

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2017-183564

(P2017-183564A)

(43) 公開日 平成29年10月5日(2017.10.5)

(51) Int.Cl.	F I	テーマコード(参考)
HO1S 3/067 (2006.01)	HO1S 3/067	2H150
HO1S 3/10 (2006.01)	HO1S 3/10 D	5F172
GO2B 6/02 (2006.01)	GO2B 6/02 461	
GO2B 6/036 (2006.01)	GO2B 6/036	

審査請求 未請求 請求項の数 8 O L (全 32 頁)

(21) 出願番号 特願2016-70062(P2016-70062)
 (22) 出願日 平成28年3月31日(2016.3.31)

(71) 出願人 000005290
 古河電気工業株式会社
 東京都千代田区丸の内二丁目2番3号
 (74) 代理人 110002147
 特許業務法人酒井国際特許事務所
 (72) 発明者 土田 幸寛
 東京都千代田区丸の内2丁目2番3号 古河電気工業株式会社内
 (72) 発明者 杉崎 隆一
 東京都千代田区丸の内2丁目2番3号 古河電気工業株式会社内
 Fターム(参考) 2H150 AB04 AB05 AB10 AB32 AC57
 AD03 AD04 AD05 AD12 AD15
 AD18 AD19 AD22 AD34 AH27
 AH33 AH50

最終頁に続く

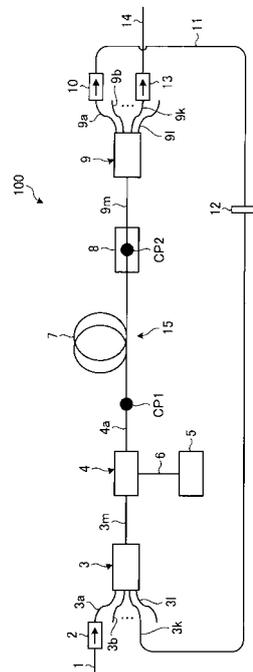
(54) 【発明の名称】 光ファイバ増幅器および多段光増幅ファイバ構造

(57) 【要約】

【課題】 多段接続しても小型化かつ低消費電力化が可能な光ファイバ増幅器およびこれに好適に用いることができる多段光増幅ファイバ構造を提供すること。

【解決手段】 希土類元素が添加された複数のコア部と、前記複数のコア部の外周に形成され、前記複数のコア部よりも屈折率が低い内側クラッド部と、前記内側クラッド部の外周に形成され、前記内側クラッド部よりも屈折率が低い外側クラッド部と、を有する光増幅ファイバと、前記光増幅ファイバの内側クラッド部に、前記希土類元素を光励起する励起光を供給する少なくとも一つの励起光源と、を備えるクラッド励起型の光ファイバ増幅器であって、前記複数のコア部は、複数のコア部群からなり、前記光増幅ファイバは、異なるコア部群に属するコア部の間で利得が互いに異なるように構成されており、前記異なるコア部群に属するコア部同士が直列接続されており、多段光増幅ファイバ構造を構成している。

【選択図】 図1



【特許請求の範囲】**【請求項 1】**

希土類元素が添加された複数のコア部と、前記複数のコア部の外周に形成され、前記複数のコア部よりも屈折率が低い内側クラッド部と、前記内側クラッド部の外周に形成され、前記内側クラッド部よりも屈折率が低い外側クラッド部と、を有する光増幅ファイバと

、
前記光増幅ファイバの内側クラッド部に、前記希土類元素を光励起する励起光を供給する少なくとも一つの励起光源と、

を備えるクラッド励起型の光ファイバ増幅器であって、

前記複数のコア部は、複数のコア部群からなり、

前記光増幅ファイバは、異なるコア部群に属するコア部の間で利得が互いに異なるように構成されており、

前記異なるコア部群に属するコア部同士が直列接続されており、多段光増幅ファイバ構造を構成していることを特徴とする光ファイバ増幅器。

【請求項 2】

前記内側クラッド部は、互いに屈折率が異なる複数の内側副クラッド部を有し、前記異なるコア部群に属するコア部は、それぞれ異なる内側副クラッド部に囲まれていることを特徴とする請求項 1 に記載の光ファイバ増幅器。

【請求項 3】

前記異なるコア部群に属するコア部は、前記希土類元素の添加濃度が互いに異なることを特徴とする請求項 1 または 2 に記載の光ファイバ増幅器。

【請求項 4】

前記異なるコア部群に属するコア部は、前記添加されている希土類元素の種類が互いに異なることを特徴とする請求項 1 ~ 3 のいずれか一つに記載の光ファイバ増幅器。

【請求項 5】

前記異なるコア部群に属するコア部は、コア直径が互いに異なることを特徴とする請求項 1 ~ 4 のいずれか一つに記載の光ファイバ増幅器。

【請求項 6】

n 、 m を 2 以上の整数として、前記多段光増幅ファイバ構造における段数を n とし、お前記光増幅ファイバにおけるコア部群の数を n 以上とし、前記光増幅ファイバにおけるコア部の数を $n \times m$ とすると、 m 個の前記多段光増幅ファイバ構造を有することを特徴とする請求項 1 ~ 5 のいずれか一つに記載の光ファイバ増幅器。

【請求項 7】

前記励起光源の数は m より小さいことを特徴とする請求項 6 に記載の光ファイバ増幅器。

【請求項 8】

希土類元素が添加された複数のコア部と、前記複数のコア部の外周に形成され、前記複数のコア部よりも屈折率が低い内側クラッド部と、前記内側クラッド部の外周に形成され、前記内側クラッド部よりも屈折率が低い外側クラッド部と、を有する光増幅ファイバを備え、

前記複数のコア部は、複数のコア部群からなり、

前記光増幅ファイバは、異なるコア部群に属するコア部の間で利得が互いに異なるように構成されており、

前記異なるコア部群に属するコア部同士が直列接続されていることを特徴とする多段光増幅ファイバ構造。

【発明の詳細な説明】**【技術分野】****【0001】**

本発明は、光ファイバ増幅器および多段光増幅ファイバ構造に関するものである。

【背景技術】

10

20

30

40

50

【0002】

1本の光ファイバ内に希土類元素が添加された複数のコア部を含む、いわゆるマルチコアファイバと呼ばれる構造の光増幅ファイバが開示されており、これを用いた光ファイバ増幅器やファイバレーザが開示されている（特許文献1、2）。

【0003】

特許文献1では、クラッド励起構成のマルチコア希土類添加光ファイバを用いたファイバレーザが開示されている。このファイバレーザでは、励起光を無駄なく効率的にコア部へ結合させるために、マルチコア希土類添加光ファイバ中のコアを周回接続させて、残留する励起光量を削減する構造となっている。一方、特許文献2では、マルチコア希土類添加光ファイバの各コア部を周回接続させることにより、ファイバレーザにおいて希土類添加光ファイバの条長で変化する増幅特性や共振器特性に対して、希土類添加光ファイバの取り換えをせずに特性を調整し、かつ小型化可能とする技術が開示されている。

10

【先行技術文献】

【特許文献】

【0004】

【特許文献1】特許第3889746号公報

【特許文献2】特許第5811056号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

20

ところで、多くの光ファイバ増幅器において、光増幅ファイバが多段接続されている。この場合、光増幅ファイバの段数が増加するにつれて光ファイバ増幅器が大型化したり、光増幅ファイバを光励起するために用いる励起光源の数が増加し、光ファイバ増幅器の消費電力が増加したりするという問題がある。

【0006】

本発明は、上記に鑑みてなされたものであって、多段接続しても小型化かつ低消費電力化が可能な光ファイバ増幅器およびこれに好適に用いることができる多段光増幅ファイバ構造を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0007】

30

上述した課題を解決し、目的を達成するために、本発明の一態様に係る光ファイバ増幅器は、希土類元素が添加された複数のコア部と、前記複数のコア部の外周に形成され、前記複数のコア部よりも屈折率が低い内側クラッド部と、前記内側クラッド部の外周に形成され、前記内側クラッド部よりも屈折率が低い外側クラッド部と、を有する光増幅ファイバと、前記光増幅ファイバの内側クラッド部に、前記希土類元素を光励起する励起光を供給する少なくとも一つの励起光源と、を備えるクラッド励起型の光ファイバ増幅器であって、前記複数のコア部は、複数のコア部群からなり、前記光増幅ファイバは、異なるコア部群に属するコア部の間で利得が互いに異なるように構成されており、前記異なるコア部群に属するコア部同士が直列接続されており、多段光増幅ファイバ構造を構成していることを特徴とする。

40

【0008】

本発明の一態様に係る光ファイバ増幅器は、前記内側クラッド部は、互いに屈折率が異なる複数の内側副クラッド部を有し、前記異なるコア部群に属するコア部は、それぞれ異なる内側副クラッド部に囲まれていることを特徴とする。

【0009】

本発明の一態様に係る光ファイバ増幅器は、前記異なるコア部群に属するコア部は、前記希土類元素の添加濃度が互いに異なることを特徴とする。

【0010】

本発明の一態様に係る光ファイバ増幅器は、前記異なるコア部群に属するコア部は、前記添加されている希土類元素の種類が互いに異なることを特徴とする。

50

【 0 0 1 1 】

本発明の一態様に係る光ファイバ増幅器は、前記異なるコア部群に属するコア部は、コア直径が互いに異なることを特徴とする。

【 0 0 1 2 】

本発明の一態様に係る光ファイバ増幅器は、 n 、 m を2以上の整数として、前記多段光増幅ファイバ構造における段数を n とし、前記光増幅ファイバにおけるコア部群の数を n 以上とし、前記光増幅ファイバにおけるコア部の数を $n \times m$ とすると、 m 個の前記多段光増幅ファイバ構造を有することを特徴とする。

【 0 0 1 3 】

本発明の一態様に係る光ファイバ増幅器は、前記励起光源の数は m より小さいことを特徴とする。

10

【 0 0 1 4 】

本発明の一態様に係る多段光増幅ファイバ構造は、希土類元素が添加された複数のコア部と、前記複数のコア部の外周に形成され、前記複数のコア部よりも屈折率が低い内側クラッド部と、前記内側クラッド部の外周に形成され、前記内側クラッド部よりも屈折率が低い外側クラッド部と、を有する光増幅ファイバを備え、前記複数のコア部は、複数のコア部群からなり、前記光増幅ファイバは、異なるコア部群に属するコア部の間で利得が互いに異なるように構成されており、前記異なるコア部群に属するコア部同士が直列接続されていることを特徴とする。

【 発明の効果 】

20

【 0 0 1 5 】

本発明によれば、多段接続しても小型化かつ低消費電力化が可能な光ファイバ増幅器を実現できるという効果を奏する。

【 図面の簡単な説明 】

【 0 0 1 6 】

【 図 1 】 図 1 は、実施形態 1 に係る光ファイバ増幅器の模式的な構成図である。

【 図 2 】 図 2 は、図 1 に示す光増幅ファイバの模式的な断面および屈折率プロファイルを示す図である。

【 図 3 】 図 3 は、光増幅ファイバの構成例 1 の模式的な断面図である。

【 図 4 】 図 4 は、光増幅ファイバの構成例 2 の模式的な断面図である。

30

【 図 5 】 図 5 は、光増幅ファイバの構成例 3 の模式的な断面図である。

【 図 6 】 図 6 は、光増幅ファイバの構成例 4 の模式的な断面図である。

【 図 7 】 図 7 は、実施形態 2 に係る光ファイバ増幅器の模式的な構成図である。

【 図 8 】 図 8 は、実施形態 3 に係る光ファイバ増幅器の模式的な構成図である。

【 図 9 】 図 9 は、図 8 に示す光増幅ファイバの模式的な断面および屈折率プロファイルを示す図である。

【 図 1 0 】 図 1 0 は、光増幅ファイバの構成例 5 の模式的な断面および屈折率プロファイルを示す図である。

【 図 1 1 】 図 1 1 は、光増幅ファイバの構成例 6 の模式的な断面図である。

【 図 1 2 】 図 1 2 は、光増幅ファイバの構成例 7 の模式的な断面図である。

40

【 図 1 3 】 図 1 3 は、光増幅ファイバの構成例 8 の模式的な断面図である。

【 図 1 4 】 図 1 4 は、光増幅ファイバの構成例 9 の模式的な断面図である。

【 発明を実施するための形態 】

【 0 0 1 7 】

以下に、図面を参照して本発明に係る光ファイバ増幅器および多段光増幅ファイバ構造の実施形態を詳細に説明する。なお、この実施形態によりこの発明が限定されるものではない。また、各図面において、同一または対応する要素には適宜同一の符号を付している。

【 0 0 1 8 】

(実施形態 1)

50

図1は、実施形態1に係る光ファイバ増幅器の模式的な構成図である。図1に示すように、光ファイバ増幅器100は、入力光ファイバ1と、光アイソレータ2と、光合分波器3と、WDM (Wavelength Division-Multiplexing) カブラ4と、励起光源5と、マルチモード光ファイバ6と、光増幅ファイバ7と、残留励起光処理部8と、光合分波器9と、光アイソレータ10と、接続光ファイバ11と、ASE (Amplified Spontaneous Emission) カットフィルタ12と、光アイソレータ13と、出力光ファイバ14と、を備えている。

【0019】

はじめに、光増幅ファイバ7の構成について説明する。図2は、光増幅ファイバ7の模式的な断面およびA-A線断面における屈折率プロファイルを示す図である。光増幅ファイバ7は、希土類元素であるエルビウム (Er) が添加された複数 (光増幅ファイバ7では12個) のコア部7aa~7alと、コア部7aa~7alの外周に形成された内側クラッド部7bと、内側クラッド部7bの外周に形成された外側クラッド部7cと、を有する、いわゆるダブルクラッド構造の光増幅ファイバである。

10

【0020】

コア部7aa~7alは、6個のコア部7aa~7afで構成されるコア部群7dと、6個のコア部7ag~7alで構成されるコア部群7eとからなる。コア部群7dのコア部7aa~7af、コア部群7eのコア部7ag~7alはそれぞれ六角形状に配置されている。

【0021】

また、内側クラッド部7bは、複数 (光増幅ファイバ7では2個) の内側副クラッド部7ba、7bbを有し、異なるコア部群7d、7eに属するコア部7aa~7af、7ag~7alは、それぞれ異なる内側副クラッド部7ba、7bbに囲まれている。具体的には、コア部群7dに属するコア部7aa~7afは、断面円形の内側副クラッド部7baに囲まれており、コア部群7eに属するコア部7ag~7alは、内側副クラッド部7baの外周に形成されたリング状の内側副クラッド部7bbに囲まれている。

20

【0022】

また、屈折率プロファイルP1が示すように、外側クラッド部7c、内側副クラッド部7ba、内側副クラッド部7bb、コア部7aa~7af、コア部7ag~7alの屈折率は、それぞれ、 n_1 、 n_2 、 n_3 、 n_4 、 n_5 である。したがって、内側クラッド部7bは、コア部7aa~7alの屈折率よりも屈折率が低い。また、外側クラッド部7cは、内側クラッド部7bよりも屈折率が低い。また、内側副クラッド部7ba、7bbは、互いに屈折率が異なる。具体的には、内側副クラッド部7bbの方が内側副クラッド部7baよりも屈折率が高い。

30

【0023】

上記屈折率の関係を実現するために、コア部7aa~7alは、屈折率を高める添加物であるゲルマニウム (Ge) が添加された石英ガラスからなり、内側副クラッド部7baは、屈折率を高める添加物であるフッ素 (F) が添加された石英ガラスからなり、内側副クラッド部7bbは、屈折率調整用の添加物が添加されていない純石英ガラスからなり、外側クラッド部7cは低屈折率の樹脂材料からなる。ただし、これらの材料は例示であって、上記屈折率の関係を実現できる材料であれば特に限定はされない。

40

【0024】

また、光増幅ファイバ7では、コア直径、Erの添加濃度、および囲まれているクラッド部に対する比屈折率差については、コア部7aa~7alの全てで略等しい。なお、たとえば、コア直径は2~6 μ mであり、Erの添加濃度は300~3000ppmであり、および囲まれているクラッド部に対する比屈折率差は0.3~1.5%である。

【0025】

つぎに、図1に戻って光ファイバ増幅器100について説明する。以下では、光ファイバ増幅器100の各構成要素とその機能について、入力光ファイバ1側から、接続された順に説明する。入力光ファイバ1は光ファイバ増幅器100が光増幅すべき信号光の入力

50

を受け付け、シングルモードで伝搬する。信号光はたとえば光通信で用いられる $1.55\mu\text{m}$ 波長帯や $1.57\mu\text{m}$ 波長帯に含まれる信号光である。なお、信号光は単一波長の信号光でもよいし、異なる波長の信号光が波長多重されたWDM信号光でもよい。

【0026】

光アイソレータ2は、入力光ファイバ1を光合分波器3に向けて伝搬する信号光を通過させるとともに、光合分波器3から入力光ファイバ1に向けて伝搬する光を遮断する機能を有する。

【0027】

光合分波器3は、ファイババンドル型の光合分波器であって、本実施形態1では12本の入力側光ファイバ3a~3lと、1本の出力側マルチコア光ファイバ3mとを備えている。入力側光ファイバ3a~3lはいずれも信号光をシングルモードで伝搬する。入力光ファイバ1は光アイソレータ2を経由して入力側光ファイバ3aに接続している。

10

【0028】

出力側マルチコア光ファイバ3mは光増幅ファイバ7と同じコア配置を有するマルチコア光ファイバである。入力側光ファイバ3a~3lのコア部はそれぞれ、出力側マルチコア光ファイバ3mのコア部のいずれかと接続している。出力側マルチコア光ファイバ3mはWDMカブラ4に接続している。これにより、光合分波器3は入力光ファイバ1から入力された信号光をWDMカブラ4に出力する。なお、本実施形態1では光合分波器3はファイババンドル型であるが、本発明はこれに限らず、空間結合型の光合分波器を用いてもよい。

20

【0029】

励起光源5は、波長が 980nm 帯のマルチモード励起光を出力する、1つの高出力の半導体LD(Laser Diode)で構成されている。励起光の中心波長はたとえば 975nm や 976nm である。励起光源5は、光増幅ファイバ7の内側クラッド部7bに、Erを光励起する励起光を供給するためのものである。

【0030】

マルチモード光ファイバ6は、たとえばコア直径が $105\mu\text{m}$ 、クラッド径が $125\mu\text{m}$ 、NAが0.22または0.15のマルチモード光ファイバである。マルチモード光ファイバ6は、励起光源5から出力された励起光をマルチモードで伝搬し、WDMカブラ4に出力する。

30

【0031】

WDMカブラ4は、信号光と励起光とを合波し、接続点CP1にて光増幅ファイバ7に融着接続された出力側マルチコア光ファイバ4aに出力する。出力側マルチコア光ファイバ4aは、光増幅ファイバ7と同じコア配置を有するマルチコア光ファイバであり、かつダブルクラッド構造を有している。出力側マルチコア光ファイバ4aのコア部はそれぞれ、光増幅ファイバ7のコア部のいずれかと接続している。出力側マルチコア光ファイバ4aは、信号光をコア部によってシングルモードで伝搬し、励起光を内側クラッド部によってマルチモードで伝搬し、光増幅ファイバ7に出力する。本実施形態1ではWDMカブラ4はファイバ型であるが、本発明はこれに限らず、空間結合型のWDMカブラを用いてもよい。

40

【0032】

なお、光ファイバ増幅器100では、入力光ファイバ1から入力された信号光が、光増幅ファイバ7のコア部7aaに入力されるように、光合分波器3、WDMカブラ4および光増幅ファイバ7の接続がなされている。

【0033】

光増幅ファイバ7は、励起光を内側クラッド部7bによってマルチモードで伝搬する。すると、光増幅ファイバ7のコア部7aa~7alのそれぞれに添加されたErは励起光を吸収し、光励起される。すなわち、光ファイバ増幅器100は、クラッド励起型の光ファイバ増幅器である。そこに、信号光がコア部7aaによってシングルモードで伝搬されることにより、誘導放出現象が発生し、信号光は光増幅される。光増幅ファイバ7は増幅

50

した信号光を光合分波器 9 に出力する。

【 0 0 3 4 】

なお、上述したように、内側クラッド部 7 b において内側副クラッド部 7 b b の方が内側副クラッド部 7 b a よりも屈折率が高いため、励起光は、内側副クラッド部 7 b a よりも内側副クラッド部 7 b b において、より強いパワーで偏在する。その結果、内側副クラッド部 7 b b に囲まれているコア部群 7 e のコア部 7 a g ~ 7 a l の方が、内側副クラッド部 7 b a に囲まれているコア部群 7 d のコア部 7 a a ~ 7 a f よりも、励起光によってより強く励起された状態となっている。

【 0 0 3 5 】

光合分波器 9 は、ファイババンドル型の光合分波器であって、本実施形態 1 では 1 本の入力側マルチコア光ファイバ 9 m と、12 本の出力側光ファイバ 9 a ~ 9 l とを備えている。入力側マルチコア光ファイバ 9 m は光増幅ファイバ 7 と同じコア配置を有するマルチコア光ファイバである。入力側マルチコア光ファイバ 9 m のコア部はそれぞれ、光増幅ファイバ 7 のコア部のいずれかと接続している。

【 0 0 3 6 】

出力側光ファイバ 9 a ~ 9 l はいずれも信号光をシングルモードで伝搬する。出力側光ファイバ 9 a ~ 9 l のコア部はそれぞれ、入力側マルチコア光ファイバ 9 m のコア部のいずれかと接続している。光ファイバ増幅器 100 では、光増幅ファイバ 7 のコア部 7 a a から出力された信号光が、出力側光ファイバ 9 a から出力されるように、光増幅ファイバ 7 および光合分波器 9 の接続がなされている。これにより、光合分波器 9 は、光増幅ファイバ 7 のコア部 7 a a から出力された信号光を出力側光ファイバ 9 a に出力する。なお、本実施形態 1 では光合分波器 9 はファイババンドル型であるが、本発明はこれに限らず、空間結合型の光合分波器を用いてもよい。

【 0 0 3 7 】

なお、入力側マルチコア光ファイバ 9 m と光増幅ファイバ 7 とは接続点 C P 2 にて融着接続している。接続点 C P 2 には残留励起光処理部 8 が設けられている。残留励起光処理部 8 は、融着接続のために接続点 C P 2 の近傍で外側クラッド部 7 c が除去され露出した内側クラッド部 7 b を、屈折率の高い材料で覆う構造を有している。残留励起光処理部 8 は、内側クラッド部 7 b を伝搬し、光増幅に使用されずに出力された残留励起光を処理する機能を有する。

【 0 0 3 8 】

光アイソレータ 10 は、光合分波器 9 の出力側光ファイバ 9 a と接続光ファイバ 11 との間に接続されている。光アイソレータ 10 は、出力側光ファイバ 9 a から出力された信号光を接続光ファイバ 11 に向けて通過させるとともに、接続光ファイバ 11 側から出力側光ファイバ 9 a に向けて伝搬する光を遮断する機能を有する。なお、光アイソレータ 10 は、残留励起光処理部 8 で除去できなかった残留励起光が接続光ファイバ 11 に向けて通過することを防止するような波長依存光損失特性を有することが好ましい。

【 0 0 3 9 】

接続光ファイバ 11 は、光合分波器 9 の出力側光ファイバ 9 a と光合分波器 3 の入力側光ファイバ 3 k とを接続し、信号光をシングルモードで伝搬するシングルモード光ファイバである。接続光ファイバ 11 は出力側光ファイバ 9 a から出力された信号光を光合分波器 3 の入力側光ファイバ 3 k に入力させる。

【 0 0 4 0 】

なお、A S E カットフィルタ 12 は接続光ファイバ 11 の途中に介挿されている。A S E カットフィルタ 12 は、信号光を通過させるとともに、光増幅ファイバ 7 のコア部 7 a a で発生した A S E 光を遮断する機能を有しており、たとえばバンドパスフィルタにより構成される。ただし、A S E カットフィルタ 12 の介挿位置はこれに限られず、たとえば出力側光ファイバ 9 a と光アイソレータ 10 との間でもよい。

【 0 0 4 1 】

光ファイバ増幅器 100 では、光合分波器 3 の入力側光ファイバ 3 k に入力された信号

10

20

30

40

50

光が、光増幅ファイバ7のコア部7 a kに入力されるように、光合分波器3、WDMカプラ4および光増幅ファイバ7の接続がなされている。これにより、異なるコア部群7 d、7 eにそれぞれ属するコア部7 a aとコア部7 a kとは、直列接続され、2段である多段光増幅ファイバ構造15を構成することとなる。その結果、添加されたErが光励起されたコア部7 a kによって、信号光がシングルモードで伝搬されるので、誘導放出現象が発生し、信号光は再び光増幅される。

【0042】

ここで、上述したように、コア部7 a kは、コア部7 a aよりも、励起光によってより強く励起された状態となっているので、異なるコア部群7 d、7 eにそれぞれ属するコア部7 a aとコア部7 a kとの間で信号光に与える利得が互いに異なる。具体的には、コア部7 a kの方がコア部7 a aよりも、信号光に対して与える利得が高い。ここで、利得とは、利得飽和が起こらない程度のパワーの信号光に対する利得、いわゆる小信号利得を意味する。コア部7 a aとコア部7 a kとの間の利得差はたとえば2～5 dB程度であり、好ましくは5 dB以上であるが、利得差の値はこれに限られない。また、利得差は内側副クラッド部7 b aと内側副クラッド部7 b bとの屈折率差や励起光強度などにより調整することができる。

10

【0043】

さらに、光ファイバ増幅器100では、光増幅ファイバ7のコア部7 a kから出力された信号光が、光合分波器9の出力側光ファイバ9 kから出力されるように、光増幅ファイバ7および光合分波器9の接続がなされている。その結果、コア部7 a kにより光増幅された信号光は、光合分波器9の出力側光ファイバ9 kから出力され、光アイソレータ13を通過して、信号光をシングルモードで伝搬する出力光ファイバ14から出力される。

20

【0044】

以上説明したように、本実施形態1に係るクラッド励起型の光ファイバ増幅器100では、光増幅ファイバ7が、異なるコア部群7 d、7 eにそれぞれ属するコア部7 a aとコア部7 a kとの間で信号光に与える利得が互いに異なるように構成されており、かつ、コア部7 a aとコア部7 a k同士が直列接続されており、コア部7 a aが1段目、コア部7 a kが2段目である多段光増幅ファイバ構造15を構成している。このように、マルチコアファイバである光増幅ファイバ7に含まれるコア部7 a aとコア部7 a k同士を直列接続しているため、光ファイバ増幅器100は2段光増幅ファイバ構造を有しながら小型化が可能である。さらに、コア部7 a aとコア部7 a kとをクラッド励起により一括励起しているため、2段光増幅ファイバ構造を有しながら励起光源5の数は1個、すなわち2段光増幅ファイバ構造の段数である2より少ない個数でよく、光ファイバ増幅器100は低消費電力化が可能である。

30

【0045】

なお、コア部7 a a～7 a lのうち隣接するコア部間の距離は、隣接するコア部間での信号光のクロストークが-40 dB以下となるような距離に設定することが好ましい。以下に示す光増幅ファイバの他の構成例の場合も同様である。

【0046】

(光増幅ファイバの構成例)

40

つぎに、光ファイバ増幅器100において光増幅ファイバ7に代えて使用できる光増幅ファイバの構成例について説明する。

【0047】

(構成例1)

図3は、光増幅ファイバの構成例1の模式的な断面図である。光増幅ファイバ7Aは、Erが添加された6個のコア部7 A a a～7 A a fと、Erとイッテルビウム(Yb)とが共添加された6個のコア部7 A a g～7 A a lと、コア部7 A a a～7 A a lの外周に形成された内側クラッド部7 A bと、内側クラッド部7 A bの外周に形成された外側クラッド部7 cと、を有するダブルクラッド構造の光増幅ファイバである。

【0048】

50

コア部 7 A a a ~ 7 A a l は、6 個のコア部 7 A a a ~ 7 A a f で構成されるコア部群 7 A d と、6 個のコア部 7 A a g ~ 7 A a l で構成されるコア部群 7 A e とからなる。コア部群 7 A d のコア部 7 A a a ~ 7 A a f、コア部群 7 A e のコア部 7 A a g ~ 7 A a l はそれぞれ六角形状に配置されている。

【 0 0 4 9 】

また、内側クラッド部 7 A b は、コア部 7 A a a ~ 7 A a l の屈折率よりも屈折率が低い。また、外側クラッド部 7 c は、内側クラッド部 7 A b よりも屈折率が低い。

【 0 0 5 0 】

上記屈折率の関係を実現するために、コア部 7 A a a ~ 7 A a l は、Ge が添加された石英ガラスからなり、内側クラッド部 7 A b は、純石英ガラスからなり、外側クラッド部 7 c は低屈折率の樹脂材料からなる。ただし、これらの材料は例示であって、上記屈折率の関係を実現できる材料であれば特に限定はされない。

【 0 0 5 1 】

ここで、光増幅ファイバ 7 A では、コア直径および内側クラッド部 7 A b に対する比屈折率差については、コア部 7 A a a ~ 7 A a l の全てで略等しい。また、Er の添加濃度については、コア部 7 A a a ~ 7 A a f の全てで略等しい。また、Er および Y b の添加濃度については、コア部 7 A a g ~ 7 A a l の全てで略等しい。

【 0 0 5 2 】

光ファイバ増幅器 1 0 0 において光増幅ファイバ 7 に代えてこの光増幅ファイバ 7 A を使用した場合について説明する。なお、入力光ファイバ 1 から入力された信号光が、光増幅ファイバ 7 A のコア部 7 A a a に入力されるように、光合分波器 3、WDM カプラ 4 および光増幅ファイバ 7 A の接続がなされる。また、コア部 7 A a a から出力された信号光が、光合分波器 9 の出力側光ファイバ 9 a から出力されるように、光増幅ファイバ 7 A および光合分波器 9 の接続がなされる。また、接続光ファイバ 1 1 を伝搬して光合分波器 3 の入力側光ファイバ 3 k に入力された信号光が、光増幅ファイバ 7 A のコア部 7 A a k に入力されるように、光合分波器 3、WDM カプラ 4 および光増幅ファイバ 7 A の接続がなされる。さらに、コア部 7 A a k から出力された信号光が、光合分波器 9 の出力側光ファイバ 9 k から出力されるように、光増幅ファイバ 7 A および光合分波器 9 の接続がなされる。これにより、異なるコア部群 7 A d、7 A e にそれぞれ属するコア部 7 A a a とコア部 7 A a k とは、直列接続され、多段光増幅ファイバ構造を構成することとなる。

【 0 0 5 3 】

光増幅ファイバ 7 A は、励起光を内側クラッド部 7 A b によってマルチモードで伝搬する。なお、内側クラッド部 7 A b の屈折率は、光増幅ファイバ 7 A の長手方向に垂直な断面において略均一であるため、当該断面における励起光の強度分布も略均一となる。すると、光増幅ファイバ 7 A のコア部 7 A a a ~ 7 A a f のそれぞれに添加された Er は励起光を吸収し、光励起される。一方、コア部 7 A a g ~ 7 A a l では、それぞれに添加された Y b が主に励起光を吸収して光励起し、Y b から Er にエネルギー移動が起こるために Er が励起される。そこに、信号光がコア部 7 A a a によってシングルモードで伝搬されることにより、誘導放出現象が発生し、信号光は光増幅される。光増幅ファイバ 7 A は増幅した信号光を光合分波器 9 に出力する。

【 0 0 5 4 】

さらに、信号光は、接続光ファイバ 1 1 を伝搬してコア部 7 A a k に入力される。そして、信号光がコア部 7 A a k によってシングルモードで伝搬されることにより、誘導放出現象が発生し、信号光は再び光増幅され、最終的に出力光ファイバ 1 4 から出力される。

【 0 0 5 5 】

ここで、コア部 7 A a a ~ 7 A a f において励起光を吸収する Er の励起光に対する吸収係数はたとえば 5 ~ 1 0 d B / m 程度であるが、コア部 7 A a g ~ 7 A a l において励起光を主に吸収する Y b の励起光に対する吸収係数はたとえば 5 0 ~ 1 0 0 d B / m 程度とできる。その結果、コア部 7 A a k は、コア部 7 A a a よりも、励起光をより多く吸収し、より強く励起された状態となる。その結果、異なるコア部群 7 A d、7 A e にそれぞれ

10

20

30

40

50

れ属するコア部 7 A a a とコア部 7 A a k との間で信号光に与える利得が互いに異なる。具体的には、コア部 7 A a k の方がコア部 7 A a a よりも、信号光に対して与える利得が高い。コア部 7 A a a とコア部 7 A a k との間の利得差はたとえば 3 ~ 4 d B 程度であり、5 d B 以上が好ましいが、利得差の値はこれに限られない。また、利得差はコア部群 7 A d における E r の添加濃度、コア部群 7 A e における E r および Y b の添加濃度、または励起光強度などにより調整することができる。

【 0 0 5 6 】

以上説明したように、光ファイバ増幅器 1 0 0 において光増幅ファイバ 7 に代えて光増幅ファイバ 7 A を使用した光ファイバ増幅器では、光増幅ファイバ 7 A が、異なるコア部群 7 A d、7 A e にそれぞれ属するコア部 7 A a a とコア部 7 A a k との間で信号光に与える利得が互いに異なるように構成されており、かつ、コア部 7 A a a とコア部 7 A a k と同士が直列接続されており、コア部 7 A a a が 1 段目、コア部 7 A a k が 2 段目である 2 段光増幅ファイバ構造を構成している。これにより、このファイバ増幅器は 2 段光増幅ファイバ構造を有しながら小型化が可能である。さらに、コア部 7 A a a とコア部 7 A a k とをクラッド励起により一括励起しているため、この光ファイバ増幅器は低消費電力化が可能である。

10

【 0 0 5 7 】

なお、上記構成例 1 の光増幅ファイバ 7 A では、異なるコア部群 7 A d、7 A e にそれぞれ属するコア部 7 A a a ~ 7 A a f、7 A a g ~ 7 A a l にそれぞれ E r、E r と Y b を添加し、添加されている希土類元素の種類を互いに異ならせることによって、信号光に与える利得が互いに異なるようにしている。しかし、本発明がこれに限らず、異なるコア部群にそれぞれ属するコア部にいずれも E r、または E r と Y b とを添加するが、E r、または E r と Y b との添加濃度をコア部群の間で互いに異ならせることにより、信号光に与える利得が互いに異なるようにしてもよい。

20

【 0 0 5 8 】

(構成例 2)

図 4 は、光増幅ファイバの構成例 2 の模式的な断面図である。光増幅ファイバ 7 B は、E r が添加された 1 2 個のコア部 7 B a a ~ 7 B a l と、コア部 7 B a a ~ 7 B a l の外周に形成された内側クラッド部 7 B b と、内側クラッド部 7 B b の外周に形成された外側クラッド部 7 c と、を有するダブルクラッド構造の光増幅ファイバである。

30

【 0 0 5 9 】

コア部 7 B a a ~ 7 B a l は、6 個のコア部 7 B a a ~ 7 B a f で構成されるコア部群 7 B d と、6 個のコア部 7 B a g ~ 7 B a l で構成されるコア部群 7 B e とからなる。コア部群 7 B d のコア部 7 B a a ~ 7 B a f、コア部群 7 B e のコア部 7 B a g ~ 7 B a l はそれぞれ六角形状に配置されている。

【 0 0 6 0 】

また、内側クラッド部 7 B b は、コア部 7 B a a ~ 7 B a l の屈折率よりも屈折率が低い。また、外側クラッド部 7 c は、内側クラッド部 7 B b よりも屈折率が低い。

【 0 0 6 1 】

上記屈折率の関係を実現するための光増幅ファイバ 7 B の構成材料の例は構成例 1 の光増幅ファイバ 7 A の場合と同様である。

40

【 0 0 6 2 】

ここで、光増幅ファイバ 7 B では、E r の添加濃度および内側クラッド部 7 B b に対する比屈折率差については、コア部 7 B a a ~ 7 B a l の全てで略等しい。ただし、コア直径については、コア部 7 B a a ~ 7 B a f の全てで略等しく、コア部 7 B a g ~ 7 B a l の全てで略等しいが、コア部 7 B a a ~ 7 B a f とコア部 7 B a g ~ 7 B a l とでは互いに異なる。具体的には、コア部 7 B a a ~ 7 B a f よりもコア部 7 B a g ~ 7 B a l の方が、コア直径が大きい。

【 0 0 6 3 】

光ファイバ増幅器 1 0 0 において光増幅ファイバ 7 に代えてこの光増幅ファイバ 7 B を

50

使用した場合について説明する。なお、入力光ファイバ1から入力された信号光が、光増幅ファイバ7Bのコア部7Baaに入力されるように、光合分波器3、WDMカプラ4および光増幅ファイバ7Bの接続がなされる。また、コア部7Baaから出力された信号光が、光合分波器9の出力側光ファイバ9aから出力されるように、光増幅ファイバ7Bおよび光合分波器9の接続がなされる。また、接続光ファイバ11を伝搬して光合分波器3の入力側光ファイバ3kに入力された信号光が、光増幅ファイバ7Bのコア部7Bakに入力されるように、光合分波器3、WDMカプラ4および光増幅ファイバ7Bの接続がなされる。さらに、コア部7Bakから出力された信号光が、光合分波器9の出力側光ファイバ9kから出力されるように、光増幅ファイバ7Bおよび光合分波器9の接続がなされる。これにより、異なるコア部群7Bd、7Beにそれぞれ属するコア部7Baaとコア部7Bakとは、直列接続され、多段光増幅ファイバ構造を構成することとなる。

10

【0064】

光増幅ファイバ7Bは、励起光を内側クラッド部7Bbによってマルチモードで伝搬する。なお、内側クラッド部7Bbの屈折率は、光増幅ファイバ7Bの長手方向に垂直な断面において略均一であるため、当該断面における励起光の強度分布も略均一となる。すると、光増幅ファイバ7Bのコア部7Baa~7Balのそれぞれに添加されたErは励起光を吸収し、光励起される。そこに、信号光がコア部7Baaによってシングルモードで伝搬されることにより、誘導放出現象が発生し、信号光は光増幅される。光増幅ファイバ7Bは増幅した信号光を光合分波器9に出力する。

20

【0065】

さらに、信号光は、接続光ファイバ11を伝搬してコア部7Bakに入力される。そして、信号光がコア部7Bakによってシングルモードで伝搬されることにより、誘導放出現象が発生し、信号光は再び光増幅され、最終的に出力光ファイバ14から出力される。

【0066】

ここで、上述したように、コア部7Baa~7Bafよりもコア部7Bag~7Balの方が、コア直径が大きい。その結果、コア部7Bakは、コア部7Baaよりも、励起光をより多く吸収し、より強く励起された状態となる。その結果、異なるコア部群7Bd、7Beにそれぞれ属するコア部7Baaとコア部7Bakとの間で信号光に与える利得が互いに異なる。具体的には、コア部7Bakの方がコア部7Baaよりも、信号光に対して与える利得が高い。コア部7Baaとコア部7Bakとの間の利得差はたとえば3~4dB程度であり、5dB以上が好ましいが、利得差の値はこれに限られない。また、利得差はErの添加濃度、コア直径または励起光強度などにより調整することができる。

30

【0067】

以上説明したように、光ファイバ増幅器100において光増幅ファイバ7に代えて光増幅ファイバ7Bを使用した光ファイバ増幅器では、光増幅ファイバ7Bが、異なるコア部群7Bd、7Beにそれぞれ属するコア部7Baaとコア部7Bakとの間で信号光に与える利得が互いに異なるように構成されており、かつ、コア部7Baaとコア部7Bak同士が直列接続されており、コア部7Baaが1段目、コア部7Bakが2段目である2段光増幅ファイバ構造を構成している。これにより、このファイバ増幅器は2段光増幅ファイバ構造を有しながら小型化が可能である。さらに、コア部7Baaとコア部7Bakとをクラッド励起により一括励起しているので、この光ファイバ増幅器は低消費電力化が可能である。

40

【0068】

(構成例3)

図5は、光増幅ファイバの構成例3の模式的な断面図である。光増幅ファイバ7Cは、Erが添加された12個のコア部7Ca~7Cafと、コア部7Ca~7Cafの外周に形成された内側クラッド部7Cbと、内側クラッド部7Cbの外周に形成された外側クラッド部7cと、を有するダブルクラッド構造の光増幅ファイバである。

【0069】

コア部7Ca~7Cafは、6個のコア部7Ca~7Cafで構成されるコア部群

50

7 C d と、6 個のコア部 7 C a g ~ 7 C a l で構成されるコア部群 7 C e とからなる。コア部群 7 C d のコア部 7 C a a ~ 7 C a f、コア部群 7 C e のコア部 7 C a g ~ 7 C a l はそれぞれ六角形状に配置されている。

【0070】

また、内側クラッド部 7 C b は、2 個の内側副クラッド部 7 C b a、7 C b b を有し、異なるコア部群 7 C d、7 C e に属するコア部 7 C a a ~ 7 C a f、7 C a g ~ 7 C a l は、それぞれ異なる内側副クラッド部 7 C b a、7 C b b に囲まれている。具体的には、コア部群 7 C d に属するコア部 7 C a a ~ 7 C a f は、断面円形の内側副クラッド部 7 C b a に囲まれており、コア部群 7 C e に属するコア部 7 C a g ~ 7 C a l は、内側副クラッド部 7 C b a の外周に形成されたリング状の内側副クラッド部 7 C b b に囲まれている。

10

【0071】

また、光増幅ファイバ 7 と同様に、内側クラッド部 7 C b は、コア部 7 C a a ~ 7 C a l の屈折率よりも屈折率が低い。また、外側クラッド部 7 c は、内側クラッド部 7 C b よりも屈折率が低い。また、内側副クラッド部 7 C b a、7 C b b は、互いに屈折率が異なる。具体的には、内側副クラッド部 7 C b b の方が内側副クラッド部 7 C b a よりも屈折率が高い。このような屈折率の関係を実現するための光増幅ファイバ 7 C の構成材料の例は光増幅ファイバ 7 の場合と同様である。

【0072】

また、光増幅ファイバ 7 C では、コア直径、E r の添加濃度、および囲まれているクラッド部に対する比屈折率差については、コア部 7 C a a ~ 7 C a l の全てで略等しい。なお、たとえば、コア直径は 2 ~ 6 μ m であり、E r の添加濃度は 3 0 0 ~ 3 0 0 0 p p m であり、および囲まれているクラッド部に対する比屈折率差は 0 . 3 ~ 1 . 5 % である。

20

【0073】

光増幅ファイバ 7 と光増幅ファイバ 7 C とを比較すると、光増幅ファイバ 7 C の内側副クラッド部 7 C b a の外径が、光増幅ファイバ 7 の内側副クラッド部 7 b a の外径よりも大きい。また、光増幅ファイバ 7 C の内側副クラッド部 7 C b b の径方向における幅 D が、光増幅ファイバ 7 の内側副クラッド部 7 b b の径方向における幅よりも小さい。

【0074】

内側副クラッド部 7 C b b は、たとえば純石英ガラスからなるが、その幅 D は、光増幅ファイバ 7 C の直径（外側クラッド部 7 c の外径）に対して 1 0 ~ 9 0 % の大きさとなるように自由に選択できる。

30

【0075】

内側副クラッド部 7 C b a の外径や内側副クラッド部 7 C b b の径方向における幅 D を調整することにより、隣接するコア部間での信号光のクロストークが - 4 0 d B 以下となるような距離に設定することが容易になる。

【0076】

光ファイバ増幅器 1 0 0 において光増幅ファイバ 7 に代えて光増幅ファイバ 7 C を使用した光ファイバ増幅器においても、2 段光増幅ファイバ構造を有しながら小型化が可能であり、かつ低消費電力化が可能である。

40

【0077】

（構成例 4）

図 6 は、光増幅ファイバの構成例 4 の模式的な断面図である。光増幅ファイバ 7 D は、E r が添加された 6 個のコア部 7 D a a ~ 7 D a f と、E r と Y b とが共添加された 6 個のコア部 7 D a g ~ 7 D a l と、コア部 7 D a a ~ 7 D a l の外周に形成された内側クラッド部 7 D b と、内側クラッド部 7 D b の外周に形成された外側クラッド部 7 c と、を有するダブルクラッド構造の光増幅ファイバである。

【0078】

コア部 7 D a a ~ 7 D a l は、6 個のコア部 7 D a a ~ 7 D a f で構成されるコア部群 7 D d と、6 個のコア部 7 D a g ~ 7 D a l で構成されるコア部群 7 D e とからなる。コ

50

ア部群 7 D d のコア部 7 D a a ~ 7 D a f、コア部群 7 D e のコア部 7 D a g ~ 7 D a l はそれぞれ六角形状に配置されている。

【 0 0 7 9 】

また、内側クラッド部 7 D b は、コア部 7 D a a ~ 7 D a l の屈折率よりも屈折率が低い。また、外側クラッド部 7 c は、内側クラッド部 7 D b よりも屈折率が低い。このような屈折率の関係を実現するための光増幅ファイバ 7 D の構成材料の例は光増幅ファイバ 7 A の場合と同様である。

【 0 0 8 0 】

ここで、光増幅ファイバ 7 D では、コア直径および内側クラッド部 7 D b に対する比屈折率差については、コア部 7 D a a ~ 7 D a l の全てで略等しい。また、 E_r の添加濃度については、コア部 7 D a a ~ 7 D a f の全てで略等しい。また、 E_r および Y_b の添加濃度については、コア部 7 D a g ~ 7 D a l の全てで略等しい。

10

【 0 0 8 1 】

光増幅ファイバ 7 A と光増幅ファイバ 7 D とを比較すると、光増幅ファイバ 7 A では、径方向に並んでいるコア部、たとえばコア部 7 A a a とコア部 7 A a g とは、光増幅ファイバ 7 A の中心軸から径方向に等間隔に並んでいる。これに対して、光増幅ファイバ 7 D では、たとえばコア部 7 D a a とコア部 7 D a g とは、光増幅ファイバ 7 D の中心軸から径方向に不等間隔に並んでいる。

【 0 0 8 2 】

このように、径方向に並んでいるコア部の間隔を調整することにより、隣接するコア部間での信号光のクロストークが - 4 0 d B 以下となるような距離に設定することが容易になる。

20

【 0 0 8 3 】

光ファイバ増幅器 1 0 0 において光増幅ファイバ 7 に代えて光増幅ファイバ 7 D を使用した光ファイバ増幅器においても、2 段光増幅ファイバ構造を有しながら小型化が可能であり、かつ低消費電力化が可能である。

【 0 0 8 4 】

(実施形態 2)

図 7 は、実施形態 2 に係る光ファイバ増幅器の模式的な構成図である。図 7 に示すように、光ファイバ増幅器 1 0 0 A は、図 1 に示す光ファイバ増幅器 1 0 0 に、入力光ファイバ 1 A と、光アイソレータ 2 A と、光アイソレータ 1 0 A と、接続光ファイバ 1 1 A と、ASE カットフィルタ 1 2 A と、光アイソレータ 1 3 A と、出力光ファイバ 1 4 A とを追加した構成を有する。

30

【 0 0 8 5 】

入力光ファイバ 1 A は、入力光ファイバ 1 に入力される信号光 (以下、第 1 信号光とする) とは別の信号光 (以下、第 2 信号光とする) の入力を受け付け、シングルモードで伝搬する。第 2 信号光はたとえば光通信で用いられる 1 . 5 5 μ m 波長帯や 1 . 5 7 μ m 波長帯に含まれる信号光である。なお、第 2 信号光は単一波長の信号光でもよいし、異なる波長の信号光が波長多重された WDM 信号光でもよい。

【 0 0 8 6 】

光アイソレータ 2 A は、入力光ファイバ 1 A を光合分波器 3 に向けて伝搬する第 2 信号光を通過させるとともに、光合分波器 3 から入力光ファイバ 1 A に向けて伝搬する光を遮断する機能を有する。入力光ファイバ 1 A は光アイソレータ 2 A を経由して光合分波器 3 の入力側光ファイバ 3 b に接続している。

40

【 0 0 8 7 】

光ファイバ増幅器 1 0 0 A では、入力光ファイバ 1 A から入力された第 2 信号光が、光増幅ファイバ 7 のコア部 7 a b に入力されるように、光合分波器 3、WDM カプラ 4 および光増幅ファイバ 7 の接続がなされている。

【 0 0 8 8 】

光増幅ファイバ 7 は、第 2 信号光をコア部 7 a b によってシングルモードで伝搬する。

50

その結果、コア部 7 a b に添加され、光励起された E_r によって誘導放出現象が発生し、第 2 信号光は光増幅される。光増幅ファイバ 7 は増幅した第 2 信号光を光合分波器 9 に出力する。

【0089】

光ファイバ増幅器 100 A では、光増幅ファイバ 7 のコア部 7 a b から出力された第 2 信号光が、光合分波器 9 の出力側光ファイバ 9 b から出力されるように、光増幅ファイバ 7 および光合分波器 9 の接続がなされている。これにより、光合分波器 9 は、光増幅ファイバ 7 のコア部 7 a b から出力された第 2 信号光を出力側光ファイバ 9 b に出力する。

【0090】

光アイソレータ 10 A は、光合分波器 9 の出力側光ファイバ 9 b と接続光ファイバ 11 A との間に接続されている。光アイソレータ 10 A は、出力側光ファイバ 9 b から出力された第 2 信号光を接続光ファイバ 11 A に向けて通過させるとともに、接続光ファイバ 11 A 側から出力側光ファイバ 9 b に向けて伝搬する光を遮断する機能を有する。なお、光アイソレータ 10 A は、残留励起光処理部 8 で除去できなかった残留励起光が接続光ファイバ 11 A に向けて通過することを防止するような波長依存光損失特性を有することが好ましい。

10

【0091】

接続光ファイバ 11 A は、光合分波器 9 の出力側光ファイバ 9 b と光合分波器 3 の入力側光ファイバ 3 1 とを接続し、第 2 信号光をシングルモードで伝搬するシングルモード光ファイバである。接続光ファイバ 11 A は出力側光ファイバ 9 b から出力された信号光を光合分波器 3 の入力側光ファイバ 3 1 に入力させる。

20

【0092】

なお、ASE カットフィルタ 12 A は接続光ファイバ 11 A の途中に介挿されている。ASE カットフィルタ 12 A は、第 2 信号光を通過させるとともに、光増幅ファイバ 7 のコア部 7 a b で発生した ASE 光を遮断する機能を有しており、たとえばバンドパスフィルタにより構成される。ただし、ASE カットフィルタ 12 A の介挿位置はこれに限られず、たとえば出力側光ファイバ 9 b と光アイソレータ 10 A との間でもよい。

【0093】

光ファイバ増幅器 100 A では、光合分波器 3 の入力側光ファイバ 3 1 に入力された信号光が、光増幅ファイバ 7 のコア部 7 a 1 に入力されるように、光合分波器 3、WDM カプラ 4 および光増幅ファイバ 7 の接続がなされている。これにより、異なるコア部群 7 d、7 e にそれぞれ属し、互いに利得が異なるコア部 7 a b とコア部 7 a 1 とは、直列接続され、多段光増幅ファイバ構造 15 A を構成することとなる。その結果、添加された E_r が光励起されたコア部 7 a 1 によって、第 2 信号光がシングルモードで伝搬されるので、誘導放出現象が発生し、第 2 信号光は再び光増幅される。

30

【0094】

さらに、光ファイバ増幅器 100 A では、光増幅ファイバ 7 のコア部 7 a 1 から出力された信号光が、光合分波器 9 の出力側光ファイバ 9 1 から出力されるように、光増幅ファイバ 7 および光合分波器 9 の接続がなされている。その結果、コア部 7 a 1 により光増幅された第 2 信号光は、光合分波器 9 の出力側光ファイバ 9 1 から出力され、光アイソレータ 13 A を通過して、第 2 信号光をシングルモードで伝搬する出力光ファイバ 14 A から出力される。

40

【0095】

なお、第 1 信号光については、光ファイバ増幅器 100 と同様に、コア部 7 a a とコア部 7 a k とが構成する多段光増幅ファイバ構造 15 により光増幅される。

【0096】

本実施形態 2 に係るクラッド励起型の光ファイバ増幅器 100 A では、光増幅ファイバ 7 が、異なるコア部群 7 d、7 e にそれぞれ属するコア部 7 a a とコア部 7 a k との間、およびコア部 7 a b とコア部 7 a 1 との間で信号光に与える利得が互いに異なるように構成されており、かつ、コア部 7 a a とコア部 7 a k と同士が直列接続されており、コア部 7

50

a a が 1 段目、コア部 7 a k が 2 段目である 2 段光増幅ファイバ構造 1 5 を構成している。さらに、コア部 7 a b とコア部 7 a l 同士が直列接続されており、コア部 7 a b が 1 段目、コア部 7 a l が 2 段目である 2 段光増幅ファイバ構造 1 5 A を構成している。このように、マルチコアファイバである光増幅ファイバ 7 に含まれるコア部 7 a a とコア部 7 a k 同士を直列接続し、かつコア部 7 a b とコア部 7 a l 同士を直列接続しているため、光ファイバ増幅器 1 0 0 は 2 段光増幅ファイバ構造を 2 個有しながら小型化が可能である。さらに、コア部 7 a a、コア部 7 a k、コア部 7 a b、およびコア部 7 a l をクラッド励起により一括励起しているため、2 段光増幅ファイバ構造を 2 個有しながら励起光源 5 の数は 1 個でよく、光ファイバ増幅器 1 0 0 A は低消費電力化が可能である。

【 0 0 9 7 】

さらに、光ファイバ増幅器 1 0 0 A に、入力光ファイバ、光アイソレータ、接続光ファイバ、ASE カットフィルタ、および出力光ファイバを適宜追加することにより、2 段光増幅ファイバ構造を 6 個有する光ファイバ増幅器を構成することができる。これにより、より一層の小型化、低消費電力化がなされた光ファイバ増幅器を実現できる。なお、このような光ファイバ増幅器において、多段光増幅ファイバ構造における段数は 2 であり、6 個の多段光増幅ファイバ構造を有し、光増幅ファイバのコア部の数は $2 \times 6 = 12$ である。

【 0 0 9 8 】

(実施形態 3)

図 8 は、実施形態 3 に係る光ファイバ増幅器の模式的な構成図である。図 3 に示すように、光ファイバ増幅器 2 0 0 は、入力光ファイバ 1 と、光アイソレータ 2 と、光合分波器 2 3 と、WDM カプラ 2 4 と、励起光源 5 と、マルチモード光ファイバ 6 と、光増幅ファイバ 2 7 と、残留励起光処理部 8 と、光合分波器 2 9 と、光アイソレータ 1 0 と、接続光ファイバ 1 1、3 1 と、ASE カットフィルタ 1 2、3 2 と、光アイソレータ 1 3 と、出力光ファイバ 1 4 と、を備えている。

【 0 0 9 9 】

はじめに、光増幅ファイバ 2 7 の構成について説明する。図 9 は、光増幅ファイバ 2 7 の模式的な断面および B - B 線断面における屈折率プロファイルを示す図である。光増幅ファイバ 2 7 は、Er が添加された 1 8 個のコア部 2 7 a a ~ 2 7 a r と、コア部 2 7 a a ~ 2 7 a r の外周に形成された内側クラッド部 2 7 b と、内側クラッド部 2 7 b の外周に形成された外側クラッド部 2 7 c と、を有するダブルクラッド構造の光増幅ファイバである。

【 0 1 0 0 】

コア部 2 7 a a ~ 2 7 a r は、6 個のコア部 2 7 a a ~ 2 7 a f で構成されるコア部群 2 7 d と、6 個のコア部 2 7 a g ~ 2 7 a l で構成されるコア部群 2 7 e と、6 個のコア部 2 7 a m ~ 2 7 a r で構成されるコア部群 2 7 f とからなる。コア部群 2 7 d のコア部 2 7 a a ~ 2 7 a f、コア部群 2 7 e のコア部 2 7 a g ~ 2 7 a l、コア部群 2 7 f のコア部 2 7 a m ~ 2 7 a r はそれぞれ六角形状に配置されている。

【 0 1 0 1 】

また、内側クラッド部 2 7 b は、3 個の内側副クラッド部 2 7 b a、2 7 b b、2 7 b c を有し、異なるコア部群 2 7 d、2 7 e、2 7 f に属するコア部 2 7 a a ~ 2 7 a f、2 7 a g ~ 2 7 a l、2 7 a m ~ 2 7 a r は、それぞれ異なる内側副クラッド部 2 7 b a、2 7 b b、2 7 b c に囲まれている。具体的には、コア部群 2 7 d に属するコア部 2 7 a a ~ 2 7 a f は、断面円形の内側副クラッド部 2 7 b a に囲まれており、コア部群 2 7 e に属するコア部 2 7 a g ~ 2 7 a l は、内側副クラッド部 2 7 b a の外周に形成されたリング状の内側副クラッド部 2 7 b b に囲まれており、コア部群 2 7 f に属するコア部 2 7 a m ~ 2 7 a r は、内側副クラッド部 2 7 b b の外周に形成されたリング状の内側副クラッド部 2 7 b c に囲まれている。

【 0 1 0 2 】

また、屈折率プロファイル P 2 が示すように、外側クラッド部 2 7 c、内側副クラッド

10

20

30

40

50

部 27ba、内側副クラッド部 27bb、内側副クラッド部 27bc、コア部 27aa ~ 27af、コア部 27ag ~ 27al、コア部 27am ~ 27ar の屈折率は、それぞれ、 n_{11} 、 n_{12} 、 n_{13} 、 n_{14} 、 n_{15} 、 n_{16} 、 n_{17} である。したがって、内側クラッド部 27b は、コア部 27aa ~ 27ar の屈折率よりも屈折率が低い。また、外側クラッド部 27c は、内側クラッド部 27b よりも屈折率が低い。また、内側副クラッド部 27ba、27bb、27bc は、互いに屈折率が異なる。具体的には、内側副クラッド部 27bb の方が内側副クラッド部 27ba よりも屈折率が高く、内側副クラッド部 27bc の方が内側副クラッド部 27bb よりも屈折率が高い。

【0103】

上記屈折率の関係を実現するために、コア部 27aa ~ 27am は、Ge が添加された石英ガラスからなり、内側副クラッド部 27ba は、F が添加された石英ガラスからなり、内側副クラッド部 27bb は、内側副クラッド部 27ba よりも低い添加濃度で F が添加された石英ガラスからなり、内側副クラッド部 27bc は、純石英ガラスからなり、外側クラッド部 27c は低屈折率の樹脂材料からなる。ただし、これらの材料は例示であって、上記屈折率の関係を実現できる材料であれば特に限定はされない。

【0104】

また、光増幅ファイバ 27 では、コア直径、Er の添加濃度、および囲まれているクラッド部に対する比屈折率差については、コア部 27aa ~ 27ar の全てで略等しい。なお、たとえば、コア直径は 2 ~ 6 μm であり、Er の添加濃度は 300 ~ 3000 ppm であり、および囲まれているクラッド部に対する比屈折率差は 0.3 ~ 1.5 % である。

【0105】

つぎに、図 8 に戻って光ファイバ増幅器 200 について説明する。以下では、光ファイバ増幅器 100 の各構成要素とその機能について、入力光ファイバ 1 側から、接続された順に説明する。ただし、入力光ファイバ 1、光アイソレータ 2、励起光源 5、マルチモード光ファイバ 6、残留励起光処理部 8、光アイソレータ 10 と、接続光ファイバ 11、ASE カットフィルタ 12、光アイソレータ 13、および出力光ファイバ 14 については、図 1 に示す光ファイバ増幅器 100 の対応する構成要素と同じものなので、適宜説明を省略する。

【0106】

光合分波器 23 は、ファイババンドル型の光合分波器であって、本実施形態 1 では 18 本の入力側光ファイバ 23a ~ 23r と、1 本の出力側マルチコア光ファイバ 23s とを備えている。入力側光ファイバ 23a ~ 23r はいずれも信号光をシングルモードで伝搬する。入力光ファイバ 1 は光アイソレータ 2 を経由して入力側光ファイバ 23a に接続している。

【0107】

出力側マルチコア光ファイバ 23s は光増幅ファイバ 27 と同じコア配置を有するマルチコア光ファイバである。入力側光ファイバ 23a ~ 23r のコア部はそれぞれ、出力側マルチコア光ファイバ 23s のコア部のいずれかと接続している。出力側マルチコア光ファイバ 23s は WDM カプラ 24 に接続している。これにより、光合分波器 23 は入力光ファイバ 1 から入力された信号光を WDM カプラ 24 に出力する。なお、本実施形態 3 では光合分波器 23 はファイババンドル型であるが、本発明はこれに限らず、空間結合型の光合分波器を用いてもよい。

【0108】

励起光源 5 は、波長が 980 nm 帯のマルチモード励起光を出力する、1 つの高出力の半導体 LD で構成されている。励起光源 5 は、光増幅ファイバ 27 の内側クラッド部 27b に、Er を光励起する励起光を供給するためのものである。

【0109】

マルチモード光ファイバ 6 は、励起光源 5 から出力された励起光をマルチモードで伝搬し、WDM カプラ 24 に出力する。

【0110】

10

20

30

40

50

WDMカプラ24は、信号光と、励起光源5から出力された励起光とを合波し、接続点CP1にて光増幅ファイバ27に融着接続された出力側マルチコア光ファイバ24aに出力する。出力側マルチコア光ファイバ24aは、光増幅ファイバ27と同じコア配置を有するマルチコア光ファイバであり、かつダブルクラッド構造を有している。出力側マルチコア光ファイバ24aのコア部はそれぞれ、光増幅ファイバ27のコア部のいずれかと接続している。出力側マルチコア光ファイバ24aは、信号光をコア部によってシングルモードで伝搬し、励起光を内側クラッド部によってマルチモードで伝搬し、光増幅ファイバ27に出力する。本実施形態3ではWDMカプラ24はファイバ型であるが、本発明はこれに限らず、空間結合型のWDMカプラを用いてもよい。

【0111】

なお、光ファイバ増幅器200では、入力光ファイバ1から入力された信号光が、光増幅ファイバ27のコア部27aaに入力されるように、光合分波器23、WDMカプラ24および光増幅ファイバ27の接続がなされている。

【0112】

光増幅ファイバ27は、励起光を内側クラッド部27bによってマルチモードで伝搬する。すると、光増幅ファイバ27のコア部27aa~27arのそれぞれに添加されたErは光励起される。そこに、信号光がコア部27aaによってシングルモードで伝搬されることにより、誘導放出現象が発生し、信号光は光増幅される。光増幅ファイバ27は増幅した信号光を光合分波器29に出力する。

【0113】

なお、上述したように、内側クラッド部27bにおいて内側副クラッド部27bbの方が内側副クラッド部27baよりも屈折率が高いため、励起光は、内側副クラッド部27baよりも内側副クラッド部27bbにおいて、より強いパワーで偏在する。同様に、内側副クラッド部27bcの方が内側副クラッド部27bbよりも屈折率が高いため、励起光は、内側副クラッド部27bbよりも内側副クラッド部27bcにおいて、より一層強いパワーで偏在する。その結果、内側副クラッド部27bbに囲まれているコア部群27eのコア部27ag~27alの方が、内側副クラッド部27baに囲まれているコア部群27dのコア部27aa~27afよりも、励起光によってより強く励起された状態となっている。また、内側副クラッド部27bcに囲まれているコア部群27fのコア部27am~27arの方が、内側副クラッド部27bbに囲まれているコア部群27eのコア部27ag~27alよりも、励起光によってより一層強く励起された状態となっている。

【0114】

光合分波器29は、ファイババンドル型の光合分波器であって、本実施形態3では1本の入力側マルチコア光ファイバ29sと、18本の出力側光ファイバ29a~29rとを備えている。入力側マルチコア光ファイバ29sは光増幅ファイバ27と同じコア配置を有するマルチコア光ファイバである。入力側マルチコア光ファイバ29sのコア部はそれぞれ、光増幅ファイバ27のコア部のいずれかと接続している。

【0115】

出力側光ファイバ29a~29rはいずれも信号光をシングルモードで伝搬する。出力側光ファイバ29a~29rのコア部はそれぞれ、入力側マルチコア光ファイバ29sのコア部のいずれかと接続している。光ファイバ増幅器200では、光増幅ファイバ27のコア部27aaから出力された信号光が、出力側光ファイバ29aから出力されるように、光増幅ファイバ27および光合分波器29の接続がなされている。これにより、光合分波器29は、光増幅ファイバ27のコア部27aaから出力された信号光を出力側光ファイバ29aに出力する。なお、本実施形態3では光合分波器9はファイババンドル型であるが、本発明はこれに限らず、空間結合型の光合分波器を用いてもよい。

【0116】

なお、入力側マルチコア光ファイバ29sと光増幅ファイバ27とは接続点CP2にて融着接続している。接続点CP2には残留励起光処理部8が設けられている。

10

20

30

40

50

【0117】

光アイソレータ10は、光合分波器29の出力側光ファイバ29aと接続光ファイバ11との間に接続されている。接続光ファイバ11は、光合分波器29の出力側光ファイバ29aと光合分波器23の入力側光ファイバ23kとを接続し、信号光をシングルモードで伝搬する。接続光ファイバ11は出力側光ファイバ29aから出力された信号光を光合分波器23の入力側光ファイバ23kに入力させる。

【0118】

光ファイバ増幅器200では、光合分波器23の入力側光ファイバ23kに入力された信号光が、光増幅ファイバ27のコア部27akに入力されるように、光合分波器23、WDMカプラ24および光増幅ファイバ27の接続がなされている。その結果、添加されたErが光励起されたコア部27akによって、信号光がシングルモードで伝搬されるので、誘導放出現象が発生し、信号光は再び光増幅される。

10

【0119】

さらに、光ファイバ増幅器200では、光増幅ファイバ27のコア部27akから出力された信号光が、出力側光ファイバ29kから出力されるように、光増幅ファイバ27および光合分波器29の接続がなされている。これにより、光合分波器29は、光増幅ファイバ27のコア部27akから出力された信号光を出力側光ファイバ29kに出力する。

【0120】

光アイソレータ30は、光合分波器29の出力側光ファイバ29kと接続光ファイバ31との間に接続されている。なお、光アイソレータ30は、残留励起光処理部8で除去できなかった残留励起光が接続光ファイバ31に向けて通過することを防止するような波長依存光損失特性を有することが好ましい。

20

【0121】

接続光ファイバ31は、光合分波器29の出力側光ファイバ29kと光合分波器3の入力側光ファイバ23rとを接続し、信号光をシングルモードで伝搬するシングルモード光ファイバである。接続光ファイバ31は出力側光ファイバ29kから出力された信号光を光合分波器3の入力側光ファイバ23rに入力させる。

【0122】

なお、ASEカットフィルタ32は接続光ファイバ31の途中に介挿されている。ASEカットフィルタ32は、信号光を通過させるとともに、光増幅ファイバ27のコア部7akで発生したASE光を遮断する機能を有しており、たとえばバンドパスフィルタにより構成される。ただし、ASEカットフィルタ32の介挿位置はこれに限られず、たとえば出力側光ファイバ29kと光アイソレータ30との間でもよい。

30

【0123】

光ファイバ増幅器200では、光合分波器23の入力側光ファイバ23rに入力された信号光が、光増幅ファイバ27のコア部27arに入力されるように、光合分波器23、WDMカプラ24および光増幅ファイバ27の接続がなされている。これにより、異なるコア部群27d、27e、27fにそれぞれ属するコア部27aaとコア部27akとコア部27arとは、直列接続され、3段である多段光増幅ファイバ構造25を構成することとなる。その結果、添加されたErが光励起されたコア部27arによって、信号光がシングルモードで伝搬されるので、誘導放出現象が発生し、信号光は再び光増幅される。

40

【0124】

ここで、上述したように、コア部27akは、コア部27aaよりも、励起光によってより強く励起された状態となっており、コア部27arは、コア部27akよりも、励起光によってより強く励起された状態となっている。その結果、異なるコア部群27d、27e、27fにそれぞれ属するコア部27aaとコア部27akとコア部27arとの間で信号光に与える利得が互いに異なる。具体的には、コア部27akの方がコア部27aaよりも、信号光に対して与える利得が高く、コア部27arの方がコア部27akよりも、信号光に対して与える利得が高い。コア部27aaとコア部27akとの間の利得差、コア部27akとコア部27arとの間の利得差は、それぞれ、たとえば3~4dB程

50

度であり、5 dB以上が好ましいが、利得差の値はこれに限られない。また、利得差は内側副クラッド部27baと内側副クラッド部27bbと内側副クラッド部27bcとの屈折率差や励起光強度などにより調整することができる。

【0125】

さらに、光ファイバ増幅器200では、光増幅ファイバ27のコア部27arから出力された信号光が、光合分波器29の出力側光ファイバ29rから出力されるように、光増幅ファイバ27および光合分波器29の接続がなされている。その結果、コア部27arにより光増幅された信号光は、光合分波器29の出力側光ファイバ29rから出力され、光アイソレータ13を通過して、信号光をシングルモードで伝搬する出力光ファイバ14から出力される。

10

【0126】

以上説明したように、本実施形態3に係るクラッド励起型の光ファイバ増幅器200では、光増幅ファイバ27が、異なるコア部群27d、27e、27fにそれぞれ属するコア部27aaとコア部27akとコア部27arの間で信号光に与える利得が互いに異なるように構成されており、かつ、コア部27aaとコア部27akとコア部27ar同士が直列接続されており、コア部27aaが1段目、コア部27akが2段目、コア部27arが3段目である多段光増幅ファイバ構造25を構成している。このように、マルチコアファイバである光増幅ファイバ27に含まれるコア部27aaとコア部27akとコア部27ar同士を直列接続しているため、光ファイバ増幅器200は3段光増幅ファイバ構造を有しながら小型化が可能である。さらに、コア部27aaとコア部27akとコア部27arとをクラッド励起により一括励起しているため、3段光増幅ファイバ構造を有しながら励起光源5の数は1個でよく、光ファイバ増幅器200は低消費電力化が可能である。

20

【0127】

なお、本実施形態3に係る光ファイバ増幅器200に、図7に示す光ファイバ増幅器100Aの場合と同様に、入力光ファイバ、光アイソレータ、接続光ファイバ、ASEカットフィルタ、および出力光ファイバを適宜追加することにより、3段光増幅ファイバ構造を6個有する光ファイバ増幅器を構成することができる。これにより、より一層の小型化、低消費電力化がなされた光ファイバ増幅器を実現できる。なお、このような光ファイバ増幅器において、多段光増幅ファイバ構造における段数は3であり、6個の多段光増幅ファイバ構造を有し、光増幅ファイバにおけるコア部の数は $3 \times 6 = 18$ である。

30

【0128】

(光増幅ファイバの構成例)

つぎに、光ファイバ増幅器200において光増幅ファイバ27に代えて使用できる光増幅ファイバの構成例について説明する。

【0129】

(構成例5)

図10は、光増幅ファイバの構成例5の模式的な断面図である。光増幅ファイバ27Aは、Erが添加された6個のコア部27Aaa~27Aafと、ErとYbとが共添加された12個のコア部27Aag~27Aarと、コア部27Aaa~27Aarの外周に形成された内側クラッド部27Abと、内側クラッド部27Abの外周に形成された外側クラッド部27cと、を有するダブルクラッド構造の光増幅ファイバである。

40

【0130】

コア部27Aaa~27Aarは、6個のコア部27Aaa~27Aafで構成されるコア部群27Adと、6個のコア部27Aag~27Aalで構成されるコア部群27Aeと、6個のコア部27Aam~27Aarで構成されるコア部群27Afとからなる。コア部群27Adのコア部27Aaa~27Aaf、コア部群27Aeのコア部27Aag~27Aal、コア部群27Afのコア部27Aam~27Aarはそれぞれ六角形状に配置されている。

【0131】

50

また、内側クラッド部 27Ab は、コア部 27Aaa ~ 27Aar の屈折率よりも屈折率が低い。また、外側クラッド部 27c は、内側クラッド部 27Ab よりも屈折率が低い。このような屈折率の関係を実現するための光増幅ファイバ 27A の構成材料の例は構成例 1 の光増幅ファイバ 7A の場合と同様である。

【0132】

ここで、光増幅ファイバ 27A では、コア直径および内側クラッド部 27Ab に対する比屈折率差については、コア部 27Aaa ~ 27Aar の全てで略等しい。また、Er の添加濃度については、コア部 27Aaa ~ 27Aaf の全てで略等しい。また、Er および Yb の添加濃度については、コア部 27Aag ~ 27Aal の全てで略等しく、コア部 27Aam ~ 27Aar の全てで略等しく、かつコア部 27Aag ~ 27Aal よりもコア部 27Aam ~ 27Aar の Er および Yb の添加濃度の方が高い。

10

【0133】

光ファイバ増幅器 200 において光増幅ファイバ 27 に代えてこの光増幅ファイバ 27A を使用した場合について説明する。なお、入力光ファイバ 1 から入力された信号光が、光増幅ファイバ 27A のコア部 27Aaa に入力されるように、光合分波器 23、WDM カプラ 24 および光増幅ファイバ 27A の接続がなされる。また、コア部 27Aaa から出力された信号光が、光合分波器 29 の出力側光ファイバ 29a から出力されるように、光増幅ファイバ 27A および光合分波器 29 の接続がなされる。また、接続光ファイバ 11 を伝搬して光合分波器 23 の入力側光ファイバ 23k に入力された信号光が、光増幅ファイバ 27A のコア部 27Aak に入力されるように、光合分波器 23、WDM カプラ 24 および光増幅ファイバ 27A の接続がなされる。さらに、コア部 27Aak から出力された信号光が、光合分波器 29 の出力側光ファイバ 29k から出力されるように、光増幅ファイバ 27A および光合分波器 29 の接続がなされる。また、接続光ファイバ 31 を伝搬して光合分波器 23 の入力側光ファイバ 23r に入力された信号光が、光増幅ファイバ 27A のコア部 27Aar に入力されるように、光合分波器 23、WDM カプラ 24 および光増幅ファイバ 27A の接続がなされる。さらに、コア部 27Aar から出力された信号光が、光合分波器 29 の出力側光ファイバ 29r から出力されるように、光増幅ファイバ 27A および光合分波器 29 の接続がなされる。これにより、異なるコア部群 27Ad、27Ae、27Aaf にそれぞれ属するコア部 27Aaa とコア部 27Aak とコア部 27Aar は、直列接続され、多段光増幅ファイバ構造を構成することとなる。

20

30

【0134】

光増幅ファイバ 27A は、励起光を内側クラッド部 27Ab によってマルチモードで伝搬する。なお、内側クラッド部 27Ab の屈折率は、光増幅ファイバ 27A の長手方向に垂直な断面において略均一であるため、当該断面における励起光の強度分布も略均一となる。すると、光増幅ファイバ 27A のコア部 27Aaa ~ 27Aaf のそれぞれに添加された Er は励起光を吸収し、光励起される。一方、コア部 27Aag ~ 27Aar では、それぞれに添加された Yb が主に励起光を吸収して光励起し、Yb から Er にエネルギー移動が起こるために Er が励起される。そこに、信号光がコア部 27Aaa によってシングルモードで伝搬されることにより、誘導放出現象が発生し、信号光は光増幅される。光増幅ファイバ 27A は増幅した信号光を光合分波器 29 に出力する。

40

【0135】

さらに、信号光は、接続光ファイバ 11 を伝搬してコア部 27Aak に入力される。そして、信号光がコア部 27Aak によってシングルモードで伝搬されることにより、誘導放出現象が発生し、信号光は再び光増幅される。さらに、信号光は、接続光ファイバ 31 を伝搬してコア部 27Aar に入力される。そして、信号光がコア部 27Aar によってシングルモードで伝搬されることにより、誘導放出現象が発生し、信号光は再び光増幅される。最終的に出力光ファイバ 14 から出力される。

【0136】

ここで、光増幅ファイバ 27A では、コア部 27Aag ~ 27Aal における励起光の吸収係数が、コア部 27Aaa ~ 27Aaf における励起光の吸収係数よりも大きい。さ

50

らに、コア部 27Aam ~ 27Aar における励起光の吸収係数が、コア部 27Aag ~ 27Aal における励起光の吸収係数よりも大きい。その結果、コア部 27Aak は、コア部 27Aaa よりも、励起光をより多く吸収し、より強く励起された状態となる。同様に、コア部 27Aar は、コア部 27Aak よりも、励起光をより一層多く吸収し、より一層強く励起された状態となる。その結果、異なるコア部群 27Ad、27Ae、27Af にそれぞれ属するコア部 27Aaa とコア部 27Aak とコア部 27Aar との間で信号光に与える利得が互いに異なる。具体的には、コア部 27Aak の方がコア部 27Aaa よりも、信号光に対して与える利得が高く、コア部 27Aar の方がコア部 27Aak よりも、信号光に対して与える利得が高い。コア部 27Aaa とコア部 27Aak とコア部 27Aar の間の利得差はたとえば 3 ~ 4 dB 程度であり、5 dB 以上が好ましいが、利得差の値はこれに限られない。また、利得差はコア部群 27Ad における Er の添加濃度、コア部群 27Ae、27Af における Er および Yb の添加濃度、または励起光強度などにより調整することができる。

10

【0137】

以上説明したように、光ファイバ増幅器 200 において光増幅ファイバ 27 に代えて光増幅ファイバ 27A を使用した光ファイバ増幅器では、光増幅ファイバ 27A が、異なるコア部群 27Ad、27Ae、27Af にそれぞれ属するコア部 27Aaa とコア部 27Aak とコア部 27Aar との間で信号光に与える利得が互いに異なるように構成されており、かつ、コア部 27Aaa とコア部 27Aak とコア部 27Aar 同士が直列接続されており、コア部 27Aaa が 1 段目、コア部 27Aak が 2 段目、コア部 27Aar が 3 段目である 3 段光増幅ファイバ構造を構成している。これにより、この光ファイバ増幅器は 3 段光増幅ファイバ構造を有しながら小型化が可能である。さらに、コア部 27Aaa とコア部 27Aak とコア部 27Aar とをクラッド励起により一括励起しているため、この光ファイバ増幅器は低消費電力化が可能である。

20

【0138】

なお、本発明は上記構成例 5 の構成の光増幅ファイバに限らず、異なるコア部群にそれぞれ属するコア部にいずれも Er、または Er と Yb とを添加するが、Er、または Er と Yb との添加濃度をコア部群の間で互いに異ならせることにより、信号光に与える利得が互いに異なるようにしてもよい。

30

【0139】

(構成例 6)

図 11 は、光増幅ファイバの構成例 6 の模式的な断面図である。光増幅ファイバ 27B は、Er が添加された 18 個のコア部 27Baa ~ 27Bar と、コア部 27Baa ~ 27Bar の外周に形成された内側クラッド部 27Bb と、内側クラッド部 27Bb の外周に形成された外側クラッド部 27c と、を有するダブルクラッド構造の光増幅ファイバである。

【0140】

コア部 27Baa ~ 27Bar は、6 個のコア部 27Baa ~ 27Baf で構成されるコア部群 27Bd と、6 個のコア部 27Bag ~ 27Bal で構成されるコア部群 27Be と、6 個のコア部 27Bam ~ 27Bar で構成されるコア部群 27Bf とからなる。コア部群 27Bd のコア部 27Baa ~ 27Baf、コア部群 27Be のコア部 27Bag ~ 27Bal、コア部群 27Bf のコア部 27Bam ~ 27Bar はそれぞれ六角形状に配置されている。

40

【0141】

また、内側クラッド部 27Bb は、コア部 27Baa ~ 27Bar の屈折率よりも屈折率が低い。また、外側クラッド部 27c は、内側クラッド部 27Bb よりも屈折率が低い。このような屈折率の関係を実現するための光増幅ファイバ 27B の構成材料の例は構成例 1 の光増幅ファイバ 7A の場合と同様である。

【0142】

ここで、光増幅ファイバ 27B では、Er の添加濃度および内側クラッド部 27Bb に

50

対する比屈折率差については、コア部 27Baa ~ 27Bar の全てで略等しい。ただし、コア直径については、コア部 27Baa ~ 27Baf の全てで略等しく、コア部 27Bag ~ 27Bal の全てで略等しく、コア部 27Bam ~ 27Bar の全てで略等しいが、コア部 27Baa ~ 27Baf とコア部 27Bag ~ 27Bal とコア部 27Bam ~ 27Bar では互いに異なる。具体的には、コア部 27Baa ~ 27Baf よりもコア部 27Bag ~ 27Bal の方が、コア直径が大きく、コア部 27Bag ~ 27Bal よりもコア部 27Bam ~ 27Bar の方が、コア直径が大きい。

【0143】

光ファイバ増幅器 200 において光増幅ファイバ 7 に代えてこの光増幅ファイバ 27B を使用した場合について説明する。なお、入力光ファイバ 1 から入力された信号光が、光増幅ファイバ 27B のコア部 27Baa に入力されるように、光合分波器 23、WDM カプラ 24 および光増幅ファイバ 27B の接続がなされる。また、コア部 27Baa から出力された信号光が、光合分波器 9 の出力側光ファイバ 29a から出力されるように、光増幅ファイバ 27B および光合分波器 9 の接続がなされる。また、接続光ファイバ 11 を伝搬して光合分波器 3 の入力側光ファイバ 23k に入力された信号光が、光増幅ファイバ 27B のコア部 27Bak に入力されるように、光合分波器 23、WDM カプラ 24 および光増幅ファイバ 27B の接続がなされる。さらに、コア部 27Bak から出力された信号光が、光合分波器 9 の出力側光ファイバ 29k から出力されるように、光増幅ファイバ 27B および光合分波器 9 の接続がなされる。また、接続光ファイバ 31 を伝搬して光合分波器 23 の入力側光ファイバ 23r に入力された信号光が、光増幅ファイバ 27B のコア部 27Bar に入力されるように、光合分波器 23、WDM カプラ 24 および光増幅ファイバ 27B の接続がなされる。さらに、コア部 27Bar から出力された信号光が、光合分波器 29 の出力側光ファイバ 29r から出力されるように、光増幅ファイバ 27B および光合分波器 29 の接続がなされる。これにより、異なるコア部群 27Bd、27Be、27Bf にそれぞれ属するコア部 27Baa とコア部 27Bak とコア部 27Bar とは、直列接続され、多段光増幅ファイバ構造を構成することとなる。

【0144】

光増幅ファイバ 27B は、励起光を内側クラッド部 27Bb によってマルチモードで伝搬する。なお、内側クラッド部 27Bb の屈折率は、光増幅ファイバ 27B の長手方向に垂直な断面において略均一であるため、当該断面における励起光の強度分布も略均一となる。すると、光増幅ファイバ 27B のコア部 27Baa ~ 27Bar のそれぞれに添加された Er は励起光を吸収し、光励起される。そこに、信号光がコア部 27Baa によってシングルモードで伝搬されることにより、誘導放出現象が発生し、信号光は光増幅される。光増幅ファイバ 27B は増幅した信号光を光合分波器 9 に出力する。

【0145】

さらに、信号光は、接続光ファイバ 11 を伝搬してコア部 27Bak に入力される。そして、信号光がコア部 27Bak によってシングルモードで伝搬されることにより、誘導放出現象が発生し、信号光は再び光増幅される。さらに、信号光は、接続光ファイバ 31 を伝搬してコア部 27Bar に入力される。そして、信号光がコア部 27Bar によってシングルモードで伝搬されることにより、誘導放出現象が発生し、信号光は再び光増幅される。最終的に出力光ファイバ 14 から出力される。

【0146】

ここで、上述したように、コア部 27Baa ~ 27Baf よりもコア部 27Bag ~ 27Bal の方が、コア直径が大きく、コア部 27Bag ~ 27Bal よりもコア部 27Bam ~ 27Bar の方が、コア直径が大きい。その結果、コア部 27Bak は、コア部 27Baa よりも、励起光をより多く吸収し、より強く励起された状態となる。同様に、コア部 27Bar は、コア部 27Bak よりも、励起光をより多く吸収し、より強く励起された状態となる。その結果、異なるコア部群 27Bd、27Be、27Bf にそれぞれ属するコア部 27Baa とコア部 27Bak とコア部 27Bar との間で信号光に与える利得が互いに異なる。具体的には、コア部 27Bak の方がコア部 27Baa よりも、信号光

10

20

30

40

50

に対して与える利得が高く、コア部 27Bar の方がコア部 27Bak よりも、信号光に対して与える利得が高い。コア部 27Baa とコア部 27Bak とコア部 27Bar との間の利得差はたとえば 3 ~ 4 dB 程度であり、5 dB 以上が好ましいが、利得差の値はこれに限られない。また、利得差は Er の添加濃度、コア直径または励起光強度などにより調整することができる。

【0147】

以上説明したように、光ファイバ増幅器 200 において光増幅ファイバ 27 に代えて光増幅ファイバ 27B を使用した光ファイバ増幅器では、光増幅ファイバ 27B が、異なるコア部群 27Bd、27Be、27Bf にそれぞれ属するコア部 27Baa とコア部 27Bak とコア部 27Bar との間で信号光に与える利得が互いに異なるように構成されており、かつ、コア部 27Baa とコア部 27Bak とコア部 27Bar 同士が直列接続されており、コア部 27Baa が 1 段目、コア部 27Bak が 2 段目、コア部 27Bar が 3 段目である 3 段光増幅ファイバ構造を構成している。これにより、この光ファイバ増幅器は 3 段光増幅ファイバ構造を有しながら小型化が可能である。さらに、コア部 27Baa とコア部 27Bak とコア部 27Bar とをクラッド励起により一括励起しているため、この光ファイバ増幅器は低消費電力化が可能である。

10

【0148】

(構成例 7)

図 12 は、光増幅ファイバの構成例 7 の模式的な断面図である。光増幅ファイバ 27C は、Er が添加された 6 個のコア部 27Ca a ~ 27Ca f と、Er と Yb とが共添加された 12 個のコア部 27Ca g ~ 27Ca r と、コア部 27Ca a ~ 27Ca r の外周に形成された内側クラッド部 27Cb と、内側クラッド部 27Cb の外周に形成された外側クラッド部 27c と、を有するダブルクラッド構造の光増幅ファイバである。

20

【0149】

コア部 27Ca a ~ 27Ca r は、6 個のコア部 27Ca a ~ 27Ca f で構成されるコア部群 27Cd と、6 個のコア部 27Ca g ~ 27Ca l で構成されるコア部群 27Ce と、6 個のコア部 27Ca m ~ 27Ca r で構成されるコア部群 27Cf とからなる。コア部群 27Cd のコア部 27Ca a ~ 27Ca f、コア部群 27Ce のコア部 27Ca g ~ 27Ca l、コア部群 27Cf のコア部 27Ca m ~ 27Ca r はそれぞれ六角形状に配置されている。

30

【0150】

また、内側クラッド部 27Cb は、コア部 27Ca a ~ 27Ca r の屈折率よりも屈折率が低い。また、外側クラッド部 27c は、内側クラッド部 27Cb よりも屈折率が低い。このような屈折率の関係を実現するための光増幅ファイバ 27C の構成材料の例は光増幅ファイバ 27A の場合と同様である。

【0151】

ここで、光増幅ファイバ 27C では、コア直径および内側クラッド部 27Cb に対する比屈折率差については、コア部 27Ca a ~ 27Ca r の全てで略等しい。また、Er の添加濃度については、コア部 27Ca a ~ 27Ca f の全てで略等しい。また、Er および Yb の添加濃度については、コア部 27Ca g ~ 27Ca l の全てで略等しく、コア部 27Ca m ~ 27Ca r の全てで略等しくかつコア部 27Ca g ~ 27Ca l よりも添加濃度が高い。

40

【0152】

光増幅ファイバ 27A と光増幅ファイバ 27C とを比較すると、光増幅ファイバ 27A では、コア部 27Aa a ~ 27Aa f が形成する六角形と、コア部 27Aa g ~ 27Aa l が形成する六角形と、コア部 27Aa m ~ 27Aa r が形成する六角形とが、光増幅ファイバ 27A の中心軸を中心として、頂点が径方向に沿って並んでいる同心となっている。これに対して、光増幅ファイバ 27C では、コア部 27Ca a ~ 27Ca f が形成する六角形と、コア部 27Ca m ~ 27Ca r が形成する六角形とは、光増幅ファイバ 27C の中心軸を中心として、頂点が径方向に沿って並んでいる同心となっているが、コア部 2

50

7 C a g ~ 2 7 C a l が形成する六角形は、これらの六角形に対して中心軸回りに時計回りに 30° 回転させた配置となっている。

【 0 1 5 3 】

このように、各コア部群 2 7 C d、2 7 C e、2 7 C f に属するコア部が形成する六角形の少なくとも 1 つを中心軸回りに回転させるようにコア部を配置することで、隣接するコア部間での信号光のクロストークが - 40 dB 以下となるような距離に設定することが容易になる。

【 0 1 5 4 】

光ファイバ増幅器 2 0 0 において光増幅ファイバ 2 7 に代えて光増幅ファイバ 2 7 C を使用した光ファイバ増幅器においても、3 段光増幅ファイバ構造を有しながら小型化が可能であり、かつ低消費電力化が可能である。

【 0 1 5 5 】

(構成例 8)

図 1 3 は、光増幅ファイバの構成例 8 の模式的な断面図である。光増幅ファイバ 2 7 D は、E r が添加された 1 8 個のコア部 2 7 D a a ~ 2 7 D a r と、コア部 2 7 D a a ~ 2 7 D a r の外周に形成された内側クラッド部 2 7 D b と、内側クラッド部 2 7 D b の外周に形成された外側クラッド部 2 7 c と、を有するダブルクラッド構造の光増幅ファイバである。

【 0 1 5 6 】

コア部 2 7 D a a ~ 2 7 D a r は、6 個のコア部 2 7 D a a ~ 2 7 D a f で構成されるコア部群 2 7 D d と、6 個のコア部 2 7 D a g ~ 2 7 D a l で構成されるコア部群 2 7 D e と、6 個のコア部 2 7 D a m ~ 2 7 D a r で構成されるコア部群 2 7 D f とからなる。コア部群 2 7 D d のコア部 2 7 D a a ~ 2 7 D a f、コア部群 2 7 D e のコア部 2 7 D a g ~ 2 7 D a l、コア部群 2 7 D f のコア部 2 7 D a m ~ 2 7 D a r はそれぞれ六角形状に配置されている。

【 0 1 5 7 】

また、内側クラッド部 2 7 D b は、3 個の内側副クラッド部 2 7 D b a、2 7 D b b、2 7 D b c を有し、異なるコア部群 2 7 D d、2 7 D e、2 7 D f に属するコア部 2 7 D a a ~ 2 7 D a f、2 7 D a g ~ 2 7 D a l、2 7 D a m ~ 2 7 D a r は、それぞれ異なる内側副クラッド部 2 7 D b a、2 7 D b b、2 7 D b c に囲まれている。具体的には、コア部群 2 7 D d に属するコア部 2 7 D a a ~ 2 7 D a f は、断面円形の内側副クラッド部 2 7 D b a に囲まれており、コア部群 2 7 D e に属するコア部 2 7 D a g ~ 2 7 D a l は、内側副クラッド部 2 7 D b a の外周に形成されたリング状の内側副クラッド部 2 7 D b b に囲まれており、コア部群 2 7 D f に属するコア部 2 7 D a m ~ 2 7 D a r は、内側副クラッド部 2 7 D b b の外周に形成されたリング状の内側副クラッド部 2 7 D b c に囲まれている。

【 0 1 5 8 】

また、光増幅ファイバ 2 7 と同様に、内側クラッド部 2 7 D b は、コア部 2 7 D a a ~ 2 7 D a l の屈折率よりも屈折率が低い。また、外側クラッド部 2 7 c は、内側クラッド部 2 7 D b よりも屈折率が低い。また、内側副クラッド部 2 7 D b a、2 7 D b b、2 7 D b c は、互いに屈折率が異なる。具体的には、内側副クラッド部 2 7 D b b の方が内側副クラッド部 2 7 D b a よりも屈折率が高く、内側副クラッド部 2 7 D b c の方が内側副クラッド部 2 7 D b b よりも屈折率が高い。このような屈折率の関係を実現するための光増幅ファイバ 2 7 D の構成材料の例は光増幅ファイバ 2 7 の場合と同様である。

【 0 1 5 9 】

また、光増幅ファイバ 2 7 D では、コア直径、E r の添加濃度、および囲まれているクラッド部に対する比屈折率差については、コア部 2 7 D a a ~ 2 7 D a r の全てで略等しい。なお、たとえば、コア直径は 2 ~ 6 μm であり、E r の添加濃度は 300 ~ 3000 ppm であり、および囲まれているクラッド部に対する比屈折率差は 0.3 ~ 1.5 % である。

10

20

30

40

50

【0160】

光増幅ファイバ27と光増幅ファイバ27Dとを比較すると、光増幅ファイバ27Dの内側副クラッド部27Dba、27Dbbの外径が、それぞれ、光増幅ファイバ27の内側副クラッド部27ba、27bbの外径よりも大きい。また、コア部27Da a~27Da f、コア部27Da g~27Da lの光増幅ファイバ27Dの中心軸からの距離も、コア部27aa~27af、コア部27ag~27alの光増幅ファイバ27の中心軸からの距離よりもそれぞれ大きい。また、光増幅ファイバ27Dの内側副クラッド部27Dbcの径方向における幅が、光増幅ファイバ27の内側副クラッド部27bcの径方向における幅よりも小さい。内側副クラッド部27Dbcは、たとえば純石英ガラスからなるが、その幅は、光増幅ファイバ27Dの直径（外側クラッド部27cの外径）に対して10~90%の大きさとなるように自由に選択できる。また、光増幅ファイバ27では、コア部27aa~27afが形成する六角形と、コア部27ag~27alが形成する六角形と、コア部27am~27arが形成する六角形とが、光増幅ファイバ27の中心軸を中心とし、頂点が径方向に沿って並んでいる同心となっている。これに対して、光増幅ファイバ27Dでは、コア部27Da a~27Da fが形成する六角形と、コア部27Dam~27Darが形成する六角形とは、光増幅ファイバ27Dの中心軸を中心として、頂点が径方向に沿って並んでいる同心となっているが、コア部27Da g~27Da lが形成する六角形は、これらの六角形に対して中心軸回りに時計回りに30°回転させた配置となっている。

10

【0161】

内側副クラッド部27Dba、27Dbbの外径を調整したり、各コア部群27Dd、27De、27Dfに属するコア部が形成する六角形の少なくとも1つを中心軸回りに回転させるようにコア部を配置したりすることにより、隣接するコア部間での信号光のクロストークが-40dB以下となるような距離に設定することが容易になる。

20

【0162】

光ファイバ増幅器200において光増幅ファイバ27に代えて光増幅ファイバ27Dを使用した光ファイバ増幅器においても、3段光増幅ファイバ構造を有しながら小型化が可能であり、かつ低消費電力化が可能である。

【0163】

(構成例9)

図14は、光増幅ファイバの構成例9の模式的な断面図である。光増幅ファイバ27Eは、Erが添加された18個のコア部27Eaa~27Earと、コア部27Eaa~27Earの外周に形成された内側クラッド部27Ebと、内側クラッド部27Ebの外周に形成された外側クラッド部27cと、を有するダブルクラッド構造の光増幅ファイバである。

30

【0164】

コア部27Eaa~27Earは、6個のコア部27Eaa~27Eafで構成されるコア部群27Edと、6個のコア部27Eag~27Ealで構成されるコア部群27Eeと、6個のコア部27Eam~27Earで構成されるコア部群27Efとからなる。コア部群27Edのコア部27Eaa~27Eaf、コア部群27Eeのコア部27Eag~27Eal、コア部群27Efのコア部27Eam~27Earはそれぞれ六角形状に配置されている。

40

【0165】

また、内側クラッド部27Ebは、コア部27Eaa~27Earの屈折率よりも屈折率が低い。また、外側クラッド部27cは、内側クラッド部27Ebよりも屈折率が低い。このような屈折率の関係を実現するための光増幅ファイバ27Eの構成材料の例は構成例6の光増幅ファイバ27Bの場合と同様である。

【0166】

ここで、光増幅ファイバ27Eでは、Erの添加濃度および内側クラッド部27Ebに対する比屈折率差については、コア部27Eaa~27Earの全てで略等しい。ただし

50

、コア直径については、コア部 27Eaa ~ 27Eaf の全てで略等しく、コア部 27Eag ~ 27Eal の全てで略等しく、コア部 27Eam ~ 27Ear の全てで略等しいが、コア部 27Eaa ~ 27Eaf とコア部 27Eag ~ 27Eal とコア部 27Eam ~ 27Ear では互いに異なる。具体的には、コア部 27Eaa ~ 27Eaf よりもコア部 27Eag ~ 27Ealの方が、コア直径が大きく、コア部 27Eag ~ 27Eal よりもコア部 27Eam ~ 27Earの方が、コア直径が大きい。

【0167】

光増幅ファイバ 27B と光増幅ファイバ 27E とを比較すると、コア部 27Eaa ~ 27Eaf、コア部 27Eag ~ 27Eal の光増幅ファイバ 27E の中心軸からの距離が、コア部 27Baa ~ 27Baf、コア部 27Bag ~ 27Bal の光増幅ファイバ 27B の中心軸からの距離よりもそれぞれ大きい。また、光増幅ファイバ 27B では、コア部 27Baa ~ 27Baf が形成する六角形と、コア部 27Bag ~ 27Bal が形成する六角形と、コア部 27Bam ~ 27Bar が形成する六角形とが、光増幅ファイバ 27B の中心軸を中心として、頂点が径方向に沿って並んでいる同心となっている。これに対して、光増幅ファイバ 27E では、コア部 27Eaa ~ 27Eaf が形成する六角形と、コア部 27Eam ~ 27Ear が形成する六角形とは、光増幅ファイバ 27E の中心軸を中心として、頂点が径方向に沿って並んでいる同心となっているが、コア部 27Eag ~ 27Eal が形成する六角形は、これらの六角形に対して中心軸回りに時計回りに 30° 回転させた配置となっている。

10

【0168】

各コア部群 27Ed、27Ee、27Ef に属するコア部が形成する六角形の少なくとも 1 つを中心軸回りに回転させるようにコア部を配置したりすることにより、隣接するコア部間での信号光のクロストークが -40dB 以下となるような距離に設定することが容易になる。

20

【0169】

光ファイバ増幅器 200 において光増幅ファイバ 27 に代えて光増幅ファイバ 27E を使用した光ファイバ増幅器においても、3 段光増幅ファイバ構造を有しながら小型化が可能であり、かつ低消費電力化が可能である。

【0170】

また、上記実施形態では、光ファイバ増幅器が有する多段光増幅ファイバ構造の段数は 2 段または 3 段であり、多段光増幅ファイバ構造の数は 6 個であるが、より多数の段数の多段光増幅ファイバ構造をより多く有することができるように設計された光増幅ファイバを用いれば、より多段かつ多くの多段光増幅ファイバ構造を有する光ファイバ増幅器を実現できる。たとえば、 n 、 m を 2 以上の整数として、多段光増幅ファイバ構造における段数を n とし、光増幅ファイバにおけるコア部群の数を n 以上とし、光増幅ファイバにおけるコア部の数を $n \times m$ とすると、光ファイバ増幅器は m 個の多段光増幅ファイバ構造を有することができる。また、このとき励起光源の数を m より小さくすると、励起光源の数を多段光増幅ファイバ構造の数よりも少なくできるので、低消費電力の点で好適である。

30

【0171】

また、上記実施形態では、利得がより大きいコア部をより後段に接続し、多段光増幅ファイバ構造を構成しているが、本発明はこれに限られない。すなわち、光ファイバ増幅器の設計や仕様に応じて、利得がより小さいコア部をより後段に接続したり、利得の大きさに依存しない順番でコア部を接続したりして、多段光増幅ファイバ構造を構成してもよい。

40

【0172】

また、上記実施形態により本発明が限定されるものではない。上述した各構成要素を適宜組み合わせる構成したものも本発明に含まれる。たとえば、光増幅ファイバにおける異なるコア部群に属するコア部は、(1) 互いに屈折率が異なる複数の内側副クラッド部に囲まれている、(2) 希土類元素の添加濃度が互いに異なる、(3) 添加されている希土類元素の種類が互いに異なる、(4) コア直径が互いに異なる、の(1) ~ (4)の特性

50

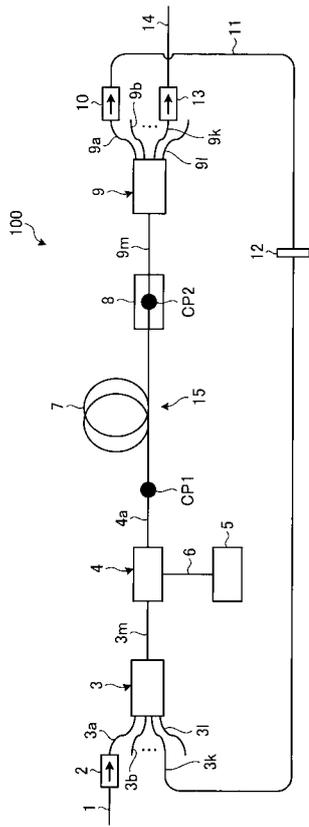
を適宜組み合わせた特性を有するものとする。また、さらなる効果や変形例は、当業者によって容易に導き出すことができる。よって、本発明のより広範な態様は、上記の実施形態に限定されるものではなく、様々な変更が可能である。

【符号の説明】

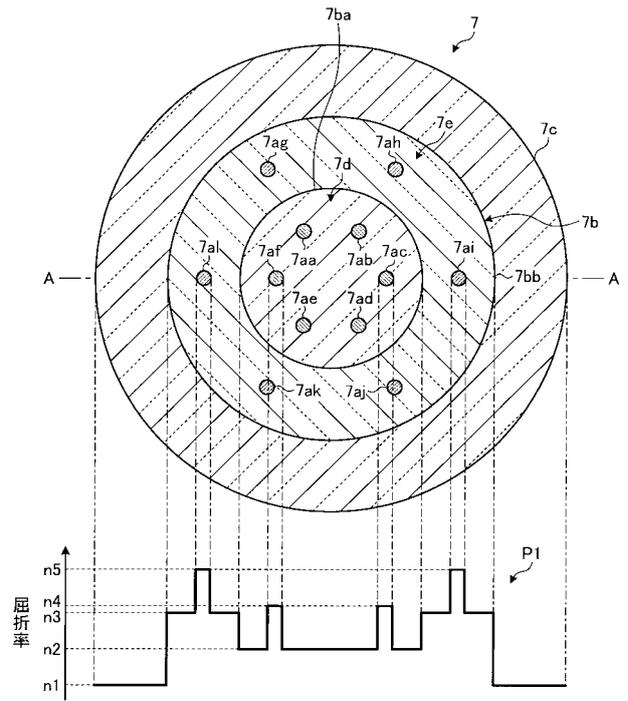
【0173】

- 1、1A 入力光ファイバ
- 2、2A、10、10A、13、13A、30 光アイソレータ
- 3、9、23、29 光合分波器
- 3a~3l、23a~23r 入力側光ファイバ
- 9m、29s 入力側マルチコア光ファイバ 10
- 3m、4a、23s、24a 出力側マルチコア光ファイバ
- 9a~9l、29a~29r 出力側光ファイバ
- 4、24 WDMカプラ
- 5 励起光源
- 6 マルチモード光ファイバ
- 7、7A、7B、7C、7D、27、27A、27B、27C、27D、27E 光増幅
ファイバ
- 7aa~7al、7Aaa~7Aal、7Baa~7Bal、7Caa~7Cal、7D
aa~7Dal、27aa~27ar、27Aaa~27Aar、27Baa~27Ba
r、27Caa~27Car、27Daa~27Dar、27Eaa~27Ear コア 20
部
- 7b、7Ab、7Bb、7Cb、7Db、27b、27Ab、27Bb、27Cb、27
Db、27Eb 内側クラッド部
- 7d、7e、7Ad、7Ae、7Bd、7Be、7Cd、7Ce、7Dd、7De、27
d、27e、27f、27Ad、27Ae、27Af、27Bd、27Be、27Bf、
27Cd、27Ce、27Cf、27Dd、27De、27Df、27Ed、27Ee、
27Ef コア部群
- 7ba、7bb、7Cba、7Cbb、27ba、27bb、27bc、27Dba、2
7Dbb、27Dbc 内側副クラッド部
- 7c、27c 外側クラッド部 30
- 8 残留励起光処理部
- 11、11A、31 接続光ファイバ
- 12、12A、32 ASEカットフィルタ
- 14、14A 出力光ファイバ
- 15、15A、25 多段光増幅ファイバ構造
- 100、100A、200 光ファイバ増幅器
- CP1、CP2 接続点
- P1、P2 屈折率プロファイル

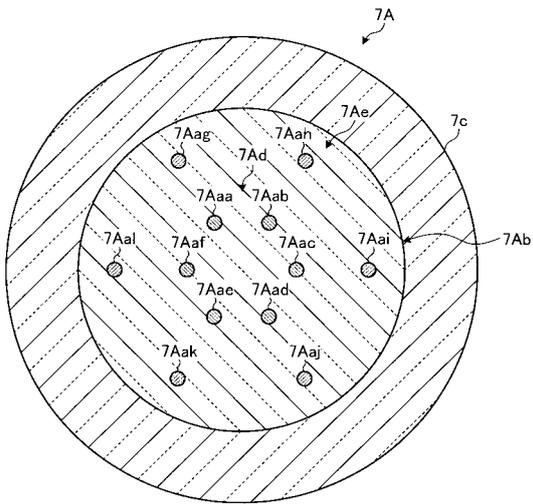
【 図 1 】



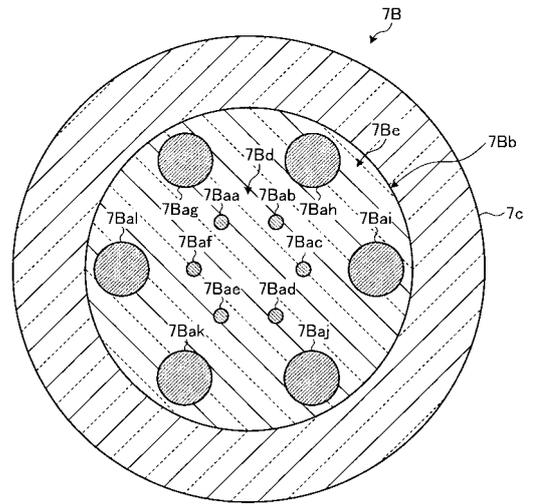
【 図 2 】



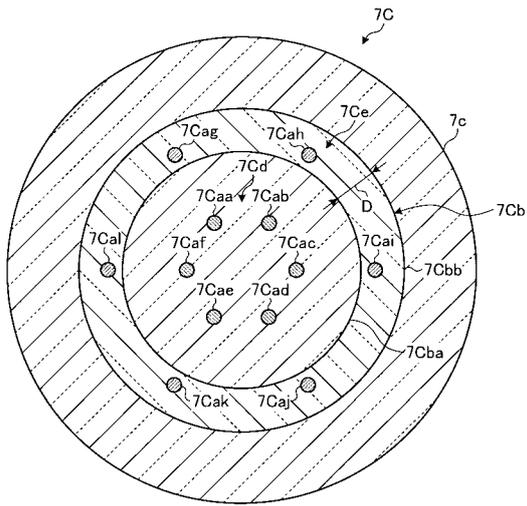
【 図 3 】



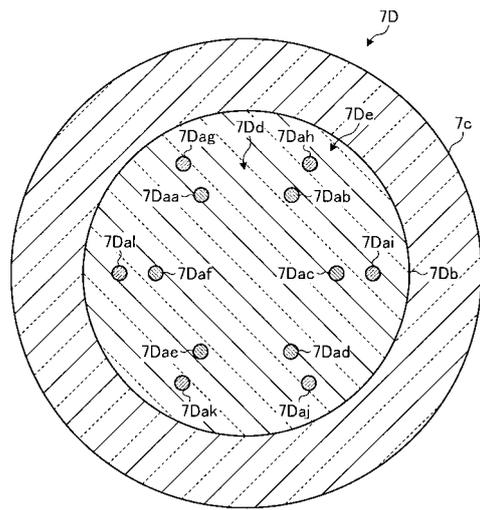
【 図 4 】



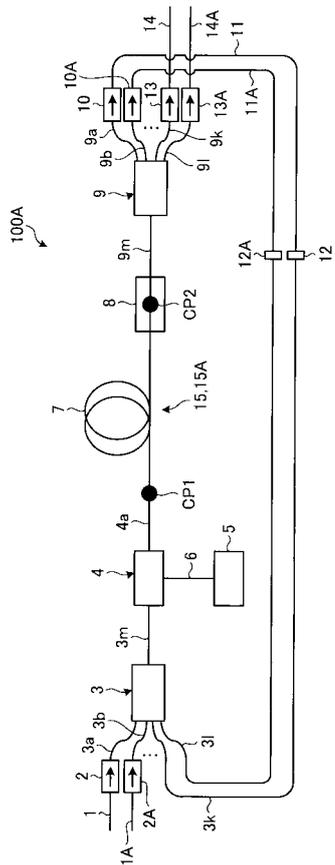
【 図 5 】



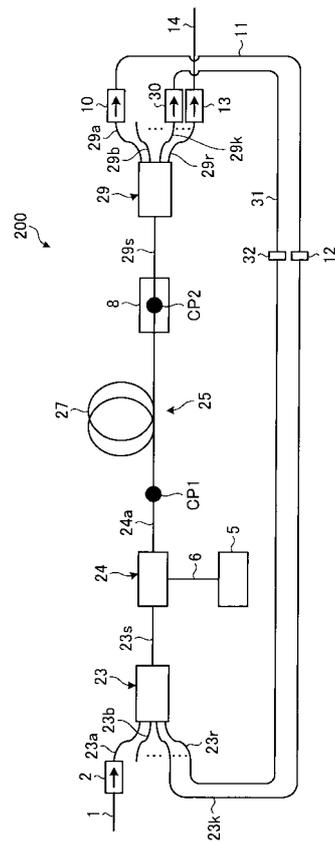
【 図 6 】



【 図 7 】



【 図 8 】



フロントページの続き

Fターム(参考) 5F172 AE13 AF03 AF06 AM01 AM02 AM04 AM08 BB02 BB03 BB27
BB84 BB86 BB94