

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第6831370号
(P6831370)

(45) 発行日 令和3年2月17日 (2021.2.17)

(24) 登録日 令和3年2月1日 (2021.2.1)

(51) Int. Cl.

F I

G O 2 B 6/02 (2006.01)

G O 2 B 6/02 4 5 1

G O 2 F 1/365 (2006.01)

G O 2 F 1/365

G O 2 B 6/032 (2006.01)

G O 2 B 6/02 3 5 6 A

C O 3 B 37/012 (2006.01)

G O 2 B 6/032 Z

C O 3 B 37/012 Z

請求項の数 23 (全 21 頁)

(21) 出願番号 特願2018-510890 (P2018-510890)
 (86) (22) 出願日 平成28年8月24日 (2016.8.24)
 (65) 公表番号 特表2018-533042 (P2018-533042A)
 (43) 公表日 平成30年11月8日 (2018.11.8)
 (86) 国際出願番号 PCT/EP2016/001424
 (87) 国際公開番号 W02017/032454
 (87) 国際公開日 平成29年3月2日 (2017.3.2)
 審査請求日 令和1年5月13日 (2019.5.13)
 (31) 優先権主張番号 15002534.4
 (32) 優先日 平成27年8月26日 (2015.8.26)
 (33) 優先権主張国・地域又は機関
 欧州特許庁 (EP)

(73) 特許権者 512247223
 マックス・プランク・ゲゼルシャフト ツ
 ール フェルデルング デル ヴイツセン
 シヤフテン エー ファウ
 MAX-PLANCK-GESELLSC
 HAFT ZUR FOERDERUNG
 DER WISSENSCHAFTEN
 E. V.
 ドイツ連邦共和国 80539 ミュンヘ
 ン ホーフガルテンシュトラッセ 8
 Hofgartenstrasse 8,
 80539 Muenchen, B
 undesrepublik Deuts
 chland

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 中空コア・ファイバおよびその製造方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

非バンドギャップ型の中空コア・ファイバ (100) であって、

前記中空コア・ファイバ (100) に沿って軸方向に伸び最小横コア寸法 (D) を有し、横基本コア・モードおよび複数の横高次コア・モードを導くよう適合化された中空コア領域 (10) と、

前記中空コア・ファイバ (100) に沿って前記コア領域 (10) を取り囲み、各々が最小横反共振要素寸法 (d_i) を有し複数の横反共振要素モードを導くよう適合化された入れ子状でない複数の反共振要素 (ARE) (21、21A、21B)、の配置を含む内側クラッド領域 (20) と、
 を含み、

前記最小横コア寸法 (D) は前記コア領域の直径方向の両側の反共振要素間の最小距離であり、

前記最小横反共振要素寸法 (d_i) は、前記反共振要素の最小内側横断寸法であり、

前記コア領域 (10) および前記反共振要素 (21、21A、21B) は、前記高次コア・モードおよび前記反共振要素モードの位相整合を形成するよう構成され、

前記反共振要素寸法 (d_i) および前記コア寸法 (D) は、前記反共振要素寸法と前記コア寸法の比 (d_i / D) が、各第1種ベッセル関数の各ゼロ点の商 ($u_{1m, ARE} / u_{1m, core}$) に0.9乃至1.5の範囲の適合係数を乗じたものに近似するように、選択され、ここで、mは、次数1の第1種ベッセル関数のm番目のゼロ点であり、前記

各ベッセル関数の前記各ゼロ点は、それぞれ LP_{1m} 反共振要素モードおよび LP_{1m} 高次コア・モードを記述するものであり、

前記コア領域と前記複数の反共振要素は、基本コアモードの中空コア・ファイバ透過窓内の波長をカバーする広帯域波長範囲で、高次コアモードと ARE モードの位相整合を提供するように構成されており、

前記反共振要素 (21、21A) は、第1の最小横反共振要素寸法 (d_1) を有し、

前記第1の反共振要素寸法と前記コア寸法の比 (d_1/D) が、0.62乃至0.745の範囲で選択されるものである、中空コア・ファイバ。

【請求項2】

前記コア領域を取り囲む前記反共振要素は非接触形態で配置されるものである、請求項1に記載の中空コア・ファイバ。

【請求項3】

— 第1群の前記反共振要素 (21A) が、前記第1の反共振要素寸法 (d_1) を有し、
— 第2群の前記反共振要素 (21B) が、前記第1群の前記反共振要素 (21A) の前記第1の反共振要素寸法 (d_1) より小さい第2の最小横反共振要素寸法 (d_2) を有し、

— 前記第2の反共振要素寸法と前記コア寸法の比 (d_2/D) が、各第1種ベッセル関数の各ゼロ点の商 ($u_{01, ARE}/u_{21, core}$) に前記適合係数を乗じたものに近似され、前記各ベッセル関数 ($u_{01, ARE}$) ($u_{21, core}$) は、それぞれ LP_{01} 反共振要素モードおよび LP_{21} コア・モードを記述するものである、請求項1または2に記載の中空コア・ファイバ。

【請求項4】

前記第2の反共振要素寸法と前記コア寸法の比 (d_2/D) が、0.3乃至0.7の範囲で選択されるものである、請求項3に記載の中空コア・ファイバ。

【請求項5】

前記第2の反共振要素寸法と前記コア寸法の比 (d_2/D) が、0.45乃至0.54の範囲で選択されるものである、請求項3に記載の中空コア・ファイバ。

【請求項6】

前記反共振要素 (21、21A、21B) の数が、3、4、5、6または7である、請求項1乃至5のいずれかに記載の中空コア・ファイバ。

【請求項7】

前記反共振要素 (21、21A、21B) の配置は、

— 前記反共振要素 (21、21A、21B) の配置が3回対称性を有する、
— 前記反共振要素 (21、21A、21B) の配置が2回対称性を有し光学的複屈折を生じさせる、
— 前記反共振要素 (21、21A、21B) が、その断面が前記コア領域 (10) を包囲する単一のリング上に分散配置されるように、配置されている、
— 前記反共振要素 (21、21A、21B) が、その断面が前記コア領域 (10) を包囲する複数のリング上に分散配置されるように、配置されている、
という特徴の中の少なくとも1つの特徴を有するものである、請求項1乃至6のいずれかに記載の中空コア・ファイバ。

【請求項8】

前記反共振要素 (21、21A、21B) は、

— 前記反共振要素 (21、21A、21B) が、円形、楕円形または多角形の横断面を有する、
— 前記反共振要素 (21、21A、21B) が、ガラス製、特にシリカまたはZBLAN製、ポリマー製、特にPMMA製、複合材製、金属製、または結晶材料製である、
という特徴の中の少なくとも1つの特徴を有するものである、請求項1乃至7のいずれかに記載の中空コア・ファイバ。

【請求項 9】

前記コア領域（10）および前記反共振要素（21、21A、21B）の中の少なくとも1つは、排気され、または、非線形光応答性を有する、気体、特に空気または希ガスまたは水素のうちの少なくとも1つ、液体、および固体の中の少なくとも1つが充填されている、請求項1乃至8のいずれかに記載の中空コア・ファイバ。

【請求項 10】

ー 前記中空コア・ファイバ（100）に沿って前記内側クラッド領域（20）を包囲する外側クラッド領域（30）を含む、請求項1乃至9のいずれかに記載の中空コア・ファイバであって、

ー 前記外側クラッド領域（30）は多角形の形状の横断面を有し、

ー 前記反共振要素（21、21A、21B）は、前記多角形の形状の角部に配置されているものである、

中空コア・ファイバ。

10

【請求項 11】

ー 前記中空コア・ファイバ（100）に沿って前記内側クラッド領域（20）を包囲する外側クラッド領域（30）を含む、請求項1乃至9のいずれかに記載の中空コア・ファイバであって、

ー 前記外側クラッド領域（30）は、湾曲した形状、特に円形の形状、の横断面を有し、

ー 前記反共振要素（21、21A、21B）は、前記湾曲した形状に均等に分散配置されるものである、

中空コア・ファイバ。

20

【請求項 12】

前記コア領域（10）および前記反共振要素（21、21A、21B）は、広帯域波長範囲における前記高次コア・モードと前記反共振要素モードの位相整合を形成するよう構成されているものである、請求項1乃至11のいずれかに記載の中空コア・ファイバ。

【請求項 13】

前記コア領域（10）および前記反共振要素（21、21A、21B）は、前記基本コア・モードの中空コア・ファイバ透明窓内で全波長までをカバーする波長範囲における前記高次コア・モードと前記反共振要素モードの位相整合を形成するよう構成されているものである、請求項12に記載の中空コア・ファイバ。

30

【請求項 14】

前記コア領域（10）および前記反共振要素（21、21A、21B）は、少なくとも10THzをカバーする波長範囲における前記高次コア・モードと前記反共振要素モードの位相整合を形成するよう構成されているものである、請求項12または13に記載の中空コア・ファイバ。

【請求項 15】

請求項1乃至14のいずれかに記載の中空コア・ファイバを少なくとも1つ含む光デバイス。

【請求項 16】

ー モード・フィルタリング・デバイス、

ー 光源（210）、特にレーザ、

ー 光増幅器、

ー ビーム供給システム、

ー パルス整形器、特にパルス圧縮用のパルス整形器、

ー データ通信システム、および

ー 周波数変換器、特にスーパーコンティニウム生成用の周波数変換器、

の中の少なくとも1つを含む、請求項15に記載の光デバイス。

40

【請求項 17】

非バンドギャップ型の中空コア・ファイバ（100）を製造する方法であって、

50

ー 前記中空コア・ファイバ（１００）に沿って軸方向に伸び最小横コア寸法（Ｄ）を有し、横基本コア・モードおよび複数の横高次コア・モードを導くよう適合化された中空コア領域（１０）を供給する工程と、

ー 前記中空コア・ファイバ（１００）に沿って前記コア領域（１０）を取り囲み、各々が最小横反共振要素寸法（ d_i ）を有し横反共振要素モードを導くよう適合化された入れ子状でない複数の反共振要素（ＡＲＥ）（２１、２１Ａ、２１Ｂ）、の配置を含む内側クラッド領域（２０）を供給する工程と、
を含み、

前記最小横コア寸法（Ｄ）は前記コア領域の直径方向の両側の反共振要素間の最小距離であり、

前記最小横反共振要素寸法（ d_i ）は、前記反共振要素の最小内側横断寸法であり、

ー 前記コア領域（１０）および前記反共振要素（２１、２１Ａ、２１Ｂ）は、前記高次コア・モードおよび前記反共振要素モードの位相整合を形成するよう構成され、

ー 前記反共振要素寸法（ d_i ）および前記コア寸法（Ｄ）は、前記反共振要素寸法と前記コア寸法の比（ d_i / D ）が、各第１種ベッセル関数の各ゼロ点の商（ $u_{1m, ARE} / u_{1m, core}$ ）に０．９乃至１．５の範囲の適合係数を乗じたものに近似するように、選択され、ここで、 m は、次数１の第１種ベッセル関数の m 番目のゼロ点であり、前記各ベッセル関数の前記各ゼロ点は、それぞれ LP_{1m} 反共振要素モードおよび LP_{1m} 高次コア・モードを記述するものであり、

前記コア領域と前記複数の反共振要素は、基本コアモードの中空コア・ファイバ透過窓内の波長をカバーする広帯域波長範囲で、高次コアモードとＡＲＥモードの位相整合を提供するように構成されており、

前記反共振要素（２１、２１Ａ）は、第１の最小横反共振要素寸法（ d_1 ）を有し、

前記第１の反共振要素寸法と前記コア寸法の比（ d_1 / D ）が、０．６２乃至０．７４５の範囲で選択されるものである、
方法。

【請求項１８】

前記中空コア・ファイバ（１００）は、請求項１乃至１４のいずれかに記載の中空コア・ファイバ（１００）の特徴を有するように製造される、請求項１７に記載の方法。

【請求項１９】

前記反共振要素寸法（ d_i ）は、解析モデルを適用することによって選択され、前記コア領域（１０）および前記反共振要素（２１、２１Ａ、２１Ｂ）は複数のキャピラリとして処理され、前記キャピラリにおける LP_{1m} モードにおけるモード屈折率が次式で近似され、

【数１】

$$n_{1m} = \sqrt{1 - \left(\frac{u_{1m}}{\pi f_s} \right)^2 \left(\frac{\lambda}{d_i} \right)^2}$$

ここで、 u_{1m} はベッセル関数 J_1 の m 番目のゼロ点であり、 d_i は前記キャピラリの内径であり、前記パラメータ f_s は経験則的な適合パラメータである。

請求項１７または１８に記載の方法。

【請求項２０】

（ａ）複数の反共振要素プリフォーム（２３）および中空ジャケット・プリフォーム（３２）を供給する工程と、

（ｂ）前記複数の反共振要素プリフォーム（２３）を、前記ジャケット・プリフォーム（３２）の内面に分散配置形態で固定する工程と、

（ｃ）前記反共振要素寸法および前記コア寸法が得られるまで、前記複数の反共振要素プリフォーム（２３）を含む前記ジャケット・プリフォーム（３２）を加熱して引き出す工程と、

を含む、請求項１７乃至１９のいずれかに記載の方法。

【請求項 2 1】

前記工程 (c) は、

(c 1) 前記複数の反共振要素プリフォーム (2 3) を含む前記ジャケット・プリフォーム (3 2) を加熱してケインとすること、および

(c 2) 前記反共振要素寸法およびコア寸法が得られるまで、前記ケインを加熱して引き出すこと

を含むものである、請求項 2 0 に記載の方法。

【請求項 2 2】

前記工程 (c) は、

前記反共振要素寸法および前記コア寸法を得るために、前記ジャケット・プリフォーム (3 2) および前記複数の反共振要素プリフォーム (2 3) または前記ケインの複数の中空領域の中の少なくとも 1 つについて、負圧または増大された圧力を加える工程を含むものである、請求項 2 1 に記載の方法。

【請求項 2 3】

前記コア領域 (1 0) および前記反共振要素 (2 1、2 1 A、2 1 B) の中の少なくとも 1 つに、非線形光応答性を有する、気体、特に空気または希ガスまたは水素、液体、および固体の中の 1 つを充填する後処理工程を含む、請求項 2 1 または 2 2 に記載の方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0 0 0 1】

本発明は、非バンドギャップ型の中空コア・ファイバ (hollow-core fibre) (H C F、または中空コア・フォトニック結晶ファイバ (hollow-core photonic crystal fiber) : H C - P C F) (または中空コア反共振反射ファイバ (hollow-core anti-resonant-reflecting fiber) : H C - A F) に関し、特に、軸方向の中空コア領域と、そのコア領域を取り囲む複数の反共振要素 (anti-resonant elements) (A R E s) の配置または配列を含む内側クラッド領域と、を有する非バンドギャップ型の中空コア・ファイバ (または中空コア反共振反射ファイバ) に関する。さらに、本発明は、少なくとも 1 つの H C - A F を含む光デバイス、および非バンドギャップ型の H C F を製造する方法に関する。

【0 0 0 2】

本発明の適用例は、データ伝送、特に低遅延データ伝送、高パワー (出力) ビーム供給システム、特に材料処理用のもの、モード・フィルタリング (濾波)、気体系非線形光学、特に紫外線乃至赤外線のスーパコンティニウム (S C) 発生または超短パルスの生成、ファイバ・ジャイロスコープまたは化学センシングの各分野において利用可能である。

【背景技術】

【0 0 0 3】

本明細書において、導光ファイバの技術的背景、特にバンドギャップ型または非バンドギャップ型の H C F の技術的背景、を示す以下の従来技術が参照される。

[1] T.A. Birks et al., "Optics Letters" 1997. 22(13): p.961-963、

[2] N. A. Mortensen et al., "Optics Letters" 2003. 28(20): p.1879-1881、

[3] 米国特許出願公開第 2 0 1 5 / 0 1 0 4 1 3 1 号、

[4] P. J. Roberts et al., "Optics Express" 2005. 13(1): p.236-244、

[5] J. K. Lyngso et al., "22nd International Conference on Optical Fiber Sensors" Pts 1-3, 2012. 8421、

[6] J. M. Fini et al., "Nature Communications" 2014. 5: article number 5085、

[7] F. Couny et al., "Optics Letters" 2006. 31(24): p.3574-3576、

[8] B. Debord et al., "Optics Letters" 2014. 39(21): p.6245-6248、

[9] W. Belardi et al., "Optics Express" 2014. 22(8): p.10091-10096、

[10] W. Belardi et al., "arXiv:1501.00586v2" 2015: p.[physics.optics]、

[11] P. Jaworski et al., "Optics Express" 2015. 23(7): p.8498-8506、

- [12] A. Hartung et al., "Optics Express" 2014. 22(16)、
- [13] Benabid, A.F., et al., Hollow-core photonic crystal fibre, in US patent 8306379 B2, GLOphotonics SAS、
- [14] F. Poletti, "Optics Express" 2014. 22(20): p.23807-23828、
- [15] T. G. Euser et al., "Optics Express" 2008. 16(22): p. 17972-17981、
- [16] E. A. J. Marcatili et al., "Bell Systems Technical Journal" 1964. 43: p.1783-1809、
- [17] J. M. Fini et al., "Optics Express" 2013. 21(5): p.6233-6242、
- [18] C. Wei et al., "Optics Express" 2015. 23: p.15824、
- [19] A. Hartung et al., "Optics Letters" 2015. 40(14): p.3432. 10
- 【先行技術文献】
- 【特許文献】
- 【0004】
- 【特許文献1】米国特許出願公開第2015/0104131号
- 【特許文献2】米国特許第8306379号
- 【0005】
- 【非特許文献1】T.A. Birks et al., "Optics Letters" 1997. 22(13): p.961-963
- 【非特許文献2】N. A. Mortensen et al., "Optics Letters" 2003. 28(20): p.1879-1881
- 【非特許文献3】P. J. Roberts et al., "Optics Express" 2005. 13(1): p.236-244 20
- 【非特許文献4】J. K. Lyngso et al., "22nd International Conference on Optical Fiber Sensors" Pts 1-3, 2012. 8421
- 【非特許文献5】J. M. Fini et al., "Nature Communications" 2014. 5: article number 5085
- 【非特許文献6】F. Couny et al., "Optics Letters" 2006. 31(24): p.3574-3576
- 【非特許文献7】B. Debord et al., "Optics Letters" 2014. 39(21): p.6245-6248
- 【非特許文献8】W. Belardi et al., "Optics Express" 2014. 22(8): p.10091-10096
- 【非特許文献9】W. Belardi et al., "arXiv:1501.00586v2" 2015: p.[physics.optics]
- 【非特許文献10】P. Jaworski et al., "Optics Express" 2015. 23(7): p.8498-8506 30
- 【非特許文献11】A. Hartung et al., "Optics Express" 2014. 22(16)
- 【非特許文献12】F. Poletti, "Optics Express" 2014. 22(20): p.23807-23828
- 【非特許文献13】T. G. Euser et al., "Optics Express" 2008. 16(22): p.17972-17981
- 【非特許文献14】E. A. J. Marcatili et al., "Bell Systems Technical Journal" 1964. 43: p.1783-1809
- 【非特許文献15】J. M. Fini et al., "Optics Express" 2013. 21(5): p.6233-6242
- 【非特許文献16】C. Wei et al., "Optics Express" 2015. 23: p.15824
- 【非特許文献17】A. Hartung et al., "Optics Letters" 2015. 40(14): p.3432 40
- 【発明の開示】
- 【0006】

中実（ソリッド）コア・ファイバは、一般的に知られており、例えばデータ通信の適用例において、広く使用されている。中実コア・ファイバは、例えば石英ガラスのようなファイバ材料の広帯域伝送の領域において、低損失シングル（単一）モード伝送用に設計することができる。中実コア・フォトニック結晶ファイバ（PCF）では、図7A（従来技術）に示すように、中実コア（芯材）を包囲するクラッド構造を工学的に設計することによって、所謂エンドレス・シングル・モード導光（誘導）（endlessly single-mode guidance）（ESM、即ち、全ての高次のモード（higher order modes）：HOM（HOMs）が漏洩的（漏光性）であり、一方、基本LP₀₁モードは完全に閉じ込められる）が達成さ

れていて、クラッド構造の複数のチャンネルの直径 d およびそれらの中心－中心間隔（ピッチ） Λ は幾何学的条件 $d/\Lambda < 0.41$ を満たすようになっている（文献〔1、2〕）。しかし、固体ファイバ材料中での導光に起因して、データ伝送における遅延の増大、新しい光周波数を生じさせる非線形光学効果（optically non-linear effects）、および相対的に低い損傷閾値の点で、欠点が存在する。

【0007】

中空コア・フォトニック結晶ファイバ、HC-PCFは、真空化（排気）され（真空コア）または気体が充填されまたは液体が充填された非中実コア領域において光を導波する能力によって、中実コア・ファイバと比較して固有の利点を有し、その結果として、例えば、低遅延データ伝送、高パワー・ビーム供給、気体系非線形光学、超低非線形性での導光、および化学的センシングのような応用分野が得られる。HC-PCF類は、典型的には、物理的導波（誘導）機構に応じて、2つのクラス：中空コア・フォトニック・バンドギャップ・ファイバ（HC-PBFS）および中空コア反共振反射ファイバ（HC-AFS）、に分類される。

【0008】

図7B～7I（従来技術）は、異なるタイプ（種類）の通常の複数のHC-PCFの走査電子顕微鏡写真の選集を示している。図7Bおよび7Cは、クラッドにおけるフォトニック・バンドギャップによって中心中空コア内に複数のモードを閉じ込める複数のHC-PBFを示している〔文献4～6〕。これらのタイプのPCFは、典型的には、遠隔通信波長において相対的に低い損失（約20 dB/km未満）を有する。しかし、フォトニック・バンドギャップの波長固有の効果に起因して、それらは、相対的に狭い帯域幅（約15 THz未満）で光を導くに過ぎない。一般的に、HC-PBFはHOMを支持（下支え）するが、フィニ氏（Fini）他の文献（文献〔6、3〕）には、曲げたHC-PBFが、クラッド内に複数の“サテライト”（satellite：周辺部）中空コアを含ませることによって実効的シングル・モードにすることができていることが示されている（図7B）。これらのサテライト部は、それらに位相整合することによってコアにおけるHOMを強く抑制して、それによって高いHOM損失が生じる。また、充分小さいコアが使用される場合には、HC-PBGを狭いスペクトル範囲（約7 THz未満）で真のシングル・モードにすることができるが（図7C参照）〔文献5〕、この結果、製造上の困難が生じ、所望の基本モードにおいてかなりより高い損失が生じる。

【0009】

また、図7D乃至7Iは、HC-AF構造、即ち主に反共振効果に基づく導波機構を有するファイバの選集を示している。また、図7Dおよび7Eはカゴメ（籠目）格子クラッドを有し〔文献7、8、13〕、図7Fおよび7Gは、複数の単一（F）または入れ子状（nested）（G）反共振要素（ARE）からなる1つのリングを有する。図7Hは、四角形コアを有するHC-AFを示し〔文献12〕、図7Iは、紫外線における導波特性を有するHC-AFを示している〔文献19〕。HC-PBFと比較すると、HC-AFの損失は、閉じ込めが理想的でないので一般的により大きい、伝送窓がより広い。

【0010】

Fポレッティ氏（F. Poletti）によって、入れ子状ARE相互間の半径方向の距離を工学的に設計することによって、HC-AFを、限定された波長範囲で実効的シングル・モードにすることができていることが数値的に示されたが〔文献14〕、これは実験的には実証されていない。特に、或る中心波長および或る構造パラメータ z/R に関してだけ、モード抑制が文献〔14〕で示唆された。ここで、 z は、各AREとAREにおける各入れ子状構造の直径差であり、 R は、中空コアの半径である。この理論的結果は、HC-AFの一般的な設計および製造に拡張することはできない。

【0011】

また、ワイ氏（Wei）他（文献〔18〕）およびA. ハルトゥング氏（A. Hartung）他（文献〔19〕）によって、HOM抑制を増強できることが示された。これは、HC-AFにおいてAREとの接触で達成されたが、全体的なHOM抑制は相対的に低かった。文献

[18]によれば、中空コアおよび複数のAREの実効屈折率に対する接触AREの厚さ t を変化させる効果が調査された。HOMが抑制される最適な厚さが見出された。この手法の欠点として、HOM抑制は或る波長のみについて示されたが、広い波長範囲については示されなかった。

【0012】

中空コア・ファイバと比較して、通常のHC-AFの1つの特定の欠点は、単一モードとなる能力がないことであり、即ち、高次モード(HOM)が相対的に長い距離で支持(形成)されることである。その結果として、出力ビーム品質が低下し、これは、それによって、モード・ビートが生じ、焦点スポットがぼけ、ファイバが応力の変化を経た場合にパワー変動が生じるので、多くの適用例で望ましくない。通常のHC-AFの別の欠点は、その製造における制限によって生じ、特に、AREを特定の方位角位置に充分安定した再現可能な形態で配置することによって生じる。

10

【0013】

本発明の目的は、通常のHC-AFの欠点を解消することができる非バンドギャップ型の改良された中空コア・ファイバを実現することである。特に、HC-AFでは、単一モード伝送の波長範囲の拡張、HOMの損失の増大、および/または最高屈折率コアHOMと基本モード(例えば LP_{01} モード)の間の損失の比の増大が得られる。さらに、本発明の目的は、少なくとも1つのHC-AFを備え、特に、低損失単一モード導波、損傷のない高パワー光供給、および非線形光学効果の形成の目標に関して、通常の光デバイスの制限を解消(回避)する改良された光デバイス、を実現することである。さらに、本発明の目的は、改良された本発明によるHC-AFが得られ通常の製造方法の制限を回避する非バンドギャップ型の中空コア・ファイバを製造する改良された方法を実現することである。

20

【0014】

発明の概要

これらの目的は、それぞれ独立請求項の特徴を含む、非バンドギャップ型の中空コア・ファイバ、光デバイス、および非バンドギャップ型の中空コア・ファイバを製造する方法、によって達成(解決)される。本発明の有利な実施形態および適用例が従属請求項に記載されている。

【0015】

本発明の第1の一般的態様によれば、上述の目的は非バンドギャップ型の中空コア・ファイバによって達成(解決)され、その中空コア・ファイバは、中空コア・ファイバの長手方向の伸長(長さ)に沿って軸方向に配置された中空コア領域と、中空コア・ファイバの長さに沿ってコア領域を取り囲む複数の反共振要素(ARE)の配置を含む内側クラッド領域とを含むものである。そのコア領域は、HC-AFに結合された光場の横基本コア・モードおよび複数の横高次コア・モードを導く(導波する)よう適合化される。コア領域は、コア領域の直径方向の両側(対向位置)のARE間の最小距離である最小横コア寸法(D)を有する。最小横コア寸法は、HC-AFの長さに沿って一定であることが、好ましい。それらのAREの各々は、複数の横AREモードを導く(導波する)よう適合化され、 i 番目のAREは最小横ARE寸法(d_i)を有する。また、最小横ARE寸法は、HC-AFの長さに沿って一定であることが、好ましい。コア領域および複数のAREは、コア領域の複数の高次コア・モードと、複数のAREの複数のAREモードとの位相整合を形成するよう構成される。換言すれば、複数の高次コア・モードと複数のAREモードは、互いに等しいまたは互いに近似するそれぞれの屈折率を有して、それによって、それらの高次コア・モードがそれらのAREモードに共振的に結合することができるよう、即ち、それらのAREモードがそれらの高次コア・モードによって励起できるようになっている。

30

40

【0016】

本発明によるHC-AFの中空コア領域は中空コア・ファイバの内部空間によって形成され、その内部空間は空状態(empty)(排気状態)であり、または、その内部空間には

50

、非線形光応答性を有する、気体（特に、空気、希ガスおよび水素のうちの少なくとも1つ）、液体、および／または材料、例えば上述の気体類またはリュードベリ（Rydberg）ガスのうちの少なくとも1つ、が充填される。従って、“中空コア領域”という用語は、その内部空間に固体材料を含まない任意の長手方向の導波管構造をカバーする（その範囲として含む）。コア領域は、その材料によって決定される第1の屈折率を有し、一方、そのコア・モードの屈折率（または実効屈折率）は、材料屈折率、コア領域の形状、および励起波長によって、決定される。

【0017】

複数の半径方向において、コア領域は、非接触形態で配置された複数のAREによって取り囲まれる。換言すれば、内側クラッド領域は、その方位角接触（azimuthal contact）のない複数の単一AREの配置を含んでいる。“反共振要素”、ARE（または“チューブ”）または“クラッド・キャピラリ”という用語は、中空コア領域より小さい直径を有しHC-AFの長さに沿って伸びる任意の中空導波要素を指す。内側クラッド領域のAREの壁厚は、コア寸法Dの20%より小さい（例えば、5 μ m未満である）ことが好ましい。全てのAREは、同じ最小内部寸法を有することができ、または各AREは異なる最小内部寸法を有することができる。コア領域を包囲する内側クラッド領域は、コア領域の第1の屈折率より高い屈折率（第2の屈折率）を有する。複数の中空AREは、例えばコア領域のように、空状態（排気状態）であり、または、気体または液体等が充填された状態である。

【0018】

コア領域を区画する（コア領域の境界を定める）偶数回または奇数回対称で配置できる、偶数個のARE、例えば4または6つのARE、または奇数個のARE、例えば3または5または7つのAREが、設けられる。それらのAREは入れ子状でないAREであること、および／または、それらのAREは、ガラス、特にシリカ、プラスチック材料、特にポリマー、複合材、特にZBLANファイバ（繊維）複合材、金属または結晶材料で形成されることが、好ましい。それらのAREを保持するために、外側クラッド領域が設けられ、それらのAREは外側クラッド領域の内面に取り付けられることが、好ましい。

【0019】

本発明によれば、複数のARE寸法（ d_i ）の各々およびコアの寸法（D）は、ARE寸法とコア寸法の比（ d_i/D ）が、各第1種ベッセル関数の各ゼロ点（零点）の商（quotient：除算）（ $u_{1m, ARE}/u_{1m, core}$ ）に0.9乃至1.5、好ましくは0.96乃至1.20の範囲の適合係数（fitting factor：調整係数）を乗算した値、に近似するように、選択される。ここで、mは、次数1の第1種ベッセル関数のm番目のゼロ点であり、その各ベッセル関数の各ゼロ点は、それぞれLP_{1m} AREモード（複数）およびLP_{1m} 高次コア・モード（複数）をそれぞれ記述（モデル化）する。利点として、発明者たちは、エンドレス・シングル・モード中実コアPCF用の周知の d/Λ パラメータと同種の、唯一の無次元幾何学的パラメータ（ d_i/D ）に依存するモード・フィルタリング（濾波）効果を見出した。

【0020】

発明者たちは、複数のLP_{1m} AREモードおよび複数のLP_{1m} 高次コア・モードの複数のモード屈折率が、結合された複数のキャピラリ導波路（capillary waveguides）の複数のモードに基づく解析モデルによって表すことができること、を見出した。それらのモードは、それらのモードを形成するベッセル関数のゼロ点（複数）および適合係数に依存するマルカティリーシュメルツァー表現（Marcatili-Schmeltzer expression）によって、近似されるものである。複数のLP_{1m} AREモードと複数のLP_{1m} 高次コア・モードの位相整合、即ちそれらのモード屈折率（modal indices）の整合、が得られるのは、ARE寸法とコアの寸法の比（ d_i/D ）が、各第1種ベッセル関数の各ゼロ点の商（ $u_{1m, ARE}/u_{1m, core}$ ）に適合係数を乗算した値、に適合化される場合である。

【0021】

その適合係数は、 $HC-AF$ の複数の LP_{1m} AREモードおよび複数の LP_{1m} 高次コア・モードのベクトル有限要素(FE)モデルに、解析モデルを整合させることによって得られる1つのモデル・パラメータであることが、好ましい。特に、その適合係数は、複数の LP_{1m} 高次コア・モードのFEモデルに解析モデルを整合させる第1の係数と、複数の LP_{1m} AREモードのFEモデルに解析モデルを整合させる第2の係数とによる除算で得られ、それを以下で式(4)を参照して説明する。

【0022】

“近似”(approximating)(または“適合化”(adapting))という用語は、ARE寸法とコア寸法の比と、各第1種ベッセル関数の各ゼロ点の商に適合係数を乗算した値との等価性(等しい場合)、または、ARE寸法とコア寸法の比と、各第1種ベッセル関数の各ゼロ点の商に適合係数を乗算した値との間の差(差がある場合)、を含み、これ(差)は、最高屈折率コアHOMと LP_{01} コア・モードの間の損失(dB/m)の比が、5より大(>5)、特に10より大(>10)、またはさらには25より大(>25)、好ましくは50より大(>50)、となるように、最小化されるものである。

【0023】

利点として、発明者たちは、ARE寸法とコア寸法の比を選択するための上述の条件で、複数のAREモードに結合するHOMの広帯域拡張を、例えばその基本コア・モードの透明窓内の(最大)全波長についてまで、可能にする、 $HC-AF$ 用の新しい設計パラメータを見出した。本発明によれば、コア領域および複数AREの屈折率は、好ましくは少なくとも10THzをカバーするような、特に好ましくは少なくとも20THzをカバー

【0024】

基本モードを除く全てのモードが大幅に抑制され、その結果として、 $HC-AF$ の実効シングル・モードの動作(実効的エンドレス・シングル・モードの動作(effectively endlessly single-mode behaviour)、eESM)が得られる。(実効的)シングル・モード $HC-PBF$ [文献17]とは対照的に、提案する $HC-AF$ 構造は、eESM動作を行う一方で相対的に低い損失ではるかに広い帯域幅を形成する。さらに、クラッド内のガラス・キャピラリの太さが最適化されるだけの文献[18]に記載された $HC-AF$ とは対照的に、本発明は、ARE寸法とコア寸法の比に対する新しい設計パラメータを提供する。この新しい設計は実際の位相整合を実現し、一方、文献[18]では位相整合が達成されなかった(文献[18]の図2aを参照)。相対的に狭い波長範囲に対してHOM抑制を増強させるためにバンドギャップ・クラッドにシャント(分岐)を含ませた $HC-PBF$ のSM導波[文献6]とは対照的に、本発明による $HC-AF$ は、拡張された周波数範囲に対してHOM抑制を支援する。

【0025】

ARE寸法とコア寸法の比は、以下で概説するように、円形横断面を有する管(チューブ)状ARE(AREキャピラリ)を説明するために発明者たちによって見出されたモデルに基づいて、選択される。この場合、最小横ARE寸法(d_i)は、AREの内径である。本発明の別の利点として、選択された設計パラメータは、管状AREに対してだけでなく、例えば楕円形またはさらには多角形の断面のような他の断面を有するAREに対しても、有効である。後者の変形例では、最小横ARE寸法(d_i)は、AREの最小内側横断寸法である。発明者たちは、複数の管状AREに基づくモデルが、複数の非円形AREにおけるHOM抑制のための優れた近似を依然として与えるのは、それら(非円形ARE)が管状AREのように近似的にモデル化できる場合であることを、見出した。

【0026】

本発明の好ましい実施形態によれば、複数のAREは第1の最小横ARE寸法(d_1)を有し、第1の最小横ARE寸法とコア寸法の比(d_1/D)は、各第1種ベッセル関数の各ゼロ点(零点)の商(quotient)($u_{01,ARE}/u_{11,core}$)に適合係数を乗算した値、に近似される。その各ゼロ点($u_{01,ARE}$)、($u_{11,core}$)はそれぞれ LP_{01} AREモード(複数)および LP_{11} コア・モードを記述する。従っ

て、コア領域の最も顕著なHOM、LP₁₁コア・モードは、複数のAREモードに結合される。この実施形態では、全てのAREが、同じ最小横ARE寸法を有することが、好ましい。一例として、全てのAREは、同じ内径を有する管状AREである。この実施形態の特に好ましい変形例によれば、第1のARE寸法とコア寸法の比(d_1/D)は、0.5乃至0.8の範囲、好ましくは0.60乃至0.75の範囲、特に0.62乃至0.74の範囲で選択される。利点として、HC-AFは、これらの範囲で形成され、伝送窓内の全ての波長において基本モードに対して低損失導波を有し、LP₁₁コア・モードおよび全ての高次モードをも大幅に抑制する。

【0027】

本発明の別の有利な実施形態によれば、複数のAREは、第1のARE寸法(d_1)を有する第1群のAREと、第1群のAREの第1のARE寸法(d_1)より小さい第2の最小横ARE寸法(d_2)を有する第2群のAREとを含んでいる。この実施形態では、第2のARE寸法とコア寸法の比(d_2/D)は、各第1種ベッセル関数の各ゼロ点の商($u_{01, ARE}/u_{21, core}$)に適合係数を乗算した値、に近似される。その各ベッセル関数(のゼロ点)($u_{01, ARE}$)、($u_{21, core}$)は、それぞれLP₀₁AREモード(複数)およびLP₂₁コア・モードを記述する。第1のARE寸法を有する各AREおよび第2のARE寸法を有する各AREは、HC-AFの中空コア領域を取り囲む交互の形態で配置することができる。

【0028】

この実施形態の特に好ましい変形によれば、第2のARE寸法とコア寸法の比(d_2/D)は、0.3乃至0.7の範囲、好ましくは0.43乃至0.59の範囲、特に0.45乃至0.54の範囲で選択される。利点として、HC-AFにこれらの範囲が与えられて、そのHOMの抑制がさらに改善される。

【0029】

利点として、本発明によるHC-AFの内側クラッド領域を形成する複数のAREの配置を設計するのに、複数の変形例が利用可能である。これらの変形例は、本発明の特定の適用例に応じて代替形態としてまたは組合せで選択することができる。第1に、複数のAREの配置は、3回対称性を有することができる。代替形態として、複数のAREの配置は、2回対称性を有することができ、光学的複屈折を生じさせる。さらに、それらのAREは、それらの断面がコア領域を包囲する単一リング(環状体)上で分散配置されるように、配置することができる。代替形態として、複数のAREは、その断面が、コア領域を包囲する複数の、例えば、2つ、3つまたはそれより多くの同軸リング上で分散配置されるように、配置することができる。利点として、改善されたHOMS抑制を有するより低い損失のHC-AFが、本発明のこれらの変形例で実現することができる。

【0030】

複数のAREを保持するための外側クラッド領域は、HC-AFに沿って伸びる中空スリーブ(さや)であって、複数のAREを取り付けるための内面と、HC-AFの表面として露出できまたは例えば保護層(例えば、ポリマー被覆)または不透明層のような他の層で覆うことができる外面とを有する中空スリーブ、の形状を有する。本発明の一変形例によれば、外側クラッド領域は、例えば六角形のような正多角形の内部横断面を有し、複数のAREは多角形形状の複数の角部(コーナ)に固定される。利点として、各AREは、2つの接触線に沿って外側クラッド領域の内面で固定され、従ってプリフォーム(母材)を調製するときに内側クラッド領域(ARE)の機械的安定性が増大する。さらに、それらのAREは、それらを多角形形状の複数の角部に配置することによって、規則的方位角間隔で固定される。本発明の代替的な変形例によれば、外側クラッド領域は、湾曲した、特に円形形状を有する内側横断面を有し、それらのAREは、湾曲した形状において均等に分散配置される。

【0031】

本発明の第2の一般的態様によれば、上述の目的は、本発明の第1の一般的態様による少なくとも1つの中空コア・ファイバを含む光デバイス(装置)によって達成(解決)さ

10

20

30

40

50

れる。光デバイスは、モード・フィルタリング・デバイス、光源、特にレーザ、光増幅器、ビーム供給システム、データ通信システム、周波数変換器、特にスーパーコンティニウム生成用の周波数変換器、およびパルス整形器、特にパルス圧縮用のパルス整形器、の中の少なくとも1つを含んでいることが、好ましい。

【0032】

本発明の第3の一般的態様によれば、上述の目的は、本発明の第1の一般的態様による中空コア・ファイバの製造方法によって達成（解決）される。中空コア・ファイバの製造方法は、複数のAREプリフォームおよび1つの中空ジャケット・プリフォームを供給する工程と、そのAREプリフォームをそのジャケット・プリフォームの内面に分散配置形態で固定する工程と、最終的なARE寸法およびコア寸法が設定される（得られる）まで、そのAREプリフォームを含むそのジャケット・プリフォームを加熱して引き出す工程と、を含むことが、好ましい。

10

【0033】

任意に、それらのAREプリフォームを含むそのジャケット・プリフォームは、第1の加熱して引き出す工程において、まず、ケイン（茎）状部の形に引き出され、第2の加熱して引き出す工程において、次いで、最終的なARE寸法およびコア寸法が設定される（得られる）までファイバの形に引き出される。

【0034】

それらの加熱して引き出す工程は、ARE寸法およびコア寸法をそれぞれ設定する（得る）ために、ジャケット・プリフォームおよび複数のAREプリフォームの少なくとも1つについて、その少なくとも1つを真空にし（負圧を加え）またはその少なくとも1つに増大した流体圧力を加えることを含むことが、好ましい。利点として、これによって、コア領域の最小横断コア寸法（D）および複数のAREの最小横断寸法ARE（ d_i ）の正確な調整が可能になる。

20

【0035】

本発明の好ましい実施形態によれば、ARE寸法およびコア寸法は、最終的な加熱して引き出す工程の期間中に、複数の高次コア・モードと複数のAREモードの位相整合が20 THzを超える周波数範囲にわたって得られるように、選択されることが、好ましい。これは、理論的考察または参照（基準）測定によって達成することができる。

【0036】

本発明の別の有利な実施形態によれば、コア領域および複数の反共振要素の中の少なくとも1つに、非線形光応答性を有する、ガス（特に、空気、希ガスおよび／または水素）、液体、および／または材料の中の少なくとも1つを充填することができる後処理工程、を設けることができる。この目的のために、中空コア・ファイバの少なくとも一部をセルに封入することができる。そのセルおよび全てのその中空コア領域は、外部貯留層（リザーバ）から供給される材料を充填することができ、または、その中空コア領域の幾つかは、第1の外部貯留層（リザーバ）から供給される材料と、第2の外部貯留層（リザーバ）から供給される別の材料の幾分かとで充填することができる。この後処理工程は、例えば光学的実験におけるようなファイバの適用の直前またはその適用の期間中に、実行することができる。その後他の後処理工程を行って、例えばデータ伝送または非線形光学系において、本発明によるファイバをその適用例に適合化させようとすることができる。

30

40

【0037】

本発明の他の利点および詳細を、図面を参照して以下で説明する。

【図面の簡単な説明】

【0038】

【図1】図1は、本発明の好ましい実施形態による複数のHC-AFの各断面図である。

【図2】図2は、コア領域のHOMとAREモードとの結合、およびARE寸法dとコア寸法Dの間の最適な比を見つけるためにd/Dを変化させたときの各数値シミュレーションのグラフ図である。

【図3】図3は、本発明によるHC-AFのスケラビリティ（拡張性）を示すための数

50

値シミュレーションのグラフ図である。

【図4】図4は、HC-AFを設計するための本発明によるモデルを適用する図である。

【図5】図5は、本発明の例示的な実施形態による光デバイスを示す図である。

【図6】図6は、本発明によるHC-AFを製造する方法の各工程である。

【図7】図7は、通常の中実または中空コア・ファイバの断面図（従来技術）である。

【発明を実施するための形態】

【0039】

以下では、HC-AFの適正な幾何学的形状の選択、特に、内側クラッド領域のガラス・キャピラリのようなコアおよび複数AREの直径の選択について、例示的に参照する。本発明の実装は、例えば寸法D、dおよびtのような幾何学的量の例示に限定されることがなく、本発明による設計パラメータを与える様々な値を用いても可能である。複数のHC-AFの特徴、その製造およびその適用例は、従来技術で知られている限り、説明しない。

【0040】

HC-AFの実例

図1A乃至1Eは、本発明による複数のHC-AF100の実例の（その軸方向に垂直な）各横断面を示している。明るい円は、複数のAREまたは外側クラッド領域の固体材料、例えば石英ガラスまたはシリカを表し、一方、暗い部分は固体材料を含まない（真空状態、または気体または液体が充填された状態である）。各HC-AF100の幾何学的設計は、以下のモデル選択で概説されるように選択される。

【0041】

各HC-AF100は、中空コア領域10（図1Aにおいて点線の円で示されている）、複数のARE21を有する内側クラッド領域20、および外側クラッド領域30を含んでいる。中空コア領域10は、複数のARE21の間にある空き空間であり、HC-AF100の長手方向の長さに沿って伸び、最小横コア寸法Dを有する。内側クラッド領域20のARE21は、壁厚tおよび最小横ARE寸法dを有する複数のキャピラリを含んでいる。ARE21は、例えば図6を参照して以下で説明するように、外側クラッド領域30の内面に固定される。外側クラッド領域30は、例えばガラスで形成されHC-AF100の閉じたクラッドを形成する1つのより大きいキャピラリを含んでいる。

【0042】

図1AのHC-AF100は一実施形態を示しており、ここで、複数のARE21は、 $D = 20 \mu\text{m}$ の直径D（直径方向における両側のARE21の間の最短距離）の中心中空コアを形成するように、6回（回転）対称パターンで外側クラッド領域30におけるより大きいキャピラリ内に配置された円形横断面を有する6つの薄壁キャピラリ（内径 $d = 13.6 \mu\text{m}$ および壁厚 $t = 0.2 \mu\text{m}$ ）からなる1つの単一リング（環）を含んでいる。外側クラッド領域30は、外径 $125 \mu\text{m}$ およびクラッド厚さ $38 \mu\text{m}$ を有する。代替形態として、コア寸法Dは、 $10 \mu\text{m}$ 乃至 $1000 \mu\text{m}$ の範囲で選択することができ、それに応じて他の幾何学的パラメータ（例えば、d、t）が増減（スケール）される。

【0043】

図1Bは、6回対称性を有する外側クラッド領域30内に配置された複数のARE21からなる複数の同軸リング、特に2つの同軸リング（ $d = 13.6 \mu\text{m}$ 、 $t = 0.2 \mu\text{m}$ 、および $D = 20 \mu\text{m}$ ）を有する変形実施形態を示している。複数のARE21からなる内側リングおよび外側リングを保持するために、HC-AF100に1つの支持チューブ（管）22が含まれている。この支持チューブ22は、例えば直径 $48 \mu\text{m}$ の、例えばシリカで形成される。

【0044】

図1Cおよび1Dは3回対称性を示し、図1Eは本発明によるHC-AF100の2回対称性を示し、利点として増強されたeESM効果を与える。

【0045】

図1Cによれば、ARE21A、21Bは、第1のより大きいARE寸法 d_1 （例えば

10

20

30

40

50

13. $6\ \mu\text{m}$)を有する第1群(グループ)のARE 21Aと、第2のより小さいARE寸法 d_2 (例えば $10.2\ \mu\text{m}$)を有する第2群(グループ)のARE 21Bとを含み、双方とも、例えば $0.2\ \mu\text{m}$ の壁厚を有する。外側クラッド30の内面には、HC-AF 100に沿った軸方向の伸長を有する長手方向の複数の突起部31が設けられている。図1Cの断面図において、突起部31はブ롭(blobs:小塊)として示されている。複数の突起部31は、例えばガラスのようなAREと同じ材料で形成されることが、好ましい。より小さい複数のARE 21Bの各々は複数の突起部31の中の1つの頂部に固定される。ARE 21A、21Bは、直径 $D=20\ \mu\text{m}$ を有するコア領域10を取り囲んでいる。突起部31の半径方向の高さは、中心コア領域10において最も円(回転)対称な導波モードを生じるように選択されることが、好ましい。代替形態として、突起部31を省略して、図1Dに示されているように、より簡単な構造にすることができるであろう。

10

【0046】

ARE 21A、21Bを、2回対称構造を形成するように配置することによって(図1E)、複屈折偏光(偏波)を維持しe ESM動作を示すHC-AFが得られる。

【0047】

図1に示された本発明によるHC-AF 100の各例は、特に、ARE 21、21A、21Bの形状(これは、例えば楕円形または多角形の断面を有し得る);外側クラッド30の内部形状(これは、例えば多角形の断面を有し得る)(図6参照);ARE 21、21A、21Bの固体材料(これは、例えば、プラスチック材料、例えばPMMA、ガラス、例えばシリカ、または軟質ガラス、例えばZBLAN、を含んでもよい);ARE 21、21A、21Bの寸法;複数AREからなるリングの数(例えば、3またはそれより多い);AREの数(例えば、4または5または7またはそれより多い);およびARE配置の対称性、に関して変形することができる。

20

【0048】

HC-AF設計のモデル

本発明によるHC-AF 100のARE寸法(d_i)およびコア寸法(D)は、先に規定したように、ARE寸法とコア寸法(d_i/D)の比が、各第1種ベッセル関数の各ゼロ点の商($u_{1m, ARE}/u_{1m, core}$)に適合係数を乗算した値、に近似するように、選択される。全てのAREが同じARE寸法(d_1)を有する場合、ARE寸法とコア寸法(d_1/D)の比は、各第1種ベッセル関数の各ゼロ点の商($u_{01, ARE}/u_{11, core}$)に適合係数を乗算した値、に近似されることが好ましく、ここで、その各ゼロ点($u_{01, ARE}$)、($u_{11, core}$)は、それぞれLP₀₁AREモード(複数)およびLP₁₁コア・モードを記述する。他のAREが第2のより小さいARE寸法を有する場合、第2のARE寸法とコア寸法の比(d_2/D)は、各第1種ベッセル関数の各ゼロ点の商($u_{01, ARE}/u_{21, core}$)に適合係数を乗算した値、に近似することが好ましく、ここで、その各ベッセル関数(のゼロ点)($u_{01, ARE}$)、($u_{21, core}$)は、それぞれLP₀₁ARE(複数)およびLP₂₁コア・モードを記述する。

30

【0049】

これらの設計条件は、図2乃至4を参照して以下で例示する理論的考察および数値シミュレーションに基づいて理解される。これらの理論的考察および数値シミュレーションは、それに対応して、複数のAREモードに対する、LP₂₁コア・モードより高い複数のコア・モードの結合に拡張することができる。

40

【0050】

HC-AF 100の中心コア領域10は幾つかの横コア・モードを支持(形成)し、各モードは特徴的なモード屈折率および漏洩損失を有する。本発明による構造は、(最高の実効屈折率を有する)LP₀₁モードが、いずれのコアHOMよりはるかに低い損失を有する形態で、設けられる。これは、ARE 21、21A、21Bおよびそれらの間の間隙(ギャップ)の設計を、それら(ARE)が、コア領域10における複数のHOMと位相整合する複数の漏洩モード(または状態)の帯域(a band:一群)を支持してそれら(モ

50

ード)を大きく漏洩させるように、行うことによって達成される。この強い損失の識別力(性)は、e E S M動作を得るのに十分な広帯域にすることができる。

【0051】

図2Aは、図1AのHC-AF100(左)を示し、基本LP₀₁コア・モード(中央)およびLP₁₁コア・モード(右)、並びに漏洩AREモード(右)を例示し、これ(AREモード)に、LP₁₁コア・モードおよびより高いコア・モードが共振的に結合される。図2Bは、パラメータd/Dに依存する、有限要素(FE)モデルの計算された実効屈折率の曲線を示しており、図2Cは、ARE寸法dを変化させコア寸法Dを一定とした場合についての漏洩損失の複数の曲線を示している。図2Cにおける中央の曲線は、対応するHOM抑制を示している。破線は、直径dおよび厚さtの自立的なチューブのLP₀₁モード用の完全ベクトル計算値を示している。例示的な構造パラメータは、t/D=0.01およびD/λ=20、n_{glass}=1.45およびn_{core}=1である。

10

【0052】

図2Aに示された構造は、負の曲率を有する複数のARE21の各壁における反共振反射によって形成される幾つかの漏洩(リーキー)横コア・モードを支持(形成)する。複数のARE21は、内側クラッド領域20によって形成されるクラッド・フォトリック・バンド構造を支持し、準自立的な薄壁チューブによって近似することができる。外側クラッド領域30の厚い包囲ガラス壁は、モード特性にはあまり影響しないが、複数のARE21を物理的に支持するために設けられる。

20

【0053】

図2Bは、(固定したDに対して)ARE直径を変化させてクラッド・フォトリック・バンド構造を実効的に変化させたときの、2つの最高屈折率コア・モードLP₀₁およびLP₁₁の実効屈折率分布(曲線)を示している。LP₀₁コア・モードの屈折率は、複数の基本AREモードに対する共振結合を回避するのに充分高く、d/Dとはほとんど独立の関係を維持し、一方、LP₁₁コア・モードは、d/D=0.68において基本AREモードとの強い反交差(anti-crossing)を生じる。この反交差から離れるにしたがって、偶数および奇数の固有モードは、結合されていないLP₁₁コア・モードおよび複数の基本AREモードに対して漸近的に変化または展開する。さらにより高次のコア・モード(図2Bに図示せず)は、より低い屈折率を有し、AREリングの複数の高漏洩モードに結合し、そのうちの幾つかのモードは、複数のARE21間の間隙(ギャップ)に集中する。

30

【0054】

図2Cは、LP₀₁モードおよび2つのハイブリッドLP₁₁/ARE₀₁モードの計算された漏洩損失のプロットを示している。その示された範囲では、LP₀₁コア・モードは、d/D=0.65における0.17dB/mの最小値で比較的一定の損失を有する。より小さいARE21直径について、その損失は、増大し、限界d/D→0(図2Cに図示せず)において孤立した(隔てられた)厚壁の誘電体キャピラリの場合の値とほぼ一致または整合する。この限界を用いて、FE(有限要素)計算結果を、解析結果と、特に複数の完全に一致または整合した層(PML)の精度で、照合または検証した[文献16]。反交差点において、2つのハイブリッドのLP₁₁/ARE₀₁モードの損失は、大幅に増大し、マクスウェルの方程式を完全なベクトル形式で解くことによって計算された真空状態にある孤立したキャピラリ(茶色の破線)の場合の値にほぼ達する。これによって、複数のPMLが正しく設定されたことがさらに確認される。

40

【0055】

HOM抑制は、反交差において大幅に増大し、約1200の値にピークを有する。反交差から遠く離れると、それは5未満に低下する。それは、カゴメPCFにおいて典型的に達成される値と類似している[文献15]。包括的な分析のためには、全ての高次コア・モードのHOM抑制を計算しなければならない。FEモデル化で明らかになったこととして、LP₁₁コア・モードの後に次の最低の損失を有するHOMは、4分葉(four-lobed)のLP₂₁コア・モードであり、d/D=0.68においてHOM抑制が約70であり

50

、 $d/D = 0.51$ において基本AREモードとの反交差が生じる。しかし、実験では、この特定のコア・モードは、エンド・ファイア照射によってまたはLP₀₁コア・モードからの応力および曲げ誘導型の散乱によって励起される可能性はより低い（屈折率差はLP₁₁コア・モードの場合よりも約2倍強大きい）。FEモデル化が示すこととして、さらにより高次の複数のLP_{1m}コア・モードは全体的なHOM抑制に影響せず、その理由は、それらがAREリングの複数モードに位相整合し（その幾つかは複数のARE₂₁間の隙間に集中する）、その結果として強い漏洩損失が生じるからである。

【0056】

図3Aは、定数 $d/D = 0.68$ および $t/D = 0.01$ における複数のLP_{1m}コア・モードと基本AREモードの屈折率の間の差 Δn_{1m} 対 D/λ （ λ ：波長）のプロットを示している。 Δn_{01} は、 D/λ の増大とともに減少するが、全体的に正を維持する。その結果として、LP₀₁コア・モードは、基本AREモードと反共振し、コアに閉じ込められた状態を維持する（図3Aの挿入部の左側パネルも参照）。それとは対照的に、 Δn_{11} は、はるかに小さく、 $D/\lambda = 66$ において 10^{-6} という小さな値に達する。

10

【0057】

D/λ の特定の値では、複数のARE₂₁のガラス壁におけるLP₀₁モードとq次横モードの間に、次式の単純な関係に従う反交差が出現する。

【数1】

$$\left(\frac{D}{\lambda}\right)_q \approx \frac{q}{2(t/D)\sqrt{n_g^2 - 1}} \quad (1)$$

20

【0058】

図3における垂直の各点線は、 $t/D = 0.01$ について、これらの共振点のうちの最初の2つの共振点を中心とする。これらの点の近傍では、LP₀₁コア・モードは、複数の共振ARE₂₁を通して中実ガラス・ジャケット30中に急速に漏洩し、孤立した厚壁誘電キャピラリの損失値に近い損失値を生じ〔文献16〕、その結果、HOM抑制に大幅な減少が生じる（図3B参照）。しかし、これらの狭い領域から遠く離れると、HOM抑制は相対的に高い状態を維持する。それは、LP₁₁コア・モードと基本AREモードの屈折率が互いに近い状態を維持するという事実の結果である。その結果、LP₀₁モード伝送の全範囲にわたって非常に強いLP₁₁コア・モード抑制が生じる。

30

【0059】

全ての波長（ARE壁共振の近傍を除く、式（1）参照）について、 $d/D = 0.68$ において最大HOM抑制が生じる理由を説明するために、発明者たちは、コア10および複数のARE₂₁を有する実際の構造が厚壁キャピラリとして扱われる解析モデルを適用した（図4A参照）。厚壁キャピラリにおける複数のLP_{1m}モードのモード屈折率は、修正されたマルカティリーシュメルツァー表現によって次式で近似することができる〔文献16〕。

【数2】

$$n_{lm} = \sqrt{1 - \left(\frac{u_{lm}}{\pi f_s}\right)^2 \left(\frac{\lambda}{d_i}\right)^2} \quad (2)$$

40

ここで、 u_{1m} はベッセル関数 J_1 のm番目のゼロ点であり、 d_i はキャピラリの内径である。パラメータ f_s （これは1に近い値を有し、 $s = co$ はコア10を表し、 $s = ARE$ は複数のARE₂₁を表す）を使用して、モデル式から得た解析値をFEシミュレーションの結果にヒューリスティックに適合させる。それによって、非円形コア、およびコア10および複数のARE₂₁の有限壁厚について補正される。

【0060】

図4Bは、2つのLP₁₁/ARE₀₁ハイブリッド・モードの実効屈折率を、式（2

50

を用いて計算した LP_{11} モードに対する適合させた値（ゼロのライン）と共にプロットしたものであり、ここで、コア 10 について適合パラメータ $f_{co} = 1.077$ を用い、 ARE_{21} についてパラメータ $f_{ARE} = 0.990$ を用いている。式（2）の便利な解析形式によって、 LP_{11} コア・モードおよび複数の ARE_{01} モードが最適に結合する d/D 値に関する簡単な式を、次式のように導き出すことができる。

【数 3】

$$\frac{d}{D} = \frac{u_{01}}{u_{11}} \frac{f_{co}}{f_{ARE}} = 0.68 \quad (3)$$

【0061】

式（3）は、シングル・モード eESM の PCF を強固に設計するための便利な大雑把な経験則を与える。最初の近似では、ファイバの屈折率にも絶対的物理的寸法にも依存せず、その設計を拡張可能（スケーラブル、規模拡大縮小可能）にする。これは、比 d/D が維持される場合、大きいコアの eESM の PCF を設計し、複数の伝送窓で数 dB/km の損失を与えることが可能になることを意味し、その最も広い範囲は 1 オクターブより広い。

【0062】

式（2）を用いることによって、より高次のコア・モード（例えば、 LP_{21} コア・モード）が実効的に抑制される構造パラメータを容易に見つけることができる。また、物理的寸法を調整することによって、共振帯域を（より小さい／より厚い壁厚 t について）青／赤シフトすることができ、 LP_{01} コア・モードの最小伝送損失を（コア直径を変えるために）調整することができる。

【0063】

また、式（2）を用いて、増強された eESMF 効果を有する HC-AF、即ち、コアの最初の 2 つの HOM が複数の ARE における共振に結合するようなファイバ、を設計するための適切な幾何学的パラメータを見つけることができる。これによって、次式の条件が得られる。

【数 4】

$$\frac{d_1}{D} = \frac{u_{01}}{u_{11}} \frac{f_{co}}{f_{ARE}} = 0.68 \quad \text{および} \quad \frac{d_2}{D} = \frac{u_{01}}{u_{21}} \frac{f_{co}}{f_{ARE}} = 0.51 \quad (4)$$

【0064】

図 1C～1E には、そのような増強された eESM 効果を有するファイバ構造が、示されており、その構造は、異なる内径 d_1 および d_2 を有する複数の ARE からなる 1 つまたは幾つかの単一リングからなる。

【0065】

光デバイスの実施形態

本発明による HC-AF 100 は、例えば、ビーム供給、データ伝送または周波数変換のための、導光用の複数の適用例を有する。従って、本発明の別の対象を表す光デバイスは、少なくとも 1 つの本発明による HC-AF 100、および他の光学部品（コンポーネント、構成要素）、監視部品、検出器部品および／または制御部品を含み、これらの部品は、光デバイスの特定の適用例に応じて選択される。

【0066】

図 5 は、例えば表面処理のための、高パワーのビーム供給に適合化された、本発明の一実施形態による光デバイス 200 を概略的に示している。光デバイス 200 は、例えばレーザ源のような光源 210 と、HC-AF 100 とを含んでいる。光源 210 の出力は、HC-AF 100 の入力側に光結合され、一方、そのファイバの出力側は、ビーム供給の位置に方向付けられる（指向される）（矢印を参照）。

【0067】

10

20

30

40

50

本発明の代替的な適用例では、光源 210 は、HC-AF100 内における、周波数変換プロセス、特にスーパーコンティニウム生成プロセスまたはパルス圧縮、を駆動するためのレーザ源を含んでいる。さらに他の適用例によれば、光源 210 は、HC-AF100 を介して光受信機（図示せず）に結合されたデータ通信システムの光送信機を含んでもよい。

【0068】

図 5 は概略図を表しているに過ぎないことに留意されたい。少なくとも 1 つの本発明による HC-AF100 を含む光デバイスの詳細は、通常の光デバイスで知られているように、実装することができる。

【0069】

HC-AF の製造方法

図 6 は、本発明による HC-AF100 を製造する主な複数の工程を概略的に示している。図 6 は主な複数の工程を示す概略図に過ぎず、その工程は、複数の ARE プリフォーム 23 および 1 つの中空ジャケット・プリフォーム 32 を供給する工程（図 6 A）と、複数の ARE プリフォーム 23 をジャケット・プリフォーム 32 の内面に固定する工程（図 6 B）と、HC-AF100 を得るように、複数の ARE プリフォーム 23 を含むプリフォーム・ジャケット 32 を加熱して引き出す工程（図 6 C）と、からなる。任意に、その加熱して引き出す工程は、ジャケット・プリフォーム 32 を複数の ARE プリフォーム 23 と共に加熱してケイン（茎）の形に引き出す第 1 の工程と、ARE 寸法およびコア寸法が設定される（得られる）まで、そのケインを加熱して引き出す第 2 の工程とを含んでもよい。図 6 A、6 B および 6 C の各工程の詳細は、通常のファイバ製造方法で知られている限り、実装（実現）することができる。

【0070】

図 6 A によれば、ジャケット・プリフォーム 32 は、内側横断面に正六角形の形状を有するガラス製の中空管状の形態である。プリフォーム・ジャケット 32 の外径は、例えば、28 mm であり、一方、内側横（横断）寸法は約 22 mm である。プリフォーム・ジャケット 32 および ARE プリフォーム 23 の長手方向の長さは約 120 cm である。

【0071】

図 6 B の固定する工程で、複数の ARE プリフォーム 23 は、ジャケット・プリフォーム 32 の内側六角形の形状の各角部に固定される。これは、結果的に複数の ARE プリフォームとジャケット・プリフォームの間の物理的接続を形成する熱を加えることによって得られる。その後、ジャケット・プリフォーム 32 と複数の ARE プリフォーム 23 の複合体は、ARE およびコアの横方向寸法が得られるまで、加熱期間において引き出される。ARE およびコアの横方向寸法は、加熱して引き出す各工程の期間中に、ジャケット・プリフォーム 32 および／または複数の ARE プリフォーム 23 について真空状態にし（これに負圧を加え）またはこれに増大された圧力を加えることによる影響を受けることができる。

【0072】

加熱して引き出す各工程の期間中に真空にし（負圧を加え）または増大された圧力を加えることが、図 6 B に概略的に示されている。ジャケット・プリフォーム 32 の中空内部空間は、例えば加圧窒素の供給源のような第 1 の外部貯留層（タンク）41 に接続される。さらに、複数の ARE プリフォーム 23 は、例えば加圧窒素の外部供給源のような少なくとも 1 つの第 2 の外部貯留層 42 に接続される。全ての ARE が同じ内側横方向寸法で製造されるものとする場合、全ての ARE は共通の外部貯留層に接続することができる。そうでなければ、例えば、2 群の ARE が、例えば図 1 E に示されているような、異なる内側横方向寸法を形成するために 2 つの異なる外部貯留層に接続される。最終的な加熱して引き出す工程は、例えば、ジャケット・プリフォーム 32 および複数の ARE プリフォーム 23 の材料に応じて選択された炉内で、（例えば、シリカ成分に対して約 2000 °C で、）行われる。

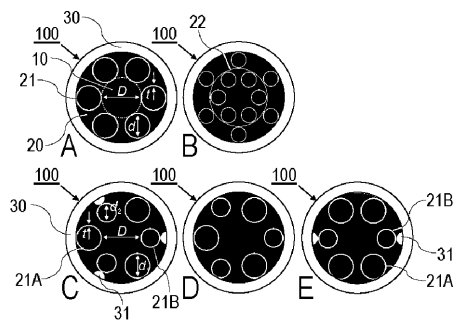
【0073】

最終的なHC-AF100を得た後、それに、例えば空気または希ガスまたは水素のような気体、または例えば水のような液体が充填され、HC-AF100の入出力側は、高い流体圧力に耐えるセルによって包囲され。そのセルは、例えばレーザ供給源からの光放射用の例えばガラス・プレートを含むことによって、部分的に透過性である。

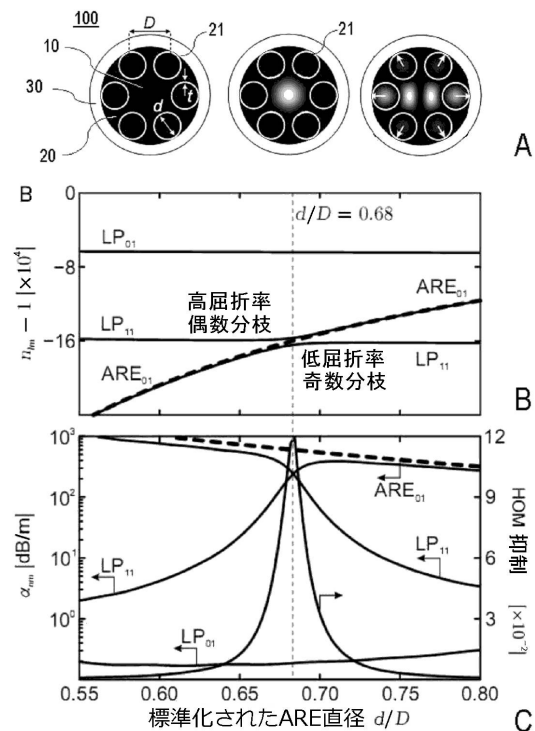
【0074】

以上の説明、図面および特許請求の範囲における本発明の各特徴は、個々にもまたは組合せまたは部分的組合せでも、本発明を相異なる実施形態で実現するために、重要であり得る。

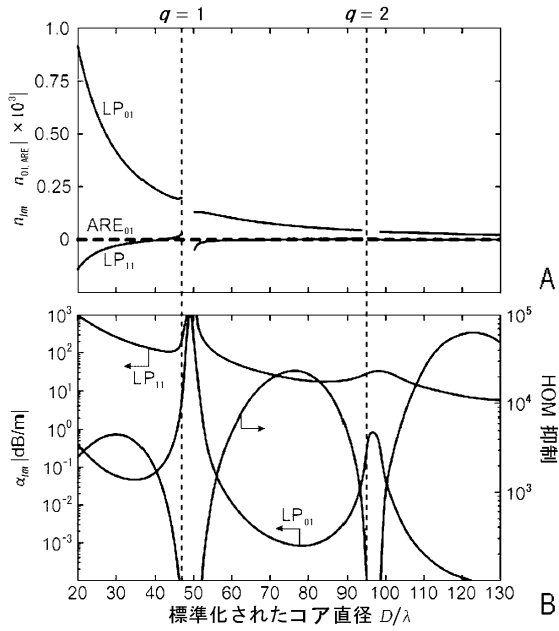
【図1】



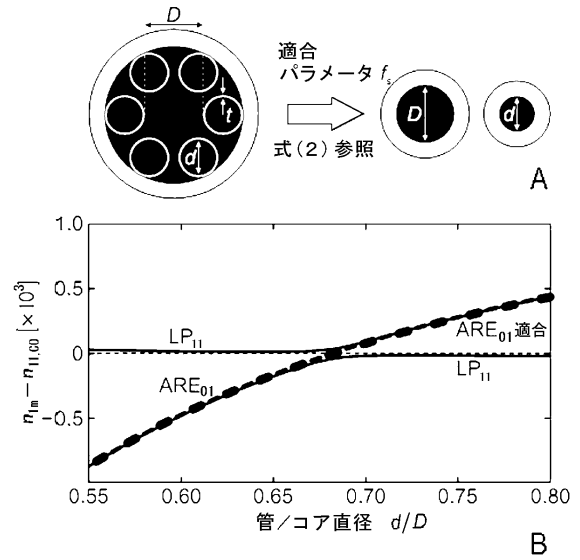
【図2】



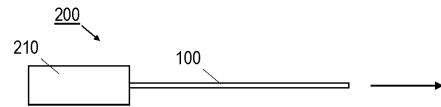
【図 3】



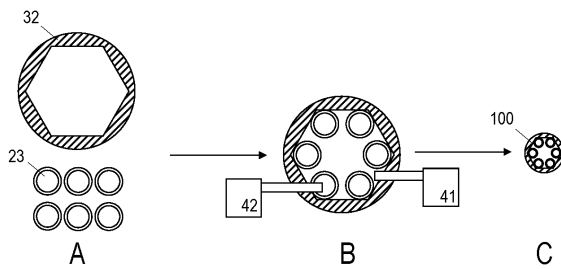
【図 4】



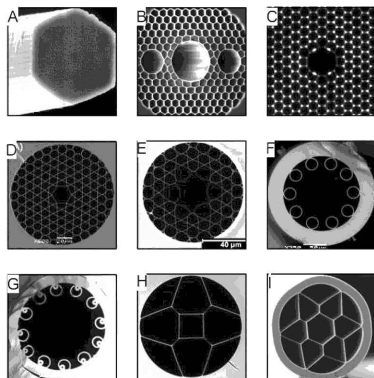
【図 5】



【図 6】



【図 7】



フロントページの続き

- (74)代理人 100079108
弁理士 稲葉 良幸
- (74)代理人 100109346
弁理士 大貫 敏史
- (74)代理人 100117189
弁理士 江口 昭彦
- (74)代理人 100134120
弁理士 内藤 和彦
- (72)発明者 ラッセル, フィリップ
ドイツ連邦共和国 91341 ロッテンバッハ, アルテンゼーシュトラッセ 2
- (72)発明者 ユーベル, パトリック
ドイツ連邦共和国 91080 マーロフシュタイン, リングシュトラッセ 1
- (72)発明者 フロッツ, ミヒャエル エノク
ドイツ連邦共和国 91058 エアランゲン, テネンローアー シュトラッセ 20エー

審査官 野口 晃一

- (56)参考文献 特表2005-538029 (JP, A)
特表2013-535032 (JP, A)
米国特許出願公開第2005/0185908 (US, A1)
特表2017-520804 (JP, A)
BELARDI, Walter and KNIGHT, Jonathan C., Hollow antiresonant fibers with low bending loss, Optics Express, 米国, Optical Society of America, 2014年 4月18日, Vol.22, No.8, pp.10091-10096
BELARDI, Walter, New possibilities with hollow core antiresonant fibers, [online], 米国, arXiv.org, 2015年 2月17日, v2, <URL:http://arxiv.org/abs/1501.00586v2>
POLETTI, Francesco, Nested antiresonant nodeless hollow core fiber, Optics Express, 米国, Optical Society of America, 2014年 9月22日, Vol.22, No.20, pp.23807-23828
WEI et al., Higher-order mode suppression in chalcogenide negative curvature fibers, Optics Express, 米国, Optical Society of America, 2015年 6月 8日, Vol.23, No.13, pp.15824-15832

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G02B 6/02-6/036
6/10
6/44
G02F 1/00-1/125
1/21-7/00
IEEE Explore