01) i

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料（国際特許分類（IPC））

Int.Cl. G02B6/02

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	1922-1996年
日本国公開実用新案公報	1971-2019年
日本国実用新案登録公報	1996-2019年
日本国登録実用新案公報	1994-2019年

国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
X Y	BHARATHAN et al., Direct inscription of Bragg gratings into coated fluoride fibers for widely tunable and robust mid-infrared lasers, OPTICS EXPRESS, 2017.11.16, Vol. 25, No. 24, pp. 30013-30019	1-4, 6-14 5
Y	LIN et al., Fiber surface Bragg grating waveguide for refractive index measurements, OPTICS LETTERS, 2017.04.20, Vol. 42, No. 9, pp. 1684-1687	5

☒ C欄の続きにも文献が列挙されている。

☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
「E」 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
「L」 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）
「O」 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
「P」 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
「X」 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
「Y」 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
「&」 同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

12.06.2019

国際調査報告の発送日

25.06.2019

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁（ISA/J P）

郵便番号100-8915

東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官（権限のある職員）

岸 智史

2 L

3603

電話番号 03-3581-1101 内線 3295

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
A	JP 2009-103786 A (大日本印刷株式会社) 2009. 05. 14, 全文, 全図 (ファミリーなし)	1-14
A	WO 2016/123719 A1 (GRENIER, Jason R.) 2016. 08. 11, 全文, 全図 (ファミリーなし)	1-14