

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号  
特許第6657087号  
(P6657087)

(45) 発行日 令和2年3月4日 (2020. 3. 4)

(24) 登録日 令和2年2月7日 (2020. 2. 7)

(51) Int. Cl.	F I
GO 2 B 6/024 (2006. 01)	GO 2 B 6/024 3 O 1
GO 2 B 6/02 (2006. 01)	GO 2 B 6/02 3 7 6 A
GO 2 B 6/036 (2006. 01)	GO 2 B 6/036
HO 1 S 3/067 (2006. 01)	GO 2 B 6/02 4 6 1
	HO 1 S 3/067

請求項の数 23 (全 29 頁)

(21) 出願番号	特願2016-533113 (P2016-533113)	(73) 特許権者	593185670
(86) (22) 出願日	平成26年11月5日 (2014. 11. 5)		イムラ アメリカ インコーポレイテッド
(65) 公表番号	特表2017-503189 (P2017-503189A)		アメリカ合衆国 ミシガン州48105
(43) 公表日	平成29年1月26日 (2017. 1. 26)		アンアーバー ウッドリッジ・アベニュー
(86) 国際出願番号	PCT/US2014/064066		1044
(87) 国際公開番号	W02015/077021	(74) 代理人	100094112
(87) 国際公開日	平成27年5月28日 (2015. 5. 28)		弁理士 岡部 譲
審査請求日	平成29年9月28日 (2017. 9. 28)	(74) 代理人	100106183
(31) 優先権主張番号	61/907, 754		弁理士 吉澤 弘司
(32) 優先日	平成25年11月22日 (2013. 11. 22)	(74) 代理人	100114915
(33) 優先権主張国・地域又は機関	米国 (US)		弁理士 三村 治彦
		(74) 代理人	100120363
			弁理士 久保田 智樹
		(74) 代理人	100125139
			弁理士 岡部 洋

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 偏光及び偏波保持漏洩チャネルファイバ

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

偏光（PZ）光ファイバであって、  
前記PZ光ファイバは、漏洩チャネルファイバ（LCF）であり、且つ、  
第1の屈折率 $n_1$ を有する第1のクラッド材料を備える第1のクラッド領域、  
前記第1のクラッド領域に配置され、 $n_1$ より小さい第2の屈折率 $n_2$ を有する第2の  
クラッド材料を備えるクラッド構成物、  
前記第1のクラッド領域に配置され、熱膨張係数  $\alpha_{SAP}$  の材料を備える応力付与部（  
SAP）、及び  
少なくとも部分的に前記クラッド構成物及び前記SAPに囲まれ、熱膨張係数  $\alpha_{core}$  のガラスを有するコア領域  
を備え、

$D_{sc}$  を前記SAPから前記コア中心領域の中心までの距離とし、 $d_{SAP}$  を平均SAP  
直径とした場合に、前記SAPの配置が関係式： $R_{sc} = d_{SAP} / D_{sc}$  及び  $d_{sc} =$   
 $|d_{SAP} - d_{core}|$  を満たし、 $R_{sc}$  が0.7から0.95の範囲にあり、且つ、  
 $d_{sc}$  が  $1 \times 10^{-7}$  よりも大きく、且つ  $R_{sc}$  及び  $d_{sc}$  が、応力複屈折を前記コア領域へ  
誘発するのに十分に大きく、

偏光出力が前記漏洩チャネルファイバから生成されるように、前記PZ光ファイバは、  
偏波保持（PM）動作から偏光（PZ）動作への遷移範囲に関連する複屈折値を超える増  
大した複屈折値（B）を示し、且つ該複屈折値（B）は  $8 \times 10^{-5}$  より大きく、

前記コア領域の少なくとも一部分が、光学利得を提供するドーパントによりドーブされ、前記 P Z ファイバが、

内側のリングに配置されたクラッド構成物、

前記内側のリングを部分的に囲む S A P の複数グループ、及び

前記内側のリングを部分的に囲む第 2 のリングに配置された追加のクラッド構成物を備え、

前記第 2 のリングが前記複数グループの各々からの S A P を含む、  
偏光 ( P Z ) 光ファイバ。

【請求項 2】

前記第 2 のクラッド材料が、フッ素添加シリカガラス又はホウ素添加シリカガラスからなる第 2 のガラスを備える、請求項 1 に記載の P Z ファイバ。

10

【請求項 3】

前記 P Z ファイバが、光入力パルスに応じて 15 dB から 25 dB までの範囲の偏波消光比 ( P E R ) 及び 1.05 から 1.20 までの範囲のビーム品質 (  $M^2$  ) を示す光出力パルスを生成することができる、請求項 1 に記載の P Z ファイバ。

【請求項 4】

$n = n_1 - n_2$  が少なくとも  $1.2 \times 10^{-3}$  である、請求項 1 に記載の P Z ファイバ。

【請求項 5】

$n_2$  が 1 より大きく (  $n_1 - 5 \times 10^{-5}$  ) までの範囲にある、請求項 1 に記載の P Z ファイバ。

20

【請求項 6】

$n_1$  が 1 より大きく 3.5 までの範囲にある、請求項 1 に記載の P Z ファイバ。

【請求項 7】

前記コア領域の少なくとも一部分が光学利得を提供するドーパントでドーブされた、請求項 1 に記載の P Z ファイバ。

【請求項 8】

前記クラッド構成物が複数のリングに配置され、前記 S A P が前記コア領域に隣接した第 1 の最内リングに配置される、請求項 1 に記載の P Z ファイバ。

【請求項 9】

前記 S A P 及びクラッド構成物が少なくとも 1 つのリングに配置され、前記各 S A P は前記 S A P と最も近いクラッド構成物との間に間隔  $d_p$  を有し、少なくとも 1 つの S A P の  $d_{SAP} / d_p$  が 0.70 から 0.95 の範囲にある、請求項 1 に記載の P Z ファイバ。

30

【請求項 10】

前記第 1 のクラッド材料が、シリカ、パイレックス、ソーダ石灰ガラス、リン酸塩ガラス、カルコゲナイドガラス、フッ化物ガラス又はポリマーの 1 つ又は組合せからなる、請求項 1 に記載の P Z ファイバ。

【請求項 11】

前記第 1 のクラッド材料が単結晶体からなる、請求項 1 に記載の P Z ファイバ。

40

【請求項 12】

前記コア領域が 35  $\mu m$  から 150  $\mu m$  の範囲の平均コア直径を有し、前記第 1 のクラッド領域が平均コア直径よりも少なくとも 3 倍大きな外径を有する、請求項 1 に記載の P Z ファイバ。

【請求項 13】

前記 P Z ファイバが複数のコアを備え、前記クラッド構成物の複数のリングが前記複数のコアの少なくとも 1 つの少なくとも一部分を囲む、請求項 1 に記載の P Z ファイバ。

【請求項 14】

前記複数のコアの前記の少なくとも 1 つが希土類イオンでドーブされ、高ピーク出力光パルスを生成するようにアクティブなマルチコア漏洩チャネルファイバアレイ ( M C - L

50

C F ) の一部分として配置された、請求項 1 3 に記載の P Z ファイバ。

【請求項 1 5】

前記 P Z ファイバが高ピーク出力増幅システムにおけるパルス圧縮器として配置され、ピコ秒の入力パルスを  $100\text{ fs}$  よりも小さいパルス幅に圧縮可能な、請求項 1 に記載の P Z ファイバ。

【請求項 1 6】

前記  $R_{sc}$  及び  $d$  によって、第 1 の偏波状態の有効率が上昇されて第 2 の他の偏波状態の有効率が低下されるように基本モードの有効モード率に変更される、請求項 1 に記載の P Z ファイバ。

【請求項 1 7】

偏波保持 (PM) 光ファイバであって、  
前記 PM 光ファイバは、漏洩チャネルファイバ (LCF) であり、且つ、  
第 1 の屈折率  $n_1$  を有する第 1 のクラッド材料を備える第 1 のクラッド領域と、  
前記第 1 のクラッド領域に配置され、 $n_1$  より小さい第 2 の屈折率  $n_2$  を有する第 2 のクラッド材料を備えるクラッド構成物と、  
前記第 1 のクラッド領域に配置され、熱膨張係数  $\alpha_{SAP}$  の材料を備える応力付与部 (SAP) と、

少なくとも部分的に前記クラッド構成物及び前記 SAP に囲まれ、熱膨張係数  $\alpha_{core}$  のガラスを有するコア領域とを備え、

前記クラッド構成物が複数のリングに配置され、前記 SAP が内側のリングよりも前記コアに対して外側に配置され、

$D_{sc}$  を前記 SAP から前記コア中心領域の中心までの距離とし、 $d_{SAP}$  を平均 SAP 直径とした場合に、前記 SAP の配置が関係式： $R_{sc} = d_{SAP} / D_{sc}$  及び  $d = |d_{SAP} - d_{core}|$  を満たし、 $R_{sc}$  及び  $d$  が、応力複屈折を前記コア領域へ誘発するとともに、前記 PM ファイバへの入力として受光した偏光入力ビームの偏波を保持するのに十分に大きく、

前記 PM LCF の複屈折値 (B) は約  $7 \times 10^{-5}$  よりも小さい、  
偏波保持 (PM) 光ファイバ。

【請求項 1 8】

$R_{sc}$  が約 0.4 から約 0.7 の範囲にある、請求項 1 7 に記載の PM ファイバ。

【請求項 1 9】

前記 PM ファイバが複数のコア領域を備える、請求項 1 7 に記載の PM ファイバ。

【請求項 2 0】

前記  $R_{sc}$  及び  $d$  によって、第 1 の偏波状態の有効率が上昇され第 2 の他の偏波状態の有効率が低下されるように基本モードの有効モード率に変更される、請求項 1 7 に記載の PM ファイバ。

【請求項 2 1】

$d$  が約  $1 \times 10^{-7}$  よりも大きい、請求項 1 7 に記載の PM ファイバ。

【請求項 2 2】

前記コア領域が  $50\text{ }\mu\text{m}$  から  $150\text{ }\mu\text{m}$  の範囲の平均コア直径を有する、請求項 1 に記載の P Z ファイバ。

【請求項 2 3】

前記第 1 のクラッド領域が、平均コア直径よりも少なくとも 3 倍大きな外径を有する、請求項 2 2 に記載の P Z ファイバ。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

関連出願への相互参照

本出願は、2013 年 11 月 22 日出願の米国特許出願第 61 / 907754 号、発明

10

20

30

40

50

の名称「POLARIZING AND POLARIZATION MAINTAINING LEAKAGE CHANNEL FIBERS」の優先権の利益を主張し、ここに参照により全体を取り込む。

#### 【0002】

本開示は、偏光光ファイバ及び偏波保持光ファイバに関し、そのような光ファイバ双方のタイプのアクティブ及び／又はパッシブな実施例を含む。

#### 【背景技術】

#### 【0003】

以下の特許及び公開された特許出願は、偏光(PZ)又は偏波保持(PM)光ファイバ配置の一方又は両方を記載する。米国特許第6954575号、発明の名称「Single-polarization high power fiber lasers and amplifiers」、米国特許第7724422号、発明の名称「Method and Apparatus for providing light having a selected polarization within an optical fiber」、米国特許第7289709号、発明の名称「Photonic crystal fibres comprising stress elements」、米国特許第7787729号、発明の名称「Single mode propagation in fibers and rods having large leakage channels」、米国特許第8159742号、発明の名称「Glass large-core optical fibers」、米国特許第8199398号、発明の名称「High power parallel fiber arrays」及び米国特許出願公開第2009/0207483号、発明の名称「Photonic bandgap fiber and fiber amplifier」

#### 【先行技術文献】

#### 【特許文献】

#### 【0004】

【特許文献1】米国特許第6954575号明細書

【特許文献2】米国特許第7724422号明細書

【特許文献3】米国特許第7289709号明細書

【特許文献4】米国特許第7787729号明細書

【特許文献5】米国特許第8159742号明細書

【特許文献6】米国特許第8199398号明細書

【特許文献7】米国特許出願公開第2009/0207483号明細書

【特許文献8】米国特許第7450813号明細書

#### 【発明の概要】

#### 【0005】

本開示は、アクティブ及び／又はパッシブな実施例を含む、偏光光ファイバ及び偏波保持光ファイバの実施例を提供する。少なくとも1つの実施形態は、偏光(PZ)光ファイバを含む。ファイバは、第1のクラッド領域に配置される応力付与部(SAP)を含み、SAPは熱膨張係数 $\alpha_{SAP}$ の材料からなる。コア領域は、少なくとも部分的にクラッド構成物及びSAPに囲まれている。コア領域は、熱膨張係数 $\alpha_{core}$ のガラスを含む。 $D_{sc}$ をSAPの中心からコア中心への距離、 $d_{SAP}$ を平均SAP直径とすると、SAPの配置は、関係式 $R_{sc} = d_{SAP} / D_{sc}$ 及び $d = |r_{SAP} - r_{core}|$ を満たす。様々な実施形態において、 $R_{sc}$ 及び $d$ は、応力複屈折をコアへ誘発するとともに偏光出力を与えるのに十分に大きい。ファイバの一部分が(例えば利得媒質で)ドーパされたアクティブファイバは、ファイバレーザ、ファイバ増幅器及び／又は光パルス圧縮器での用途に実施され得る。

#### 【0006】

第1の形態では、偏光(PZ)光ファイバの実施形態は、第1の屈折率 $n_1$ を有する第1のクラッド材料を備える第1のクラッド領域、第1のクラッド領域に配置されて $n_1$ よ

り小さい第2の屈折率 $n_2$ を有する第2のクラッド材料を備えるクラッド構成物、第1のクラッド領域に配置され熱膨張係数 $\alpha_{SAP}$ である材料を備える応力付与部(SAP)並びに少なくとも部分的にクラッド構成物及びSAPに囲まれ熱膨張係数 $\alpha_{core}$ であるガラスを有するコア領域を備え、 $D_{sc}$ をSAPの中心からコア中心領域の中心までの距離とし、 $d_{SAP}$ を平均SAP直径とした場合に、SAPの配置が関係式 $R_{sc} = d_{SAP} / D_{sc}$ 及び $d = |SAP - core|$ を満たし、 $R_{sc}$ 及び $d$ は、応力複屈折をコア領域へ誘発するとともにファイバからの偏光出力を与えるのに十分に大きい。

【0007】

$R_{sc}$ が約0.7から約0.95の範囲にある、形態1によるPZファイバ。

【0008】

$d$ が約 $1 \times 10^{-7}$ よりも大きい、形態1によるPZファイバ。

【0009】

コアの屈折率が約 $(n_1 + 1 \times 10^{-4})$ から $(n_1 - 2 \times 10^{-4})$ の範囲にある、形態1によるPZファイバ。

【0010】

コア領域が第1の偏波を有する少なくとも1つの低次モードで伝搬する一方で、少なくとも1つの低次モードの第2の偏波の伝搬を制限する、形態1によるPZファイバ。

【0011】

第2のクラッド材料が、フッ素添加シリカガラス又はホウ素添加シリカガラスからなる第2のガラスを備える、形態1によるPZファイバ。

【0012】

少なくともコア領域の一部が、光学利得を提供するドーパントによりドーブされた形態1によるPZファイバであって、内側のリングに配置されたクラッド構成物、内側のリングを部分的に囲むSAPの複数グループ及び内側のリングを部分的に囲む第2のリングに実質的に配置された更なるクラッド構成物を備え、第2のリングは実質的に各グループからのSAPを含み、PZは、光入力パルスに応じて、約15dBから25dBまでの範囲のPER及び約1.05から約1.08までの範囲の $M^2$ を示す光出力パルスの生成することができる。

【0013】

$n = n_1 - n_2$ が少なくとも約 $1.2 \times 10^{-3}$ である、形態1によるPZファイバ。

【0014】

$n_2$ が1より大きく約 $(n_1 - 5 \times 10^{-5})$ までの範囲にある、形態1によるPZファイバ。

【0015】

$n_1$ が1より大きく約3.5までの範囲にある、形態1によるPZファイバ。

【0016】

ファイバの少なくとも一部分が希土類イオンでドーブされた、形態1によるPZファイバ。

【0017】

コア領域の少なくとも一部分が光学利得を提供するドーパントでドーブされた、形態1によるPZファイバ。

【0018】

クラッド構成物が複数のリングに配置され、SAPがコア領域に隣接した第1の最内リングに配置される、形態1によるPZファイバ。

【0019】

SAP及びクラッド構成物が少なくとも1つのリングに配置され、各SAPはSAPと最も近いクラッド構成物との間に間隔 $p$ を有し、少なくとも1つのSAPの $d_{SAP} / p$ が約0.4から約0.75の範囲にある、形態1によるPZファイバ。

【0020】

10

20

30

40

50

ファイバからの偏光出力が約 1.05 から約 1.7 の範囲の  $M^2$  を有する、形態 1 による PZ ファイバ。

【0021】

第 1 のクラッド材料が熔融シリカからなる第 1 のガラスを備える、形態 1 による PZ ファイバ。

【0022】

第 1 のクラッド材料が、パイレックス、ソーダ石灰ガラス、リン酸塩ガラス、カルコゲナイドガラス、フッ化物ガラス又はポリマーの 1 つ又は組合せからなる、形態 1 による PZ ファイバ。

【0023】

第 1 のクラッド材料が単結晶からなる、形態 1 による PZ ファイバ。

【0024】

コア領域が約  $35\ \mu\text{m}$  から約  $150\ \mu\text{m}$  の範囲の平均コア直径を有し、第 1 のクラッド領域が平均コア直径よりも少なくとも約 3 倍大きな外径を有する、形態 1 による PZ ファイバ。

【0025】

第 20 の形態では、PZ ファイバが複数コアを備え、低率クラッド構成物の複数のリングが複数のコアの少なくとも 1 つの少なくとも一部分を囲む、形態 1 による PZ ファイバ。

【0026】

複数のコアの少なくとも 1 つが希土類イオンでドーブされ、高ピーク出力光パルスを生成するようにアクティブなマルチコア漏洩チャネルファイバアレイ (MC-LCF) の一部分として配置される、形態 20 による PZ ファイバ。

【0027】

PZ ファイバが高ピーク出力増幅システムにおけるパルス圧縮器として配置され、ピコ秒の入力パルスを約  $100\ \text{fs}$  よりも小さいパルス幅に圧縮可能な、形態 1 による PZ ファイバ。

【0028】

$R_{sc}$  及び  $d$  によって、第 1 の偏波状態の有効率が上昇され第 2 の他の偏波状態の有効率が低下されるように基本モードの有効モード率を変更される、形態 1 による PZ ファイバ。

【0029】

前述のいずれかの形態の PZ ファイバにおいて、PZ ファイバは、約  $8 \times 10^{-5}$  より大きなモード複屈折を有し得る。

【0030】

第 24 の形態では、偏波保持 (PM) 光ファイバは、第 1 の屈折率  $n_1$  を有する第 1 のクラッド材料を備える第 1 のクラッド領域、第 1 のクラッド領域に配置され  $n_1$  より小さい第 2 の屈折率  $n_2$  を有する第 2 のクラッド材料を備えるクラッド構成物、第 1 のクラッド領域に配置され熱膨張係数  $\alpha_{SAP}$  である材料を備える応力付与部 (SAP)、少なくとも部分的にクラッド構成物及び SAP に囲まれ熱膨張係数  $\alpha_{core}$  であるガラスを有するコア領域を備え、クラッド構成物が複数のリングに配置され、SAP が内側のリングを超えてコアに対して遠位に配置され、 $D_{sc}$  を SAP の中心からコア中心領域の中心までの距離とし、 $d_{SAP}$  を平均 SAP 直径とした場合に、SAP の配置が関係式  $R_{sc} = d_{SAP} / D_{sc}$  及び  $d = |d_{SAP} - d_{core}|$  を満たし、 $R_{sc}$  及び  $d$  が、応力複屈折をコア領域へ誘発するとともに、PM ファイバへ入力として受光した偏光入力ビームの偏波を保持するのに十分に大きい。

【0031】

$R_{sc}$  が約 0.4 から約 0.7 の範囲にある、形態 24 による PM ファイバ。

【0032】

PM ファイバが複数のコア領域を備える、形態 24 による PM ファイバ。

## 【0033】

$R_{sc}$  及び  $d$  によって、第1の偏波状態の有効率が上昇され第2の他の偏波状態の有効率が低下されるように基本モードの有効モード率の変更される、形態24によるPMファイバ。

## 【0034】

$d$  が約  $1 \times 10^{-7}$  よりも大きい、形態24によるPMファイバ。

## 【0035】

前述のいずれかの形態のPMファイバにおいて、PMファイバは、約  $7 \times 10^{-5}$  より小さいモード複屈折を有し得る。

## 【0036】

前述のいずれかの形態のPMファイバ又はPZファイバにおいて、コアを囲むクラッド材料の均一性は、約  $5 \times 10^{-5}$ 、約  $1 \times 10^{-5}$  又は約  $5 \times 10^{-6}$  より良好である。

## 【0037】

前述及び他の形態を、図面及び以降の詳細な説明を参照して説明する。

## 【図面の簡単な説明】

## 【0038】

【図1A】図1Aは、漏洩チャネル光ファイバの実施例並びにパラメータのピッチ、ホール直径  $d$ 、コア半径  $r_c$  及びファイバ直径  $2r_o$  を模式的に示す側面図である。この実施例のファイバは、被膜及びホールを超えるクラッド領域も備える。漏洩チャネルファイバは、光モードを導く大きなエアホールを備え得る。本開示の少なくとも1つの実施形態では、漏洩チャネルファイバは、市販のフッ素添加シリカを第二クラッド材料（エアホールではなく）として全ての「全ガラス」設計において備え、第二のクラッド材料と他のクラッド材料との間に、小さな相対屈折率  $n_{rel}$  を成す。（ガラスクラッド構成物の使用は、コア直径が同じであるがクラッド構成物がエアホールを含む場合と比較してより大きなクラッド構成物をもたらし得る。）

【図1B】図1Bは、漏洩チャネル光ファイバの実施例並びにパラメータのピッチ、ホール直径  $d$ 、コア半径  $r_c$  及びファイバ直径  $2r_o$  を模式的に示す断面図である。この実施例のファイバは、被膜及びホールを超えるクラッド領域も備える。漏洩チャネルファイバは、光モードを導く大きなエアホールを備え得る。本開示の少なくとも1つの実施形態では、漏洩チャネルファイバは、市販のフッ素添加シリカを第二クラッド材料（エアホールではなく）として全ての「全ガラス」設計において備え、第二のクラッド材料と他のクラッド材料との間に、小さな相対屈折率  $n_{rel}$  を成す。（ガラスクラッド構成物の使用は、コア直径が同じであるがクラッド構成物がエアホールを含む場合と比較してより大きなクラッド構成物をもたらし得る。）

【図1C】図1Cは、二重クラッドの偏波保持（PM）ファイバを模式的に示す断面図であり、本開示のある実施形態に対応するイッテルビウム添加の大きなコア及び複数材料のクラッドを有する。

【図1D】図1Dは、利用され得る他のクラッド構成物の形を示す。様々に異なるクラッド構成物の横断面が示されるが、クラッド構成物の設計はこれに限定されない。

【図2A】図2Aは、漏洩チャネルファイバ（LCF）の実施例（上部右）を対応するブリフォームスタック（上部左）及び作製されたファイバの一部分の実施例の画像（下部）とともに模式的に示す。

【図2B】図2Bは、ブリフォームの実施例（上部左）及び大きなコアの偏波保持（PM）LCFに対応するファイバ（上部右）を模式的に示し、作製された大きなコアのPM LCFの対応の実施例の顕微鏡画像（下部）を含む。

【図3A】図3Aは、偏光（PZ）LCFの実施例（上部）及び作製されたPZ LCFの一部分の実施例の画像（下部）を模式的に示す。

【図3B】図3Bは、偏光（PZ）LCFの他の実施例（上部右）及びブリフォーム（上部左）を、作製されたLCFの実施例の画像（下部）とともに模式的に示す。

【図4】図4は、偏光LCFブリフォームスタックの実施例（左）及びポンプガイドとし

10

20

30

40

50

て構成された最外クラッドを備えるファイバの実施例（右）を模式的に示す。

【図 5】図 5 は、低率クラッド構成物から生じた漏洩チャネルがほぼ環状構成に配置されている偏光 L C F プリフォーム（左）及びファイバ（右）の配置の実施例を模式的に示す。

【図 6 A】図 6 A は、マルチコア P M 及び P Z L C F を含むマルチコアファイバの実施例の断面図を模式的に示す。

【図 6 B】図 6 B は、マルチコア P M 及び P Z L C F を含むマルチコアファイバの実施例の断面図を模式的に示す。

【図 6 C】図 6 C は、マルチコア P M 及び P Z L C F を含むマルチコアファイバの実施例の断面図を模式的に示す。

【図 6 D】図 6 D は、プリフォームの実施例の断面図を模式的に示す。

【図 6 E】図 6 E は、プリフォームから引き出されたマルチコアファイバの実施例の断面図を模式的に示す。

【図 7 A】図 7 A は、偏光 L C F のためのプリフォームスタックの実施例を示す。

【図 7 B】図 7 B は、作製された L C F の一部分の対応の実施例を示す。

【図 8 A】図 8 A は、図 7 B の偏光 L C F の性能を示すプロットである。

【図 8 B】図 8 B は、図 7 B の偏光 L C F の性能を示すプロットである。

【図 8 C】図 8 C は、図 7 B の偏光 L C F の性能を示すプロットである。

【図 8 D】図 8 D は、図 7 B の偏光 L C F の性能を示すプロットである。

【図 9 A】図 9 A は、応力付与部（S A P）の様々な配置の作製された L C F の様々な実施例の性能を示すプロットである。非 P M ファイバの例の性能も比較のため計測された。

【図 9 B】図 9 B は、応力付与部（S A P）の様々な配置の作製された L C F の様々な実施例の性能を示すプロットである。非 P M ファイバの例の性能も比較のため計測された。

【図 9 C】図 9 C は、応力付与部（S A P）の様々な配置の作製された L C F の様々な実施例の性能を示すプロットである。非 P M ファイバの例の性能も比較のため計測された。

【図 10 A】図 10 A は、P Z 及び P M ファイバの実施例の偏波保持能力を比較するプロットである。

【図 10 B】図 10 B は、P Z 及び P M ファイバの実施例の偏波保持能力を比較するプロットである。

【図 11】図 11 は、作製された Y b 添加偏光漏洩チャネル増幅ファイバの一部の実施例を示す。

【発明を実施するための形態】

【0039】

本開示の追加的な実施形態を模式的に示す追加的な図は、参照によりここに取り込まれた様々な特許、特許公開及び特許出願に含まれている。図は、説明の目的で本開示の様々な実施形態を表現するが、制限を意図したものではない。ここで示されるシステム及び方法の代替となる実施形態は、ここに記載の原理から逸脱することなく利用され得る。詳細な参照がいくつかの実施形態についてなされ、その実施例は添付図面に示される。図中で使用可能な類似又は同様の符号が使われる場合は、類似又は同様の機能を示していることに注意すべきである。

【0040】

漏洩チャネルファイバ（L C F）技術は、コア直径の大きな、例えば米国特許第 7787729 号（‘729）及び第 8159742 号（‘742）に記載されているような 40  $\mu\text{m}$  より大きい、ファイバの様々な実施例を提供することができる。‘729 及び ‘742 特許は、開示する全てについてその全体においてここに参照によりここに取り込まれる。

【0041】

‘742 で検討されたように、漏洩チャネルファイバは、第 1 の屈折率  $n_1$  の第 1 のクラッド材料を有する第 1 のクラッド領域を含み得る。クラッド構成物は、第 1 のクラッド領域に配置される。クラッド構成物は、第 2 の屈折率  $n_2$  を有する第 2 のクラッド材料を

10

20

30

40

50



含み、 $n_2$  は  $n_1$  よりも小さく、相対屈折率差  $\Delta n$  は  $(n_1 - n_2) / n_1$  で特徴づけられ、ある実施形態では約  $4.5 \times 10^{-3}$  より小さくなり得る。コア領域は、少なくとも部分的にクラッド構成物により囲まれている。第1のクラッド領域及びクラッド構成物は、コア領域がある波長を有する少なくとも1つの低次モードで伝搬し、一方その波長を有する少なくとも1つの高次モードの伝搬を制限するように構成される。少なくとも1つの高次モードは、その波長における少なくとも1つの低次モードよりもより高い損失を有する。

#### 【0042】

図1A及び1Bは、漏洩チャネルファイバを示す。実施例の光ファイバ100はクラッド構成物102、例えば、6個のホールに囲まれたコア101を備える。その構成物は、直径 $d$ 及び中心間の間隔でピッチともいうを有する。コアは、直径 $2r_0$ を有し、最も近いホール間の間隔を $2r_0$ として定義する。ファイバの直径は、 $2r_0$ である。この実施例において、第1のクラッド領域103は、低率クラッド構成物102を超えて形成され、被膜104が加えられる。正規化されたホール直径 $d/\lambda$ は、2次モードについての漏れ損失が基本モードでの損失よりも有意に高くなるように選択される。これにより、従来型の光ファイバでビルトインモードフィルタリングを用いて可能な直径よりも非常に大きなコア直径での効果的なシングルモード動作が与えられる。

#### 【0043】

ファイバ直径 $2r_0$ は、第1のクラッド領域103を横切って計測が可能であるが、任意の被膜104を含まない。コア直径 $2r_0$ は、対向するクラッド構成物102の内部境界線間をファイバの中心を横切って計測可能である。

#### 【0044】

図1B及び1Cは、クラッド構成物としての円形のホールを模式的に示す。同様に、ファイバ直径 $2r_0$ は、代表的な円形ファイバとして示される。以下の作製されたファイバの実施例から明らかとなるように、クラッド構成物是非円形であってもよく、ファイバの形状は少なくとも非円形の部分を含んでいてもよい。例えば、いくつかの構成物又はクラッド形状は、六角形、八角形に近くてもよく、又は直線及び/若しくは曲線部分で非回転対称であってもよい。ある実施形態では、クラッド形状は、不規則な、及び明確に定義されない標準形状であってもよい。

#### 【0045】

ある実施形態では、クラッド構成物の少なくとも一部が、少なくとも部分的に排気されている、又は気体（例えば空気）若しくは液体を含むホールであればよい。ある実施形態では、クラッド構成物の少なくとも一部が、その構成物を囲む材料の屈折率とは異なる屈折率、例えばその構成物を囲む材料の屈折率よりも小さい屈折率を有する構成物を含むことができる。

#### 【0046】

多角形の直径の1つの可能な定義は、頂点の任意の対の間で最大の距離であり、多角形の最長対角線に対応する。また、構成物の寸法 $d$ に関しては、特に指定がなければ、 $d/2$ は、一般に構成物の中心から、最も近くで隣り合う2つの中心を結ぶ線に沿った辺までの距離とみなされる。構成物の中心は、非円形又は非対称な構成物については、「質量の中心」又は「重心」として計算され得る。

#### 【0047】

例として、ファイバ直径の数値は、ある実施形態ではポンプガイドとしても利用され得る図1Bに示す第1のクラッド103の外縁を一般に基準とする。円形ファイバの実施例では、直径は $2r_0$ である。直径は、コア101の中心を通る線に沿った第1のクラッド103の外縁への最大寸法である。

#### 【0048】

少なくとも1つの実施形態において、クラッド構成物102の少なくとも1つは、コア101又は他のクラッド材料（例えば第1のクラッド材料）103のいずれかの屈折率よりも低い屈折率を有する第2の材料ガラスから作製される。ある実施形態は、「全ガラス

10

20

30

40

50

」設計を備え、クラッド構成物 102 及びクラッド構成物が配置されている材料の双方がガラスを含む。クラッド構成物 102 の少なくとも一部はガラスを含むことができる。

【0049】

非常に小さな相対屈折差、例えば約  $8.3 \times 10^{-4}$  の  $\Delta$  は、例えばフッ素添加シリカ（フッ素添加シリカ、又は全エアホールではなく使用されるクラッド構成物 102 に適切な他の材料）とクラッド構成物が配置される他のクラッド材料との間に作り出される。クラッド材料 102（第 2 のクラッド）は、概して光ファイバ 101 のクラッド材料 103（第 1 のクラッド）の屈折率よりもわずかに低い屈折率を有する。驚くべきことに、フォトニック結晶ファイバ及び漏洩チャネルファイバの双方について、低損失のシングルモード動作は、 $7 \times 10^{-3}$  よりも実質的に低い 2 つのクラッド材料間の相対屈折率差で発生し得る。ある実施形態では、相対屈折率差  $\Delta$  は、大きなコアのファイバについての  $2 \times 10^{-4}$  と同程度に低い。相対屈折率は、同様に相対屈折率もより低くてもよい。ある実施形態では、 $\Delta$  は、約  $1 \times 10^{-3}$  又は約  $4.5 \times 10^{-3}$  よりも小さくてもよい。ここで記載されるファイバ実施形態では、相対屈折率は、 $1.05 \mu\text{m}$  の公称波長で決定される。数値シミュレーションは、一般に  $1.05 \mu\text{m}$  の設計波長に基づいて実行されたが、波長依存性が定量化され、弱いものであることがわかった。

10

【0050】

さらに、全ガラスフォトニック結晶ファイバ、エンドレスシングルモード光ファイバ及び漏洩チャネルファイバは、製造が容易なだけでなく、従来の光ファイバと比べて使用も容易となる。上記のように、このような「全ガラス」ファイバの効果は、十分に低い曲げ損失、生産された製品の再現性の向上、エアホールがないことによる性能の向上、及び簡単に例えば角部を丸くした六角形の形態となるようなファイバ断面の形状を含む。

20

【0051】

一般に、非常に小さい相対屈折率は、シングルモード動作について十分なモードフィルタリングを与え、一方で妥当な曲げ損失性能も与える。より大きな  $\Delta$  は良好なモードフィルタリング及び曲げ性能を意味するが、十分小さな相対屈折率差はシングルモード及び曲げ損失の制御を与える。また、上記のように、第 1 の背景クラッド材料とホール中の第 2 のクラッド材料との間の、減少した又は最小限の有用な屈折率差により、製造可能性及び性能が著しく向上する。いくつかの漏洩チャネルファイバを、相対屈折率差  $\Delta$   $8.3 \times 10^{-4}$  のフッ素添加シリカで作製して、先の設計で使用されたエアホールを置き換えることによって得られた結果が以下に検討される。作製された漏洩チャネルファイバを有する実施形態が多くの用途のために十分な曲げ損失性能を与えることがわかった。

30

【0052】

上記のように、曲げ損失性能は、低い相対率差で低下することが知られており、出願人の実験及びシミュレーションで確認された。しかし、出願人は、低い相対屈折率差でのモードフィルタリングにおいて著しい向上を認め、曲げ損失性能が十分であることも見出した。これは、例えば「全ガラス」設計で、クラッド構成物がエアホールを含む等価な漏洩チャネルファイバと比較して向上したモードフィルタリングに供する。

【0053】

2 種類のクラッド材料間の屈折差が非常に小さいある実施形態では、広く入手可能な高純度溶融シリカガラスが第 1 のクラッドガラス 103 として使用可能であり、一方、フッ素又は / 及びホウ素添加の他の高純度シリカガラスを第 2 のクラッドガラス 102 として使用可能である。フッ素及びホウ素添加レベルが低い場合は、2 種類のクラッド材料は、力学的、化学的、物理的及び熱的に良好な適合性を有する。市販のフッ素添加シリカがホール 102 のための材料として使用可能であり、高純度シリカガラスは第 1 のクラッド 103 のために使用可能である。他の材料及び設計もまた可能である。

40

【0054】

図 1C は、「全ガラス」設計：二重クラッド、偏波保持、イッテルビウム添加の大きなコアのファイバの他の実施例である。（上記のように、このような二重クラッド配置が非円形、例えば六角形の断面を有するファイバに含まれる場合、ポンプ混合は増加され得る

50

。 ) コア 1 0 1 内側のイッテルビウム添加領域 1 0 5 は、直径  $2 d_0$  及び周囲のガラスに厳密に適合した屈折率を有する。

【 0 0 5 5 】

上記のように、図 1 C は、二重クラッドの偏波保持 ( P M ) ファイバであり、大きなコア及び複数材料クラッドを有する実施例を模式的に示す断面図である。ある実施形態では、コアの少なくとも一部分には、1 以上のドーパント例えばイッテルビウムのような 1 以上の希土類イオンをドーピング可能である。コアの少なくとも一部分には、1 以上のドーパントがドーピング可能であり、ドーパントは希土類イオンを含み得る。ドーパントは、光学利得を提供可能である ( このようなファイバは、光学利得を提供しないパッシブファイバと対照的にアクティブファイバということもある ) 。

10

【 0 0 5 6 】

2 個の応力付与要素 1 0 6 ( S A P ) は、周囲のガラスとは実質的に異なる熱膨張係数及び他の低率構成物 1 0 2 とは異なる屈折率を有する。応力要素 1 0 6 は、低率構成物 1 0 2 とは異なる寸法及び大きさも有し得る。応力要素 1 0 6 は、ホウ素添加シリカガラスからなっていればよい。この実施例では、ガラス 1 0 7 は、ポンプクラッドを与える低屈折率のガラスで、フッ素及び / 又はホウ素添加シリカガラスから構成されていればよい。

【 0 0 5 7 】

図 1 A - 1 D のファイバの構造は、漏洩ファイバ設計の構造の標準的な方法で一般に実施され得る。例えば、フッ素添加シリカロッドは、まずシリカ管に挿入され、所望の直径及びフッ素添加シリカのシリカガラスに対する割合でケーンに引き伸ばされる。そして、そのケーンは、シリカケーンとともに所望の構成の六角形のスタックに積層される。そのスタックは、次にシリカ管に挿入されファイバに引き出される。シリカ管の中の真空は、低い引出し温度を併用して非円形ファイバ ( 例えば六角形のファイバ ) の生産に使用されることがある。イッテルビウム添加シリカロッド及び / 又は応力ロッドは、イッテルビウム添加ファイバ及び / 又は偏波保持ファイバの作成にスタックで使用されることがある。概して、低い相対率、「全ガラス」構造によって、例えば上記のように漏洩ファイバの製造全体が簡素化し得る。

20

【 0 0 5 8 】

図 1 D は、利用され得る他のクラッド構成物の形状を示す。図示されるように、クラッド構成物の断面は、円形に限定されない。図 1 D は、他に可能な形状 1 2 0 - 1 2 7 を示し、これらもまた使用され得る。したがって、クラッド構成物の構成、例えばクラッド構成物の形状、寸法、材料、屈折率などは変化し得る。その変化は、クラッド構成物の周囲に限定されず、さらに内部の構成物及び設計も含み得る。図 1 D の断面 1 2 8、1 3 0 及び 1 3 2 は、例えば、含有物が埋め込まれている材料とは異なる屈折率の 1 以上の含有物 1 2 9、1 3 1 及び 1 3 3 を示す。これらの内部構成物も、例えば、形状、大きさ、配置、材料、屈折率などで変化し得る。さらに他の設計も可能である。

30

【 0 0 5 9 】

ここに記載されるいずれのファイバにおいても、1 以上のクラッド構成物が、例えば相互に異なる形状、寸法、材料及び / 又は屈折率を有し、クラッド構成物の全てが同じ設計を有する必要はない。

40

【 0 0 6 0 】

図 2 A は、大きなコア、漏洩チャネルファイバ 2 0 3、及び対応するプリフォーム 2 0 1 の実施例を模式的に示す。L C F 2 0 3 は、プリフォーム 2 0 1 から引き出し得る。作製された L C F の一部分 2 0 5 も示される。上記のように、L C F を、コア及び第 1 のクラッド領域を形成する内部クラッドを有することで特徴づけることができる。1 以上の更なる外側クラッド領域は、例えばポンプ源からポンプ光を誘導するために利用され得る。ある実施形態では、コア及び内部クラッド ( 例えば第 1 のクラッド領域 1 0 3 ) は、屈折率  $n_1$  を有するガラスを含み得る。内部クラッドは、屈折率  $n_1$  の背景ガラス及び  $n_1$  より小さい屈折率の 1 以上のクラッド構成物を含むことができる。クラッド構成物は、全ガラス又は低率のガラス、気体 ( 例えば空気 )、真空若しくはより低率の他の媒質の組合せ

50

の場合がある。低率クラッド構成物の配置は、少なくとも1つのより低次のモード（例えば基本モード）と比べて少なくとも1つのより高次のモードに対するより高い損失を与える漏洩チャネルを与える。

#### 【0061】

LCFコアにおける全モードについての閉じ込め損失は、場合によっては、標準的なステップインデックスファイバよりも一層大きくなり得る。LCFの1つの効果は、基本モードと次の高次モードとの間の差分損失が大きくなり得ることである。基本モードについての損失が $0.05 \text{ dB/m}$ から $2 \text{ dB/m}$ であり、一方、次の高次モードでは $5 \text{ dB/m}$ から $20 \text{ dB/m}$ の範囲であればよい。ファイバの長さに亘って、FMは誘導されるが、HOMはファイバクラッドへ漏出する。

10

#### 【0062】

様々な実施形態において、LCFの背景ガラスは、合成熔融シリカである。図2Aの低率構成物207は、熔融シリカの屈折率よりも低い屈折率 $1.2 \times 10^{-3}$ のフッ素添加シリカガラスを含み得る。低率構成物は、数個のリング（例えば1、2、3、4個又はそれより多いリング）に配置が可能で、それらを層ということもあり、コアの周辺に配置される。ある好ましい実施例では、2個又は3個のリングが利用可能である。例として、図2AのLCF205は2個のリングで配置される。ある実施形態では、低率構成物の3個以下のリングが利用される。

#### 【0063】

低率構成物は、周期性及び直径 $d$ を有する。直径 $d$ は、円形構成物の直径又は非円形構成物の最大幅を表すことが可能である。比 $d/\lambda$ は、漏洩チャネルサイズの特徴づけに使用可能なパラメータである。以下の実施例において明らかになるように、LCFのSAPは、SAPの中心から最も近い低率クラッド構成物への距離であるピッチ $p$ を有することである程度特徴づけが可能である。リングに配置された低率構成物についての比 $d/\lambda$ は、一様である必要はない。リングに配置されたSAPについての比 $d/\lambda_p$ は、一様である必要はない。同様に、比は各リングについて一様である必要はなく、例えば比 $d/\lambda$ 及び $\lambda/\lambda_p$ 又は $d/\lambda_p$ は異なるリングについて異なり得る。

20

#### 【0064】

偏波保持（PM）パッシブ又はアクティブファイバは、偏光出力が要求されるファイバレーザ/増幅器で利用可能である。漏洩チャネルファイバは、'742で検討されたように、例えば、少なくとも'742の図1Cに関して記載されたように、偏波保持となり得る。

30

#### 【0065】

光ファイバの偏波効果に関して、まず標準シングルモード（SM）ファイバを検討する。コアは、標準モードのみに対応する。一方、基本モードは、2つの直交する偏波状態について縮退している。理想的には、これら2つの縮退状態は、ファイバ全体に同一の伝搬定数を有する。ファイバにおける偏光パルス伝搬は、この理想的な場合では初期偏波状態のままとなる。しかし、ファイバのマイクロベンディング及び $\lambda/\lambda_p$ 又は他の環境効果によるランダム応力の結果として、これら2つの縮退状態のうちの1つでシングルモードファイバに伝播する偏光パルスは、電力を他の偏波状態に結合する。伝搬定数は、SMファイバの2つの偏波状態間でほぼ等しいので、2つの状態間の結合が促進される。したがって、標準的なSMファイバに入射された偏光は、通常は、偏波されない状態で、部分的に偏波された状態で、楕円偏波された状態で、又は2つの出力偏波軸間の $\text{dB}$ における電力比である偏波消光比を概ね減少した状態で現れる。

40

#### 【0066】

シングルモード（SM）ファイバを利用するPM設計において偏波を保存するために、ファイバは1以上の応力付与部（SAP）、例えば応力ロッドで引き伸ばすことができる。SAPで引き起こされる応力光学効果によって、基本モードの有効モード率が変わり、よって伝搬定数も変わる。1つの偏波状態の有効率は、上昇して「遅い軸」を生成する。他の偏波状態の有効率は、低下して「速い軸」を生成する。モード結合を引き起こすラン

50

ダム応力効果の能力は、有効モード率の差が増加した結果として減少する。

【0067】

偏光は、PMファイバの遅い軸又は速い軸に平行な偏波軸を有するPMファイバの入力に出射される。双方の軸が光を誘導する。PMファイバの出力に到着する光は、入力時と実質的に同じ偏波を有する。このシステムの性能指数は偏波消光比(PER)である。

【0068】

1つの偏波状態のみが誘導されるように、偏光ファイバを作製し、又は標準的なPMファイバのパラメータを調整することが可能である。好ましくない偏波状態へ出射された偏光は、ファイバクラッドへ失われることになる。

【0069】

先行する偏光ファイバの例として、米国特許第7289709号、発明の名称「Photonic crystal fibres comprising stress elements」は、大きなモード領域のフォトニック結晶ファイバ(PCF)におけるシングルモード、単一偏波誘導及び増幅を教示する。偏光フォトニック結晶ファイバ(PCF)の例は、'709において開示された。例えば、基本的な偏波状態の1つが誘導され、基本モードの有効屈折率 $n_{mode}$ とクラッド領域の有効屈折率 $n_{eff}$ の間の差 $n$ は、コア領域のモード複屈折 $B_{mode}$ より小さい又は実質的に等しい。中心波長 $\lambda_c$ については、単一偏光帯域幅 $\Delta n$ は、基本的な偏波状態のうちの1つのみの誘導をもたらす。率差 $n$ は、 $B_{mode}$ の50%未満、 $B_{mode}$ の20%未満又は $B_{mode}$ の10%未満に適合され得る。

【0070】

'709において、いくつかのパラメータは、単一偏光帯域幅 $\Delta n$ 及び/又はその中心波長 $\lambda_c$ に影響を及ぼし得ると指摘されている。パラメータ群は、例えば、応力要素の熱膨張係数 $\alpha_{sap}$ とクラッド背景材料の熱膨張係数 $\alpha_{cladback}$ の間の差 $\Delta\alpha$ 、隣接する2個の微細構造要素間の最小距離 $d$ 、微細構造要素の相対的大きさ $d/\lambda_c$ 、コアの屈折率 $n_{core}$ とクラッド背景の屈折率 $n_{cladback}$ の間の差 $\Delta n$ 、フォトニック結晶ファイバの曲げ半径及びそれらの組合せを含む。このようなパラメータは、偏光帯域幅及びその中心波長を特定用途の要求に適合させることに供し得る。コア及びクラッド背景の屈折率の制御によりモードフィールド直径の制御が可能となり、それによって他の微細構造又は非微細構造の光ファイバへのサプライスが容易になる。

【0071】

PCFと比較すると、漏洩チャネルファイバは、好ましい全固体ガラス配置を備え、大きなモードのファイバレーザ及び増幅器の開発を促進することができる。少なくとも1つの実施形態では、LCFは、比較的大きなエアホールの少数のリング(例えば2、3個の)で囲まれ、高次モードとしては比較的高い損失を与える。'742で開示されたように、ある好適な配置では、ガラスLCFは低率のクラッド構成物の、例えば低率のガラスの、少数のリングに囲まれた大きなコアを含む。低率の領域は、クラッドガラスに狭いチャネルを画定する。いくつかの配置では、全ガラスLCFが提供され得る。非PM、PM及び偏光(PZ)LCFの比較例が以下に検討される。

【0072】

図2Aを再び参照すると、漏洩チャネルファイバ(LCF)203の実施例が、対応するプリフォームスタック201(ここからファイバ203が引き出し可能である)及び作製されたファイバ205の実施例の画像とともに示される。この実施例では、ファイバは、50/480LCFとして特徴づけ可能であり、50 $\mu$ mコア及び480 $\mu$ m直径の第1の(内部)クラッドに対応する。プリフォーム201は、低率のロッド201bの2層に囲まれた中心の中実ロッド201aを含む。ロッド201bは、コア及びクラッドからなる。ロッド201bのコアは、ロッド201aの屈折率よりも低い屈折率を有する材料から形成される。ロッド201bのクラッドは、ロッド201aの材料と同じ屈折率を有する材料から形成される。全ガラスLCFの低率構成物201bは、内側のリングとして $d/\lambda_c = 0.8$ 及び外側のリングとして $d/\lambda_c = 0.7$ の2層に配置される。低率ロッド

10

20

30

40

50

201bの層は、中実ロッド201cの2層に囲まれてクラッドを形成する。ロッド201cは、コアロッド201aと同じ屈折率の材料を備える。ロッド201a - 201cは、外側のクラッド管201dの中に積み重ねられる。クラッド管201dは、ロッド201cと同じ屈折率を有し得る。顕微鏡画像は、作製されたLCF205の内側及び外側のリングのクラッド構成物のわずかに異なる大きさを示す。この実施例では、SAPは含まれず、ファイバは非PMである。

#### 【0073】

図2Bは、大きなコアの偏波保持(PM)LCFに対応するプリフォーム211及びファイバ213を模式的に示し、作製された大きなコアのPM LCFの対応の実施例の顕微鏡画像を含む。ファイバは、低率構成物として図2と同じ値の $d/\rho$ を有する50/480LCFである。外側のリングの2個の非円形SAP204は、 $d/\rho \sim 0.9$ に配置され、PM動作を提供する。ここで、 $d$ はSAPの最大直径であり、 $\rho$ はSAP204の中心と最も近く隣接したクラッド構成物の中心との間隔である。作製されたPMファイバ215の顕微鏡画像が示される。この実施例では、SAPは、外側のリングのクラッド構成物よりも大きい。プリフォーム211は、概してプリフォーム201に似ているが、低率ロッド201cの外側のリングに2本のSAPロッド201eを含む。SAPロッド201eは、クラッドを形成するロッド201c及び/又は低率構成物を形成するロッド201bの熱膨張係数とは異なる熱膨張係数を有する。

#### 【0074】

図3A - 3Bは、偏光(PZ)LCF303及び313の実施例を、それぞれ作製されたLCF305及び315の実施例とともに模式的に示す。各ファイバは、低率構成物としての図2Aと同じ値の $d/\rho$ を有する50/480LCFである。図2BのPMの実施例とは対照的に、2個のSAP304はLCF303の内側のリング及び作製されたPZ LCF305の $d/\rho = 0.9$ に含まれ(図3A)、SAP314はLCF313の内側のリング及び作製されたPZ LCF315の $d/\rho = 0.75$ に含まれる(図3B)。したがって、異なる応力がSAPによりファイバに付与され、それぞれが偏光(PZ)能力をもたらす。図3Bはまた、ファイバ313が引出し可能なプリフォーム311の実施例を示す。プリフォーム311は概してプリフォーム211に似ているが、2本の応力付与ロッド314を含む。

#### 【0075】

図4は、偏光LCFプリフォーム401の実施例及び最外クラッド405をポンプガイドとして構成したLCFファイバ403の実施例を模式的に示す。コア及び低率構成物領域で囲む背景ガラス402は、周囲のガラス405よりも高い屈折率を有する。周囲のガラス405と比べた背景ガラス402のNAは、 $0.1 - 0.3$ の範囲であればよく、ポンプガイドを形成する。この実施例では、ファイバは、50/480LCFである。2個のSAP404は、 $d/\rho = 0.75$ の内側のリングに含まれる。4個の低率構成物は、 $d/\rho = 0.8$ の内側のリングに配置される。この実施例では、外側のリングは、 $d/\rho = 0.7$ の低率構成物で部分的に占められる。構成物の寸法の間隔に対する比は、上記に掲げた「最も近い隣接」基準に従う。SAP404に囲まれた希土類添加コア領域(個別には示されない)及び低率構成物の内側の層は、50/200漏洩チャネル利得ファイバを提供するように形成され得る。このようなPZ LCFは、ファイバ増幅器又はファイバレーザシステムに利用可能である。

#### 【0076】

図5は、漏洩チャネルのための12個の低率クラッド構成物の1つのリング502が、ほぼ円形の構成で配置された偏光LCF503の配置の実施例を模式的に示す。この実施例では、低率構成物(及び漏洩チャネル)は六角形形で配置されず、さらに厳密に円に近い(例えば12辺の多角形)。2個のSAP504の各々の直径は、コア直径よりも大きく、低率クラッド構成物の直径よりも一層大きく、例えばこの実施例では5 - 10倍程度大きい。

#### 【0077】

10

20

30

40

50

特別な理論に従うことなしに、いくつかの効果が、作製されたファイバの様々な実施例の発展の間に明らかになった。作製されたファイバでは、層の数又は低率構成物間の間隔に応じて、偏光に重大な影響は認められなかった。層の数が少なすぎると、例えば1層又は非ポピュレ-ト層の場合、損失は増加し得るが偏光能力は維持される。(非ポピュレ-ト層は、漏洩チャネルを形成するディプレストインデックス構成物のないプリフォームスタックの層である。)同様に、構成物間の間隔が減少すると、モード間クロストークが増加した状態で消光比も減少する。しかし、偏光特性は維持される。また、間隔の減少によって、コアの一層増加するモードの伝搬が可能となるので、消光比は減少する。

【0078】

要件ではないが、応力光学効果が偏光能力に相当な影響を有すると考えられている。コア上の応力が、コアからの距離を増加させたSAPを有するファイバを作製することによって低減させる場合、様々な作製されたファイバの実施例は、偏光(PZ)動作よりもPM動作の増加を示した。さらに、SAPの $d/\rho_p$ は、ファイバが偏光するための低率構成物の $d/\rho$ より大きいことは、重要又は必須ではない。このような見解は、偏光効果が応力光学効果により引き起こされていることを支持する。

【0079】

少なくとも1つの実施形態では、偏光漏洩チャネルファイバは、以下の原理及び作用に基づいて構築される。

【0080】

屈折率 $n_1$ 及び熱膨張係数(TEC) $_{clad}$ を有するクラッドガラスを選択する。クラッド直径及びコア直径が指定される。大きなコアのシングルモードファイバで、有効コア開口数(NA)がゼロに近づくと、それにより、同様に、次第に弱まる誘導、マイクロベンディング又は他のランダムな環境応力効果が、基本モード(FM)で見られる背景損失を増加し得ることになる。したがって、クラッドの大きさは、クラッドが目的のコアを外部応力から隔離するように、そのコアの直径に一致するように選択される。

【0081】

ある好適な実施例では、全ての外側クラッドの直径は、コアの中央を通過して計測されるが、外部応力からコアを隔離するために十分な大きさでなくてはならない。例として、コアの直径は、約20-150 $\mu\text{m}$ 、35-150 $\mu\text{m}$ 又は50-150 $\mu\text{m}$ の範囲にあればよい。様々な実施形態において、外側クラッドは、コアの大きさの少なくとも3倍となる。少なくとも一実施形態においては、コアとクラッドの比は、50/250又は50/480であればよい。特に、コアの直径が減少すると、好ましいクラッドの直径は相対的に増加し得る。例えば、20 $\mu\text{m}$ のコアで好ましい外側クラッドの直径は、少なくとも約500 $\mu\text{m}$ から1mmであればよい。あるファイバ増幅器の実施例では、ポンプガイドは、全クラッド直径とは独立して実施及び検討され得る。例として、直径150 $\mu\text{m}$ のポンプガイドは、直径50 $\mu\text{m}$ のコアを囲み得る。ファイバは直径500 $\mu\text{m}$ の外側クラッドを有し得る。ファイバは、アクティブファイバ、例えばレーザ又は増幅器として作用できるように利得を与えるようにドーパントでドーブされ得る。

【0082】

名目上50 $\mu\text{m}$ のコアの偏光LCFについては、LCFコアの屈折率は、 $n_1$ と比較して、ある実施例では、 $(n_1 + 1 \times 10^{-4})$ から $(n_1 - 2 \times 10^{-4})$ の範囲にあればよい。好ましい実施形態では、 $_{core} TEC_{clad}$ であり、ここではそれぞれコア又はクラッド領域の熱膨張係数(TEC)である。コアの周囲に配置された低率ガラス領域は、 $n_1$ よりも小さい屈折率を有する。好ましい実施例では、低率領域のTECは、 $_{clad} TEC$ の約 $\pm 20\%$ の範囲にある。ある実施形態では、低率領域のTECは $7 \times 10^{-7}$ を超える場合もあり、約 $3 \times 10^{-6}$ と同程度に大きい場合もある。ある実施形態では、率差の大きさ $|dn|$ は、低率ガラス領域の各々と $n_1$ との間で、約 $|dn| > 5 \times 10^{-4}$ となり得る。率差は、より大きく、例えば $|dn| > 1.2 \times 10^{-3}$ であってもよい。ファイバで偏光特性を得るために、少なくとも2個の低率構成物がSAPとして配置され、 $TEC_{SAP}$ が $|SAP - core| > 1 \times 10^{-7}$ であるガラスから

10

20

30

40

50

なことが可能である。ある実施例では、2個のSAP領域は、隣接し、コアについて対照的に配置され得る。増加した偏光能力のために、SAPは内側のリングに含まれ得るが、LCFは低率構成物の1-4個のリングを有し得る。ある実施形態では8個までのリングが利用されてもよく、他の実施形態では約10個までのリングが利用され得る。ここで開示されるいずれのファイバ実施形態も、アクティブな部分を含むことができ、利得媒質でドーブされて光学利得を与える1以上の領域を備えることができる。

#### 【0083】

特別な理論に従うことなしに、コアに隣接するSAPを有して増加した偏光能力は、少なくとも基本的なメカニズムとして、応力光学効果から生じ得る。便利な基準として、 $D_{sc}$ をSAPの中心からコアの中心までの距離とし、 $d_{sap}$ を、この実施例では平均SAP直径であるSAPの寸法とした場合、比 $R_{sc} = d_{sap} / D_{sc}$ が考えられる。出願人は、PZパッシブファイバで $R_{sc}$ が約0.82-0.95であることを観察したが、一方、PMファイバについては、 $R_{sc} \sim 0.5$ が得られた。PMファイバは、約0.4から0.7の範囲の $R_{sc}$ を有し得る。PZアクティブ又はパッシブファイバは、約0.7-0.95の範囲の $R_{sc}$ を有し、1を超え、又は実施形態によっては約1.5までになることもある。したがって、ここで開示されるファイバの所定の実施形態については、PZファイバは、PMファイバよりも大きな $R_{sc}$ を有する傾向がある。PMの性質は、0.4から0.7の範囲の $R_{sc}$ を有するファイバ実施形態について得られる。PZの性質は、約0.7より大きく約1.5までの $R_{sc}$ を有するファイバ実施形態について得られる。パッシブPZファイバは、アクティブPZファイバよりも幾らか広い範囲に亘る $R_{sc}$ で作製され得る。

#### 【0084】

ガラス偏光LCF(PZ-LCF)ファイバの様々な実施形態は、1以上の好ましい特性を与えることができる。例えば、クラッド構成物は大きく、従来のPCFの作製で要求されるよりも少ないプリフォームスタック要素で広いピッチで配置され得る。そのように、作製が容易化される。また、偏光アプリケーションについては、必要とされる応力付与部の材料がより少ない。例として、40/200PCFは、20個以上のSAP材料領域を利用し得る。これに対して、ここで開示されるPZ-LCF実施形態の一部は、わずか2個のSAP領域しか含まない。さらに、曲げ制約及び曲げ性能は、考慮すべきパラメータである。出願人は、様々な作製されたファイバについて、パッシブファイバの最大性能を達成するような好ましい曲げの向きはなく、非円形のファイバ形状についての偏光アプリケーションにおいて何も期待される効果がないことも見出した。

#### 【0085】

コアの材料及び配置並びにクラッド材料及び組成物には多くの可能性が存在し、これに限定されないが以下を含む。

#### 【0086】

クラッド材料は、溶融シリカを含み得る。クラッド材料は、パイレックス、ソーダ石灰ガラス、リン酸塩ガラス、カルコゲナイドガラス、フッ化物ガラス、又は好ましくは高率の均一性を備えたポリマーの1つ又は組合せを含み得る。クラッド材料は、単結晶体を含み得る。

#### 【0087】

クラッド材料の屈折率 $n_1$ は、動作の波長において1から約3.5までの範囲、例えば近赤外線(IR)から中赤外線までの範囲に存在し得る。

#### 【0088】

LCFファイバのある実施形態は、第1のクラッドを実質的に囲む第2のクラッドを含み得る。第2のクラッド材料は、フッ素添加シリカガラス又はホウ素添加シリカガラスを含み得る。第2のクラッド材料の屈折率 $n_2$ は、平均として $n_1$ よりも小さくてよい。例えば、 $n = n_1 - n_2$ は、少なくとも約 $1.2 \times 10^{-3}$ であればよい。第2のクラッド材料の屈折率 $n_2$ は、1.0より大きく、概ね $n_1$ 、例えば概ね $n_1 - 5 \times 10^{-5}$ までの範囲にあればよい。



## 【 0 0 8 9 】

上記のように、マルチコアPM及び/又はPZ LCFファイバは、クラッド構成物の複数のリングの配置を含み、アクティブ又はパッシブマルチコアファイバに利用され得る。マルチコアPM又はPZファイバは、入力パルスが空間的に分離した複数ビームへ分けられ個々に増幅される、高ピーク出力のアプリケーションで利用され得る。ビームは、増幅後に再結合される。このような構成は、医療及び産業用途のために有用な増加されたピーク出力を提供し、従来のファイバレーザ/増幅器技術、特殊なファイバ(例えばLCF、PCF)、光パラメトリック発振器/増幅器又はそれらの組合せに利用され得る。

## 【 0 0 9 0 】

図6Aは、ステップインデックスファイバに基づく個々のファイバコアを備えるマルチコアファイバの実施例を模式的に示す断面図である。

10

## 【 0 0 9 1 】

図6Bは、漏洩チャネルファイバに基づく個々のファイバコアを備えるマルチコアファイバの実施例を模式的に示す断面図である。

## 【 0 0 9 2 】

図6Cは、偏波保持漏洩チャネルファイバに基づく個々のファイバコアを備えるマルチコアファイバの実施例を模式的に示す断面図である。

## 【 0 0 9 3 】

図6Eは、2層(PZ-LCF)の偏光漏洩チャネルファイバの実施例を模式的に示す断面図であり、そのプリフォームは図6Dに示される。

20

## 【 0 0 9 4 】

米国特許第8199398号(‘398)、発明の名称「High power parallel fiber arrays」は、開示する全てについてその全体において参照によりここに取り込まれる。‘398特許は、特に、漏洩チャネルファイバに基づく個々のファイバコアを有するアクティブマルチコアファイバの実施例を提供する。図6A-6C(‘398の図3A-3Cに対応)は、個々のファイバコア601を備えるマルチコアファイバを示す。これらの実施例では、各マルチコアファイバは、19本の個々のシングルモードコアを含む。図6B及び6Cは、アクティブマルチコア漏洩チャネルファイバ(MC-LCF)を示す。影付き円601はコア領域を表し、少なくともその一部は、この実施例では希土類イオン(例えばYb)のようなドーパントで(任意に)ドーブされ、一方、小さな影なし円602はエアホール又はコア601及び/若しくは低率領域602を囲む材料と比べて減少した屈折率のガラス領域を表す。以下に検討されるように、コア601を囲んでいる構成物の少なくともいくつかはSAP604であればよい。図6A-6Cに示す本実施例のファイバでは、6個の構成物602及び604が各コア601を囲む。他の実施形態では、異なる数のコア601及び/又は異なる数の構成物602、604の使用が可能である。他の実施形態では、パッシブファイバは、ドーブされる領域を含まない。

30

## 【 0 0 9 5 】

‘398で検討されたように、ファイバアレイアプリケーションのためのマルチコア漏洩チャネルファイバは、モード結合の少ない従来のステップインデックスマルチコアシングルモードファイバと比べて、各個別モードのモードウイングの削減又は最小化のために、より密な充填が可能になる。これは‘398の図4にさらに示され、従来のシングルモードファイバのモード強度の分布が、漏洩チャネルファイバの強度分布と比較される。この図では、漏洩チャネルファイバの強度分布のウイングは、従来のステップインデックスファイバよりも一層速くゼロに低下する。

40

## 【 0 0 9 6 】

モード結合に加え、マルチコアファイバでは、特に超短波パルスを利用するアプリケーションについては、あらゆる実質的な熱誘発位相変動も考慮されるべきである。そのような熱変動は、ファイバの前又は後に導入される適切な位相遅延の導入により補償され得る。そのような位相遅延は、例えばある厚さの光学位相板で実施され得る。小さな熱負荷に

50

については、適応光学の補償方式によって経路長の差を調節することができる。少なくとも1つの実施形態では、アレイの増幅器は、増幅器の熱的変動が増幅器の出力において相対位相変動を例えば10 kHzより小さい帯域幅へ制限するのに十分に適合されるように、及びいずれの増幅器間の光エネルギー - 結合も小さいか又は無視できるように、間隔を空けることができる。このような実施例は、398で検討される。

#### 【0097】

マルチコア利得ファイバは、全ての偏波保持(PM)構成でも製造可能である。図6Cは、PM設計の実施例を示す。ファイバは、図6Bに示すファイバの構造と似ているが、さらに応力生成領域を内蔵している。図6Cのファイバでは、SAP604は、コアの反対側に配置されている。この実施例では、応力生成領域は、各コアを直接囲む6個中2個の構成物に対応する。その領域は、ファイバコアに応力を生成し、偏波保持動作をもたらす。

10

#### 【0098】

図6B - 6Cに示す実施例では、2個の隣接するコア領域の間に配置された1つの低率構成物がある。さらにモード結合を減少するために、以下に検討されるように、コア分離が増加され、及び/又は2以上の低率構成物が2個のコア領域の間に配置され得る。様々な実施形態において、光学利得を提供するように、コア601のいずれもドーパントでドーパされず、又はコア601の一部若しくは全部がドーパントでドーパされ得る。

#### 【0099】

マルチコアファイバは、アクティブ又はパッシブのアプリケーションのいずれかでの使用について、偏光構成において製造可能でもある。上記に検討したように、及び特別な理論に従うことなしに、応力光学効果は、偏光能力に対して考慮すべき影響を有すると考えられる。SAPがコアから増加した距離で構成される配置は、偏光動作ではなくPM動作をもたらし得る。逆に、SAPからコアへの距離が減少すれば、偏光(PZ)動作を得ることができる。さらに、コアからコアへの分離が増加すると、隣接するコア間でのモード結合が減少し得る。例えば、上記に検討したように、ここで開示されるファイバの所定の実施形態について、PZファイバは、PMファイバよりも大きな $R_{sc}$ を有する傾向がある。PMの性質は、0.4から0.7の範囲の $R_{sc}$ を有するファイバ実施形態について得られる。PZの性質は、約0.7よりも大きく約1.5までの $R_{sc}$ を有するファイバ実施形態について得られる。パッシブPZファイバは、アクティブPZファイバよりも幾

20

30

#### 【0100】

図6Eは、低率クラッド構成物の2個のリングで各々囲まれた7個のコア領域611のマルチコアファイバ610(そのプリフォーム609が図6Dに示される)の実施例を示す。この実施例では、コア領域611の少なくとも一部を囲む2個のリングは、PZ能力のためにSAPがコアに隣接又はすぐ近くにあるように配置された2個のSAP614を含む。様々な実施形態において、コア領域611がいずれもドーパされないか、コア領域611の一部又は全部がドーパされ得る。ファイバ610は、大きなコアの漏洩チャネル偏光ファイバを構築するために約35 - 100  $\mu\text{m}$ の範囲の寸法、例えば最大直径を有するドーパされたコア領域で変更され得る。ある実施形態では、約20  $\mu\text{m}$ より大きなコア

40

#### 【0101】

マルチコアファイバ及びそのアプリケーションの更なる実施例は、398において検討されている。例えば、二重クラッド、マルチコア希土類添加(例えばYb)増幅器は、高ピーク出力を生成するのに使用され得る。他の実施例では、同軸マルチコアファイバ配置が、少なくとも部分的に低率クラッド構成物(不図示)により囲まれたファイバの外周に近いコアの単一円形アレイを含み得る。

#### 【0102】

実施例 - 偏光LCFファイバ及び性能

図7A - 7Bは、偏光LCFのためのプリフォーム701の実施例(図7A)及び作製

50

されたLCF703の一部分の対応の実施例(図7B)を示す。図7Bは、50/450の偏光LCF703の切断端面の顕微鏡画像である。暗い領域705は、フッ素又はホウ素添加低率ガラスである。図7Bに示すLCFファイバ703は、スタックアンドドロ法で作製された。クラッドロッドのスタック701a、低率コアのロッド701b及びSAPロッド701cは、図7Aのプリフォーム701で示す幾何構造において、コアロッド701dの周囲に配置され、外側の管701eの内部に積層された。

#### 【0103】

この実施例のプリフォーム701では、スタックには5層があり、中心ロッドが層1と数えられる。プリフォームスタックの層2及び3は、低率構成物701bを含む。層2は6個の要素を有し、そのうち4個は $d/p = 0.8$ の低率構成物701bであり、残り2個の構成物701cは $d/p = 0.9$ の応力付与部SAPである。層3は、12個の $d/p = 0.7$ の低率構成物を有する。層4は、18個の背景クラッドガラスのロッド701aを有する。層5は、24個の背景クラッドガラスのロッド701aを有する。内径(ID)と外径(OD)の比 $ID/OD = 0.75$ で固く嵌合したクラッド管701eが作製された。クラッド管の内壁と重なる層5のコーナーロッドは、残余のロッド端を共に融合して束を生成する段階でスタックから除去された。その束は、クラッド管に挿入された。組み立てられたファイバプリフォームは、線引きタワーへ搬入された。プリフォーム701は、真空中でクラッド直径 $450 \pm 5 \mu m$ まで引かれた。保護用の高率ポリマー被膜が塗布され、作製されたファイバ703はリールに巻き取られてコイルを形成した。

#### 【0104】

曲げ損失 $M^2$ 及び偏波消光比(PER)は、コイル直径の関数としてファイバの4メートル長で計測された。この実施例では、入力ビーム波長は $1040 nm$ であった。さらにカットバック測定が行われ、コアにおけるFM背景損失が $\sim 0.3 dB/m$ であることが示された。

#### 【0105】

図8A - 8Dは、図7Bの偏光LCFの性能を示すプロットである。この実施例のファイバは、PMではなく直線偏光であった。

#### 【0106】

図8Aは、4メートル長の50/450偏光LCFについての曲げ損失を示す。曲げ損失は、同様の構造パラメータの非PM LCF版についても同様である。曲げ損失は、ステップインデックスファイバと比べて大きい。

#### 【0107】

図8Bは、偏光50/450LCFの長さについての $M^2$ 測定を示す。400mmより小さいコイル直径については、ファイバ $M^2$ は、約1.2より小さく約1.05から約1.2の範囲にあった。

#### 【0108】

図8Cは、50/450偏光LCFの4メートル長の出力からの偏波消光比(PER)測定を示す。400mmより小さいコイル直径については、ファイバは、FMの1つの偏波状態の強い誘導を示す約20dBを超えるPERを示した。

#### 【0109】

図8Dは、LCFの偏光特性を示す。この実施例では、ファイバの4メートルが利用され、コイル直径は160mmであった。入力半波長板(WP)は、ファイバの偏光軸に一致するように回転された。出力変動を測定するのに出力半波長板が走査された。入力波長板が45度回転され、出力波長板が走査されて全波長板角度についてゼロ出力に近い測定結果を与えた。これにより、この実施例のLCFの偏光特性が量的に示される。

#### 【0110】

図9A - 9Cは、2層及びその中に応力付与部(SAP)の様々な配置を有する作製されたLCFの更なる実施例の性能を示すプロットである。以下の実施例のPMファイバは、 $d/p \sim 0.9$ の比較的大きなSAPの図2Bの作製されたファイバ215に対応する。2本のPZファイバは、それぞれ $d/p \sim 0.9$ 及び $0.75$ を有するSAPの図

3 A 及び 3 B の作製されたファイバ 3 0 5 及び 3 1 5 に対応する。

【 0 1 1 1 】

図 9 A は、3 本のファイバの P E R を曲げ直径の関数として示す。約 0 . 4 m より小さい曲げ半径では、P M ファイバは最も高い P E R を示した。特に、 $d / r_p \sim 0 . 9$  に対応する、より大きな S A P は、その P M ファイバ及び外側の層の S A P で最大の消光をもたらした。最も低い消光は、その P M ファイバで、コアに隣接した最も内側の層の S A P で見られた。P Z の実施例については、S A P の寸法を減少させることによって相対 P E R が向上した。

【 0 1 1 2 】

特別な理論に従うことなく、応力光学効果は、S A P 寸法の増加に伴い基本モードと若干高次のモード間のモード結合の増加をもたらしたと考えられている。さらに、実験において、出射条件は最適化されなかった。

【 0 1 1 3 】

図 9 B は、曲げ損失性能をコイル直径の関数として示す。この実験では、モードに考慮せずに総電力における損失が測定された。非 P M ファイバ測定も含まれた。非 P M 構成は、より小さな曲げ直径で最も高い損失を示した。さらに、P Z 及び P M ファイバの間で、より高い P E R が、より小さな曲げ直径での損失の増加をもたらした。

【 0 1 1 4 】

図 9 C は、P Z ファイバ、P M ファイバ及び非 P M ファイバについての  $M^2$  測定値を示す。減少した S A P 寸法 ( $d / r_p \sim 0 . 7 5$ ) の P Z ファイバについて、 $M^2$  値は約 1 . 0 5 - 1 . 3 の範囲にあったが、より大きな S A P では  $M^2 < 1 . 7$  が得られた。より大きな値は、増加した高次モードの成分によって引き起こされた、コアに隣接した S A P の大きなサイズによる漏洩チャネルの一部の狭小化と関連付けられ得る。上記のように、各 P Z S A P は、コア付近の内側リングにあった。図 9 C の測定は、1 0 4 0 nm の波長で得られた。より長い 1 . 5 5  $\mu$  m の波長で  $M^2$  の測定が幾らか向上したことが観察された。

【 0 1 1 5 】

例えば、約 0 . 4 - 0 . 7 5 の好ましい範囲の  $d / r_p$  は、約 0 . 2 - 0 . 6 m の範囲の曲げ直径で約 1 . 3 より小さい好ましい  $M^2$  を与え得ることが期待される。ある実施形態では、 $M^2$  は、約 0 . 2 - 0 . 6 m の範囲の曲げ直径で約 1 . 0 5 - 1 . 7 の範囲となる。

【 0 1 1 6 】

ある実施形態では、コアに隣接した最内層の S A P は、より大きな S A P サイズを維持しつつ S A P の  $d / r_p$  を効果的に低減するように調整され得る。例えば、より少ないクラッド構成物が利用され、及び / 又はクラッド構成物間の間隔が増加され得る。そのような実施例では、モードフィールドの全体形状はやや楕円的になり得る。

【 0 1 1 7 】

図 1 0 A - 1 0 B は、それぞれ P Z 及び P M ファイバの実施例の偏波保持能力を比較するプロットである。

【 0 1 1 8 】

実施例 - L C F パルス圧縮器

P Z 又は P M ファイバ配置は、パッシブ (伝送) ファイバ又は超短波パルスレーザシステムのファイバ圧縮器として利用され得る。そのようなシステムでは、一時的に拡張されたパルス又はピコセカンドからナノセカンドの範囲の他のパルスが、より短いパルス幅に圧縮可能である。ある実施例では、周知のチャープパルス増幅技術が利用され得る。

【 0 1 1 9 】

例として、持続時間 2 . 4 6 p s の入力パルスをより短い 5 7 f s の時間長に圧縮するのに 1 . 4 m 長のファイバが 1 . 5  $\mu$  m 付近の信号波長で利用された。入力 P E R は 3 2 d B であった。出力 P E R は 2 1 d B であった。

【 0 1 2 0 】

10

20

30

40

50

ある実施例では、約 50 fs、100 fs 又は 1 ps ほどの短さに圧縮されたパルス幅が与えられてもよい。ある実施形態では、100 fs 未満のパルス幅が生成され得る。

#### 【0121】

実施例 - SM PMファイバのPER測定

一実施例では、PERが26 dBの入力光が、900 mのSM PMファイバへ出射された。出力のPERは21 dBであった。恐らくは可能となった状態間の結合に起因する5 dBのPER変化が、900 m長のファイバに沿って観察された。

#### 【0122】

実施例 - Yb添加コア偏光LCFファイバ増幅器

一実施例では、適合した率のYb添加コアの偏光漏洩チャネルファイバが作製された。ファイバ断面の一部分の画像を図11に示す。ファイバは、全部で8個のSAP要素で作製された。SAP要素は、4個のうちの2グループ(1110-a、1110-b)に配置された。4個のうちの1グループにおいて、3個のSAPが層3に、1個のSAPが層4にあり、層1はファイバコアである。層2はSAPを含まず、 $d/\rho = 0.8$ の低率構成物だけを含む。SAPに加えて、層3は、6個の $d/\rho = 0.7$ の低率構成物(1120-a、1120-b)を含む。層4は、2個のSAPを除いてほとんどがシリカガラスである。全てのSAPは、 $d_{SAP}/\rho = 0.9$ を有する。平均導波路コア直径は50  $\mu\text{m}$ であり、平均クラッド直径は400  $\mu\text{m}$ である。クラッドは、ポンプ吸収を容易にするように略六角形とされた。ファイバは、低率ポリマー被膜とともに引き出された。一構成では、4メートル長のファイバが、直径0.5 mmまで巻き付けられた。ファイバの方向付けは、SAPグループにより定義される軸が、コイル水平面に対して垂直になるように制御された。ファイバ端は、約5°に研磨された角度でフェルールをつけられた。

#### 【0123】

ファイバレーザからのパルスは、自由空間結合を使用してSMファイバからLCMの一端へ入射された。平均入力電力は、1040 nm近くの中心波長において約26 dBのPERで約24 mWであった。入力パルスの繰り返し率は約50 MHzであった。高出力レーザダイオードからの980 nmでのポンプ光は、ファイバの另一端へ自由空間結合した。約20 Wの入力ポンプ電力について、増幅された信号の約6.8 Wが得られた。出力PERは、 $M^2 < 1.2$ で約18.8 dBであった。ファイバの1つの偏波軸へ入射された信号光は増幅された。他方の(直交する)偏波軸へ入射された信号光は増幅されず、有意に誘導もされなかった。しかし、この実施例では、単向性ポンピング配置によってもたらされる増幅自然放出(ASE)に起因し得る直交した偏波軸に低レベル背景が認められた。この実施例は、実質的に単一偏波及び高消光比を有するパルスを出力するような方法で、選択的に偏光入力パルスを増幅する能力を示す。例えば、偏光入力パルス及び20 dBを超える増幅器利得で、約15 dBから25 dBの範囲に増幅器出力でのPERを得ることができる。 $M^2$ の範囲が約1.05から約1.2未満及び1.8未満であることに例示されたように、偏光出力パルスは良好なビーム品質を示した。

#### 【0124】

実施例 - PM及びPZ LCFについての複屈折モデル結果

一実施例では、市販の有限要素解析プログラム(FemSIMシノブシス社から入手可能なRSoft)を利用して、モードプロファイル及び有効モード率 $n_{eff}$ を、非PM及びPM LCFファイバについて計算した。ソフトウェアにより、ユ-ザは、基本モード横方向電界(TE)及び横方向磁界(TM)偏波状態の $n_{eff}$ に熱的に誘発される応力の影響をシミュレート可能になった。モード複屈折Bは、 $B = n_{eff\_TE} - n_{eff\_TM}$ により計算される。Bは、PM/PZファイバのPERを予測するための良好な代替として使用され得る。システム上の他の外乱又はファイバインデックスプロファイルの詳細を考慮することなく、 $B > 0$ の値はPMの性質をもたらし、より大きな値のBは偏光の性質をもたらし。

#### 【0125】

モデルシステムのセットアップにおいて、及び有用な近似値を得るため、未知の材料の

性質についていくつかの仮定がなされた。溶融シリカについて、ヤング係数  $Y_{SiO_2}$ 、ポワソン比  $\nu_{SiO_2}$ 、熱膨張係数 ( $\alpha_{SiO_2}$ ) 及び応力光学係数は周知である。低率構成物の中のフッ素添加シリカについての同様の値 ( $Y_{LI}$ 、 $\nu_{LI}$ 、 $\alpha_{LI}$ ) 及び SAP の中のホウ素添加シリカについての同様の値 ( $Y_{SAP}$ 、 $\nu_{SAP}$ 、 $\alpha_{SAP}$ ) は周知ではない。妥当な仮定は、 $Y_{SiO_2} = Y_{LI} = Y_{SAP}$  及び同様に  $\nu_{SiO_2} = \nu_{LI} = \nu_{SAP}$  である。この実施例では、 $\alpha_{SiO_2} = 5.4 \times 10^{-7}$ 、 $\alpha_{LI} = 6 \times 10^{-7}$  と仮定された。 $\alpha_{SAP}$  についての値を得るため、標準シングルモード PM ファイバ (Nufern 社, East Granby, CT にて入手可能な Nufern PM980) に対する B が最初に計測され、 $B = 3.8 - 3.9 \times 10^{-4}$  であった。PM980 の幾何構造及びインデックスプロファイルを使用してモデルが作成され、 $\alpha_{SAP}$  の値を、モデルの B が計測された B に一致するまで調整した。約  $1.3 \times 10^{-6}$  の  $\alpha_{SAP}$  の値は、あり得る SAP の組成 (ホウ素添加シリカ) として妥当である。

10

#### 【0126】

以下は、先の図における幾何構造のファイバを利用したモデルで計算した複屈折 B の例の表である。

【表 1】

種々の LCF ファイバ幾何構造に対するモード複屈折の計算値

図番	FM に対する モード複屈折 B ( $\times 10^{-5}$ )	注釈
図 2A	0	非 PM ファイバ。B=0
図 2B	2.7	PM ファイバ
図 3A	13.6	PZ ファイバ
図 3B	8.7	PZ ファイバ
図 11	9.3	PZ ファイバ
該当なし	6.8	図 11 のような PM ファイバ ただし、N=4 層の SAP なし

20

#### 【0127】

特に、標準的なステップインデックス PM ファイバと比較して、これらの PM / PZ LCF の例に対する B の値は低い。モデルは、PM / PZ 移行範囲があることを示し、B が約  $7 \times 10^{-5}$  より小さければファイバは PM である。B が約  $8 \times 10^{-5}$  より大きければ LCF は PZ である。

30

#### 【0128】

モデルの利点の一例として、上記の例の Yb 添加コアで偏光 LCF ファイバ増幅器のモード複屈折が推定され、アクティブファイバとしての PZ の性質の予測をもたらした。

#### 【0129】

実施例：クラッド材料のインデックス均一性

大きなコアのファイバ作製において、インデックス均一性が考慮されるべきである。例えば、米国特許第 7450813 号、発明の名称「Rare earth doped and large effective area optical fibers for fiber lasers and amplifiers」は、インデックス非均一性の影響を開示する。米国特許第 7450813 号 ('813) は、開示する全てについてその全体において参照によりここに取り込まれる。例えば、'813 はインデックス非均一性の影響について検討し、局所化された導波路の形成を含み、インデックス均一性を得るための方法を特定する。'813 の少なくとも第 5 欄 28 行 - 第 6 欄 34 行を参照。偏光 (PZ) 又は偏波保持 (PM) 漏洩チャネルファイバのある好ましい実施形態では、コアを囲むクラッド材料の均一性は、約  $5 \times 10^{-5}$ 、約  $1 \times 10^{-5}$  又は約  $5 \times 10^{-6}$  よりも良好となり得る。

40

#### 【0130】

ここで使用される条件付きの文言、例えば、特に「can」、「could」、「may」、「might」、「例えば」などは、特に指定のない限り、又は使用される文脈で

50

他のように理解されない限り、通常、ある構成、要素及び／又はステップを、ある実施形態は含み、他の実施形態は含まないことを伝えること意図している。したがって、そのような条件付きの文言は、一般に、構成、要素及び／若しくはステップが１以上の実施形態に対して何らかの態様で要求されること、又はこれらの構成、要素及び／若しくはステップが任意の特定の実施形態に含まれ、若しくは実行されるべきかを著者の記入若しくは助言の有無にかかわらず決定するための論理を１以上の実施形態が必ず含むこと示唆するものではない。用語「備える」、「含む」、「有する」などは同意語であり、包含的に拡張可能な方法で使用され、追加の要素、構成、行為、動作などを排除しない。また、用語「又は」は、その包含的な意味で（排他的な意味ではなく）使用され、例えば、要素の列挙をつなぐために使用される場合、用語「又は」は、列挙された要素のうちの１つ、一部又は全部を意味する。さらに、この出願及び添付の請求項で使用される冠詞「a」及び「an」は、他に指定されない限り「１以上」又は「少なくとも１つの」を意味するよう解釈されるべきである。ここでは、項目の列挙の「少なくとも１つの」に言及する表現は、それら要素の任意の組合せのことであり、１要素の場合を含む。例として、「少なくとも１つのA、B又はC」は、A、B、C、A及びB、A及びC、B及びC並びにA、B及びCを含むものとする。例えば、「少なくとも１つのX、Y及びZ」のような連結的な表現は、あるいは、特に指定のない限り、通常使用される文脈で、項目、用語などが少なくとも１つのX、Y又はZとなり得ることを伝えるものとして理解される。したがって、このような連結的な表現は、ある実施形態が少なくとも１つのX、少なくとも１つのY及び少なくとも１つのZの各々が存在することを要求するという意味を一般に意図するものではない。

#### 【0131】

ここに記載される実験例、実験データ、表、グラフ、プロット、写真、図並びに処理及び／又は動作パラメータ（例えば値及び／又は範囲）は、開示されたファイバの構成又は動作条件の説明となるものであり、ここで開示されたファイバの様々な実施形態についての構成又は動作条件の範囲を限定する意図はない。さらに、実験、実験データ、計算データ、表、グラフ、プロット、写真、図及びここで開示された他のデータは、開示されたファイバの実施形態における様々なレジームを示し、そのレジームにおいて、開示されたファイバの実施形態は、１以上の所望の結果を生じるよう効果的に動作し得る。そのような動作レジーム及び所望の結果は、例えば表、グラフ、プロット、図又は写真に示された動作パラメータ、条件又は結果の特定の値のみに制限されず、これら特定の値を含む又は値に亘る適切な範囲も含む。したがって、ここで開示された値は、表、グラフ、プロット、図、写真などに記載又は表示された任意の値（又は上下限）間の範囲の値の全部を含む。さらに、ここで開示された値は、表、グラフ、プロット、図、写真などに記載又は表示された他の値により示されるように、表、グラフ、プロット、図、写真などに記載又は表示された任意の値の上方又は下方の範囲を含む。また、ここで開示されたデータは、１以上の効果的な動作範囲及び／又はある実施形態についての１以上の所望の結果を確認し得るが、全ての実施形態が、そのような動作範囲それぞれで動作可能である必要はなく、そのような所望の結果それぞれを生じる必要はないことを理解されるべきである。また、開示されたファイバの他の実施形態は、異なって構成され、又は実験例、実験データ、表、グラフ、プロット、写真、図及びここでの他のデータに関連して図示及び記載されたものとは異なる動作レジームで動作し、及び／若しくは異なる結果を生じる。

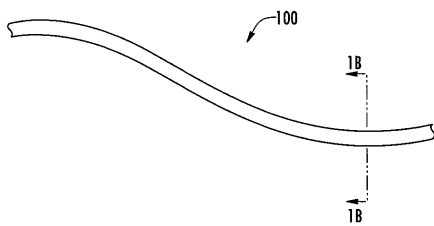
#### 【0132】

本開示を概説する目的のために、所定の形態、効果及び新規の構成がここに記載される。しかし、必ずしも全てのそのような効果が、特定の実施形態において達成され得るわけではないことが理解されるべきである。したがって、所定の実施例は、ここで教示又は示唆され得るように、必ずしも他の効果を達成することなく１以上の効果を達成する態様で具体化又は実施され得る。いずれの構成又は構成群も各実施形態について必須又は必要ではない。構成は、図示又は記載したものとは異なるように追加、削除又は調整され得る。

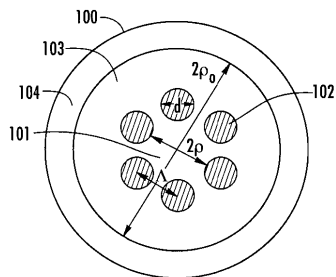
#### 【0133】

したがって、所定の実施形態のみが特にここで具体的に記載されるが、本発明の精神及び範囲から逸脱することなく多数の変更がなされ得ることは明らかである。さらに、頭字語は、明細書及び請求項の可読性を高めるためにのみ使用される。これらの頭字語は、使用される用語の一般性を弱めることを意図していないことに留意すべきであり、請求項の範囲をそこに記載される実施形態に限定するものと解釈されるべきではない。

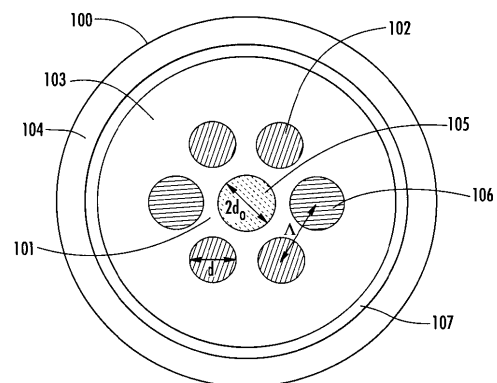
【図 1 A】



【図 1 B】

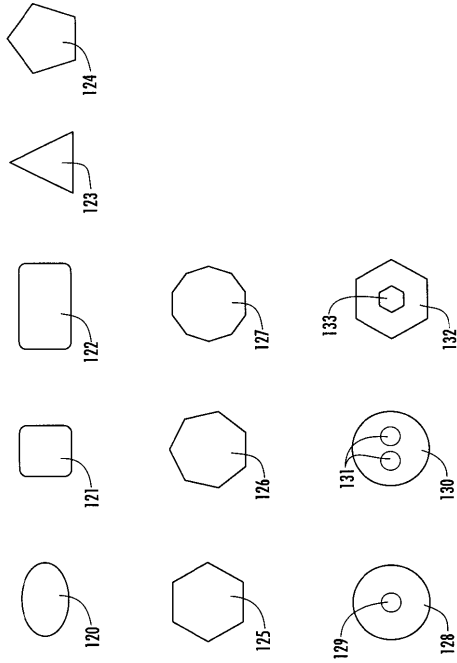


【図 1 C】

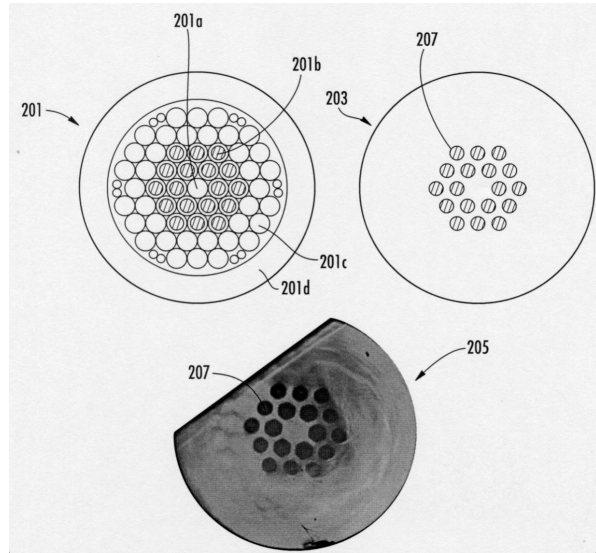




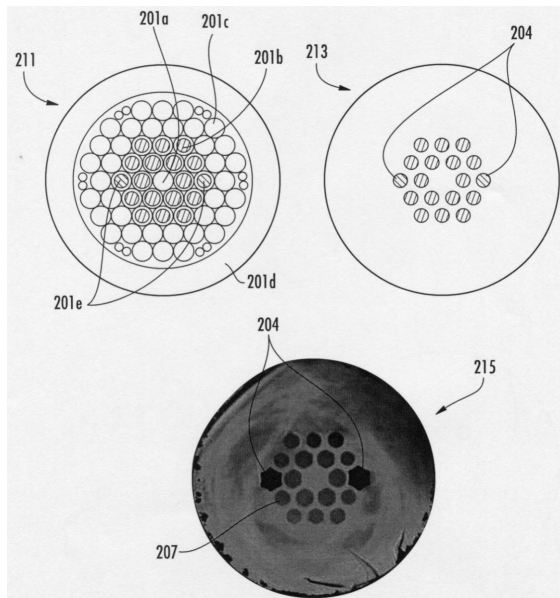
【図 1 D】



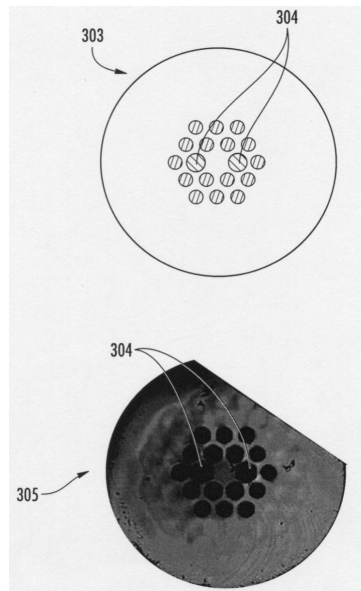
【図 2 A】



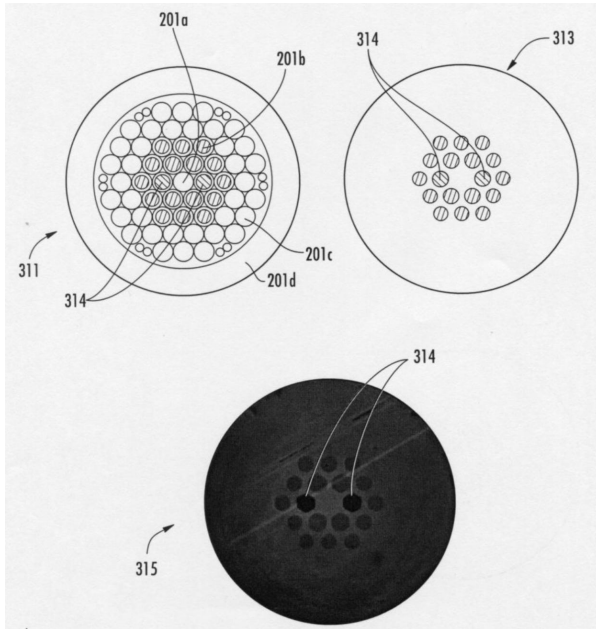
【図 2 B】



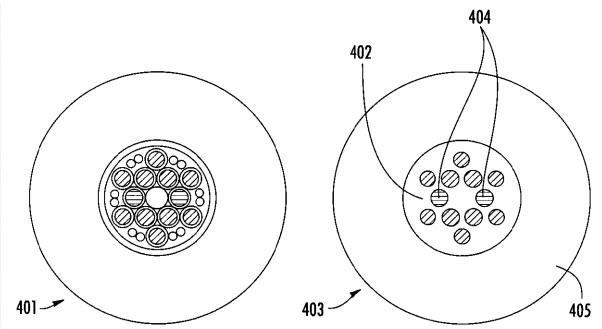
【図 3 A】



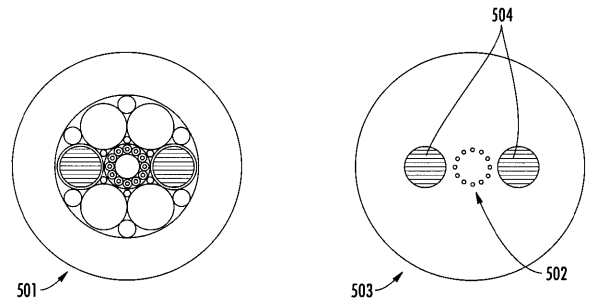
【図 3 B】



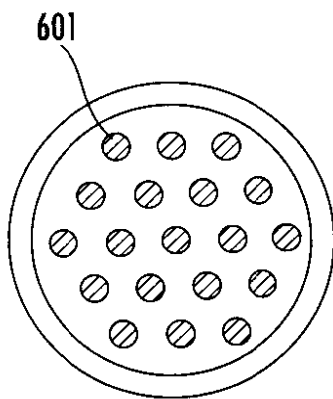
【図 4】



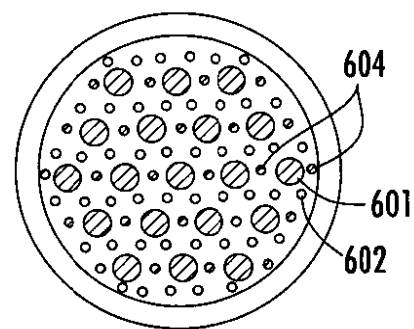
【図 5】



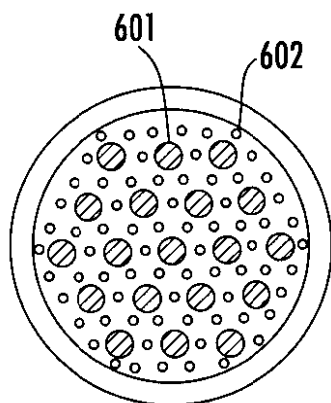
【図 6 A】



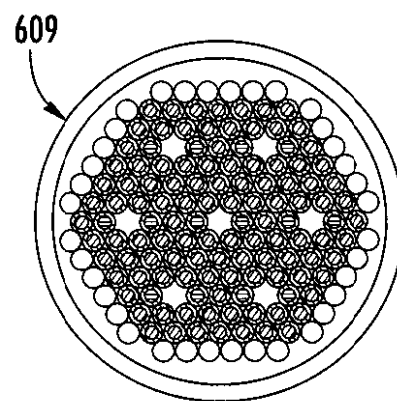
【図 6 C】



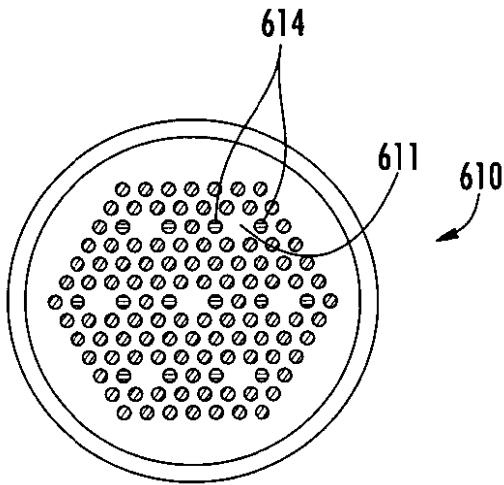
【図 6 B】



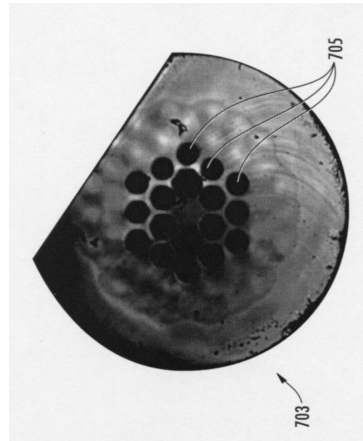
【図 6 D】



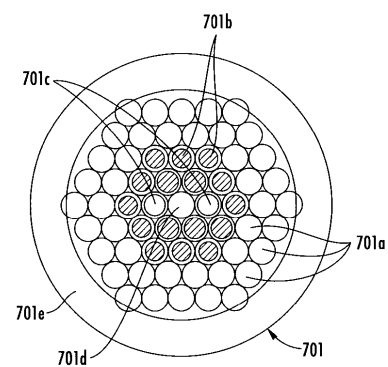
【図 6 E】



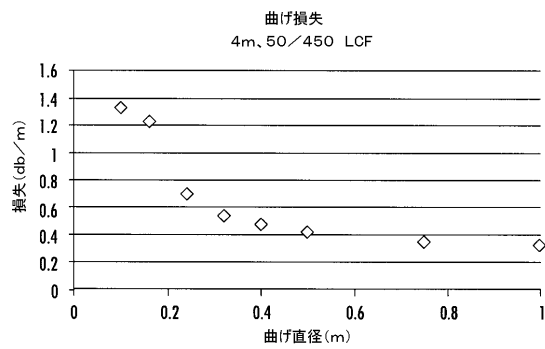
【図 7 B】



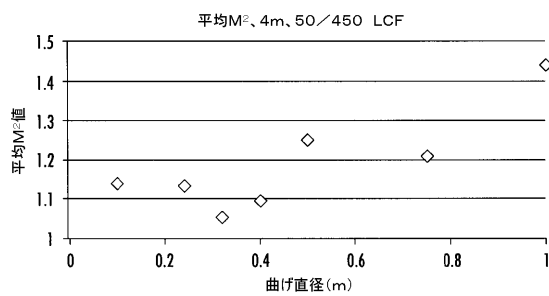
【図 7 A】



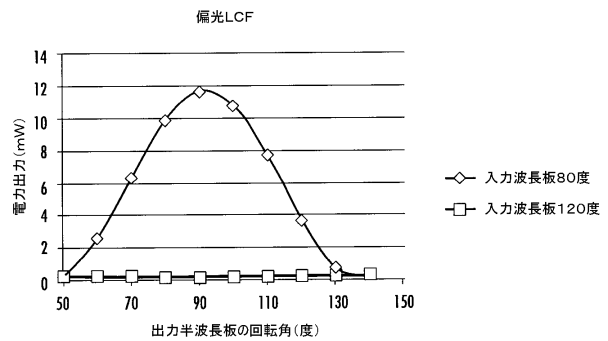
【図 8 A】



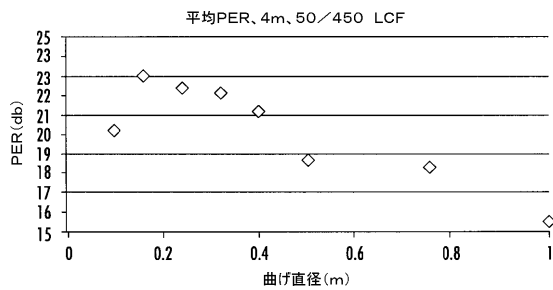
【図 8 B】



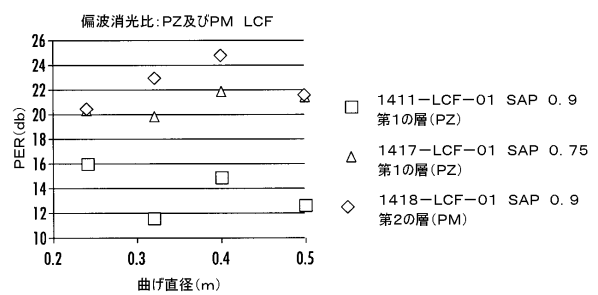
【図 8 D】



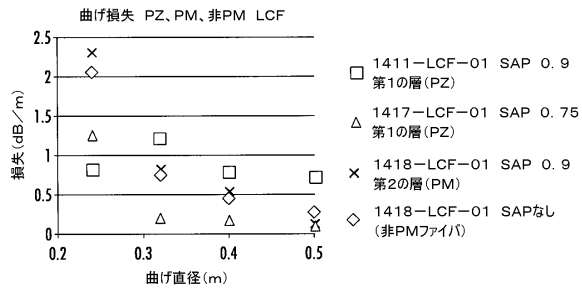
【図 8 C】



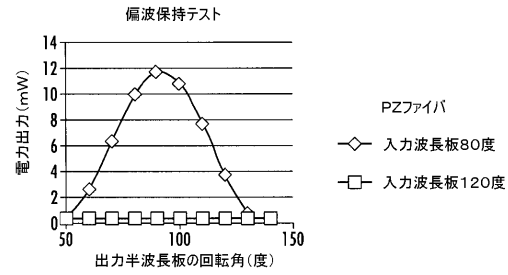
【図 9 A】



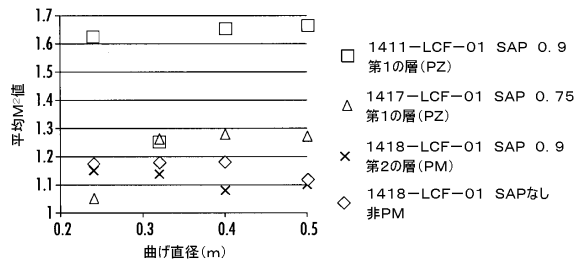
【図 9 B】



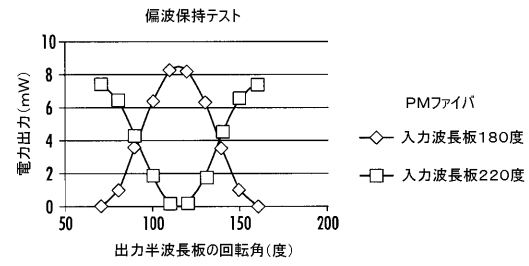
【図 10 A】



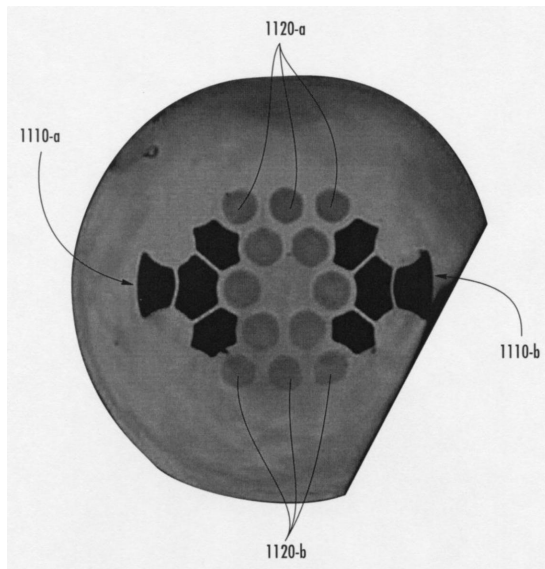
【図 9 C】



【図 10 B】



【図 11】



## フロントページの続き

(72)発明者 鈴木 茂

アメリカ合衆国 48105 ミシガン, アンアーバー, ウッドリッジ アヴェニュー 1044

(72)発明者 マッケイ, ヒュー, エー.

アメリカ合衆国 48105 ミシガン, アンアーバー, ウッドリッジ アヴェニュー 1044

(72)発明者 フェルマン, マーティン, イー.

アメリカ合衆国 48105 ミシガン, アンアーバー, ウッドリッジ アヴェニュー 1044

審査官 野口 晃一

(56)参考文献 特開2011-237796(JP, A)

特表2012-511260(JP, A)

特表2010-541006(JP, A)

特開2008-078629(JP, A)

特表2011-512653(JP, A)

DONG et al., Ytterbium-doped all glass leakage channel fibers with highly fluorine-doped silica pump cladding, OPTICS EXPRESS, 米国, OSA Publishing, 2009年 5月13日, Vol. 17, No. 11, pp.8962-8969

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G02B 6/02 - 6/036

6/10

6/44

H01S 3/00 - 3/02

3/04 - 3/0959

3/098 - 3/102

3/105 - 3/131

3/136 - 3/213

3/23 - 4/00