

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第6656076号
(P6656076)

(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6日 (2020. 2. 6)

(51) Int. Cl.

F I

G O 2 B 6/255 (2006. 01)

G O 2 B 6/255

G O 2 B 6/02 (2006. 01)

G O 2 B 6/02 4 5 1

G O 2 B 6/42 (2006. 01)

G O 2 B 6/42

請求項の数 17 (全 12 頁)

(21) 出願番号 特願2016-93153 (P2016-93153)
 (22) 出願日 平成28年5月6日 (2016. 5. 6)
 (65) 公開番号 特開2017-201367 (P2017-201367A)
 (43) 公開日 平成29年11月9日 (2017. 11. 9)
 審査請求日 平成30年5月31日 (2018. 5. 31)

(73) 特許権者 000001007
 キヤノン株式会社
 東京都大田区下丸子3丁目30番2号
 (74) 代理人 100126240
 弁理士 阿部 琢磨
 (74) 代理人 100124442
 弁理士 黒岩 創吾
 (72) 発明者 岩瀬 秀夫
 東京都大田区下丸子3丁目30番2号 キ
 ヤノン株式会社内
 (72) 発明者 井上 晋宏
 東京都大田区下丸子3丁目30番2号 キ
 ヤノン株式会社内

審査官 佐藤 宙子

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 ファイバー構造体及び光源装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

第1のファイバーと、前記第1のファイバーを伝搬した光が伝搬するように、前記第1のファイバーと接続された第2のファイバーと、を備え、

前記第1のファイバーと前記第2のファイバーのうち少なくとも1つがフォトニック結晶ファイバーであり、

前記第2のファイバーは、前記第1のファイバーと前記第2のファイバーとの接続面より順に第1の被覆層と第2の被覆層で被覆されており、

前記第1の被覆層の屈折率 n_1 は、前記第2のファイバーのクラッド層の屈折率より大きく、

前記第1のファイバーのNA、前記第2のファイバーの中心を原点とする前記第1の被覆層の半径 R 、前記第2のファイバーの中心を原点とする前記第2の被覆層の半径 r 、前記接続面と前記第1の被覆層の端との間の距離 L 、が、

$$L > (r \times n_1) / NA$$

及び、

$$R > (2L \times NA) / (2n_1)$$

の関係式を満たす、

ことを特徴とするファイバー構造体。

【請求項 2】

前記第2の被覆層に入射する、前記接続面からの漏れ光のパワーが1W以下であること

を特徴とする請求項 1 に記載のファイバー構造体。

【請求項 3】

前記ファイバー構造体をパルス光が伝搬する場合、前記第 1 のファイバーを伝搬するパルス光のパワーを P_0 、前記第 1 のファイバーと前記第 2 のファイバーとの結合効率を η とすると、

$P_0 (1 - \eta) \{ 1 - \exp [- 2 (r / (L (NA / n_1)))^2] \} < 1 W$ が満たされる、

ことを特徴とする請求項 1 に記載のファイバー構造体。

【請求項 4】

前記ファイバー構造体をパルス光が伝搬する場合、前記第 1 のファイバーを伝搬する前記パルス光のパワーを P_0 、前記第 1 のファイバーと前記第 2 のファイバーとの結合効率を η とすると、

$P_0 \{ 1 - \exp [- 2 (r / (L (NA / n_1)))^2] \} < 1 W$ が満たされる、ことを特徴とする請求項 1 に記載のファイバー構造体。

【請求項 5】

前記第 1 の被覆層 1 の透過率は、前記第 2 の被覆層の透過率より大きい、ことを特徴とする請求項 1 から 4 の何れか 1 項に記載のファイバー構造体。

【請求項 6】

前記第 1 の被覆層の透過率は 90 % / mm 以上である、ことを特徴とする請求項 1 から 5 の何れか 1 項に記載のファイバー構造体。

【請求項 7】

ヒートシンクを備え、前記ヒートシンクは前記第 1 の被覆層と接触しており、前記ヒートシンクの熱伝導率は前記第 1 の被覆層の熱伝導率よりも大きい、ことを特徴とする請求項 1 から 6 の何れか 1 項に記載のファイバー構造体。

【請求項 8】

前記第 1 の被覆層は、アクリル樹脂、エポキシ樹脂、高屈折率ポリマー、の何れかを含む UV 硬化樹脂、ポリカーボネード、およびサファイアの少なくとも 1 つを含む、ことを特徴とする請求項 1 から 7 の何れか 1 項に記載のファイバー構造体。

【請求項 9】

請求項 1 から 8 の何れか 1 項に記載のファイバー構造体と、パルス光源と、を備え、前記パルス光源からのパルス光が、前記第 1 のファイバーを伝搬したのち前記第 2 のファイバーを伝搬するように、前記パルス光源と前記第 1 のファイバーと前記第 2 のファイバーとが光学的に接続されている、ことを特徴とする光源装置。

【請求項 10】

前記パルス光源は、Yb ドープファイバー利得媒体として用い、モード同期によってパルス光を出力するファイバーレーザと、Yb ドープファイバーを媒体として用いた増幅器とを含む、

ことを特徴とする請求項 9 に記載の光源装置。

【請求項 11】

第 1 のファイバーと、前記第 1 のファイバーを伝搬した光が伝搬するように、前記第 1 のファイバーと接合された第 2 のファイバーと、前記第 1 のファイバーと前記第 2 のファイバーとの間の接合表面を被覆する第 1 の被覆層と、前記第 1 の被覆層と接触し、前記第 1 の被覆層よりも熱伝導性が高いヒートシンクとを有するファイバー構造体であって、

前記第 1 のファイバーと前記第 2 のファイバーの一方が、フォトニック結晶ファイバーであり、前記第 1 のファイバーと前記第 2 のファイバーの他方が光学ファイバーであり、前記第 2 のファイバーは、前記第 1 のファイバーと前記第 2 のファイバーとの接続面より順に前記第 1 の被覆層と第 2 の被覆層で被覆されており、

前記第 1 の被覆層の屈折率 n_1 は、前記第 2 のファイバーのクラッド層の屈折率より大きく、

前記第 1 のファイバーの NA、前記第 2 のファイバーの中心を原点とする前記第 1 の被覆層の半径 R、前記第 2 のファイバーの中心を原点とする前記第 2 の被覆層の半径 r、前記接続面と前記第 1 の被覆層の端との間の距離 L、が、

$$L > (r \times n_1) / NA$$

及び、

$$R > (2L \times NA) / (2n_1)$$

の関係式を満たす

ことを特徴とするファイバー構造体。

【請求項 12】

前記第 2 の被覆層に入射する前記接続面からの漏れ光のパワーが 1 W 以下であることを特徴とする請求項 11 に記載のファイバー構造体。

10

【請求項 13】

前記第 1 の被覆層の透過率は、前記第 2 の被覆層の透過率よりも大きいことを特徴とする請求項 11 または 12 に記載のファイバー構造体。

【請求項 14】

前記第 1 の被覆層の透過率は 90 % / mm 以上であることを特徴とする請求項 11 乃至 13 のいずれか 1 項に記載のファイバー構造体。

【請求項 15】

前記第 1 の被覆層は、アクリル樹脂、エポキシ樹脂、高屈折率ポリマー、の何れかを含む UV 硬化樹脂、ポリカーボネード、およびサファイアの少なくとも 1 つの部材を含むことを特徴とする請求項 11 乃至 14 のいずれか 1 項に記載のファイバー構造体。

20

【請求項 16】

請求項 11 乃至 15 のいずれか 1 項に記載のファイバー構造体と、パルス光源とを有する光源装置であって、

前記パルス光源と、前記第 1 のファイバーと、前記第 2 のファイバーとは、

前記パルス光源からのパルス光が、前記第 1 のファイバーを伝搬した後に前記第 2 のファイバーを伝搬するように、光学的に接続されていることを特徴とする光源装置。

【請求項 17】

前記パルス光源は、Yb ドープファイバーを利得媒体として用い、モード同期によってパルス光を出力するファイバーレーザと、Yb ドープファイバーを媒体として用いた増幅器と、を含むことを特徴とする請求項 16 に記載の光源装置。

30

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、ファイバー構造体及び光源装置に関する。

【背景技術】

【0002】

近年、スペクトル・エンコード内視鏡、光コヒーレント・トモグラフィー、誘導ラマン顕微鏡などの医用イメージング装置用の光源として、高非線形ファイバーでのパラメトリック波長変換による広帯域パルス光源や波長可変パルス光源の研究が行われている。高非線形ファイバーの中をピーク強度の高いパルス光が伝搬すると、光学非線形効果によって、ポンプ光の波長は波長の異なるパルス光に変換される。このような波長の変換に用いられる高非線形ファイバーとしては、ファイバーの断面に周期的な微細加工を施したフォトニック結晶ファイバー（以下、PCF とも言う）が用いられる。PCF を用いると、ファイバーの断面に設けられた周期的な微細加工によって、コア内への強い光閉じ込めが可能である。このコア内への光閉じ込めによって得られる高い光強度は、波長変換パルス光源に求められる高い波長変換効率を可能とする。また、PCF は、微細加工の形状の変更により、その分散を制御することができる。一般的に高非線形ファイバーの伝搬により生じる波長変換パルス光の波長は、高非線形ファイバーの群速度分散の波長依存性により決まる。PCF は、周期的な微細加工の形状の制御により群速度分散の調整が容易である。よ

40

50

って、入射するパルス光の波長を考慮して適当なPCFを選ぶことにより、所望の波長を有する波長変換パルス光を発生させることができる。また、ポンプ光としては、パルス幅が100ps以下のパルス光が頻繁に用いられる。100ps以下のパルス光を用いた場合、光学非線形効果を生じさせるのに必要となる高い光ピーク強度を得ることができる。

【0003】

パルス光をPCFに入射する方法、およびPCFから医用イメージング装置にパルス光を送る方法として、次の方法がある。即ち、シングルモードファイバー、マルチモードファイバー、およびダブルクラッドファイバー（以下、これらを総称して一般ファイバーとも呼ぶ）の何れかとPCFとを融着によって接続する方法がある。パルス光源より出力されるパルス光は、これら一般ファイバーを通して、融着部よりPCFに入射する。また、PCFより出射するパルス光および波長変換パルス光は、融着部より一般ファイバーに入り、一般ファイバーを伝搬して医用イメージング装置に送ることができる。このようなPCFと一般ファイバーとを融着接続する方法は、非特許文献1に記載されている。PCFのコア径は、パルス光の波長変換で必要とされる分散曲線によってきまる。また、パルス光源の出力端である一般ファイバー、または医用イメージング装置の入力端である一般ファイバーは、それらの光源または装置の仕様によって適切な一般ファイバーが選択される。したがって、融着で接続するPCFと一般ファイバーのモードフィールド径(MFD：ファイバー中を伝搬する光の直径)は通常異なっている。非特許文献1には、融着点で弱い放電を複数回行ない、PCFの硝材（一般には石英）を融解し、PCFの断面に加工された周期的な空孔の直径の調整により、PCFのMFDが調整できることが示されている。この方法によれば、融着点の近傍でPCFのMFDを調整することにより、通常はMFDの異なるPCFと一般ファイバーとの融着接続が可能となる。この融着方法によれば、パルス光に対して50%～90%以上の高い接続効率が得られる。ここで接続効率とは、第1の一般ファイバーと第2の一般ファイバーとを光学的に接続し前者から後者に向かって光を伝搬させるときの、前者のコアを伝搬する光のパワー P_0 と後者のコアを伝搬する光のパワー P_1 との比 P_1/P_0 である。これらパワーの差 $P_0 - P_1$ は、融着点における漏れ光のパワーを表す。

【先行技術文献】

【非特許文献】

【0004】

【非特許文献1】Journal of Lightwave Technology Vol. 25, No. 11, pp. 3563 - 3574, November 2007

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

しかし、波長変換パルス光源において、このような方法をもって一般ファイバーとPCFとを融着接続した場合、一般ファイバーおよびPCFを保護する被覆層に破損が生じることがある。図5(a)は、PCFと一般ファイバーとの融着点を横から見た断面図である。PCFと一般ファイバーの融着点は、その強度を増す為に、UV硬化樹脂によって被覆されている。このようなUV硬化樹脂で融着点を被覆する装置として、フジクラ株式会社やVytran社などのファイバーメーカおよび融着機メーカより、ファイバーリコータが販売されている。融着点をリコータによりUV硬化樹脂で被覆（リコート）することによって、一般ファイバーとPCFとは、一般的に直径0.25mmの被覆層により滑らかに被覆されている。波長変換パルス光源においてパルス光を融着点に入射した場合、融着点で発生する漏れ光によって、一般ファイバーおよびPCFの被覆層の破損が生じることがあり得る。

【0006】

以下、図を用いて被覆層の破損のメカニズムを説明する。図5(b)は、シングルモードファイバー(SMF)およびPCFを伝搬する光の断面光強度分布を表している。SM

Fの断面光強度分布は単峰形であり、一般にガウシアン分布として近似される。一方、PCFの断面光強度分布はコアの周りにフリンジ状の光の分布がある。よって、PCFにおける断面光強度分布は、断面の空孔の径を変えることにより調整できるが、SMFにおける断面光強度分布とは正確には一致しない。その結果、SMFより入射するパルス光の約10%~50%は、PCFのコアに入射せず、漏れ光となる。融着点で発生する漏れ光は、PCFのMFD(約 $3\mu\text{m}$ ~ $6\mu\text{m}$)と一般ファイバーのMFDとの差が大きいほど、一般的に大きい。よって、PCFとマルチモードファイバーもしくはダブルクラッドファイバーとを融着接続した場合、漏れ光のパワーはより大きくなり易い。また、本発明者の測定によれば、PCFと一般ファイバーとの融着点で生じる漏れ光は、伝搬するパルス光のピーク強度が高くなると増すことが分かっている。これは、一般ファイバーおよびPCFのコア内での非線形効果によって、パルス光が感受する屈折率が変わり、そのMFDが変化することにより生じると考えられる。

10

【0007】

また、ピーク強度が高いパルス光は、一般ファイバーおよびPCFのコア内での非線形光学効果によってそのスペクトル幅が広がる。PCFの空孔を変えてモードフィールド径を調整する手法では、広い波長帯域においてPCFと一般ファイバーとのモードフィールド径を一致させることは難しい。よって、非線形光学効果によってスペクトル幅が広がったパルス光に対しては、融着の接続効率は、より低下する。一方、SMFとSMFの融着点に連続光(CW光)を入射する場合の損失は、およそ0.05dB以下(約1.1%以下)である。以上のように、PCFと一般ファイバーとの融着点にパルス光を入射する場合、SMFとSMFとの融着点にCW光を入射する場合の10倍以上の漏れ光(入射する光のパワーに対して約10%~50%)が発生すると考えられる。

20

【0008】

融着点で発生した漏れ光の一部は被覆層を伝搬する。被覆層は、一般に、ファイバーを柔軟に曲げることができるように曲げに対して柔軟な樹脂が選ばれており、可視光および近赤外光に対する透過率は高くない(50%/mm以下)。よって、漏れ光は被覆層によって吸収され、発熱による被覆層の破損が生じることがある。以上のように、PCFと一般ファイバーなどとの融着点にパルス光を入射する場合、融着点で発生する漏れ光によって、PCFや一般ファイバーの被覆層の破損が生じることがある。

【課題を解決するための手段】

30

【0009】

上記課題に鑑み、本発明の一側面のファイバー構造体は、第1のファイバーと、前記第1のファイバーを伝搬した光が伝搬するように、前記第1のファイバーと接続された第2のファイバーと、を備え、前記第1のファイバーと前記第2のファイバーのうち少なくとも1つがフォトニック結晶ファイバーである。そして、前記第2のファイバーは、前記第1のファイバーと前記第2のファイバーとの接続面より順に第1の被覆層と第2の被覆層で被覆されており、前記第1の被覆層の屈折率 n_1 は、前記第2のファイバーのクラッド層の屈折率より大きく、前記第1のファイバーのNA、前記第2のファイバーの中心を原点とする前記第1の被覆層の半径 R 、前記第2のファイバーの中心を原点とする前記第2の被覆層の半径 r 、前記接続面と前記第1の被覆層の端との間の距離 L 、が、 $L > (r \times n_1) / \text{NA}$ の関係式を満たす。

40

【発明の効果】

【0010】

本発明によれば、被覆層の破損を効果的に防止ないし抑制することができる。

【図面の簡単な説明】

【0011】

【図1】本発明に係る広帯域光源を説明する概略図。

【図2】本発明の実施形態1に関わる波長変換パルス光源の概略図。

【図3】本発明の実施形態2に関わるパルス光源の概略図。

【図4】本発明の実施形態2に関わるパルス光源の漏れ光を説明するグラフ。

50

【図 5】本発明の課題を説明する模式図。

【発明を実施するための形態】

【0012】

本発明の一側面の波長変換パルス光源は、次の様なファイバー接続構造を利用する。即ち、このファイバー接続構造では、少なくとも一方がフォトニック結晶ファイバーである第1のファイバーと第2のファイバーとが融着により接続されている。そして、第2のファイバーは、両ファイバーとの接続面より順に第1の被覆層と第2の被覆層で被覆され、第1の被覆層の屈折率 n_1 は、第2のファイバーのクラッド層の屈折率より大きく、 $L > (r \times n_1) / NA$ の関係式が満たされる。波長変換パルス光源では、パルス光を出力するパルス光源がこうしたファイバー接続構造と光学的に接続され、パルス光は第1のファイバーを伝搬したのち第2のファイバーを伝搬する。被覆層の破損をより効果的に防止ないし抑制するためには、さらに $R > (L \times NA) / n_1$ の関係式が満たされるのが好適である。

10

【0013】

以下、本発明に係る広帯域光源の一例を、図1を用いて説明する。図1(a)は波長変換パルス光源の構成を表す模式図、図1(b)は波長変換パルス光源が有する融着部の断面図である。波長変換パルス光源は、パルス光を発生するパルス光源10と、第1の光ファイバーと第2の光ファイバーを備えている。融着部A、Bでは、第1の光ファイバーと第2の光ファイバーとが融着接続されている。第1の光ファイバーおよび第2の光ファイバーの一方はPCF、他方は一般ファイバーである。すなわち、図1(a)の融着部Aにおいては、第1の光ファイバーは一般ファイバー12であり、第2の光ファイバーはPCF14である。また、融着部Bにおいては、第1の光ファイバーはPCF14であり、第2の光ファイバーは一般ファイバー16である。

20

【0014】

パルス光源10はパルス光を出力し、そのパルス光は第1の光ファイバーを伝搬したのち、融着点（融着面ないし接続面）より第2の光ファイバーへと入射する。第1の光ファイバーと第2の光ファイバーとは、それぞれ、被覆層0と被覆層2（第2の被覆層）とで被覆されている。融着点を挟む第2の光ファイバーの被覆層2と第1のファイバーの被覆層0の一部は取り除かれており、代わって、被覆層1（第1の被覆層）が被覆されている。被覆層1は、融着点と被覆層0との間の第1の光ファイバーを被覆し、融着点と被覆層2との間の第2の光ファイバーを被覆している。被覆層1の屈折率 n_1 は、第2の光ファイバーのクラッド層の屈折率 n_0 よりも高い。こうする理由は、第1のファイバーから第2のファイバーへ入らなかった漏れ光を効果的に被覆層1へ導波させるためである。ここで、第2の光ファイバーがPCFである場合、PCFのクラッド層は、PCFの断面において周期的な加工が成されていない領域である。すなわち、PCFのクラッド層の屈折率 n_0 とは、PCFを形成する硝材の屈折率を指す。また、パルス光に対する被覆層1の透過率は、被覆層2の透過率よりも高い。こうする理由は、漏れ光が被覆層1で吸収されることによる発熱を抑えるためである。

30

【0015】

被覆層1は、例えば、アクリル樹脂、エポキシ樹脂、高屈折率ポリマー、の何れかを含むUV硬化樹脂、ポリカーボネード、およびサファイアの少なくとも1つを含む。即ち、UV硬化樹脂は、アクリル樹脂とエポキシ樹脂と高屈折率ポリマーのうちの少なくとも1つを含み、被覆層1は、こうしたUV硬化樹脂とポリカーボネードとサファイアのうちの少なくとも1つを含む。これらは、一般的に手に入りやすい比較的安価な部材である。

40

【0016】

融着点で第2の光ファイバーのコアに接続しなかったパルス光（すなわち漏れ光）は、の広がり角をもって被覆層1を伝搬し、被覆層2に到達する。ここで、被覆層1におけるパルス光の広がり角 θ_1 は、空気中での広がり角 $\theta_{\text{空気}}$ と、以下の関係にある。

$$\sin \theta_1 / \sin \theta_{\text{空気}} = \sin \theta_{\text{空気}} / NA = 1 / n_1$$

【0017】

50

$NA (= \sin \theta_{\text{空気}})$ は、第 1 の光ファイバーの開口数 (NA) である。融着点と被覆層 2 の端との距離が L である場合、被覆層 2 における漏れ光の広がり径 $d_{\text{漏れ光}}$ は、次式で与えられる。

$$d_{\text{漏れ光}} = 2L \times \sin \theta = (2L \times NA) / n_1$$

【0018】

第 2 の光ファイバーの中心を原点とする被覆層 1 の半径を R 、第 2 の光ファイバーの中心を原点とする被覆層 2 の半径を r とするとき、被覆層 1 の表面での反射が抑制されて漏れ光が伝搬し、被覆層 2 の外部に放出される条件は、次のように表される。

$$d_{\text{漏れ光}} > 2r$$

さらに、 $R > d_{\text{漏れ光}} / 2$ であると好適である。

【0019】

上記の条件を満たす L と R は、次のように表される。

$$L > (r \times n_1) / NA$$

さらに、 $R > (L \times NA) / n_1$ であると好適である。

【0020】

上記条件式が満たされるとき、融着点より放出される漏れ光は、被覆層 1 の内部を広がりながら伝搬し、被覆層 2 の端に到達する。このとき、被覆層 1 の透過率は被覆層 2 の透過率より高く、被覆層 1 を伝搬する漏れ光の吸収による被覆層 1 の破損を回避することができる。また、被覆層 2 の端に到達した漏れ光の一部は、被覆層 1 と被覆層 2 との隙間より外部に放出される。よって、被覆層 2 に入射する漏れ光のパワーが下がり、被覆層 2 の破損が回避される。以上の議論は、第 1 の光ファイバーが PCF であろうと一般ファイバーであろうと何れでも成立する。

【0021】

以下、より具体的な実施形態を、図を用いて説明する。

(実施形態 1)

図 2 (a) に、本発明の実施形態 1 に関わる波長変換パルス光源の概略図を示す。パルス光源 20 は、Yb ドープファイバー利得媒体として用い、モード同期によってパルス光を出力するファイバーレーザと、Yb ドープファイバーを媒体として用いた増幅器とからなる。そして、コア径 $10 \mu\text{m}$ のダブルクラッドファイバー (DCF) 22 よりパルス光を出力する。DCF は、コアアクティブ社製の DCF - UN - 10 / 125 - 08 であり、その NA は 0.08 である。パルス光は、中心波長 1030 nm 、スペクトル幅 0.5 nm 、パルス幅 3 ps 、繰り返し周波数 30 MHz 、平均出力 2 W である。

【0022】

パルス光の波長変換を行うフォトニック結晶ファイバー 24 は、NKT フォトニクス社製の SC - 5.0 - 1040 であり、その長さは 0.3 m である。PCF を伝搬するポンプパルス光は、Fiber Optical Parametric Amplifier (FOPA) の原理によって、パルス光の一部は波長約 800 nm の波長変換パルス光に変換される。パルス光および波長変換パルス光は、PCF 24 より波長変換パルス光源の出力として取り出される。DCF 22 と PCF 24 とは、非特許文献 1 に記載された断続的な融着条件により融着されている。断続的な融着条件では、通常ファイバー融着接続条件よりも弱い放電でファイバーを融着することで、PCF の穴形状を或る程度維持したまま融着・接続する。

【0023】

図 2 (b) に、DCF 22 と PCF 24 の融着部の断面図を示す。DCF のコアから PCF のコアへのパルス光の結合効率は約 70% である。融着点を挟んだ DCF と PCF は、被覆層 1 である高屈折率透明樹脂で被覆されている。被覆層 1 で被覆されている融着点と被覆層 2 の端との距離 L は 4 mm 、被覆層 1 の半径 R は 0.5 mm である。パルス光の波長に対する DCF 22 の被覆層 0 および PCF 24 の被覆層 2 の透過率は、 $50\% / \text{mm}$ 以下である。PCF 24 の被覆層 2 の径 $2r$ は 0.25 mm である ($r = 0.125 \text{ mm}$)。PCF の硝材はシリカガラスであり、パルス光に対するその屈折率は 1.45 である

10

20

30

40

50

。すなわち、PCF24のクラッドの屈折率は1.45である。被覆層1の高屈折率透明樹脂は、UV硬化で成形が可能な菱江化学株式会社のルミプラスを選択することができる。このとき、ポンプパルス光の波長に対する被覆層1の屈折率は $n_1 = 1.65$ 、透過率は80%/mm以上である。発熱を回避するために、より好ましくは90%/mm以上である。被覆層1の屈折率はPCF24の硝材の屈折率より大きく、また被覆層1の透過率は被覆層2の透過率より高い。

【0024】

$(r \times n_1) / NA$ は2.6mmとなり距離 $L (= 4 \text{ mm})$ よりも短い。また $(L \times NA) / n_1$ は0.19mmであり被覆層1の半径 $R (= 0.5 \text{ mm})$ よりも小さい。このとき、被覆層2の端における漏れ光の広がり径 $d_{\text{漏れ光}}$ は0.38mmであり、被覆層2の直径 $d (= 0.25 \text{ mm})$ よりも大きい。よって、被覆層2の端で被覆層2の断面と重ならない漏れ光は、被覆層1と被覆層2との隙間より外部に放出される。なお、漏れ光の広がり径 $d_{\text{漏れ光}}$ は、パルス光のピーク強度 I_{peak} の $1/e^2$ の強度 I_{peak}/e^2 までの部分の径で定義している。

【0025】

実施形態1のパルス光源では、PCFとDCFの融着点で発生する漏れ光(パワー約0.6W)は、透過率の高い被覆層1の内部を広がりながら伝搬する。そして、被覆層1の表面での反射が抑制されて被覆層2の端に到達し、被覆層1と被覆層2との隙間よりその一部が外部に放出される。よって、被覆層1および被覆層2で吸収される漏れ光のパワー密度(吸収される漏れ光のパワーの密度)が減少し、その結果、発熱による被覆層1および被覆層2の破損を回避することができる。

【0026】

(実施形態2)

図3(a)に、本発明の実施形態2に関わるパルス光源の概略図を示す。パルス光源30は、Ybドープファイバー利得媒体として用い、モード同期によってパルス光を出力するファイバーレーザと、Ybドープファイバーを媒体として用いた増幅器とからなる。そして、コア径 $10 \mu\text{m}$ のダブルクラッドファイバー(DCF)32よりポンプパルス光を出力する。DCF32は、コアアクティブ社製のDCF-UN-10/125-08であり、そのNAは0.08である。ポンプパルス光は、中心波長 1030 nm 、スペクトル幅 1 nm 、パルス幅 3 ps 、繰り返し周波数 30 MHz 、平均出力 5 W である。パルス光の波長変換を行うフォトニック結晶ファイバー34は、NKTフォトニクス社製のSC-3.7-975であり、その長さは 1.5 m である。パルス光はPCF34を伝搬する際に、Supercontinuumの発生原理に基づいて、波長 $480 \text{ nm} \sim 1800 \text{ nm}$ の広帯域光にその一部が変換される。

【0027】

パルス光および波長変換パルス光は、PCF34より波長変換パルス光源の出力として取り出される。DCF32とPCF34とは、非特許文献1に記載された断続的な融着条件により融着されている。DCF32のコアからPCF34のコアへのパルス光の結合効率は約60%である。すなわち、漏れ光の平均パワーは約 $2 \text{ W} (= P_{\text{漏れ光}})$ と見積られる。実験的には、被覆層2に入射する漏れ光のパワーが 1 W を超えると破損の確率が極めて高くなる。よって、被覆層2の端における漏れ光のパワー密度分布は、被覆層2の断面と重なるパワー(図3(b)の斜線部)が 1 W 以下であることが望ましい。

【0028】

融着点より放出される漏れ光の被覆層2の端における強度分布は、DCF32のNAによって記述される。図4(a)は、被覆層2の端における漏れ光のパワー密度分布(ガウシアン分布)を表している。分布のピークに対してパワー密度が $1/e^2$ 倍に減少する半径が、漏れ光の広がりであり、広がり角とDCF32のNAとは $\sin / NA = 1/n_1$ の関係が成り立つ。よって、漏れ光の広がり径は、 $d_{\text{漏れ光}}/2 = (L \times NA) / n_1$ である。

【0029】

10

20

30

40

50

図4(a)のパワー密度分布において、被覆層2の断面(半径 r)に入るパワー P_{in} は、次式で表される。

【0030】

【数1】

$$P_{in} = P_{\text{漏れ光}} \left\{ 1 - \exp \left[-2 \left(\frac{r}{d_{\text{漏れ光}}/2} \right)^2 \right] \right\}$$

$$= P_0 (1 - \alpha) \left\{ 1 - \exp \left[-2 \left(\frac{r}{L(NA/n_1)} \right)^2 \right] \right\}$$

10

20

【0031】

ここで、 P_0 は、第1の光ファイバーを伝搬するパルス光のパワー、 α は、第1の光ファイバーと第2の光ファイバーとの結合効率である。被覆層2の破損を防ぐためには、 P_{in} は1W以下であることが望ましい。

【0032】

図4(b)は、 $r / (d_{\text{漏れ光}} / 2)$ に対し、 $P_{in} / P_{\text{漏れ光}} = 1 - \exp [-2 (r / (d_{\text{漏れ光}} / 2))^2]$ をプロットしたグラフである。 $P_{\text{漏れ光}}$ は2Wであるため、 $P_{in} / P_{\text{漏れ光}}$ が0.5以下であれば、 P_{in} は1W以下となる。よって、グラフより $2r / d_{\text{漏れ光}}$ は0.6以下、すなわち、 $d_{\text{漏れ光}}$ は $2r / 0.6$ より大きければよい。

30

【0033】

融着点を挟んだDCF32とPCF34は、被覆層1である高屈折透明樹脂で被覆されている。被覆層1で被覆されている融着点と被覆層2の端との距離 L は9mm、被覆層1の半径 R は1.0mmである。パルス光の波長に対するDCF32の被覆層0およびPCF34の被覆層2の透過率は50%/mm以下である。PCF34の被覆層2の径 $2r$ は0.25mm($r = 0.125$ mm)である。PCF34の硝材はシリカガラスであり、パルス光に対する屈折率は1.45である。被覆層1の高屈折透明樹脂は、UV硬化で成形可能な菱江化学株式会社のルミプラスを選択することができる。このとき、ポンパルス光の波長に対する被覆層1の屈折率は $n_1 = 1.65$ 、透過率は80%/mm以上である。被覆層1の屈折率はPCF34の硝材より大きく、また被覆層1の透過率は被覆層2の透過率より高い。 $(r \times n_1) / NA$ は2.6mmとなり距離 $L (= 9$ mm)よりも短い。また $L \times NA / n_1$ は0.44mmであり被覆層1の半径 $R (= 1.0$ mm)よりも小さい。このとき、被覆層2の端における漏れ光の広がり径 $d_{\text{漏れ光}}$ は0.88mmであり、 $d_{\text{漏れ光}} / 2$ と被覆層2の半径 $r (= 0.125$ mm)との比 $r / (d_{\text{漏れ光}} / 2)$ は、0.28である。この値は、被覆層2に入射する漏れ光が1W以下となる条件 $r / (d_{\text{漏れ光}} / 2) < 0.6$ を満たしている。被覆層2に入射する漏れ光のパワーは、0.29Wと見積られる。

40

【0034】

よって、被覆層2の端で被覆層2の断面と重ならない漏れ光は、被覆層1と被覆層2と

50

の隙間より外部に放出される。以上のことから、実施形態 2 の波長変換パルス光源では、P C F と D C F の融着点で発生する漏れ光（パワー約 2 W）は、透過率の高い被覆層 1 の内部を広がりながら伝搬し、被覆層 2 の端でその一部が外部に放出される。そのとき、被覆層 2 の断面より入射して、被覆層 2 を伝搬するパルス光のパワーは 1 W より小さい。よって、漏れ光が被覆層 1 および被覆層 2 において高エネルギー密度で吸収されることによる発熱で被覆層 1 および被覆層 2 が破損されることを回避できる。実施形態 2 と実施形態 1 との相違点は、実施形態 2 ではパルス光の平均出力が大きいので、被覆層 2 に入ってくるパワーの観点から制限を設けていることである。

【 0 0 3 5 】

以上の様に、実施形態 2 のパルス光源では、D C F 3 2 と P C F 3 4 の融着点で発生する漏れ光（パワー約 2 W）は、透過率の高い被覆層 1 の内部を広がりながら伝搬し、被覆層 2 の端でその一部が外部に放出される。また、被覆層 2 の端において、被覆層 2 に入射する漏れ光のパワーは 0 . 2 9 W と見積られる。これは、被覆層 2 が高い確率で破損する 1 W より小さい。よって、被覆層 1 および被覆層 2 で吸収される漏れ光のパワー密度（吸収される漏れ光のパワーの密度）が減少し、その結果、発熱による被覆層 1 および被覆層 2 の破損を回避することができる。

【 0 0 3 6 】

本実施形態において、D C F 3 2 のコアから P C F 3 4 のコアへのパルス光の結合効率は約 6 0 %（ $= 0 . 6$ ）であるが、P C F 3 4 への結合効率は、パルス光のパルス幅等の条件により変動する。パルス光のパルス幅等の条件は、波長変換パルス光源の経年変化によって変動する可能性がある。よって、より確実に被覆層 2 の破損を回避するためには、次の式が満たされていることが望ましい。

$$P_0 \{ 1 - \exp [- 2 (r / (L (N A / n_1)))^2] \} < 1 W$$

【 0 0 3 7 】

これは前の式（数 1）で $= 0$ とした式である。このことは、たとえ D C F 3 2 のコアから P C F 3 4 のコアへのパルス光の結合効率がゼロとなるようなことがあっても、被覆層 2 の破損が回避されることを意味し、より確実に被覆層 2 の破損を回避できることになる。また、被覆層 1 は、図 3（b）に示すように、発生した熱を排熱するためのヒートシンク 3 6 と接触していると、より被覆層 1 の破損を回避することができる。ヒートシンク 3 6 は、被覆層 1 より高い熱伝導率を有している材料であればよい。

【 符号の説明 】

【 0 0 3 8 】

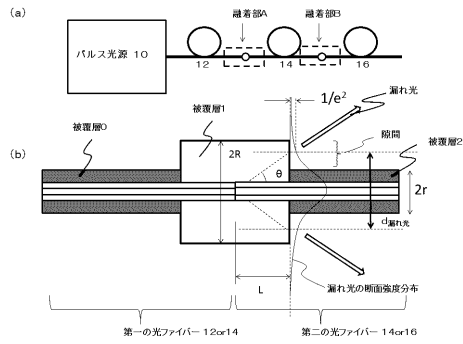
1 0・・・パルス光源、1 2, 1 4・・・第 1 のファイバー、1 4, 1 6・・・第 2 のファイバー

10

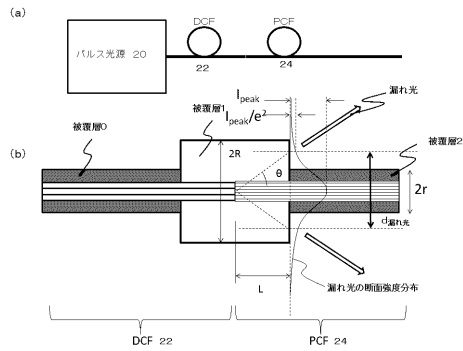
20

30

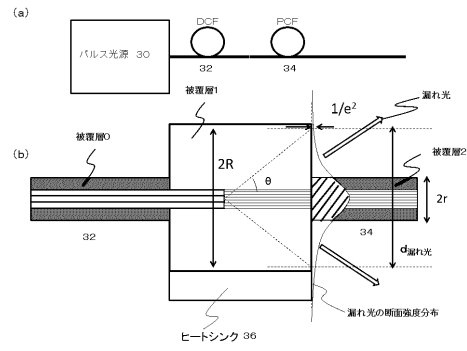
【図 1】



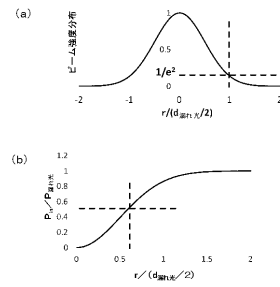
【図 2】



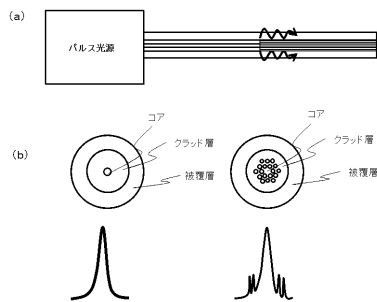
【図 3】



【図 4】



【図 5】



フロントページの続き

(56)参考文献 特開2011-211220(JP,A)
特開2004-272026(JP,A)
特開2005-303166(JP,A)
実開昭57-110523(JP,U)
特開2008-268747(JP,A)
特開2008-310277(JP,A)
米国特許第07542645(US,B1)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
G02B 6/02 - 6/43