

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公表特許公報(A)

(11) 特許出願公表番号
特表2004-500590
(P2004-500590A)

(43) 公表日 平成16年1月8日(2004.1.8)

(51) Int.Cl.⁷
G02B 6/22

F I
G02B 6/22

テーマコード (参考)
2H050

審査請求 未請求 予備審査請求 有 (全 47 頁)

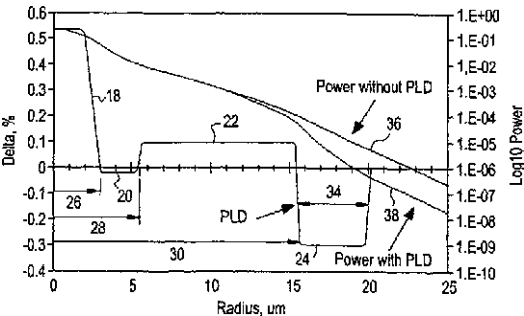
(21) 出願番号 (86) (22) 出願日 (85) 翻訳文提出日 (86) 国際出願番号 (87) 国際公開番号 (87) 国際公開日 (31) 優先権主張番号 (32) 優先日 (33) 優先権主張国 (31) 優先権主張番号 (32) 優先日 (33) 優先権主張国	特願2001-515999 (P2001-515999) 平成12年6月20日 (2000.6.20) 平成13年3月27日 (2001.3.27) PCT/US2000/016925 W02001/011402 平成13年2月15日 (2001.2.15) 60/145,759 平成11年7月27日 (1999.7.27) 米国 (US) 60/165,833 平成11年11月16日 (1999.11.16) 米国 (US)	(71) 出願人 (74) 代理人 (72) 発明者 (72) 発明者	501246857 コーニング・インコーポレーテッド アメリカ合衆国ニューヨーク州14831 、コーニング、リバーフロント・プラザ 1 100079119 弁理士 藤村 元彦 ミッチェル ブライアン イー. アメリカ合衆国 ノースカロライナ州 2 8405 ウィルミントン ゲートウッド コート 4305 スミス デービッド ケイ. アメリカ合衆国 ノースカロライナ州 2 8405 ウィルミントン ワイルドダン ズサークル 905
---	--	--	--

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 負の分散および大なる A e f f を有する光導波路

(57) 【要約】

本発明は、マイクロバンド損失を制限すると共に比較的大きい有効面積を提供するシングルモード光導波路ファイバプロファイル(18、20、22、24)を目的とする。大きな有効面積は、伝搬された光パワーを導波路中心から離してシフトするように導波路ファイバのコアを構成した結果である。ピンアレイまたは20mmのマンドレルテストにより測定されるような、マイクロバンド損失は、導波路の中心コア領域を包囲するパワー制限屈折率凹部(24)によって低く維持される。更に、低い減衰が得られ、カットオフ波長は、約1250nmから1700nmまでの波長帯域に通信動作ウィンドウを提供するように制御される。



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

クラッド層と接触して包囲されているコア領域を有し、コア領域及びクラッド層の各々はそれぞれ屈折率プロファイルを有して導波路ファイバを介して光を案内するように構成され、

コア領域は、少なくとも 2 つのセグメントを含む中心領域からなり、前記中心領域を包囲し、パワー制限凹部は内径及び外径を有し、

導波路ファイバを介して案内される光は、 $10 \mu\text{m}$ 半径点でのパワーに対する導波路の $25 \mu\text{m}$ 半径点でのパワーの比が約 1×10^{-4} よりも小さいことに特徴を有する 1550 nm でのパワー分布を有することを特徴とするシングルモード光導波路ファイバ。

10

【請求項 2】

前記ファイバは 0.22 dB/km 以下の減衰を呈することを特徴とする請求項 1 記載のシングルモード導波路。

【請求項 3】

ファイバは、 1250 nm から 1700 nm までの波長帯域で動作するように設計されていることを特徴とする請求項 1 記載のシングルモード導波路。

【請求項 4】

ファイバは、 1520 nm から 1650 nm までの波長帯域で動作するように設計されていることを特徴とする請求項 1 記載のシングルモード導波路。

【請求項 5】

パワー制限凹部は、約 $0.75 \mu\text{m}$ から $13 \mu\text{m}$ までの範囲の幅、最小約 $12 \mu\text{m}$ の内径、約 -0.05% から -0.80% までの範囲の相対屈折率を有することを特徴とする請求項 1 記載のシングルモード導波路。

20

【請求項 6】

パワー制限凹部は、導波路の中心線からパワー制限凹部の幾何学中心まで約 $12.5 \mu\text{m}$ から $22 \mu\text{m}$ までの半径を有することを特徴とする請求項 5 記載のシングルモード導波路。

【請求項 7】

有効面積は、最小約 $60 \mu\text{m}^2$ であり、ファイバカットオフ波長は、約 1450 nm から 1900 nm までの範囲にあることを特徴とする先行する請求項の任意の 1 に記載のシングルモード光導波路。

30

【請求項 8】

前記中心領域は、3 つのセグメントからなり、前記セグメントの各々は、それぞれ屈折率プロファイル、内径及び外径、導波路中心から始まり外方にカウントして、相対屈折率パーセント $\alpha_0\%$ 、 $\alpha_1\%$ 、 $\alpha_2\%$ を有し、

各屈折率プロファイルは、 $\alpha_0 - \alpha_1$ プロファイル、ステップ、角の丸いステップ、台形、角の丸い台形からなるグループから選択され、 $\alpha_0\% > \alpha_1\% > \alpha_2\%$ であることを特徴とする請求項 1 記載のシングルモード導波路。

【請求項 9】

パワー制限凹部の相対屈折率 $\alpha_p\%$ は負であることを特徴とする請求項 8 記載のシングルモード導波路。

40

【請求項 10】

$\alpha_0\%$ は 0.35 から 0.45% までの範囲にあり、 $\alpha_1\%$ は 0 から 0.05% までの範囲にあり、 $\alpha_2\%$ は 0.06 から 0.15% までの範囲にあり、 $\alpha_p\%$ は -0.05 から -0.80% までの範囲にあることを特徴とする請求項 8 記載のシングルモード導波路。

【請求項 11】

ファイバは、 $75 \mu\text{m}^2$ 以上の有効面積を呈することを特徴とする請求項 10 記載のシングルモード導波路。

【請求項 12】

ファイバは、 $80 \mu\text{m}^2$ 以上の有効面積を呈することを特徴とする請求

50

項 10 記載のシングルモード導波路。

【請求項 13】

導波路中心で始まり外側に向けてカウントして、第 1 セグメントの半径は 3 から 5 μm までの範囲にあり、第 2 セグメントの外径は 7 から 9 μm までの範囲にあり、第 3 セグメントの外径は 9 μm から 13 μm までの範囲にあり、パワー制限凹部の幾何学中心半径は 19 μm から 21 μm までの範囲にあり、パワー制限凹部の幅は 3 μm から 10 μm までの範囲にあることを特徴とする請求項 10 記載のシングルモード導波路。

【請求項 14】

10 ミクロン半径ポイントでのパワーに対するパワー制限凹部の外径でのパワーの比は、約 3×10^{-5} より小であることを特徴とする請求項 13 記載のシングルモード導波路。 10

【請求項 15】

有効面積は、最小約 75 μm^2 であることを特徴とする請求項 14 記載のシングルモード導波路。

【請求項 16】

前記中心領域は、3 つのセグメントからなり、前記セグメントの各々は屈折率プロファイル、内径及び外径、導波路中心で始まり外側に向けてカウントした相対屈折率パーセント $\alpha_0\%$ 、 $\alpha_1\%$ 、 $\alpha_2\%$ 、を有し、

各屈折率プロファイルは、 α_0 - プロファイル、ステップ、角の丸いステップ、台形、角の丸い台形からなるグループから選択され、 $\alpha_0\% > \alpha_2\% > \alpha_1\%$ であり、 $\alpha_1\%$ は負であることを特徴とする請求項 1 記載のシングルモード導波路。 20

【請求項 17】

パワー制限凹部の相対屈折率 $\alpha_p\%$ は、負であることを特徴とする請求項 16 記載のシングルモード導波路。

【請求項 18】

$\alpha_0\%$ は、0.5 から 0.6 % の範囲内にあり、 $\alpha_1\%$ は、約 - 0.025 % から 0.01 % の範囲内にあり、 $\alpha_2\%$ は、0.06 から 0.30 % の範囲内にあり、 $\alpha_p\%$ は、- 0.05 % から - 0.80 % の範囲内にいることを特徴とする請求項 17 記載のシングルモード導波路。

【請求項 19】

導波路中心で始まり外方にカウントして、第 1 セグメントの半径は 2.0 から 4.5 μm までの範囲にあり、第 2 セグメントの外径は 5 から 9 μm までの範囲にあり、第 3 セグメントの外径は 11 μm から 16 μm までの範囲内にあり、パワー制限凹部の幾何学的中心径は 14 μm から 20 μm までの範囲内にあり、パワー制限凹部の幅は 3 μm から 10 μm までの範囲内にあることを特徴とする請求項 18 記載のシングルモード導波路。 30

【請求項 20】

有効面積は、最小 65 μm^2 であることを特徴とする請求項 19 記載のシングルモード導波路。

【請求項 21】

10 ミクロン半径ポイントでのパワーに対するパワー制限凹部の外径でのパワーの比は、約 1.4×10^{-5} よりも小であることを特徴とする請求項 20 記載のシングルモード導波路。 40

【請求項 22】

前記中心領域は、4 つのセグメントからなり、前記セグメントの各々は、それぞれ屈折率プロファイル、内径及び外径、導波路中心で開始されて外方にカウントする、相対屈折率パーセント $\alpha_0\%$ 、 $\alpha_1\%$ 、 $\alpha_2\%$ 、 $\alpha_3\%$ を有し、

各屈折率プロファイルは、 α_0 - プロファイル、ステップ、角の丸いステップ、台形、角の丸い台形からなるグループから選択され、 $\alpha_0\% > \alpha_2\% > \alpha_1\%$ $\alpha_3\%$ であることを特徴とする請求項 1 記載のシングルモード導波路。

【請求項 23】

パワー制限凹部の相対屈折率 $\alpha_p\%$ は負であることを特徴とする請求項 22 記載のシング 50

ルモード導波路。

【請求項 2 4】

α_0 % は 0 . 5 3 % から 0 . 6 5 % までの範囲内にあり、 α_1 % は 0 から 0 . 0 6 5 % までの範囲内にあり、 α_2 % は 0 . 1 0 % から 0 . 7 0 % までの範囲内にあり、 α_3 % は 0 から 0 . 0 5 % までの範囲内にあり、 α_p % は - 0 . 0 5 % から - 0 . 8 0 % までの範囲内にあることを特徴とする請求項 2 2 記載のシングルモード導波路。

【請求項 2 5】

ファイバは、 $65 \mu\text{m}^2$ 以上の有効面積を呈することを特徴とする請求項 2 4 記載のシングルモード導波路。

【請求項 2 6】

ファイバは、 $70 \mu\text{m}^2$ 以上の有効面積を呈することを特徴とする請求項 2 4 記載のシングルモード導波路。

【請求項 2 7】

導波路の中心から始めて外側に向けてカウントして、第 1 セグメントの半径は $2.0 \mu\text{m}$ から $2.5 \mu\text{m}$ までの範囲内にあり、第 3 セグメントの中心径は $8.8 \mu\text{m}$ から $11.8 \mu\text{m}$ までの範囲内にあり、第 3 セグメントの幅は $0.30 \mu\text{m}$ から $9 \mu\text{m}$ までの範囲内にあり、パワー制限凹部の内側中心径は $12 \mu\text{m}$ から $19.5 \mu\text{m}$ までの範囲内にあり、パワー制限凹部の外径は $17 \mu\text{m}$ から $25 \mu\text{m}$ までの範囲内にあることを特徴とする請求項 2 4 記載のシングルモード導波路。

【請求項 2 8】

$10 \mu\text{m}$ ミクロン半径ポイントでのパワーに対するパワー制限凹部の外径でのパワーの比は、 8×10^{-5} より小であることを特徴とする請求項 2 7 記載のシングルモード導波路。

【請求項 2 9】

α_0 % は 0 . 5 0 % から 0 . 6 0 % までの範囲内にあり、 α_1 % は 0 から 0 . 1 0 % までの範囲内にあり、 α_2 % は 0 . 2 0 % から 0 . 3 0 % までの範囲内にあり、 α_3 % は 0 から 0 . 0 5 % までの範囲内にあり、 α_p % は - 0 . 0 5 % から - 0 . 8 0 % までの範囲内にあることを特徴とする請求項 2 2 記載のシングルモードファイバ。

【請求項 3 0】

α_p % は - 0 . 2 % から - 0 . 8 % までの範囲内にあることを特徴とする請求項 2 9 記載のシングルモードファイバ。

【請求項 3 1】

α_p % は - 0 . 2 5 % より小であることを特徴とする請求項 3 0 記載のシングルモードファイバ。

【請求項 3 2】

導波路中心で始まり外側にカウントして、第 1 セグメントの外径は $2.4 \mu\text{m}$ から $3.0 \mu\text{m}$ までの範囲内にあり、第 2 セグメントの外径は $8.4 \mu\text{m}$ から $9.7 \mu\text{m}$ までの範囲内にあり、第 3 セグメントの外径は $10.3 \mu\text{m}$ から $12.6 \mu\text{m}$ までの範囲内にあり、第 3 セグメントの外径は $14.5 \mu\text{m}$ から $16.5 \mu\text{m}$ までの範囲内にあり、パワー制限凹部の中心径は $16.5 \mu\text{m}$ から $20.2 \mu\text{m}$ までの範囲内にあり、パワー制限凹部の幅は $0.75 \mu\text{m}$ から $13 \mu\text{m}$ までの範囲内にあることを特徴とする請求項 2 9 記載のシングルモードファイバ。

【請求項 3 3】

クラッド層と接触して包囲されたコア領域を有し、コア領域とクラッド層とはそれぞれ屈折率プロファイルを有して導波路ファイバを介して光を案内するように構成され、コア領域は、少なくとも 2 つのセグメントを含む中心領域と、前記中心領域を包囲し、外径を有するパワー制限凹部とを有し、有効面積は、最小約 $60 \mu\text{m}^2$ であり、ピンアレイバンド損失は約 65 dB よりも小であることを特徴とするシングルモード光導波路ファイバ。

【請求項 3 4】

減衰は、最大 0.25 dB/km であることを特徴とする請求項 3 3 記載のシングルモー

10

20

30

40

50

ド導波路。

【請求項 35】

モードフィールド直径は約 $9\ \mu\text{m}$ よりも大であることを特徴とする請求項 34 記載のシングルモード導波路。

【請求項 36】

前記パワー制限凹部の外径は、約 $14\ \mu\text{m}$ から $25\ \mu\text{m}$ までの範囲内にあることを特徴とする請求項 33 記載のシングルモード導波路。

【請求項 37】

クラッド層と接触して包囲されたコア領域を有し、コア領域とクラッド層とはそれぞれ屈折率プロファイルを有して導波路ファイバを介して光を案内するように構成され、
コア領域は、少なくとも 2 つのセグメントを含む中心領域と、前記中心領域を包囲し、外径を有するパワー制限凹部とを有し、
有効面積は、最小約 $60\ \mu\text{m}^2$ であり、ピンアレイバンド損失は約 $22\ \text{dB}$ よりも小であり、 $20\ \text{mm}$ のマンドレルバンド損失は約 $11\ \text{dB/m}$ よりも小であることを特徴とするシングルモード光導波路ファイバ。

10

【請求項 38】

減衰は、最大 $0.25\ \text{dB/km}$ であることを特徴とする請求項 37 記載のシングルモード導波路。

【請求項 39】

クラッド層と接触して包囲されたコア領域を有し、コア領域とクラッド層とはそれぞれ屈折率プロファイルを有して導波路ファイバを介して光を案内するように構成され、
コア領域は、少なくとも 2 つのセグメントを含む中心領域と、前記中心領域を包囲し、 $0.75\ \mu\text{m}$ から $13\ \mu\text{m}$ までの範囲内の幅を有するパワー制限凹部とを有し、
コア及びクラッドの屈折率プロファイルの各々は、 $1520\ \text{nm}$ から $1650\ \text{nm}$ までの波長帯域で信号を案内するように設計されていることを特徴とするシングルモード光導波路。

20

【請求項 40】

パワー制限凹部は、導波路の中心から測定された約 $14\ \mu\text{m}$ から $25\ \mu\text{m}$ までの範囲内の外径を有することを特徴とする請求項 39 記載のシングルモード導波路。

【請求項 41】

有効面積は、最小約 $60\ \mu\text{m}^2$ であることを特徴とする請求項 39 記載のシングルモード導波路。

30

【請求項 42】

ファイバのカットオフ波長は、約 $1450\ \text{nm}$ から $1900\ \text{nm}$ までの範囲内にあることを特徴とする請求項 1 乃至 41 の任意の 1 に記載のシングルモード導波路。

【請求項 43】

ファイバは、 $250\ \mu\text{m}$ から $310\ \mu\text{m}$ までの範囲内の直径を有する前記クラッド層を包囲する少なくとも 1 つのポリマコーティングをさらに有することを特徴とする請求項 1 乃至 41 記載のシングルモード導波路。

【発明の詳細な説明】

40

【0001】

【関連出願の説明】

本出願は、1999 年 7 月 27 日に出願された米国仮特許出願第 60/145,759 号および 1999 年 11 月 16 日に出願された米国仮出願第 60/165,833 号の利益を請求する。

【0002】

【技術分野】

本発明は、折曲に対する耐性が改善された光導波路ファイバに関し、特に、大きな有効面積と、 $1550\ \text{nm}$ 動作ウィンドウでの負の全分散とを有し、さらにマクロバンドおよびマイクロバンドに対する耐性が改善された導波路ファイバに関する。

50

【 0 0 0 3 】

【 技術背景 】

大きな有効面積を有する導波路は、高出力システムの信号劣化を引き起こし得る自己位相変調と、4光波混合と、クロス位相変調と、非線形散乱プロセスとを含む、非線形光学効果を減らす。一般に、これらの非線形効果の数学的な記述は、比 (P / A_{eff}) を含む。但し、 P は、光パワーである。例えば、非線形光学効果は、 $\exp [P \times L_{eff} / A_{eff}]$ の項を含む式に従う。但し、 L_{eff} は、有効な長さである。このように、 A_{eff} の増加は、導波路を伝搬する光信号の低下の一因となる、非線形効果の減少を生ずる。

【 0 0 0 4 】

10

長距離に亘るより大きな情報容量に対する通信業界の条件は、再生器の無い状態で、シングルモードファイバ屈折率プロファイル設計の再評価につながる。

この再評価の焦点は、約 1550 nm あたりの低減衰動作波長範囲、すなわち約 1250 nm から 1700 nm までの範囲に対して最適化され且つ上記のような非線形効果を減らす光導波路を提供することになった。更に、導波路は、光増幅器と互換性を持つべきであり、高強度や疲労抵抗、折曲抵抗等の現在展開されている光導波路の望ましい特性を保持すべきである。

【 0 0 0 5 】

少なくとも2つの異なる屈折率セグメントを有する導波路ファイバが、十分な柔軟性を有して、高性能導波路ファイバシステムの基準を満たしたりまたは係る基準を越え低ることが見いだされた。セグメント化されたコア設計の類は、バガバチュウラ (Bhagavathula) の米国特許第 4,715,679 号に詳細に開示されている。

20

【 0 0 0 6 】

導波路の有効面積は、一般に、ファイバの光パワー分布を導波路ファイバの中心線から外側にシフトさせてパワー密度を減少させるような屈折率分布を設計することによって増加される。しかし、パワー分布をコアの端部方向へ外側に移動させる際、導波路は、ファイバの折曲によるパワー損失に対してより影響を受けやすくなる。

【 0 0 0 7 】

折曲損失が、インストールプロセスと同様にケーブル配線プロセスに起こることが分かった。いくつかの導波路ファイバの用途において、導波路の少なくとも一部分がコイルとして、例えば中継箱にインストールされる。

30

マクロバンドおよびマイクロバンドに対して所望の耐性を維持しながらも、有効面積 A_{eff} を増加させることによって、屈折率の非線形項を減らす光導波路ファイバに対する需要が存在する。

【 0 0 0 8 】

【 定義 】

以下の定義は、当該分野において一般的に合意されたものである。

- 屈折率プロファイルは、屈折率と導波路ファイバ半径との関係である。
- セグメント化コアは、少なくとも第1および第2の導波路ファイバコア部分すなわちセグメントに分割されたものである。各部分すなわちセグメントは、特定の半径方向の長さに沿って配置されて、導波路ファイバの中心線に関して実質的に対称であり、関連する屈折率プロファイルを有する。

40

【 0 0 0 9 】

- コアのセグメントの半径は、セグメントの開始点及び終了点の各々で各屈折率に関して定義されている。本発明において用いられる半径の定義を、図1を参照して説明する。図1において、中心屈折率セグメント10の半径は、導波路の中心線から、プロファイルが - プロファイルのセグメント12になるポイントまで延在する長さ2である。すなわち、このポイントは、半径曲線に対する屈折率が - プロファイルに対して後述する式に従い始めるところである。セグメント12の外径4は、中心線から、 - プロファイルの外挿された下方に傾斜する部分がプロファイルセグメント14の外挿された延長部と交差

50

する半径方向のポイントまで延在する。この定義は、 - プロファイルやステップ屈折率プロファイル等の他の中心セグメントに容易に適用される。更に、この定義は、第2のセグメントが - プロファイル以外の形状を有する場合に容易に適用される。他の中心セグメントの形状が使用される場合、半径は別の図面に示す。セグメント14の半径6は、中心線から、 %がセグメント16の %の最大値の半分になる半径方向のポイントまで延在する。更なるセグメントの半径は、最終のコアセグメントに達するまでセグメント14のそれと同様に定義される。セグメント16、すなわち図1に示すようにコアの最終セグメント、の中間点の半径8は、中心線から、セグメントの幅の中間点まで測定される。セグメント16等のセグメントの幅は、セグメント16の反対部分で2つの半 %値の間で延在する。ファイバのクラッド層を図1の17で示す。

10

【0010】

本発明にて示す定義は、機能的導波路特性が与えられた屈折率プロファイルを予測するために使用されるコンピュータモデルと適合するものである。このモデルは、機能特性の予め選択されたセットを有する屈折率プロファイルの系統を提供する逆のものに対しても使用することができる。

- 有効面積は、

【0011】

【数1】

$$A_{\text{eff}} = 2\pi \left(\int E^2 r dr \right)^2 / \left(\int E^4 r dr \right)$$

20

【0012】

但し、積分限界は0から無限大であり、Eは導波路で伝搬される光に関する電場である。有効直径 D_{eff} は次式で定義される。

【0013】

【数2】

$$A_{\text{eff}} = \pi (D_{\text{eff}}/2)^2$$

【0014】

- 相対屈折率パーセントは次式であらわされる。

【0015】

【数3】

$$\Delta \% = 100 \times (n_i^2 - n_c^2) / 2n_i^2$$

【0016】

但し、 n_i は他に指定されなければ領域iにおける最大屈折率であり、 n_c は他に指定されなければクラッド領域の平均屈折率である。

- 用語「 - プロファイル」は、屈折率プロファイルを指し、 (b) % に関して表現される。但しbは半径であり、次式を満たす。

40

【0017】

【数4】

$$\Delta(b)\% = \Delta(b_0) (1 - [|b - b_0|] / (b_1 - b_0))^a$$

【0018】

但し、 b_0 は (b) % が最大になるポイントであり、 b_1 は (b) % がゼロになるポイントであり、bは b_i から b_f の範囲内にある。デルタは上記の如く定義され、 b_i は - プロファイルの開始ポイントであり、 b_f は - プロファイルの最終ポイントであり

50

、 は実数のべき指数である。 - プロファイルの開始及び最終のポイントが選択されて、コンピュータモデルへと入力される。本発明において使用されるように、 - プロファイルがステップ屈折率プロファイルや任意のプロファイル形状のよって先行される場合、 - プロファイルの開始点は、 - プロファイルとステップや他のプロファイルとの交点である。

【 0 0 1 9 】

モデルにおいて、隣接プロファイルセグメントのプロファイルを伴う - プロファイルの平滑な接合を生じさせるために、式は次式のように書き直される。

【 0 0 2 0 】

【 数 5 】

$$\Delta(b)\% = \Delta(b_a) + [\Delta(b_o) - \Delta(b_a)] \{ (1 - [b-b_o]/(b_1-b_o))^a \}$$

【 0 0 2 1 】

但し、 b_a は隣接セグメントの第 1 ポイントである。

- ピンアレイ折曲テストが、折曲に対する導波路ファイバの相対抵抗を比較するために使用される。このテストを実施するために、減衰損失が、本質的に誘導されない折曲損失を伴う導波路ファイバに対して測定される。導波路ファイバは、次に、再度測定された減衰とピンアレイとを中心に織り込まれる。折曲によって誘導された損失は、2つの減衰測定値の差である。ピンアレイは、単一の列に配列されるとともに平坦な表面上の固定された垂直位置に保持される10個の円筒形ピンのセットである。ピンの間隔は中心と中心との間で5mmである。ピンの直径は0.67mmである。導波路ファイバは、隣接ピンの反対側部を通過するようになっている。テストの間、導波路ファイバは、導波路がピンの周縁部の一部に適合するのに十分な張力の元に配置される。

【 0 0 2 2 】

別の折曲テストは、予め選択された半径の1つ以上のマンドレルを中心に巻回されたファイバを含む。この用途では、使用されるマクロベンドテストは、約直径20mmのマンドレルを中心とする導波路の1回の巻回によって誘起される損失である。

- 本発明にて引用される別のベンドテストは、横方向負荷テストである。このマイクロベンドテストにおいて、規定された長さの導波路が2つの平坦なプレートの間に配置される。#70ワイヤメッシュがプレートの1つに取り付けられる。(マーケットコード#70メッシュは0.178mmの直径を有するワイヤから作製されたスクリーンを表す。このスクリーンの開口は一側の長さが0.185mmの正方形である。)周知の長さの導波路ファイバが、プレート間に挟まれ、プレートが30ニュートンの力によって共に押圧されている間に基準減衰が測定される。次に、70ニュートンの力がプレートに印加されて、単位dB/mの減衰の増加が測定される。減衰のこの増加は、導波路の横方向負荷減衰である。

【 0 0 2 3 】

【 発明の概要 】

本発明の1の概念は、パワー制限凹部(PLD: power limiting depression)によって包囲された少なくとも2つのセグメントを有するコアの中心領域と、包囲しているクラッド層とを含む、セグメント化されたコアを有するシングルモード光導波路ファイバである。電力制限凹部は、最後のコアであり、故に、これはクラッド層と接触している。PLDの相対屈折率は、PLDの内側境界を形成するコア部の屈折率よりも小さく、PLDの外側境界を形成するクラッド部の屈折率よりも小さい。コア及びクラッドのプロファイル、特にPLDプロファイルを画定するパラメータは、好ましくは、1550nm+/-10nmの波長で、約 1×10^{-4} よりも大であり、好ましくは最大約 5×10^{-5} 、より好ましくは最大約 5×10^{-6} のパワー比を提供するように選択され、パワー比は、中心線から10μmの半径位置で導波路にて伝搬された光パワーによって除算された、導波路中心線から25μmの半径位置にて導波路内を伝搬される光パワー

10

20

30

40

50

である。動作波長の範囲は、好ましくは約 1250 nm から 1700 nm までである。動作のより好ましい範囲は、1520 nm から 1650 nm までである。PLD の内径は、好ましくは約 12 μm より大きい。導波路ファイバの中心線から PLD の幅の中間点に引かれた半径は、好ましくは 12.5 μm から 22 μm までの範囲内にある。PLD の幅は、約 0.75 μm から 13 μm までの範囲内であり、好ましくは約 3 μm から 10 μm の範囲である。

【0024】

PLD の幅及び相対屈折率は、好ましくはそれぞれ約 0.75 μm から 13 μm までの範囲、-0.05% から -0.80% までの範囲内にある。PLD の負の相対屈折率は、屈折率を増加する物質で、PLD の境界を形成するコア及びクラッドの一部をドーピングすることによって得られる。基準屈折率の選択に依存して、PLD の相対屈折率は、正になり得るが、これは、単に数学的な慣例であり、屈折率プロファイル形状や機能には影響しない。より好ましい PLD のパラメータは、3 μm から 10 μm までの幅と、-0.2% から -0.8% までの相対屈折率である。実際には、PLD の相対屈折率のより低い負の限界が、通常、好ましいことよりも起こりうることによって要求される。PLD も、屈折率プロファイルチャートの水平軸及び PLD によって包囲された領域の点で特徴付けられている。例えば、PLD がステップ屈折率の場合、包囲された領域は、ステップの深さが乗算されたステップの幅である。このように、ステップ屈折率と関連する好ましい包囲された領域は、直前に記載されたより好ましい幅及び相対屈折率を使用して、約 0.2 μm % (1 $\mu\text{m} \times 0.2\%$ 相対屈折率の大きさ) から 3.2% (4 $\mu\text{m} \times 0.8\%$ 相対屈折率の大きさ) までの範囲内にある。

【0025】

本発明の実施例において、PLD の構成を含むコア及びクラッドの屈折率プロファイルは、約 60 μm^2 の有効面積を提供しながらファイバのカットオフ波長を約 1450 nm から 1900 nm までの範囲内に維持するように選択される。カットオフ波長は、ケーブル化の過程において約 200 nm だけ、または 1000 nm も低減される。故に、1450 nm から 1900 nm までの範囲は、約 1500 nm を超える波長帯域に亘るシングルモード動作を提供する。本発明にて開示される導波路の減衰は、高性能通信システムに適したレベルに維持される。本発明により作製され且つ 1520 nm から 1650 nm までの好ましい波長帯域にて使用されるように設計されたファイバの減衰は、1550 nm で測定される。しかしながら、1550 nm での減衰と好ましい帯域での他の波長での減衰との関係は、当業界においては周知である。本発明により作製された導波路に対する 1550 nm での導波路の減衰は、0.25 dB/km よりも小であり、大抵は 0.22 dB/km よりも小である。0.20 dB/km よりも小なる 1550 nm での減衰が、本発明にて開示されたプロファイルを有するファイバに対して測定された。

【0026】

本発明のさらなる実施例において、コアの中心領域は、3 つのセグメントを有し、各々が導波路の中心線に最近接するセグメントに対して $\alpha_0\%$ (他に何も述べられていなければこのセグメントの相対屈折率がセグメントに対して最大の相対屈折率になる)、中心線から外側にカウントして 2 番目のセグメントに対して $\alpha_1\%$ 、3 番目のセグメントに対して $\alpha_2\%$ とラベルが付された相対屈折率を有する。相対屈折率は、 $\alpha_0\% > \alpha_2\% > \alpha_1\%$ となるように選択される。PLD を含むセグメントの各々のプロファイル形状は、- プロファイル、ステップ、角が丸いステップ、台形、角が丸い台形である。傾斜に急な変化を有するプロファイルの丸みは、一般に、ドーパントの濃度の高い領域から低い領域へのドーパントの拡散による。本発明にて使用される基準屈折率の定義を与えると、プロファイルの実施例は、負になる PLD 相対屈折率 $\alpha_p\%$ を有する。上記の如く、クラッド層の平均屈折率は、相対屈折率を計算するための基準屈折率として使用される。この実施例の詳細を、以下の実施例に示す。

【0027】

本発明のさらなる実施例において、コアの中心領域は、4 つのセグメントを有し、その各

々は、導波路の中心線に最近接するセグメントに対しては α_0 % (他に述べられていなければこのセグメントの相対屈折率は最大相対屈折率値になる)、2番目のセグメントに対しては α_1 %、中心線から外側にカウントして、3番目のセグメントに対して α_2 %、4番目のセグメントに対して α_3 %とラベルが付された相対屈折率を有する。相対屈折率は、 α_0 % > α_2 % > α_3 %となるように選択される。好ましくは、 α_1 α_3 %である。第3の環状セグメントは、より高い屈折率の第2の環状セグメントをPLDから分離する。この構成は、ゲルマニウムがドーブされた領域とフッ素がドーブされた領域との間の界面を避けて界面のエアバブルの形成を抑制する点で、導波路ファイバのプリフォームの製造に関して長所を有する。PLDを含む各セグメントのプロファイル形状は、- プロファイル、ステップ、角が丸いステップ、台形、角が丸い台形である。傾斜に急な変化を有するプロファイルの丸みは、概して、ドーパント濃度の高い領域から低い領域へのドーパントの拡散による。本実施例の一例を以下に示す。

10

【0028】

本発明の他の概念は、第1の概念のように構成されたシングルモード導波路ファイバである。このファイバは、3つまたは4つのセグメント中心コア領域と特定のコア及びクラッド屈折率プロファイルを有する。屈折率プロファイルは、約 $60 \mu\text{m}^2$ よりも大なる有効面積と、約 65 dB よりも小なる、好ましくは 30 dB よりも小なる、より好ましくは 20 dB よりも小なるピンアレイバンド損失とを有する。この概念の実施例は、最大 0.25 dB/km、大抵は最大 0.22 dB/km の減衰と、最小約 $9 \mu\text{m}$ のモードフィールドとを有する導波路を含む。本発明のこの概念のさらなる実施例において、PLDの外径は、約 $15 \mu\text{m}$ から $25 \mu\text{m}$ までの範囲内にある。

20

【0029】

第1の概念による本発明のもう1つの概念は、 $60 \mu\text{m}^2$ よりも大なる有効面積と、約 22 dB よりも小なるピンアレイバンド損失と、約 11 dB/m よりも小なる 20 mm マンドレルバンド損失とを提供する。

本発明のこの概念の実施例は、最大約 0.25 dB/km の減衰を提供し、大抵は最大約 0.22 dB/km である。

【0030】

本発明のさらなる概念は、本発明の第1の概念により作製され、 $0.75 \mu\text{m}$ から $8 \mu\text{m}$ までの範囲内のPLDの幅を有するシングルモード導波路ファイバである。導波路のコアの屈折率プロファイルは、約 1520 nm から 1650 nm までの帯域に導波路ウインドウで動作するように構成されている。この概念の実施例は、約 $14 \mu\text{m}$ から $25 \mu\text{m}$ までの範囲内に位置するPLDの外径を有する。

30

【0031】

減衰レベルや有効面積によって特徴付けられる実施例の各概念において、0.22 dB/km、または 0.20 dB/km よりも小なる低い減衰、または $65 \mu\text{m}^2$ 、 $68 \mu\text{m}^2$ 、 $70 \mu\text{m}^2$ 、 $80 \mu\text{m}^2$ 、 $85 \mu\text{m}^2$ よりも大なる大きな有効面積が可能であり、好ましい。

本発明のさらなる特徴及び効果は、以下の記載に詳細を示し、当業者においては、以下の記載、請求項、図面から、または本発明に記載されたように本発明を実行することによって理解することによって、明らかになる。

40

【0032】

上記記載及び以下の記載は、本発明を単に例示したのみであり、請求項に記載されるように本発明の性質及び特徴を理解するための全体像を提供するものである。添付の図面は、本発明のさらなる理解を促し、本明細書の一部を構成するものである。図面は、本発明の様々な実施例を示し、発明の詳細な説明と共に、本発明の原理及び動作を説明するものである。

【0033】

[発明の詳細な説明]

[本発明の好ましい実施例、添付図面に示した実施例の詳細を以下に説明する。可能な限

50

り、同一の参照符号は、図面全体に亘って同一または同様な部品を引用するものである。本発明のシングルモード導波路ファイバの一実施例を図2に示す。図2の屈折率プロファイルのセグメントは、側部が傾斜した、ほぼステップ形状として示され、セグメント40, 43, 46, 50も、-プロファイル形状、または角が丸いステップ屈折率、台形、または角の丸い台形の形状を有する。調整可能な形状及びサイズ屈折率プロファイルの複数のセグメントを有するコアによって提供される柔軟性は、導波路特性の複数の組合せの達成を可能にするのに十分である。図2のプロファイルは、以下の実施例1に示す所望の特性を生成するプロファイルのグループを表す。このグループは、相対屈折率及び半径の以下の好ましい範囲によって定義される。中心セグメント40は、およそ0.35%から0.45%までの範囲内に相対屈折率パーセント ρ_0 %と、およそ3 μm から5 μm までの範囲内の半径42とを有する。第1環状セグメント43は、約0から0.05%までの範囲の相対屈折率 ρ_1 %と、約7 μm から9 μm までの範囲内に外径44とを有する。第2環状セグメント46は、約0.06%から0.20%までの範囲内に相対屈折率 ρ_2 %と、約9 μm から13 μm までの範囲内に外径48とを有する。PLD50の相対屈折率パーセント ρ_p %は、およそ-0.05%から-0.80%までの範囲と、およそ19 μm から21 μm までの範囲内の中心半径49とを有する。PLDの幅52は、約3 μm から10 μm までの範囲内にある。導波路ファイバは、70 μm^2 を超える、好ましくは75 μm^2 を超える、より好ましくは80 μm^2 を超える有効面積を呈する、これらの%対半径範囲を、1550nmで0.25dB/kmよりも小さい、好ましくは0.22dB/kmよりも小さい減衰と、1520nmから1650nmの波長範囲に亘る0.09ps/nm²-kmよりも小さい、好ましくは0.075ps/nm²-kmよりも小さい全分散傾斜と、100dBよりも小さい、好ましくは65dBよりも小さいピンアレイ折曲損失とを使用して作製されてきた。

【0034】

本発明は、本発明を例示する目的の以下の実施例によって更に説明する。

実施例1

図2を参照すると、図示されたプロファイルは、それぞれ相対屈折率40, 43, 46, 50と、0.39%の ρ_0 %、0の ρ_1 %、0.085%の ρ_2 %、-0.3のPLDの ρ_p %と、3.5 μm の中心セグメント外径42と、8 μm の第1環状セグメント外径44と、17 μm の第2環状セグメント外径48と、20 μm のPLD49の中心外径と、4 μm のPLD幅とを有する。

【0035】

モデル化された導波路パラメータは、1550nmの全分散、3.67ps/nm-kmと、全分散傾斜、0.068ps/nm²-kmと、モードフィールド直径、10.6 μm と、有効面積、86.4 μm^2 、ファイバカットオフ波長、1499nmと、ピンアレイ折曲損失、65dBである。上記プロファイルを使用して、1550nmで0.20dB/kmよりも小さい減衰を有するファイバが作製された。約1.65 μm %のPLD領域を有するモデル化プロファイルに関係するパワー分布を、図2の曲線56に示される。PLDの効果は、コア領域の端部近傍におけるパワーを急峻に減らすことである。

【0036】

比較例1

第2のプロファイルが、PLDが含まれないこと以外は実施例1のプロファイルに相当してモデル化された。この比較例において、モデル化導波路パラメータは、1550nmの全分散、1.18ps/nm-km、全分散傾斜、0.058ps/nm²-km、モードフィールド直径10.8 μm 、有効面積90.3 μm^2 、ファイバカットオフ波長2213nm、ピンアレイ折曲損失127dBである。モデル化プロファイルに関連したパワー分布を、図2の曲線54に示す。PLDが無い場合に、コア端部でのパワーは、比較的高く、ピンアレイマクロバンド損失に結果としてなる特性は、PLDプロファイルのものよりも2倍大きい。各パワー曲線56, 54に対して中心線から25 μm でのパワーを10 μm でのパワーによって徐算することによって形成されるそれぞれのパワー比は、3×

10^{-5} 、 7.6×10^{-4} である。PLDは、大きさのオーダ以上の改良を提供し、故にマクロバンド損失を低減する。更に、パワーの内側シフトによるマクロバンドの改善は、他の導波路特性に何ら悪影響を与えずに行われるのである。

【0037】

図3のプロファイルは、以下の実施例2に示す所望の特性を生じるプロファイルのグループを表す。このプロファイルのグループは、PLDによって包囲された3つのセグメントを含む中心コア領域を有する。この領域は、特に海面下での使用に適している。ここで、再び各コアセグメントのプロファイルは、図2の上記議論に示された任意の形状を採り得る。このグループは、相対屈折率及び半径の以下の好ましい範囲によって画定される。中心セグメント18は、約0.5%から0.6%までの範囲の相対屈折率パーセント ρ_0 %と、約2.0 μm から4.5 μm までの範囲の外径26とを有する。中心セグメント18は、第1の環状セグメント20によって包囲されている。この第1の環状セグメント20は、中心セグメント18のものよりも小さい相対屈折率パーセント、すなわち約-0.025%から0.01%までの範囲の ρ_1 %と、約5 μm から9 μm までの範囲の外径28とを有する。第1の環状セグメント20は、第2の環状セグメント22によって包囲されている。第2の環状セグメント22は、約0.06%から0.30%までの範囲にある相対屈折率パーセント ρ_2 %と、約11 μm から16 μm までの範囲の外径30とを有する。PLD24の相対屈折率パーセント ρ_p %は、約-0.05%から0.80%までの範囲であり、中心径32は、約14 μm から20 μm までの範囲にある。PLDの幅34は、約0.75 μm から13 μm までの範囲にある。好ましくは、 ρ_p %は、約-0.2%から-0.8%までの範囲にあり、より好ましくは、-0.25%未満である。

【0038】

導波路ファイバは、これらの%対半径範囲の屈折率プロファイルを使用して作製され、 $65\mu\text{m}^2$ を超える、好ましくは $68\mu\text{m}^2$ を超える、より好ましくは $70\mu\text{m}^2$ を超える有効面積を、以下のパラメータとの組み合わせることによって呈する。上記パラメータは、1550nmでの減衰が、0.25dB/kmよりも、好ましくは0.23dB/kmよりも、より好ましくは0.21dB/kmよりも小さく、1520nmから1650nmまでの波長帯域に対する全分散傾斜が、0.09ps/nm²-kmよりも、好ましくは0.08ps/nm²-kmよりも小さく、ピンアレイバンド損失は、50dBよりも、好ましくは35dBよりも、より好ましくは30dBよりも小さいことである。マイクロバンド損失は、約5dB/mよりも小さく、好ましくは3.3dB/mよりも小さい。導波路ファイバは、1550nmでの減衰が0.22dB/kmよりも小さいこの屈折率プロファイルを使用して作製される。1550nmでの全分散は、ゼロ分散波長の配置によって正または負の値を有するように作製できる。ケーブルになったときのカットオフ波長の多くは、約1550nmよりも小さい。

【0039】

本発明は、実施例の開示を目的とする以下の実施例によってより詳細に説明される。

実施例2

図3を参照すると、図示されたプロファイルは、それぞれ相対屈折率18, 20, 22, 24と、0.54%の ρ_0 %, -0.02%の ρ_1 %, 0.1%の ρ_2 %, -0.3%のPLDの ρ_p %, 3.0 μm の中心セグメント径26, 5.5 μm の第1の環状セグメント外径28、16 μm の第2の環状セグメント外径30、18 μm のPLD24の中心径、4 μm のPLD幅34を有する。

【0040】

モデル化された導波路パラメータは、1550nmの全分散、-2.91ps/nm-km、1520nmから1650nmに亘る帯域の全分散傾斜、0.77ps/nm²-km、モードフィールド直径9.54 μm 、有効面積70.4 μm^2 、ファイバカットオフ波長1675nm、ピンアレイバンド損失19dBである。この屈折率プロファイルを用いて作製された導波路ファイバは、1550nmでの減衰が0.22dB/kmよりも小さくなった。モデル化されたプロファイルに関連するパワー分散を、図2の曲線38とし

て示す。PLDの効果は、コア領域の端部近傍のパワーを相当量低減し、故に、マクロバンド性能を改善することである。

【0041】

比較例2

第2のプロファイルは、PLDが含まれていないことを除く実施例2のプロファイルに相当してモデル化された。この比較例において、モデル化導波路パラメータは、1550nmの全分散、 -4.96 ps/nm-km と、1520nmから1650nmまでの範囲に対する全分散傾斜 $0.068 \text{ ps/nm}^2 - \text{km}$ と、モードフィールド径 $9.65 \mu\text{m}$ と、有効面積 $72.4 \mu\text{m}^2$ と、ファイバカットオフ波長 2333 nm と、ピンアレイバンド損失 32 dB である。モデル化プロファイルに関連するパワー分布を、図2に曲線36として示す。PLDが無い場合は、コア端部のパワーは、比較的高く、ピンアレイマクロバンド損失になる特性は、PLDを有するプロファイルのものよりも1.65倍高くなる。中心線から $25 \mu\text{m}$ でのパワーを中心線から $10 \mu\text{m}$ のパワーで徐算することによって形成される各パワー比は、各パワー曲線38, 36から取られて、 1.4×10^{-5} 、 1.6×10^{-4} となり、大きさのオーダの改善である。マクロバンド損失のこの改善は、他の導波路特性に悪影響を与えずに得られる。

10

【0042】

図5のプロファイルは、以下の実施例3に示す所望の特性を生成するプロファイルのグループを表す。このプロファイルのグループは、PLDによって包囲された4つのセグメントを含むコアの中心領域を有する。この設計は、海面下での使用に好ましい。ここで、再び各コアセグメントのプロファイルは、図2の議論において述べた任意の形状を取り得て、好ましくは、様々なセグメントが、相対屈折率及び半径の以下の好ましい範囲に入る。中心セグメント60は、約0.53%から0.65%までの範囲内の相対屈折率 ρ_0 %と、約 $2.0 \mu\text{m}$ から $2.5 \mu\text{m}$ までの範囲内の外径 71 とを有する。中心セグメント60は、第1の環状セグメント62によって包囲されている。この第1の環状セグメント62は、中心セグメントのものよりも小であり好ましくは0から0.065%までの範囲にある相対屈折率 ρ_1 %を有する。セグメント62の外径 72 は、第2セグメント64の外径 74 及び幅 80 によって決定される。第1の環状セグメント62は、第2の環状セグメント64によって包囲されている。第2の環状セグメント64は、約0.10%から0.70%までの相対屈折率 ρ_2 %と、約 $0.30 \mu\text{m}$ から $0.90 \mu\text{m}$ までの範囲の幅 80 とを有する。第3の環状セグメント66は、第2の環状セグメント64を包囲し、約0から0.05%までの範囲内の相対屈折率と、約 $14.5 \mu\text{m}$ から $16.5 \mu\text{m}$ までの範囲の外径 75 とを有する。PLDの相対屈折率 ρ_p %は、約-0.05%から-0.80%までの範囲を有し、内径 75 は、 $12 \mu\text{m}$ から $19.5 \mu\text{m}$ までの範囲にあり、外径 77 は、 $17 \mu\text{m}$ から $25 \mu\text{m}$ までの範囲にある。故に、PLDの最大幅は、 $13 \mu\text{m}$ である。PLDの幅の好ましい範囲は、3から $10 \mu\text{m}$ であり、一方、PLDの幅は、約 $0.75 \mu\text{m}$ から $13 \mu\text{m}$ までの範囲内の値を取り得る。相対屈折率パーセント ρ_p %は約-0.2%から-0.8%までの範囲内にあり、好ましくは-0.20%よりも小なる負の数である。

20

30

【0043】

他の実施例において、図5のプロファイルは、以下の実施例3に示す所望の特性を生成するプロファイルのグループを表す。このプロファイルのグループは、一般に、PLDによって包囲された4つのセグメントを含む中心コア領域を有する。この設計は、特に海面下での使用に適している。ここで再び、各コアセグメントのプロファイルは、図2の議論で示した任意の形状を取りうるものであり、好ましくは、様々なセグメントが、相対屈折率及び半径の以下に示す好ましい範囲に入る。中心セグメント60は、約0.5%から0.6%までの範囲の相対屈折率 ρ_0 %と、約 $2.4 \mu\text{m}$ から $3.0 \mu\text{m}$ までの範囲内の外径 71 とを有する。中心セグメント60は、第1の環状セグメント62によって包囲される。この第1の環状セグメント62は、中心セグメント60のものよりも小である、約0から0.1%までの範囲内の相対屈折率 ρ_1 %と、約 $8.4 \mu\text{m}$ から $9.7 \mu\text{m}$ までの範囲

40

50

内の外径72とを有する。第1の環状セグメント62は、第2の環状セグメント64によって包囲されている。この第2の環状セグメント64は、約0.20%から0.30%までの範囲の相対屈折率 n_2 %と、約10.3 μm から12.6 μm までの範囲内の外径74とを有する。第3の環状セグメント66は、第2の環状セグメント64を包囲し、約0から0.05までの範囲内の相対屈折率と、約14.5 μm から16.5 μm までの範囲内の外径75とを有する。PLD68の相対屈折率パーセント p %は、約-0.05%から-0.80%までの範囲を有し、16.5 μm から20.2 μm までの範囲内の中心径78を有する。本実施例のPLDの幅70は、約6.4 μm から7.9 μm までの範囲内にあり、一方、上記の如く、PLDの幅は、約0.75 μm から13 μm までの範囲内の値を有する。好ましくは、 p %は、好ましくは約-0.2%から-0.8%までの範囲内にあり、より好ましくは、-0.20%よりも小なる負の数である。 10

【0044】

実施例3

図5を参照すると、図示したプロファイルは、相対屈折率60, 62, 64, 66、0.55%の n_0 %、0.01%の n_1 %、0.225%の n_2 %、0の n_3 %、-0.25%のPLD p %、2.37 μm の中心セグメント外径71, 8.8 μm の第1環状セグメント外径72, 11.4 μm の第2環状セグメント外径74, 15 μm の第1環状セグメント66外径, 18.3 μm のPLD78の中心径, 7.1 μm のPLD幅を有する。

【0045】

このプロファイルにより作製された導波路ファイバは、1560nmの全分散が-2.4ps/nm-kmであり、全分散傾斜が0.079ps/nm²-kmであり、9.36 μm のモードフィールド径、67.4 μm^2 の有効面積、1378nmのケーブル化カットオフ波長、29.6dBのピンアレイバンド損失を呈する。記載されたプロファイルを使用して、0.22dB/kmより小なる1550nmでの減衰を有するファイバが作製され、大抵の場合、1550nmでの減衰は0.204dB/kmである。本実施例に対するマイクロバンド損失は、3.32dB/kmである。 20

【0046】

上記実施例の何れにおいても、より大なる直径のポリマコーティングが上記記載の任意の実施例と共に使用されるとき、マイクロバンド損失は、相当量が低減され、大抵は約1dB/kmよりも小なる値になる。より大なる直径のコーティングの実施例は、2重レイヤコーティングが125 μm の直径を有する導波路ファイバに使用されるものである。1次、すなわち第1の層は、190 $\mu\text{m} \pm 10\mu\text{m}$ の直径を有し、第2の層は、285 $\mu\text{m} \pm 10\mu\text{m}$ の直径を有する。コーティングの外径についての上限は、価格やケーブル化の容易さ等の実施を考慮して設定される。コーティング直径についての理にかなった上限は、125 μm のガラスファイバ直径に対して約310 μm である。マイクロバンド損失は、260 $\mu\text{m} \pm 10\mu\text{m}$ ほどと低くターゲットが向けられた第2の層の直径を有するコーティングを使用して改善される。代表的なファイバ光ポリマコーティングは、1次層に対しては1.0MPaより小なる弾性率を有し、第2の層に対しては650MPaよりも大なる弾性率を有する、ウレタンアクリル酸塩をベースとする材料である。一実施例において、1次層は、約1.0MPaから1.3MPaまでの範囲内の弾性率を有し、第2の層は、約650MPaから850MPaまでの範囲内の弾性率を有する。 30 40

【0047】

実施例4

実施例3によるパラメータと、上記のより大なる直径を有するクラッド層を包囲するポリマコーティングと、を有する導波路ファイバが作製され測定された。測定されたパラメータは、1560nmの全分散が-2.3ps/nm-km、全分散傾斜が0.078ps/nm²-km、モードフィールド径が9.25 μm 、有効面積が66 μm^2 、ケーブル化カットオフ波長が1435nm、ピンアレイバンド損失が4.7dB、1550nmでの減衰が0.196, マイクロバンド損失が0.64dB/kmである。

【0048】

本明細書に開示する発明は、本質的に任意の屈折率プロファイルに適用され、他の導波路ファイバ特性を実質的に変化させずに折曲抵抗の改善を達成する。図4の曲線58は、PLD領域が増大したときの $10\mu\text{m}$ に対する $25\mu\text{m}$ のパワー比の変化を示す。曲線58は、別の屈折率プロファイルを使用して生成された一連のポイントに一番良く適合する。より低いPLD値、1よりも小なる値に対して、適合された線を中心とするパワー比データポイントの広がり、 7×10^{-5} である。より大きなPLD面積に対して、パワー比の広がり、約 2.2×10^{-5} である。PLDの面積が増大するにつれて、マクロベンド損失の改善は、PLDセグメントの内側にあるコアセグメントの詳細に依存しなくなる。本発明の利点は、 1250nm から 1700nm の波長帯域で使用するために設計された多くのプロファイルに対して利用できる。

10

【0049】

本発明の様々な応用例及び様々な変形例が、本発明の請求項から逸脱せずに導かれることは、当業者には明らかである。このように、本発明は、請求項の範囲及び均等物になるならば、本発明の変形例及び応用例を含むことを意図するものである。

【図面の簡単な説明】

【図1】

本発明にて使用される半径の定義を提供するセグメント化コアプロファイルを説明する図である。

【図2】

本発明によって作製された屈折率プロファイルである。

20

【図3】

本発明によって作製された屈折率プロファイルである。

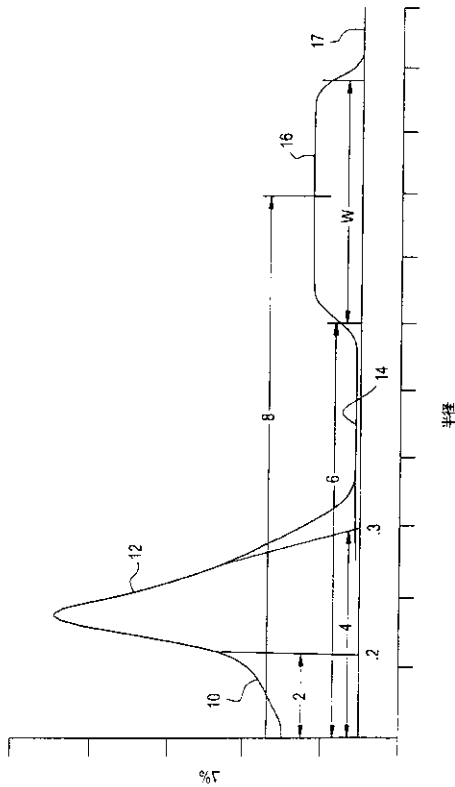
【図4】

PLD領域におけるパワー比の依存性を示すチャートである。

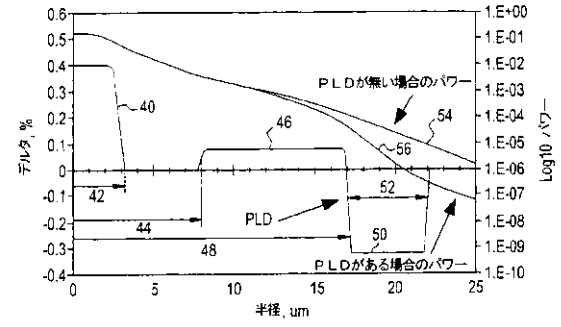
【図5】

コアの中心領域が4つのセグメントからなる本発明により作製された屈折率プロファイルのチャートである。

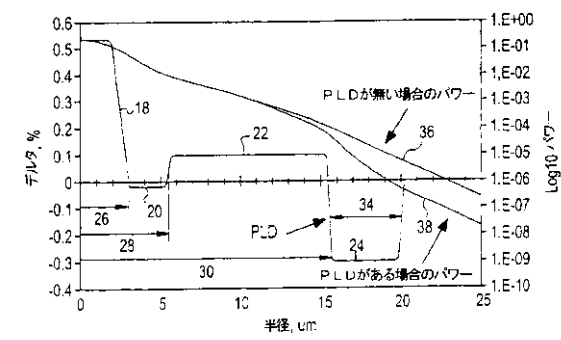
【図 1】



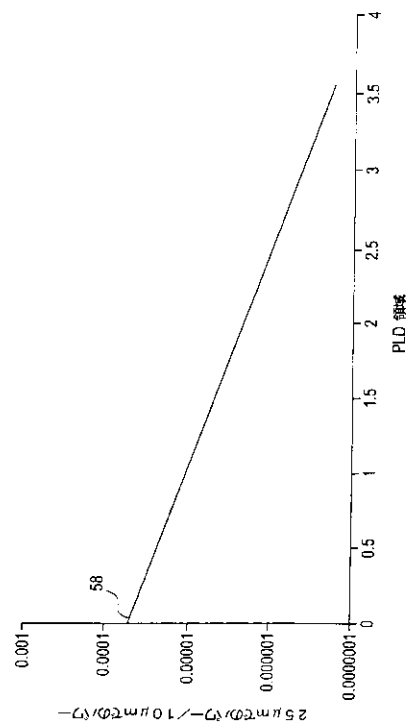
【図 2】



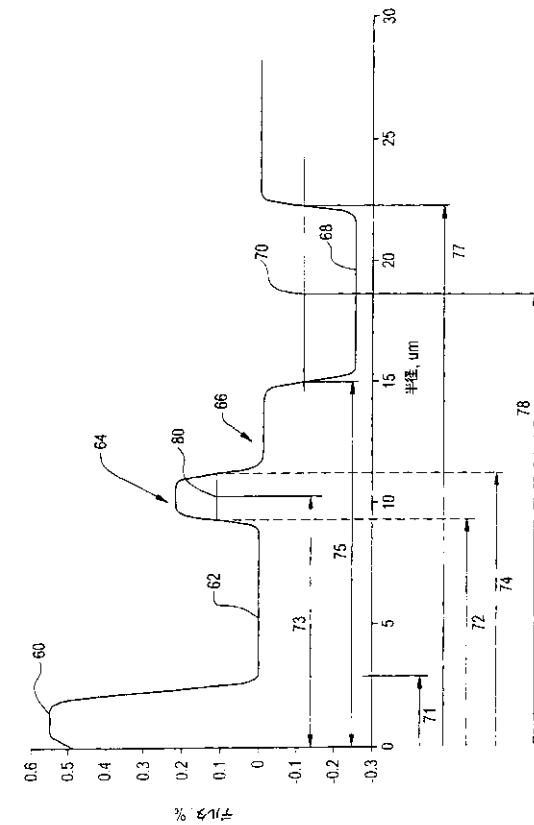
【図 3】



【図 4】



【図 5】



【国際公開パンフレット】

(12) INTERNATIONAL APPLICATION PUBLISHED UNDER THE PATENT COOPERATION TREATY (PCT)

(19) World Intellectual Property Organization
International Bureau(43) International Publication Date
15 February 2001 (15.02.2001)

PCT

(10) International Publication Number
WO 01/11402 A1

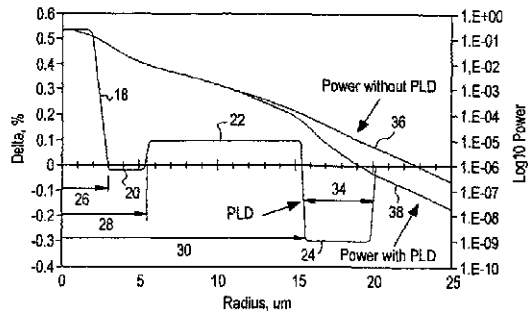
(51) International Patent Classification: G02B 6/22

(21) International Application Number: PCT/US00/16925

(22) International Filing Date: 20 June 2000 (20.06.2000)

(25) Filing Language: English

(26) Publication Language: English

(30) Priority Data:
60/145,759 27 July 1999 (27.07.1999) US
60/165,833 16 November 1999 (16.11.1999) US(71) Applicant: CORNING INCORPORATED [US/US]; 1
Riverfront Plaza, Corning, NY 14831 (US).(72) Inventors: MITCHELL, Brian, E., 4305 Gatewood Ct.,
Wilmington, NC 28405 (US); SMITH, David, K., 905
Wild Dunes Circle, Wilmington, NC 28406 (US).(74) Agent: CHERVENAK, William, J., Patent Department,
SP 11.3-1, Corning Incorporated, Corning, NY 14831 (US).(81) Designated States (national): AE, AI, AM, AT, AU, AZ,
BA, BB, BG, BR, BY, CA, CH, CN, CU, CZ, DE, DK, EE,
ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP,
KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MD,
MG, MK, MN, MW, MX, NO, NZ, PL, PT, RO, RU, SD,
SE, SG, SI, SK, SL, TJ, TM, TR, TT, UA, UG, UZ, VN,
YU, ZA, ZW.(84) Designated States (regional): European patent (AT, BE,
CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC,
NL, PT, SE).Published:
— With international search report.
Before the expiration of the time limit for amending the
claims and to be republished in the event of receipt of
amendments.For two-letter codes and other abbreviations, refer to the "Guid-
ance Notes on Codes and Abbreviations" appearing at the begin-
ning of each regular issue of the PCT Gazette.(54) Title: OPTICAL WAVEGUIDE HAVING NEGATIVE DISPERSION AND LARGE A_{eff} 

(57) Abstract: The invention is directed to a single mode optical waveguide fiber profile (18, 20, 22, 34) that provides relatively large effective area while limiting macrobend loss. The large effective area results from configuring the core of the waveguide fiber to shift propagated light power away from the waveguide center. Macrobend loss, as measured by pin array or 20 mm mandrel testing, is maintained low by means of a power-limiting index depression (24) surrounding the central core region of the waveguide. In addition, low attenuation is achieved and cut off wavelength is controlled to provide a telecommunications operating window in the wavelength range of about 1250 nm to 1700 nm.

WO 01/11402 A1

WO 01/11402

PCT/US00/16925

1

Optical Waveguide having Negative Dispersion and Large A_{eff}

5 This application claims the benefit of U.S. Provisional Patent Application
Number 60/145,759, filed July 27, 1999 and U.S. Provisional Application No.
60/165,833, filed November 16, 1999.

Background of the Invention10 **1. Field of the Invention**

The present invention relates generally to optical waveguide fibers
having improved resistance to bending, and particularly to waveguide fibers
having large effective area, and negative total dispersion in the 1550 nm
operating window, and improved resistance to macro-bend and micro-bend

15

2. Technical Background

A waveguide having large effective area reduces non-linear optical
effects, including self phase modulation, four wave mixing, cross phase
modulation, and non-linear scattering processes, which can cause degradation
20 of signals in high power systems. In general, a mathematical description of
these non-linear effects includes the ratio, P/A_{eff} , where P is light power. For
example, a non-linear optical effect can follow an equation containing a term,
 $\exp [PxL_{eff}/A_{eff}]$, where L_{eff} is effective length. Thus, an increase in A_{eff} produces

WO 01/11402

PCT/US00/16925

2

a decrease in the non-linear contribution to the degradation of a light signal propagating in the waveguide.

The requirement in the telecommunication industry for greater information capacity over long distances, without regenerators, has led to a reevaluation of single mode fiber refractive index profile design.

The focus of this reevaluation has been to provide optical waveguides that reduce non-linear effects such as those noted above and are optimized for the lower attenuation operating wavelength range around 1550 nm, i.e., the range from about 1250 nm to 1700 nm. In addition the waveguide should be compatible with optical amplifiers, and, retain the desirable properties of optical waveguides now deployed, such as, high strength, fatigue resistance, and bend resistance.

A waveguide fiber having at least two distinct refractive index segments has been found to have sufficient flexibility to meet or exceed the criteria for a high performance waveguide fiber system. The genera of segmented core designs are disclosed in detail in U. S. patent 4,715,679, Bhagavatula.

The effective area of a waveguide is in general increased by designing refractive index profiles that cause the light power distribution in the fiber to be shifted outwardly from the centerline of the waveguide fiber, thus reducing the power density. In moving the power distribution outwardly toward the core edge, however, the waveguide is made more susceptible to power losses due to bending of the fiber.

Bending losses have been found to occur in the cabling process as well as in the installation process. In some waveguide fiber uses, at least a part of the waveguide is installed as a coil, for example, in a junction box.

Thus there is a need for an optical waveguide fiber that reduces the non-linear term of refractive index by increasing effective area, A_{eff} , while maintaining a desired resistance to macrobend and microbend.

Definitions

- The following definitions are in accord with common usage in the art.
- 5 - The refractive index profile is the relationship between refractive index and waveguide fiber radius.
- A segmented core is one that is divided into at least a first and a second waveguide fiber core portion or segment. Each portion or segment is located along a particular radial length, is substantially symmetric about the waveguide
- 10 fiber centerline, and has an associated refractive index profile.
- The radii of the segments of the core are defined in terms of the respective refractive indexes at respective beginning and end points of the segments. The definitions of the radii used herein are explained with reference to Fig. 1. In Fig. 1, the radius of the center index segment 10, is the length 2 that extends
- 15 from the waveguide centerline to the point at which the profile becomes the α -profile of segment 12, that is, the point at which the refractive index versus radius curve begins to follow the equation, set forth below, for an α -profile. The outer radius 4 of segment 12 extends from the centerline to the radial point at which the extrapolated descending portion of the α -profile crosses the
- 20 extrapolated extension of profile segment 14. This definition is readily applied to alternative center segments such as α -profiles or step index profiles. Further, the definition is readily applied to those cases wherein the second segment has a shape other than that of an α -profile. In cases where alternative center segment shapes are used, the radii are illustrated in a
- 25 separate drawing. The radius 6 of segment 14 extends from the centerline to the radius point at which the Δ % is half the maximum value of the Δ % of segment 16. The radii of additional segments are defined analogously to that of segment 14 until reaching the final core segment. The midpoint radius 8 of segment 16, the final segment of the core as illustrated in Fig. 1, is measured
- 30 from the centerline to the midpoint of the width of the segment. The width of a segment such as segment 16 extends between the two half Δ % values at the

WO 01/11402

PCT/US00/16925

4

opposing portions of segment 16. The clad layer of the fiber is shown as 17 in Fig. 1.

The definitions set forth herein are in accord with a computer model that was used to predict functional waveguide properties given a refractive index profile. The model can also be used in the inverse to provide a family of

refractive index profiles that will have a pre-selected set of functional properties.

- The effective area is

$$A_{eff} = 2\pi \int_0^\infty (E^2 r dr)^2 / (\int_0^\infty E^4 r dr), \text{ where the integration limits are 0 to } \infty, \text{ and } E \text{ is the electric field associated with light propagated in the waveguide.}$$

An effective diameter, D_{eff} , may be defined as,

$$A_{eff} = \pi(D_{eff}/2)^2.$$

- The relative refractive index percent, $\Delta\%$ = $100 \times (n_i^2 - n_c^2) / 2n_c^2$, where n_i is the maximum refractive index in region i , unless otherwise specified, and n_c is the average refractive index of the cladding region unless otherwise specified.

- The term α -profile refers to a refractive index profile, expressed in terms of $\Delta(b)\%$, where b is radius, which follows the equation,

$\Delta(b)\% = \Delta(b_0)(1 - [b - b_0] / [b_1 - b_0])^\alpha$, where b_0 is the point at which $\Delta(b)\%$ is maximum, b_1 is the point at which $\Delta(b)\%$ is zero, and b is in the range $b_1 \leq b \leq b_0$, where Δ is defined above, b_1 is the initial point of the α -profile, b_0 is the

final point of the α -profile, and α is an exponent which is a real number. The initial and final points of the α -profile are selected and entered into the computer model. As used herein, if an α -profile is preceded by a step index profile or any other profile shape, the beginning point of the α -profile is the intersection of the α -profile and the step or other profile.

In the model, in order to bring about a smooth joining of the α -profile with the profile of the adjacent profile segment, the equation is rewritten as;

$\Delta(b)\% = \Delta(b_0) + [\Delta(b_0) - \Delta(b_s)] \{ (1 - [b - b_0] / [b_1 - b_0])^\alpha \}$, where b_s is the first point of an adjacent segment.

- The pin array bend test is used to compare relative resistance of waveguide

fibers to bending. To perform this test, attenuation loss is measured for a waveguide fiber with essentially no induced bending loss. The waveguide fiber

WO 01/11402

PCT/US00/16925

5

is then woven about the pin array and attenuation again measured. The loss induced by bending is the difference between the two attenuation measurements. The pin array is a set of ten cylindrical pins arranged in a single row and held in a fixed vertical position on a flat surface. The pin spacing is 5 mm, center to center. The pin diameter is 0.67 mm. The waveguide fiber is caused to pass on opposite sides of adjacent pins. During testing, the waveguide fiber is placed under a tension just sufficient to make the waveguide conform to a portion of the periphery of the pins.

- Alternate bend tests include wrapping of the fiber around one or more mandrels of pre-selected radius. In this application, a macrobend test used is the loss induced by one turn of the waveguide about a 20 mm diameter mandrel.

- Another bend test referenced herein is the lateral load test. In this microbend test a prescribed length of waveguide fiber is placed between two flat plates. A #70 wire mesh is attached to one of the plates. (The market code #70 mesh is descriptive of screen made of wire having a diameter of 0.178 mm. The screen openings are squares of side length 0.185 mm.) A known length of waveguide fiber is sandwiched between the plates and a reference attenuation is measured while the plates are pressed together with a force of 30 newtons. A 70 newton force is then applied to the plates and the increase in attenuation in dB/m is measured. This increase in attenuation is the lateral load attenuation of the waveguide.

Summary of the invention

One aspect of the present invention is a single mode optical waveguide fiber having a segmented core, including a central region of the core having at least two segments surrounded by a power-limiting depression (PLD), and a surrounding clad layer. The power-limiting depression is the final core segment, which, therefore, is in contact with the clad layer. The relative index of the PLD is less than that of the core portion that forms the PLD inner boundary and less than that of the clad portion that forms the PLD outer boundary. The core and clad profiles, in particular the parameters defining the PLD profile are preferably

WO 01/11482

PCT/US00/16925

6

selected to provide, at a wavelength of 1550 nm \pm 10 nm, a power ratio no greater than about 1×10^{-4} , preferably no greater than about 5×10^{-5} , and more preferably no greater than about 5×10^{-6} , where the power ratio is the light power propagated in the waveguide at a radial position of 25 μ m from the waveguide centerline divided by the light power propagated in the waveguide at a radial position of 10 μ m from the centerline. The range of operating wavelengths is preferably about 1250 nm to 1700 nm. A more preferred range of operation is 1520 nm to 1650 nm. The inside radius of the PLD is preferably greater than about 12 μ m. The radius drawn from the waveguide fiber centerline to the midpoint of the width of the PLD is preferably in the range of about 12.5 μ m to 22 μ m. The width of the PLD is in the range of about 0.75 μ m to 13 μ m and preferably in the range of about 3 μ m to 10 μ m.

The PLD width and relative index are preferably in the respective ranges of about 0.75 μ m to 13 μ m and -0.05 % to -0.80%. It will be understood that the negative relative index of the PLD can be achieved by doping of the portions of the core and clad which form the boundaries of the PLD with an index increasing substance. Depending upon the choice of reference index, the relative index of the PLD could be made positive, but this is merely a mathematical convention and does not affect the index profile shape or function. More preferred PLD parameters are a width in the range of 3 μ m to 10 μ m and a relative index in the range of -0.2 % to -0.8 %. In practice the lower negative limit of the PLD relative index is usually dictated by what is possible rather than what is preferred. The PLD may also be characterized in terms of the area enclosed by the PLD and the horizontal axis of a refractive index profile chart. For example in the case where the PLD is a step index, the area enclosed is the width of the step multiplied by the depth of the step. Thus the preferred enclosed area associated with a step index, using the more preferred widths and relative indexes immediately above, is in the range of about 0.2 μ m% (1 μ m x 0.2% magnitude of relative index) to 3.2 μ m% (4 μ m x 0.8% magnitude of relative index).

WO 01/11402

7

PCT/US00/16925

In an embodiment of the invention, the core and clad refractive index profiles, including the configuration of the PLD, are chosen to provide an effective area of about $60 \mu\text{m}^2$, while maintaining a fiber waveguide cut off wavelength in the range of about 1450 nm to 1900 nm. The cut off wavelength is reduced by about 200 nm or by as much as 1000 nm in the process of cabling. Thus the range 1450 nm to 1900 nm provides for single mode operation over the range of wavelengths above about 1500 nm. Attenuation of the waveguide herein disclosed is maintained at a level suited to high performance telecommunications systems. The attenuation for fibers made in accordance with the invention and designed for use in the preferred wavelength range 1520 nm to 1650 nm are measured at 1550 nm. However the relation between attenuation at 1550 nm and attenuation at other wavelengths in the preferred range is known in the art. Waveguide attenuation at 1550 nm for waveguides made in accordance with the invention is less than 0.25 dB/km and typically less than 0.22 dB/km. Attenuation at 1550 nm less than 0.20 dB/km has been measured for fibers having the profiles disclosed herein.

In a further embodiment of the invention, the central region of the core has three segments, each having a respective relative index (this relative index of a segment is the maximum relative index value for the segment unless otherwise stated) labeled $\Delta_0\%$ for the segment closest to the waveguide centerline, $\Delta_1\%$ for the second segment, counting outward from the centerline, and $\Delta_2\%$ for the third segment. The relative indexes are chosen such that $\Delta_0\% > \Delta_2\% > \Delta_1\%$. The respective profile shape of each of the segments including the PLD may be an α -profile, a step, a rounded step, a trapezoid or a rounded trapezoid. The rounding of profiles having sharp changes in slope is in general due to diffusion of dopant from a higher to a lower region of dopant concentration. Given the definition of the reference refractive index used herein, the profile embodiments will have a PLD relative index, $\Delta_p\%$, that is negative. As is stated above, the average refractive index of the clad layer is used as the reference index for calculating relative index. More detailed examples of this embodiment are set forth in the examples below.

WO 01/11402

PCT/US00/16925

8

In yet a further embodiment of the invention the central region of the core has four segments, each having a respective relative index (this relative index of a segment is the maximum relative index value for the segment unless otherwise stated) labeled $\Delta_1\%$ for the segment closest to the waveguide centerline, $\Delta_2\%$ for the second segment, counting outward from the centerline, $\Delta_3\%$ for the third segment, and $\Delta_4\%$ for the fourth segment. The relative indexes are chosen such that $\Delta_1\% > \Delta_2\% > \Delta_3\%$. Preferably $\Delta_1 \geq \Delta_3\%$. The third annular segment separates the higher index second annular segment from the PLD. This configuration has advantages with regard to manufacture of the waveguide fiber preform in that an interface between a germania doped region and a fluorine doped region is avoided, thereby suppressing the formation of interfacial air bubbles. The respective profile shape of each of the segments, including the PLD, may be an α -profile, a step, a rounded step, a trapezoid or a rounded trapezoid. The rounding of profiles having sharp changes in slope is in general due to diffusion of dopant from a higher to a lower region of dopant concentration. An example of this embodiment is set forth below.

Another aspect of the invention is a single mode waveguide fiber configured as in the first aspect, and having a three or four segment central core region and particular core and clad refractive index profiles that provide an effective area greater than about $60 \mu\text{m}^2$ and a pin array bend loss less than about 65 dB, preferably less than about 30 dB, and more preferably less than about 20 dB. An embodiment of this aspect includes waveguides having an attenuation no greater than about 0.25 dB/km, typically no greater than about 0.22 dB/km, and a mode field not less than about $9 \mu\text{m}$. In a further embodiment of this aspect of the invention the outer radius of the PLD is in the range of about $15 \mu\text{m}$ to $25 \mu\text{m}$.

Another aspect of the invention is in accord with the first aspect and provides an effective area greater than about $60 \mu\text{m}^2$, a pin array bend loss less than about 22 dB, and a 20 mm mandrel bend loss of less than about 11 dB/m.

WO 01/1402

PCT/US00/14925

9

Embodiments of this aspect of the invention provide attenuation no greater than about 0.25 dB/km and typically are not greater than about 0.22 dB/km.

Yet another aspect of the invention is a single mode waveguide fiber made in accord with the first aspect of the invention and having a PLD of width
5 in the range of 0.75 μm to 8 μm . The waveguide core index profile is configured for operation in the wavelength window in the range of about 1520 nm to 1650 nm. An embodiment of this aspect has the outer radius of the PLD located in the range of about 14 μm to 25 μm .

In each aspect or embodiment characterized by an attenuation level or
10 an effective area, it will be understood that lower attenuation, less than 0.22 dB/km or 0.20 dB/km, or larger effective area, greater than 65 μm^2 , 68 μm^2 , 70 μm^2 , 80 μm^2 , or 85 μm^2 , are possible and preferred.

Additional features and advantages of the invention will be set forth in the detailed description which follows, and in part will be readily apparent to those
15 skilled in the art from that description or recognized by practicing the invention as described herein, including the detailed description which follows, the claims, as well as the appended drawings.

It is to be understood that both the foregoing general description and the following detailed description are merely exemplary of the invention, and are
20 intended to provide an overview or framework for understanding the nature and character of the invention as it is claimed. The accompanying drawings are included to provide a further understanding of the invention, and are incorporated in and constitute a part of this specification. The drawings illustrate various embodiments of the invention, and together with the
25 description, serve to explain the principles and operation of the invention.

Brief Description of the Drawings

Fig. 1 is a generalized illustration of a segmented core profile that provides the definitions of radii used herein.

30 Figs. 2 and 3 are refractive index profiles made in accordance with the invention.

WO 01/11402

PCT/US00/16925

10

Fig. 4 is a chart showing the dependence of power ratio on PLD area.

Fig. 5 is a chart of a refractive index profile made in accord with the invention wherein the central region of the core has four segments.

5

Detailed Description of the Invention

Reference will now be made in detail to the present preferred embodiments of the invention, examples of which are illustrated in the accompanying drawings. Wherever possible, the same reference numbers will be used throughout the drawings to refer to the same or like parts. An exemplary embodiment of a single mode waveguide fiber of the present invention is shown in Fig. 2. Although the segments of the refractive index profile in Fig. 2 are depicted as being nearly step shaped, having sloped sides, the segments 40, 43, 46, and 50 can also have an α -profile shape or that of a rounded step index, a trapezoid, or a rounded trapezoid. The flexibility provided by a core having several segments of adjustable shape and size index profile is sufficient to allow for a plurality of combinations of waveguide properties to be achieved. The profile of Fig. 2 represents a group of profiles that produce the desired properties set forth in Example 1 below. The group is defined by the following preferred ranges of relative indexes and radii. Center segment 40 has a relative index percent, $\Delta_0\%$, in the range of about 0.35% to 0.45% and radius 42 in the range of about 3 μm to 5 μm . The first annular segment 43 has a relative index percent, $\Delta_1\%$, in the range of about 0 to 0.05% and outer radius 44 in the range of about 7 μm to 9 μm . The second annular segment 46 has a relative index percent, $\Delta_2\%$, in the range of about 0.06% to 0.20% and outer radius 48 in the range of about 9 μm to 13 μm . The relative index percent of the PLD 50, $\Delta_p\%$, has a range of about -0.05% to -0.80% and a center radius 49 in the range of about 19 μm to 21 μm . The width 52 of the PLD is in the range of about 3 μm to 10 μm . Waveguide fibers have been made using these $\Delta\%$ vs. radius ranges that exhibit an effective area greater than 70 μm^2 , more preferably greater than 75 μm^2 , and most preferably greater than 80 μm^2 , in combination with an attenuation at 1550 nm which is less than 0.25 dB/km.

WD 01/11402

PCT/US00/16925

11

more preferably less than 0.22 dB/km, a total dispersion slope, over the wavelength range 1520 nm to 1650 nm, less than 0.09 ps/nm²-km, more preferably less than 0.075 ps/nm²-km, and a pin array bend loss which is less than 100 dB and more preferably less than 65 dB.

5 The invention will be further illustrated by the following example that is intended to be exemplary of the invention.

Example 1

10 Referring to Fig. 2, the profile shown has respective relative indexes 40, 43, 46 and 50, $\Delta_0\%$ of 0.39%, $\Delta_1\%$ of 0, $\Delta_2\%$ of 0.085%, PLD $\Delta_p\%$ of -0.3, center segment outer radius 42 of 3.5 μm , first annular segment outer radius 44 of 8 μm , second annular segment outer radius 48 of 17 μm , center radius of the PLD 49 of 20 μm and PLD width 52 of 4 μm .

15 The modeled waveguide parameters are, 1550 nm total dispersion, 3.67 ps/nm-km, total dispersion slope, 0.068 ps/nm²-km, mode field diameter, 10.6 μm , effective area 86.4 μm^2 , fiber cut off wavelength 1499 nm and pin array bend loss 65dB. Using the profile described, fibers having attenuation at 1550 nm less than 0.20 dB/km have been made. The power distribution associated
20 with the modeled profile having a PLD area of about 1.65 μm^2 is shown as curve 56 in Fig. 2. The effect of the PLD is to sharply reduce the power near the edge of the core region.

Comparative Example 1

25 A second profile was modeled corresponding to the profile of Example 1 except that the PLD was not included. In this comparative case, the modeled waveguide parameters are, 1550 nm total dispersion, 1.18 ps/nm-km, total dispersion slope, 0.058 p-s/nm²-km, mode field diameter 10.8 μm , effective area 90.3 μm^2 , fiber cut off wavelength 2213 nm and pin array bend loss 127
30 dB. The power distribution associated with the modeled profile is shown as curve 54 in Fig. 2. In the absence of the PLD, power at the core edge is

WO 01/11402

PCT/US00/16925

12

relatively high, a characteristic which results in the pin array macrobend loss being a factor of about 2 higher than that of the PLD profile. The respective power ratios formed by dividing power at 25 μm from centerline by that at 10 μm for respective power curves 56 and 54 are 3×10^{-6} and 7.6×10^{-4} . The PLD provides an improvement of more than an order of magnitude, thereby reducing macrobend loss. In addition, the improvement in macrobend due to the inward shift of power is achieved without any large adverse affect on other waveguide properties.

The profile of Fig. 3 represents a group of profiles that produce the desired properties set forth in Example 2 below. This group of profiles generally has a central core region which includes three segments surrounded by a PLD. The design is particularly suited to undersea applications. Here again the profiles of the respective core segments may take any of the shapes set forth above in the discussion of Fig. 2. The group is defined by the following preferred ranges of relative indexes and radii. Center segment 18 has a relative index percent, $\Delta_0\%$, in the range of about 0.5% to 0.6% and outer radius 26 in the range of about 2.0 μm to 4.5 μm . Center segment 18 is surrounded by first annular segment 20 that has a relative index percent lower than that of center segment 18, $\Delta_1\%$, in the range of about -0.025% to 0.01%, and outer radius 28 in the range of about 5 μm to 9 μm . First annular segment 20 is surrounded by second annular segment 22 that has a relative index percent, $\Delta_2\%$, in the range of about 0.06% to 0.30% and outer radius 30 the range of about 11 μm to 16 μm . The relative index percent of the PLD 24, $\Delta_p\%$, has a range of about -0.05% to -0.80%, and a center radius 32 in the range of about 14 μm to 20 μm . The width 34 of the PLD is in the range of about 0.75 μm to 13 μm . Preferably $\Delta_p\%$ is in a range of about -0.2% to -0.8%, and more preferably is more negative than -0.25%.

Waveguide fibers have been made, using refractive index profiles within these $\Delta\%$ vs radius ranges, that exhibit an effective area greater than about 65 μm^2 , more preferably greater than 68 μm^2 , and most preferably greater than 70 μm^2 , in combination with an attenuation at 1550 nm which is less than 0.25

WO 01/11402

PCT/US99/16925

13

dB/km, preferably less than 0.23 dB/km, and more preferably less than 0.21 dB/km, a total dispersion slope, over the wavelength range 1520 nm to 1650 nm, of less than 0.09 ps/nm²-km, more preferably less than 0.08 ps/nm²-km, and a pin array bend loss of less than 50 dB, preferably less than 35 dB, and more preferably less than 30 dB. Microbend loss is less than about 5 dB/m and preferably less than 3.3 dB/m. Waveguide fibers have been made using this refractive index profile which exhibit an attenuation at 1550 nm of less than about 0.22 dB/km. Total dispersion at 1550 nm can be made to have a positive or negative value by placement of the zero dispersion wavelength. Cabled cut off values are typically less than about 1500 nm.

The invention will be further illustrated by the following example that is intended to be exemplary of the invention.

Example 2

Referring to Fig. 3, the profile shown has respective relative indexes 18, 20, 22 and 24, $\Delta_0\%$ of 0.54%, $\Delta_1\%$ of -0.02%, $\Delta_2\%$ of 0.1%, PLD $\Delta_p\%$ of -0.3%, center segment radius 26 of 3.0 μm , first annular segment outer radius 28 of 5.5 μm , second annular segment outer radius 30 of 16 μm , center radius of the PLD 24 of 18 μm and PLD width 34 of 4 μm .

The modeled waveguide parameters are, 1550 nm total dispersion, -2.91 ps/nm-km, total dispersion slope, 0.077 ps/nm²-km, over the range of 1520 nm to 1650 nm, mode field diameter 9.54 μm , effective area 70.4 μm^2 , fiber cut off wavelength 1675 nm and pin array bend loss 19 dB. Waveguide fibers made having this index profile exhibited attenuation at 1550 nm less than 0.22 dB/km. The power distribution associated with the modeled profile is shown as curve 38 in Fig. 2. The effect of the PLD is to significantly reduce the power near the edge of the core region, thereby improving macrobend performance.

Comparative Example 2

A second profile was modeled corresponding to the profile of Example 2 except that the PLD was not included. In this comparative case, the modeled

WO 01/1402

PCT/US00/16925

14

waveguide parameters are, 1550 nm total dispersion, -4.96 ps/nm-km, total dispersion slope, over the range of 1520 nm to 1650 nm, of 0.068 ps/nm²-km, mode field diameter 9.65 μm , effective area 72.4 μm^2 , fiber cut off wavelength 2333 nm and pin array bend loss 31 dB. The power distribution associated with the modeled profile is shown as curve 36 in Fig. 2. In the absence of the PLD, power at the core edge is relatively high, a characteristic which results in the pin array macrobend loss being a factor of about 1.65 higher than that of the profile having the PLD. The respective power ratios formed by dividing power at 25 μm from centerline by power at 10 μm from centerline, taken from respective power curves 38 and 36, are 1.4×10^{-5} and 1.6×10^{-4} , an improvement of about an order of magnitude. This improvement in macrobend loss is achieved without adversely affecting the other waveguide properties.

The profile of Fig. 5 represents a group of profiles that produce the desired properties set forth in Example 3 below. This group of profiles generally has a central region of the core that includes four segments surrounded by a PLD. The design is preferred for undersea applications. Here again the profiles of the respective core segments may take any of the shapes set forth above in the discussion of Fig. 2, and preferably the various segments fall within the following preferred ranges of relative indexes and radii. Center segment 60 has a relative index percent, $\Delta_0\%$, in the range of about 0.53% to 0.65% and outer radius 71 in the range of about 2.0 μm to 2.5 μm . Center segment 60 is surrounded by first annular segment 62 that has a relative index percent lower than that of center segment 60, $\Delta_1\%$, preferably in the range of about 0 to 0.065%. The outer radius 72 of segment 62 is determined by the outer radius 74 and width 80 of second annular segment 64. First annular segment 62 is surrounded by second annular segment 64 that has a relative index percent, $\Delta_2\%$, in the range of about 0.10% to 0.70% and center radius 73 in the range of about 8.8 μm to 11.8 μm and width 80 in the range of about 0.30 μm to 9.0 μm . Third annular segment 66 surrounds second annular segment 64 and has a relative index in the range of about 0 to 0.05% and an outer radius 75 in the range of about 14.5 μm to 16.5 μm . The relative index percent of the PLD 68,

WO 01/11402

PCT/US00/16925

15

$\Delta_p\%$, has a range of about -0.05% to -0.80%, an inner radius 75 in the range of 12 μm to 19.5 μm and an outer radius 77 in the range of 17 μm to 25 μm . The maximum width of the PLD is therefore 13 μm . A preferred range of PLD width is from 3 to 10 μm , although PLD width can take on values in the range of about 0.75 μm to 13 μm . Relative index percent $\Delta_p\%$ is in a range of about -0.2% to -0.8%, and more preferably is more negative than -0.20%.

In another embodiment, the profile of Fig. 5 represents a group of profiles that produce the desired properties set forth in Example 3 below. This group of profiles generally has a central core region which includes four segments surrounded by a PLD. The design is particularly suited to undersea applications. Here again the profiles of the respective core segments may take any of the shapes set forth above in the discussion of Fig. 2, and preferably the various segments fall within the following preferred ranges of relative indexes and radii. Center segment 60 has a relative index percent, $\Delta_c\%$, in the range of about 0.5% to 0.6% and outer radius 71 in the range of about 2.4 μm to 3.0 μm . Center segment 60 is surrounded by first annular segment 62 that has a relative index percent lower than that of center segment 60, $\Delta_1\%$, in the range of about 0 to 0.1%, and outer radius 72 in the range of about 8.4 μm to 9.7 μm . First annular segment 62 is surrounded by second annular segment 64 that has a relative index percent, $\Delta_2\%$, in the range of about 0.20% to 0.30% and outer radius 74 in the range of about 10.3 μm to 12.6 μm . Third annular segment 66 surrounds second annular segment 64 and has a relative index in the range of about 0 to 0.05 and an outer radius 75 in the range of about 14.5 μm to 18.5 μm . The relative index percent of the PLD 68, $\Delta_p\%$, has a range of about -0.05% to -0.80%, and a center radius 78 in the range of about 16.5 μm to 20.2 μm . The width 70 of the PLD in this embodiment is in the range of about 6.4 μm to 7.9 μm , although as is stated above, the PLD width can have values in the range of about 0.75 μm to 13 μm . Preferably $\Delta_p\%$ is preferably in a range of about -0.2% to -0.8%, and more preferably is more negative than -0.20%.

WO 01/11402

16

PCT/US00/16925

Example 3

Referring to Fig. 5, the profile shown has respective relative indexes 60, 62, 64 and 66, $\Delta_0\%$ of 0.55%, $\Delta_1\%$ of 0.01%, $\Delta_2\%$ of 0.225%, $\Delta_3\%$ of 0, PLD $\Delta_p\%$ of -0.25%, center segment outer radius 71 of 2.37 μm , first annular segment outer radius 72 of 8.8 μm , second annular segment outer radius 74 of 11.4 μm , third annular segment 66 outer radius of 15 μm , center radius of the PLD 78 of 18.3 μm and PLD width 70 of 7.1 μm .

Waveguide fibers made in accordance with this profile exhibit 1560 nm total dispersion of -2.4 ps/nm-km, total dispersion slope of 0.079 ps/nm²-km, mode field diameter of 9.36 μm , effective area of 67.4 μm^2 , cabled cut off wavelength of 1378 nm and pin array bend loss of 29.6 dB. Using the profile described, fibers having attenuation at 1550 nm less than 0.22 dB/km have been made and typical 1550 nm attenuation is 0.204 dB/km. Microbend loss for this exemplary case is about 3.32 dB/m.

In any of the embodiments set forth above, microbend loss can be significantly reduced, typically to values less than about 1 dB/m, when a larger diameter polymer coating is used in combination with any of the embodiments disclosed and described hereinabove. An embodiment of the larger diameter coating is one in which a dual layer coating is used on a waveguide fiber having a diameter of 125 μm . The primary or first layer has a diameter of 190 μm +/- 10 μm and the secondary layer has a diameter of 285 μm +/- 10 μm . The upper limit on coating outside diameter is set by practical considerations such as cost and ease of cabling. A reasonable upper limit on coating diameter is about 310 μm for a 125 μm glass fiber diameter. Microbend loss can be improved by using a coating having a secondary layer diameter targeted as low as 260 μm +/- 10 μm . A typical fiber optic polymer coating is a dual layer urethane acrylate based material, having a modulus less than 1.0 MPa for the primary layer and a modulus greater than 650 MPa for the secondary layer. In one embodiment the primary layer has modulus in the range of about 1.0 MPa to 1.3

WO 01/11402

PCT/US00/16925

17

MPa and the secondary layer has modulus in the range of about 650 MPa to 850 MPa.

Example 4

5 A waveguide fiber having parameters in accordance with those of example 3 and a polymer coating surrounding the clad layer having a larger diameter as set forth immediately above was made and measured. The measured parameters were, 1560 nm total dispersion, -2.3 ps/nm-km, total dispersion slope, 0.078 ps/nm²-km, mode field diameter, 9.25 μ m, effective area
10 66 μ m², cabled cut off wavelength 1435 nm, pin array bend loss 4.7 dB, attenuation at 1550 nm 0.196, and microbend loss 0.64 dB/m.

The invention as set forth in this specification may be applied to essentially any refractive index profile to achieve improved bend resistance without substantially changing the other waveguide fiber properties. Curve 58 in
15 Fig. 4 illustrates the change in 25 μ m to 10 μ m power ratio as the PLD area is increased. Curve 58 is a best fit to a series of points generated using different index profiles. For lower PLD values, those less than about 1, the spread of power ratio data points about the fitted line is 7×10^{-5} . At higher PLD areas, the spread in power ratio is about 2.2×10^{-5} . As the PLD area increases the
20 improvement in macrobend loss becomes less dependent upon the details of the core segments that are inside the PLD segment. The benefits of the invention are available for a large number of profiles that are designed for use in the 1250 nm to 1700 nm wavelength band.

It will be apparent to those skilled in the art that various modifications and variations of the present invention can be made without departing from the spirit
25 and scope of the invention. Thus, it is intended that the present invention include the modifications and variations of this invention provided they come within the scope of the appended claims and their equivalents.

WO 01/11402

PCT/US00/16925

18

What is claimed is:

1. A single mode optical waveguide fiber comprising:
a core region surrounded by and in contact with a clad layer, wherein
the core region and the clad layer each have respective refractive index profiles
and are configured to guide light through the waveguide fiber; wherein,
5 the core region comprises a central region including at least two
segments, and, surrounding said central region, a power-limiting depression
having an inner and an outer radius; and,
the light guided through the waveguide fiber has a power distribution at
10 1550 nm characterized in that the ratio of power at the 25 μm radius point of the
waveguide to the power at the 10 micron radius point is less than about 1×10^{-4} .

2. The single mode waveguide of claim 1 wherein said fiber exhibits an
attenuation less than or equal to about 0.22 dB/km.
15

3. The single mode waveguide of claim 1 wherein the fiber is designed to
operate in a wavelength range of about 1250 nm to 1700 nm.

4. The single mode waveguide of claim 1 wherein the fiber is designed to
20 operate in a wavelength range of about 1520 nm to 1650 nm.

5. The single mode waveguide of claim 1 wherein the power-limiting depression
has a width in the range of about 0.75 μm to 13 μm , an inner radius not less
than about 12 μm , and a relative refractive index in the range of about -0.05 %
25 to -0.80 %.

6. The single mode waveguide of claim 5 wherein the power-limiting depression
has a radius from the waveguide centerline to the power-limiting depression
geometric center in the range of about 12.5 μm to 22 μm .
30

WO 01/11402

PCT/US00/16925

19

7. The single mode waveguide of any one of the preceding claims wherein the effective area is not less than about $80 \mu\text{m}^2$ and the fiber cutoff wavelength is in the range of about 1450 nm to 1900 nm.

5 8. The single mode waveguide of claim 1 wherein,
said central region comprises three segments, each said segment having respective refractive index profiles, inner and outer radii, and relative index percents, beginning at the waveguide center and counting outwards, $\Delta_0\%$, $\Delta_1\%$, and $\Delta_2\%$, wherein,

10 respective refractive index profiles are selected from the group consisting of an α -profile, a step, a rounded step, a trapezoid, and a rounded trapezoid, and, $\Delta_0\% > \Delta_2\% > \Delta_1\%$.

15 9. The single mode waveguide of claim 8 wherein and the relative index of the power-limiting depression, $\Delta_p\%$, is negative.

10. The single mode waveguide of claim 8 wherein $\Delta_0\%$ is in the range 0.35 to 0.45%, $\Delta_1\%$ is in the range of 0 to 0.05%, $\Delta_2\%$ is in the range 0.06 to 0.15%, and $\Delta_p\%$ is in the range -0.05 % to -0.80 %.

20 11. The single mode waveguide of claim 10 wherein the fiber exhibits an effective area greater than or equal to $75 \mu\text{m}^2$.

25 12. The single mode waveguide of claim 10 wherein the fiber exhibits an effective area greater than or equal to $80 \mu\text{m}^2$.

30 13. The single mode waveguide of claim 10 wherein, beginning at the waveguide center and counting outwards, the radius of the first segment is in the range of 3 to 5 μm , the outer radius of the second segment is in the range of 7 to 9 μm , the outer radius of the third segment is in the range of 9 μm to 13 μm , the geometric center radius of the power-limiting depression is in the range

WO 01/11402

PCT/US00/16925

20

of 19 μm to 21 μm , and the width of the power-limiting depression is in the range of 3 μm to 10 μm .

5 14. The single mode waveguide of claim 13 wherein the ratio of power at the outer radius of the power-limiting depression to the power at the 10 micron radius point is less than about 3×10^{-3} .

10 15. The single mode waveguide of claim 14 wherein the effective area is not less than about 75 μm^2 .

16. The single mode waveguide of claim 1 wherein,
 said central region comprises three segments, each said segment
 having respective refractive index profiles, inner and outer radii, and relative
 index percents, beginning at the waveguide center and counting outwards, $\Delta_0\%$,
 15 $\Delta_1\%$, and $\Delta_2\%$, wherein,
 respective refractive index profiles are selected from the group
 consisting of an α -profile, a step, a rounded step, a trapezoid, and a rounded
 trapezoid, and, $\Delta_0\% > \Delta_2\% > \Delta_1\%$, and $\Delta_1\%$ is negative.

20 17. The single mode waveguide of claim 16 wherein the relative index of the power-limiting depression, $\Delta_p\%$, is negative.

18. The single mode waveguide of claim 17 wherein $\Delta_0\%$ is in the range 0.5 to
 0.6%, $\Delta_1\%$ is in the range of about -0.025% to 0.01%, $\Delta_2\%$ is in the range 0.06 to
 25 0.30 %, and $\Delta_p\%$ is in the range -0.05 % to -0.80 %.

19. The single mode waveguide of claim 18 wherein, beginning at the
 waveguide center and counting outwards, the radius of the first segment is in
 the range of 2.0 to 4.5 μm , the outer radius of the second segment is in the
 30 range of 5 to 9 μm , the outer radius of the third segment is in the range of 11
 μm to 16 μm , the geometric center radius of the power-limiting depression is in

WO 01/11402

PCT/US00/16925

21

the range of 14 μm to 20 μm , and the width of the power-limiting depression is in the range of 3 μm to 10 μm .

5 20. The single mode waveguide of claim 19 wherein the effective area is not less than about 65 μm^2 .

10 21. The single mode waveguide of claim 20 wherein the ratio of power at the outer radius of the power-limiting depression to the power at the 10 micron radius point is less than about 1.4×10^{-6} .

15 22. The single mode waveguide of claim 1 wherein,
said central region comprises four segments, each said segment having respective refractive index profiles, inner and outer radii, and relative index percents, beginning at the waveguide center and counting outwards, $\Delta_0\%$, $\Delta_1\%$, and $\Delta_2\%$, $\Delta_3\%$ wherein,

respective refractive index profiles are selected from the group consisting of an α -profile, a step, a rounded step, a trapezoid, and a rounded trapezoid, and, $\Delta_0\% > \Delta_2\% > \Delta_1\% \geq \Delta_3\%$.

20 23. The single mode waveguide of claim 22 wherein and the relative index of the power-limiting depression, $\Delta_p\%$, is negative.

25 24. The single mode waveguide of claim 22 wherein $\Delta_0\%$ is in the range 0.53% to 0.65%, $\Delta_1\%$ is in the range of 0 to 0.065%, $\Delta_2\%$ is in the range 0.10% to 0.70%, $\Delta_3\%$ is in the range of 0 to 0.05%, and $\Delta_p\%$ is in the range -0.05 % to -0.80 %.

30 25. The single mode waveguide of claim 24 wherein the fiber exhibits an effective area greater than or equal to 65 μm^2 .

WO 01/11402

PCT/US00/16925

22

26. The single mode waveguide of claim 24 wherein the fiber exhibits an effective area greater than or equal to $70 \mu\text{m}^2$.

5 27. The single mode waveguide of claim 24 wherein, beginning at the waveguide center and counting outwards, the radius of the first segment is in the range of $2.0 \mu\text{m}$ to $2.5 \mu\text{m}$, the center radius of the third segment is in the range of $8.8 \mu\text{m}$ to $11.8 \mu\text{m}$, the width of the third segment is in the range of $0.30 \mu\text{m}$ to $9 \mu\text{m}$, the inner center radius of the power-limiting depression is in the range of $12 \mu\text{m}$ to $19.5 \mu\text{m}$, and the outer radius of the power-limiting depression is in the range of $17 \mu\text{m}$ to $25 \mu\text{m}$.

10 28. The single mode waveguide of claim 27 wherein the ratio of power at the outer radius of the power-limiting depression to the power at the 10 micron radius point is less than about 8×10^{-5} .

15 29. The single mode fiber of claim 22 wherein $\Delta_0\%$ is in the range 0.50% to 0.60%, $\Delta_1\%$ is in the range of 0 to 0.10%, $\Delta_2\%$ is in the range 0.20% to 0.30%, $\Delta_3\%$ is in the range of 0 to 0.05%, and $\Delta_p\%$ is in the range -0.05 % to -0.80 %.

20 30. The single mode fiber of claim 29 wherein $\Delta_3\%$ is in a range of about -0.2% to -0.8%.

25 31. The single mode fiber of claim 30 wherein $\Delta_p\%$ is more negative than -0.25%.

32. The single mode fiber of claim 29 wherein beginning at the waveguide center and counting outwards, the outer radius of the first segment is in the range of $2.4 \mu\text{m}$ to $3.0 \mu\text{m}$, the outer radius of the second segment is in the range of $8.4 \mu\text{m}$ to $9.7 \mu\text{m}$, the outer radius of the third segment is in the range of $10.3 \mu\text{m}$ to $12.6 \mu\text{m}$, the outer radius of the third segment is in the range of $14.5 \mu\text{m}$ to $16.5 \mu\text{m}$, center radius of the power-limiting depression is in the

WO 01/11402

PCT/US00/16925

23

range of 16.5 μm to 20.2 μm , and the width of the power limiting depression is in the range of about 0.75 μm to 13 μm .

33. A single mode optical waveguide fiber comprising:

5 a core region surrounded by and in contact with a clad layer, wherein the core region and the clad layer each have respective refractive index profiles and are configured to guide light through the waveguide fiber; wherein,

the core region comprises a central region including at least two segments, and, surrounding said central region, a power-limiting depression
10 having an outer radius; and,

the effective area is not less than about 60 μm^2 and the pin array bend loss is less than about 65 dB.

34. The single mode waveguide of claim 33 wherein the attenuation is no
15 greater than about 0.25 dB/km.

35. The single mode waveguide of claim 34 wherein the mode field diameter is greater than about 9 μm .

20 36. The single mode waveguide of claim 33 wherein the outer radius of said power-limiting depression is in the range of about 14 μm to 25 μm .

37. A single mode optical waveguide fiber comprising:

a core region surrounded by and in contact with a clad layer, wherein
25 the core region and the clad layer each have respective refractive index profiles and are configured to guide light through the waveguide fiber; wherein,

the core region comprises a central region including at least two segments, and, surrounding said central region, a power-limiting depression having an outer radius; and,

WO 01/11402

24

PCT/US00/16925

effective area is not less than about $60 \mu\text{m}^2$, the pin array bend loss is less than about 22 dB, and the 20 mm mandrel bend loss is less than about 11 dB/m.

- 5 38. The single mode waveguide of claim 37 wherein the attenuation is no greater than about 0.25 dB/km

39. A single mode optical waveguide fiber comprising:

- 10 a core region surrounded by and in contact with a clad layer, wherein the core region and the clad layer each have respective refractive index profiles and are configured to guide light through the waveguide fiber; wherein,

the core region comprises a central region including at least two segments, and surrounding said central region a power-limiting depression having a width in the range of $0.75 \mu\text{m}$ to $13 \mu\text{m}$; and,

- 15 said respective index profiles of the core and clad are designed to guide signals in the wavelength range 1520 nm to 1650 nm.

40. The single mode waveguide of claim 39 wherein the power-limiting depression has an outer radius measured from the waveguide centerline in the range of about $14 \mu\text{m}$ to $25 \mu\text{m}$.

41. The single mode waveguide of claim 39 wherein the effective area is not less than about $60 \mu\text{m}^2$.

- 25 42. The single mode waveguide of any one of claims 1-41 wherein the fiber cut off wavelength is in the range of about 1450 nm to 1900 nm.

43. The single mode waveguide of any one of claims 1-41 wherein the fiber further comprises at least one polymer coating surrounding said clad layer having a diameter in the range of $250 \mu\text{m}$ to $310 \mu\text{m}$.

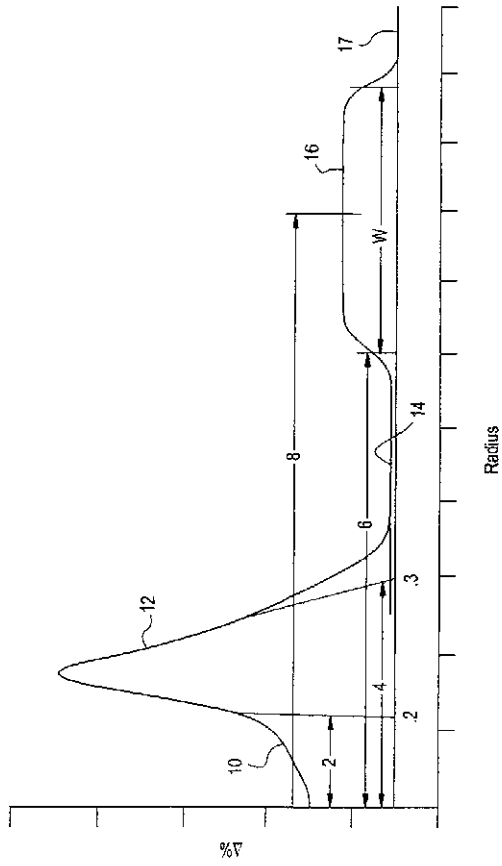
30

WO 01/11402

PCT/US00/16925

1 / 4

FIG. 1



SUBSTITUTE SHEET (RULE 26)

WO 01/11402

PCT/US00/16925

2 / 4

FIG. 2

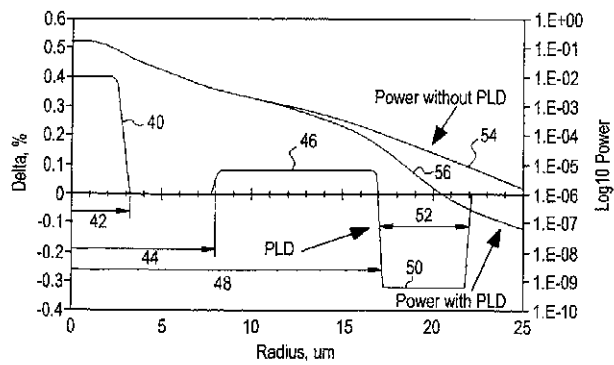
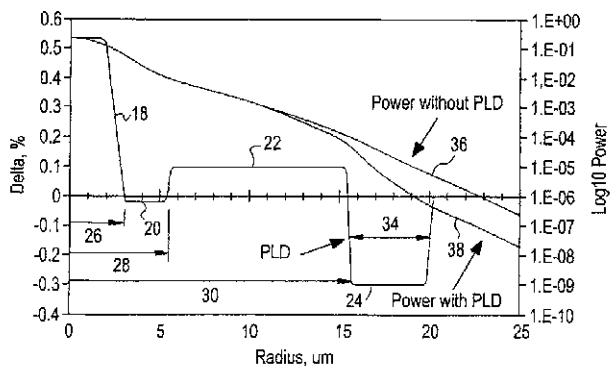


FIG. 3



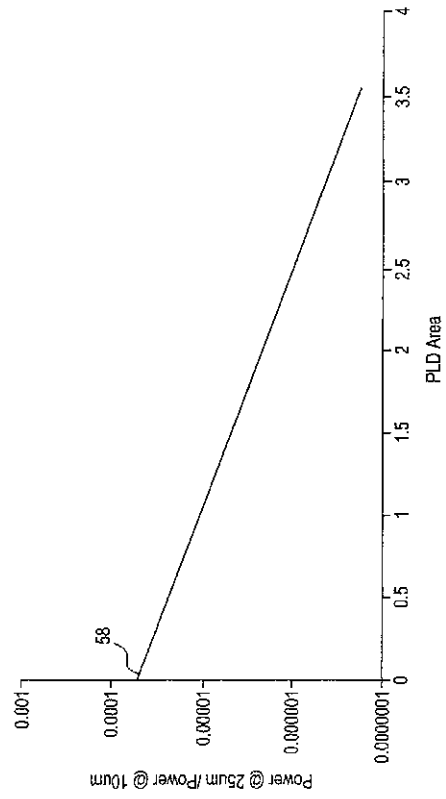
SUBSTITUTE SHEET (RULE 26)

WQ 01/11402

PCT/US00/16925

3 / 4

FIG. 4



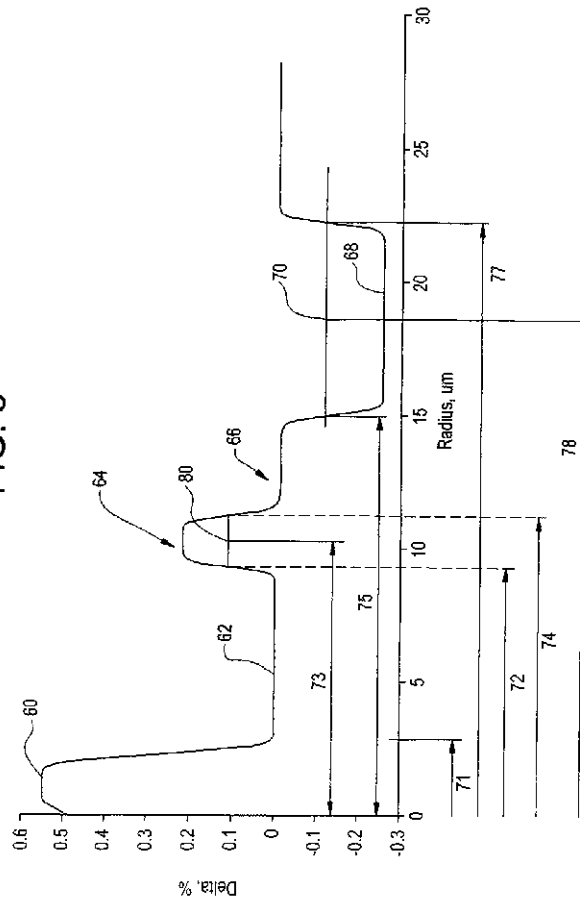
SUBSTITUTE SHEET (RULE 26)

WO 01/11402

PCT/US00/16925

4 / 4

FIG. 5



SUBSTITUTE SHEET (RULE 26)

【国際調査報告】

INTERNATIONAL SEARCH REPORT		International application No. PCT/US00/16925
A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER IPC(7): 3028.6/22 US CL: 385/127 According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) U.S.: 385/122, 126, 127, 128 Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched		
Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used) APS Search terms: optical, optic, fiber, fibre, core, profile, single-mode, singlemode, effective area, pin array, mandrel, index profile, segments		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 4,715,679 A (BHAGAVATHI ET AL) 29 December 1987 (29/12/87), see entire document.	1-43
X	US 4,852,968 A (REILD) 01 August 1989 (01/08/89), see Figure 17 and column 8, lines 10-16.	39, 40
A	US 5,278,931 A (ANTOS ET AL) 11 January 1994 (11/01/94), see entire document.	1-43
A	US 5,448,674 A (VENUGOPAL ET AL) 05 September 1995 (05/09/95), see entire document.	1-43
X	US 5,553,185 A (ANTOS ET AL) 03 September 1996 (03/09/96), see entire document, especially Figure 3.	39, 40
X	US 5,684,909 A (LIU) 04 November 1997 (04/11/97), see entire document, especially Figure 2a and column 6, lines 5-32.	33, 36, 39, 40, 41
Y		34, 35, 37, 43
X	US 5,781,684 A (LIU) 14 July 1998 (14/07/98), see entire document, especially Figure 6.	33, 36, 39-43
Y		1, 7
<input type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input type="checkbox"/> See patent family annex.		
Special categories of cited documents: * "A" documents defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance * "F" earlier application or patent published on or after the international filing date * "I" document which was known directly or indirectly (status) or which is cited to establish the publication date of another document or where special reason is specified * "O" document referred to as oral disclosure, use, exhibition or other means * "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed * "T" later document published after the international filing date or priority date and not so classified with the application but cited to understand the state of the art or to understand the invention * "X" documents of particular relevance: the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the documents in value alone * "Y" documents of particular relevance: the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combinations being obvious to a person skilled in the art * "Z" documents considered to be of the same patent family		
Date of the actual completion of the international search 14 November 2000 (14.11.2000)		Date of mailing of the international search report 27 DEC 2000
Name and mailing address of the ISA/US Commissioner of Patent and Trademark Box PCT Washington, D.C. 20231 Hacustrail No. 7033295-3230		Authorized officer Rodney D. Bovernick Telephone No. 703.306.0556

Form PCT/ISA/210 (second sheet) (July 1998)

フロントページの続き

(81)指定国 EP(AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE), AE, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, B
B, BG, BR, BY, CA, CH, CN, CU, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR
, LS, LT, LU, LV, MD, MG, MK, MN, MW, MX, NO, NZ, PL, PT, RO, RU, SD, SE, SG, SI, SK, SL, TJ, TM, TR, TT, UA, UG, UZ, VN, YU, ZA, ZW

F ターム(参考) 2H050 AC09 AC15 AC38 AC71 AC73 AC75 AC76 AD01 BB02W