

(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2010-72647
(P2010-72647A)

(43) 公開日 平成22年4月2日(2010.4.2)

(51) Int.Cl.	F I	テーマコード (参考)
GO2B 6/028 (2006.01)	GO2B 6/18	2H150
GO2B 6/036 (2006.01)	GO2B 6/22	

審査請求 未請求 請求項の数 22 O L 外国語出願 (全 56 頁)

(21) 出願番号	特願2009-215259 (P2009-215259)	(71) 出願人	509094034 オーエフエス ファイテル, エルエルシー アメリカ合衆国 30071 ジョージア 、ノアクロス, ノースイースト エクスプレ スウェイ 2000
(22) 出願日	平成21年9月17日 (2009.9.17)	(74) 代理人	100064447 弁理士 岡部 正夫
(31) 優先権主張番号	61/097, 639	(74) 代理人	100094112 弁理士 岡部 譲
(32) 優先日	平成20年9月17日 (2008.9.17)	(74) 代理人	100085176 弁理士 加藤 伸晃
(33) 優先権主張国	米国 (US)	(74) 代理人	100104352 弁理士 朝日 伸光
(31) 優先権主張番号	12/583, 212	(74) 代理人	100128657 弁理士 三山 勝巳
(32) 優先日	平成21年8月17日 (2009.8.17)		
(33) 優先権主張国	米国 (US)		

最終頁に続く

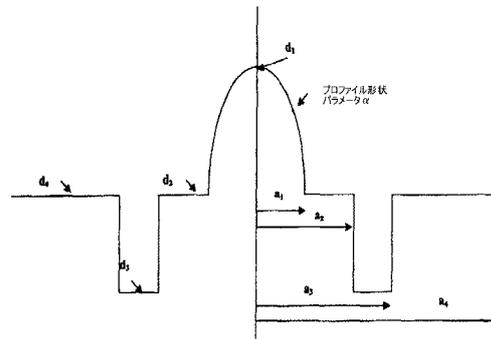
(54) 【発明の名称】 帯域幅維持多モード光ファイバ

(57) 【要約】

【課題】本明細書は、特定の設計パラメータ、すなわち、制御された屈折率設計の比率および寸法を有し、中程度に厳しい曲げにほとんど影響されない光ファイバを提供する。

【解決手段】本願発明の多モード光ファイバは、第1の半径 a_1 およびプロファイル・アルファを有するコア領域と、 a_1 から第2の半径 a_2 まで半径方向に延在する内側クラッドと、第2の半径 a_2 から第3の半径 a_3 まで半径方向に延在するトレンチと、第4の半径 a_4 まで延在する外側クラッドとを備え、コア領域の最大屈折率 d_1 、内側クラッドの屈折率 d_2 、トレンチの屈折率 d_3 、外側クラッドの屈折率 d_4 が特定の値を有する。これにより、光ファイバ中のモード構造も、曲げによってほとんど影響を受けず、したがって光ファイバの帯域幅を本質的に損なわれぬままにする。

【選択図】 図1



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

第 1 の半径 a_1 およびプロファイル・アルファを有するコア領域と、 a_1 から第 2 の半径 a_2 まで半径方向に延在する内側クラッドと、第 2 の半径 a_2 から第 3 の半径 a_3 まで半径方向に延在するトレンチと、第 4 の半径 a_4 まで延在する外側クラッドとを備える多モード光ファイバであって、前記コア領域の最大屈折率が d_1 であり、前記内側クラッドの屈折率が d_2 であり、前記トレンチの屈折率が d_3 であり、前記外側クラッドの屈折率が d_4 であり、

a_1 が、7 ~ 50 ミクロンであり、

アルファが、1.6 ~ 2.2 であり、

$(a_2 - a_1) / a_1$ が、0.1 ~ 0.7 であり、

$(a_3 - a_2) / a_1$ が、0.3 ~ 0.6 であり、

a_4 が、30 ~ 250 ミクロンであり、

$d_1 - d_4$ が、-0.019 ~ 0.032 であり、

$d_2 - d_4$ が、-0.01 ~ 0.01 であり、

$d_3 - d_4$ が、-0.05 ~ -0.0025 であり、

d_4 が、1.4 ~ 1.511 である、多モード光ファイバ。

10

【請求項 2】

a_1 が、21 ~ 29 ミクロンであり、

アルファが、1.96 ~ 2.2 であり、

$(a_2 - a_1) / a_1$ が、0.1 ~ 0.3 であり、

$(a_3 - a_2) / a_1$ が、0.3 ~ 0.5 であり、

a_4 が、 $62.5 + / - 20$ ミクロンであり、

$d_1 - d_4$ が、0.0037 ~ 0.0237 であり、

$d_2 - d_4$ が、-0.005 ~ 0.005 であり、

$d_3 - d_4$ が、-0.019 ~ -0.003 であり、

d_4 が、1.43 ~ 1.49 である、請求項 1 に記載の光ファイバ。

20

【請求項 3】

直径 10 mm の周りに 2 回転の基準状態が与えられたときに、曲がっていない状態から曲げられた状態まで 0.07 ピコ秒毎メートル未満の曲げモード性能として測定されるモード遅延時間差の変化を示す多モード光ファイバ。

30

【請求項 4】

第 1 の半径 a_1 を有するコアと、第 2 の半径 a_2 から第 3 の半径 a_3 まで半径方向に延在するトレンチと、外側クラッドとを備え、

a_1 が 22 ~ 29 マイクロメートルであり、そして、

$a_3 - a_2$ が少なくとも 2.5 ミクロンである、請求項 3 に記載の光ファイバ。

【請求項 5】

$a_3 - a_2$ が、10 ~ 13 ミクロンの範囲内である、請求項 4 に記載の光ファイバ。

【請求項 6】

第 1 の半径 a_1 から第 2 の半径 a_2 まで半径方向に延在する内側クラッドをさらに有し、 $(a_3 - a_2) / a_1$ が 0.1 ~ 0.7 の範囲内である、請求項 5 に記載の光ファイバ。

40

【請求項 7】

前記光ファイバが、コア領域およびトレンチを有し、前記トレンチが、 $500 \sim 3500 \mu\text{m}^2$ の範囲内の面積を有する、請求項 3 に記載の光ファイバ。

【請求項 8】

前記光ファイバが、コア領域およびトレンチを有し、前記トレンチが、 $2000 \sim 2900 \mu\text{m}^2$ の範囲内の面積を有する、請求項 3 に記載の光ファイバ。

【請求項 9】

前記トレンチが、前記光ファイバの内側クラッドを下回る少なくとも 0.0025 であ

50

り屈折率を有する、請求項 7 に記載の光ファイバ。

【請求項 10】

前記トレンチが、 1.452 以下である屈折率を有する、請求項 7 に記載の光ファイバ。

【請求項 11】

a_1 が、 26.12 ミクロン $+/- 2\%$ であり、

a_2 が、 28.85 $+/- 2\%$ であり、

a_3 が、 38.9 $+/- 2\%$ であり、

a_4 が、 62.5 $+/- 2\%$ であり、

d_1 が、 1.472 $+/- 2\%$ であり、

d_2 が、 1.457 $+/- 2\%$ であり、

d_3 が、 1.449 $+/- 2\%$ であり、

d_4 が、 1.457 $+/- 2\%$ であり、

アルファが、 2.08 $+/- 2\%$ である、請求項 1 に記載の光ファイバ。

10

【請求項 12】

第 1 の半径 a_1 およびプロファイル・アルファを有するコア領域と、 a_1 から第 2 の半径 a_2 まで半径方向に延在する内側クラッドと、第 2 の半径 a_2 から第 3 の半径 a_3 まで半径方向に延在するトレンチと、第 4 の半径 a_4 まで延在する外側クラッドとを備え、前記コア領域の最大屈折率が d_1 であり、前記内側クラッドの屈折率が d_2 であり、前記トレンチの屈折率が d_3 であり、前記外側クラッドの屈折率が d_4 であり、

20

a_1 が、 28.4 ミクロン $+/- 2\%$ であり、

a_2 が、 28.81 $+/- 2\%$ であり、

a_3 が、 40.71 $+/- 2\%$ であり、

a_4 が、 62.5 $+/- 2\%$ であり、

d_1 が、 1.472 $+/- 2\%$ であり、

d_2 が、 1.457 $+/- 2\%$ であり、

d_3 が、 1.449 $+/- 2\%$ であり、

d_4 が、 1.457 $+/- 2\%$ であり、

アルファが、 2.08 $+/- 2\%$ である、請求項 3 に記載の光ファイバ。

【請求項 13】

30

a_1 が、 24.4 ミクロン $+/- 2\%$ であり、

a_2 が、 28 $+/- 2\%$ であり、

a_3 が、 40.72 $+/- 2\%$ であり、

a_4 が、 62.5 $+/- 2\%$ であり、

d_1 が、 1.470 $+/- 2\%$ であり、

d_2 が、 1.457 $+/- 2\%$ であり、

d_3 が、 1.449 $+/- 2\%$ であり、

d_4 が、 1.457 $+/- 2\%$ であり、

アルファが、 2.08 $+/- 2\%$ である、請求項 1 に記載の光ファイバ。

【請求項 14】

40

第 1 の半径 a_1 およびプロファイル・アルファを有するコア領域と、 a_1 から第 2 の半径 a_2 まで半径方向に延在する内側クラッドと、第 2 の半径 a_2 から第 3 の半径 a_3 まで半径方向に延在するトレンチと、第 4 の半径 a_4 まで延在する外側クラッドとを備え、前記コア領域の最大屈折率が d_1 であり、前記内側クラッドの屈折率が d_2 であり、前記トレンチの屈折率が d_3 であり、前記外側クラッドの屈折率が d_4 であり、

a_1 が、 25 ミクロン $+/- 2\%$ であり、

a_2 が、 25.5 $+/- 2\%$ であり、

a_3 が、 36.9 $+/- 2\%$ であり、

a_4 が、 62.5 $+/- 2\%$ であり、

d_1 が、 1.472 $+/- 2\%$ であり、

50

d_2 が、 $1.457 + / - 2\%$ であり、
 d_3 が、 $1.449 + / - 2\%$ であり、
 d_4 が、 $1.457 + / - 2\%$ であり、
 アルファが、 $2.08 + / - 2\%$ である、請求項 3 に記載の光ファイバ。

【請求項 15】

a_1 が、 25 ミクロン $+ / - 2\%$ であり、
 a_2 が、 $29.4 + / - 2\%$ であり、
 a_3 が、 $40.75 + / - 2\%$ であり、
 a_4 が、 $62.5 + / - 2\%$ であり、
 d_1 が、 $1.472 + / - 2\%$ であり、
 d_2 が、 $1.457 + / - 2\%$ であり、
 d_3 が、 $1.449 + / - 2\%$ であり、
 d_4 が、 $1.457 + / - 2\%$ であり、
 アルファが、 $2.08 + / - 2\%$ である、請求項 1 に記載の光ファイバ。

10

【請求項 16】

a_1 が、 25 ミクロン $+ / - 2\%$ であり、
 a_2 が、 $27.7 + / - 2\%$ であり、
 a_3 が、 $39.1 + / - 2\%$ であり、
 a_4 が、 $62.5 + / - 2\%$ であり、
 d_1 が、 $1.472 + / - 2\%$ であり、
 d_2 が、 $1.457 + / - 2\%$ であり、
 d_3 が、 $1.449 + / - 2\%$ であり、
 d_4 が、 $1.457 + / - 2\%$ であり、
 アルファが $2.08 + / - 2\%$ である、請求項 1 に記載の光ファイバ。

20

【請求項 17】

a_1 が、 25 ミクロン $+ / - 2\%$ であり、
 a_2 が、 $30 + / - 2\%$ であり、
 a_3 が、 $40 + / - 2\%$ であり、
 a_4 が、 $62.5 + / - 2\%$ であり、
 d_1 が、 $1.472 + / - 2\%$ であり、
 d_2 が、 $1.457 + / - 2\%$ であり、
 d_3 が、 $1.446 + / - 2\%$ であり、
 d_4 が、 $1.457 + / - 2\%$ であり、
 アルファが、 $2.08 + / - 2\%$ である、請求項 1 に記載の光ファイバ。

30

【請求項 18】

a_1 が、 23.5 ミクロン $+ / - 2\%$ であり、
 a_2 が、 $28 + / - 2\%$ であり、
 a_3 が、 $38.23 + / - 2\%$ であり、
 a_4 が、 $62.5 + / - 2\%$ であり、
 d_1 が、 $1.470 + / - 2\%$ であり、
 d_2 が、 $1.457 + / - 2\%$ であり、
 d_3 が、 $1.449 + / - 2\%$ であり、
 d_4 が、 $1.457 + / - 2\%$ であり、
 アルファが、 $2.08 + / - 2\%$ である、請求項 1 に記載の光ファイバ。

40

【請求項 19】

第 1 の半径 a_1 およびプロファイル・アルファを有するコア領域と、 a_1 から第 2 の半径 a_2 まで半径方向に延在する内側クラッドと、第 2 の半径 a_2 から第 3 の半径 a_3 まで半径方向に延在するトレレンチと、第 4 の半径 a_4 まで延在する外側クラッドとを備え、前記コア領域の最大屈折率が d_1 であり、前記内側クラッドの屈折率が d_2 であり、前記トレレンチの屈折率が d_3 であり、前記外側クラッドの屈折率が d_4 であり、

50

- a₁ が、25 ミクロン + / - 2 % であり、
- a₂ が、34 + / - 2 % であり、
- a₃ が、37.6 + / - 2 % であり、
- a₄ が、62.5 + / - 2 % であり、
- d₁ が、1.472 + / - 2 % であり、
- d₂ が、1.457 + / - 2 % であり、
- d₃ が、1.451 + / - 2 % である、請求項 3 に記載の光ファイバ。

【請求項 20】

前記ファイバが、直径 10 mm の周りに 2 回転の基準の曲げ状態について、曲がっていない状態から曲げられた状態まで 0.07 ピコ秒毎メートル未満の曲げモード性能として測定されるモード遅延時間差の変化を示す、請求項 1 に記載の光ファイバ。

10

【請求項 21】

前記ファイバが、CVD、OVD、MCVD、PCVD、VAD、およびそれらの任意の組み合わせからなる群から選択される方法を用いて作製される、請求項 1 に記載の光ファイバ。

【請求項 22】

前記ファイバが、CVD、OVD、MCVD、PCVD、VAD、およびそれらの任意の組み合わせからなる群から選択される方法を用いて作製される、請求項 3 に記載の光ファイバ。

【発明の詳細な説明】

20

【技術分野】

【0001】

関連出願

本出願は、2008年9月17日に提出された仮出願第61/097,639号の利益を主張するものであり、この出願は参照により本明細書に組み込まれる。

【0002】

本発明は、ロバスト (robust) な光伝達特性を有する光ファイバの一群の設計に関する。より具体的には、本発明は、光ファイバのモード構造および帯域幅を維持しつつ曲げ損失を制御するように設計される光ファイバに関する。

【背景技術】

30

【0003】

光ファイバは曲げられると光エネルギーを漏洩するという光ファイバの傾向が、本技術の初期の頃より知られている。光は、直線経路に沿って進むが、低屈折率の材料によって囲まれた高屈折率の材料の (曲がった経路でさえ) 経路を設けることによってある程度まで誘導できることがよく知られている。しかし、実際には、その原則は限られたものであり、光ファイバは、光を閉じ込める光のガイドの能力を超える曲率を伴う曲げをしばしば有する。

【0004】

曲げられたときの伝達特性を制御することは、ほぼ全ての実際の光ファイバの設計において問題である。当初の手法は、未だに普通の手法であるが、光ファイバの物理的な曲げを防ぐまたは最小にすることである。このことは、長距離ではロバストなケーブルを設計することによって、または短距離では光ファイバをマイクロダクト中に設置することによってほとんど達成できるが、いずれの場合も、光ファイバは、各端部で終端されなければならない。したがって、最適条件下であっても、曲げ (しばしば厳しい曲げ) が、光ファイバの終端で生じる。

40

【0005】

曲げ損失を制御することは、光ファイバそれ自体の物理的設計によって対処することもできる。一部の光ファイバは、本質的に他の光ファイバよりも曲げ損失に影響されない。このことは、早期に認識されており、現在大部分の光ファイバは、低損失用に特に設計されている。マイクロバンド損失の制御に典型的に効果的である設計の特徴は、光ファイバ

50

のクラッド、通常外側クラッドの特性を含む。したがって、リングの特徴またはトレンチの特徴、あるいはそれらの組み合わせが、曲げ損失を制御するために光ファイバの屈折率プロファイルの外側に普通見られる。例えば、米国特許第 4,691,990 号および米国特許第 4,852,968 号を参照されたい。両特許は、参照により本明細書に組み込まれる。

【0006】

曲げられた状態の下での光ファイバについての性能問題は、曲げ位置での光ファイバからの光の漏洩による一般的に光パワー損失を含むと一般に考えられてきた。大抵の場合、曲げ損失に基づくモード構造の変化の影響は見逃される。

【0007】

単一モード光ファイバでは、全ての漏洩は光ファイバの基本モードの光に関わるので、一般のパワー損失が、主として考慮される。しかし、多モード光ファイバでは、モード構造がこの損失に影響を及ぼし、より高次のモードがより低次のモードより多い損失を被る。加えて、光ファイバの曲げは、モードを変換および混合させる。したがって、より低次のモードの信号は、いくらかの曲げに耐え得るが、より低次のモードの信号がより高次のモードへ変換される場合、その信号は曲げ損失の影響をより受けやすくなる。

【0008】

多モード光ファイバにおけるより高次のモードとより低次のモードの組み合わせは、光ファイバの帯域幅、したがって光ファイバの信号搬送能力を決定する。多モード光ファイバを曲げると、光学系の信号搬送能力を減少させ得る。

【0009】

多モード光ファイバにおける差分モード損失 (differential mode loss) の特性は、単一モード光ファイバにおける一般的に光損失より深刻であり得る。後者は、安価な電力増幅器を用いて対処できる。しかし、多モード光ファイバにおける差分モード損失は、より高次のモード中で伝播する信号の完全な損失をもたらし得る。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0010】

【特許文献 1】米国特許第 4,691,990 号

【特許文献 2】米国特許第 4,852,968 号

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0011】

厳しい曲げの存在下でも光ファイバのモード構造、したがって光ファイバの帯域幅をほとんど保持する多モード光ファイバを設計した。

【図面の簡単な説明】

【0012】

【図 1】後述の (1 つまたは複数の) 実施形態によって用いられる設計パラメータについての名称を示す光ファイバの屈折率プロファイルの図である。この図は、いかなる尺度も表すものでない。

【図 2】本発明の光ファイバの性能を評価するために用いられる特性である、モード遅延時間差 (DMD: Differential Mode Delay) を測定する装置の概略図である。

【図 3 a】従来の多モード光ファイバに対する曲げの影響を示す DMD パルスの記録の図である。

【図 3 b】従来の多モード光ファイバに対する曲げの影響を示す DMD パルスの記録の図である。

【図 4 a】本発明の多モード光ファイバに対する曲げの影響を示す図 3 a および図 3 b と比較される DMD の記録の図である。

【図 4 b】本発明の多モード光ファイバに対する曲げの影響を示す図 3 a および図 3 b と

10

20

30

40

50

比較されるDMDの記録の図である。

【図5】ある従来の光ファイバと本発明により設計された他の光ファイバの2種類の多モード光ファイバを比較している損失対波長のグラフである。

【発明を実施するための形態】

【0013】

図1を参照すると、本発明の実施に関連する寸法設計パラメータが示されている。垂直基準線、線 d_1 は、多モード光ファイバの中心を表す。様々な絶対値を有する同様の比例したプロファイルは、光ファイバを製造するために用いられるプリフォームを特徴付けることになる。

【0014】

特定の制御された設計の比率および寸法については、中程度に厳しい曲げに本質的に影響されない多モード光ファイバが生産できることが発見された。モード構造も、曲げによってほとんど影響を受けず、したがって光ファイバの帯域幅を本質的に損なわれなままにする。普通の光ファイバは、高次モードはクラッドの中に逃げ、中次モードは高次モードの中に混合され、光ファイバ帯域幅のかなりの変化を引き起こすので、曲げられたときかなりのモード構造の変化を示す。典型的には、これらの変化は、モード遅延時間差(DMD)として測定される。本発明に関連しているDMD技術およびDMD測定を以下により詳細に説明することにする。

【0015】

典型的な光ファイバ、および本発明が関連している光ファイバは、最大屈折率がコアの中心にあると共に、コア/クラッドの境界に向かって屈折率が減少している多モード屈折率分布型コアを有する。減少する屈折率は、以下の式によって定められる放物曲線に一般に従う。

$$(1) \quad d_c(r) = d_1 [1 - 2 (r/a_1)^2]^{1/2}$$

$$(2) \quad = (d_1^2 - d_2^2) / 2 d_1^2$$

【0016】

以下の説明におけるパラメータは、図1に示すパラメータに関連する。量 d_1 および d_2 はそれぞれ、 $r=0$ および $r=a_1$ でのコアの屈折率である。量 a_1 は、最大コア半径であり、コアとクラッドの境界を表す。値 d_3 は、コア形状プロファイル・パラメータであり、屈折率分布型プロファイルの形状を定める。コアは、 a_2 によって示す半径のクラッドで囲まれる。従来の多モードファイバについては、屈折率は、 a_1 と a_2 の間の半径方向範囲内で値 d_2 に維持される。

【0017】

本発明の具体的な設計の特徴は、本明細書中で「トレンチ」と呼ばれる(図1中の半径方向位置 a_2 と a_3 の間に示される)コア・クラッドの境界の近くのクラッド領域内の部分が、クラッド領域内で厳密に制御された幅($a_3 - a_2$)となっており、 d_2 と異なる屈折率の値 d_3 を有する。さらに、外側クラッドの屈折率 d_4 は、 d_2 によって示される内側の値と異なっておりよい。屈折率深さ($d_3 - d_2$ 、 $d_3 - d_4$)、幅($a_3 - a_2$)、および屈折率分布型コアに関連するその位置($a_2 - a_1$)を有するこの負の屈折率領域(トレンチ)は、(本説明において後に述べるように)ファイバがきつく曲げられたときに、本発明のファイバのモード構造の保持に寄与する。したがって、光ファイバの性能に関する新しいパラメータが実現され、「曲げモード性能」(「BMP: bend mode performance」と名付けられ、ここでBMPは、曲げられた状態および曲がっていない状態において絶対差0~23ミクロンのDMDである。TIA-FOTP-220規格として知られているDMD試験法によって定められるように、BMPおよびDMDのパラメータは共に、ピコ秒毎メートル、またはps/mで表現される。

【0018】

本発明の基準に適合する設計を公式で表す際、トレンチの特性、具体的にはトレンチ幅 $a_3 - a_2$ およびシヨルダ幅 $a_2 - a_1$ は、光ファイバのBMPに大きな影響があると分かった。実際には、トレンチ幅およびシヨルダ幅の特定の範囲内で、光ファイバのモード

10

20

30

40

50

・ストラクチャは、極端な曲げを受けたときでも本質的に変わらないままであり得る。

【0019】

前述の通り、関連する変化は典型的には、モード遅延時間差(DMD)として測定される。DMDは、多モード光ファイバのコア内で異なるモードに沿って進む光エネルギー同士の間での伝播時間の差である。多モード光ファイバは、光を送信機から受信機まで搬送する複数の光路、すなわちモードを支持する。レーザパルスのエネルギーが光ファイバの中に送信されるとき、レーザパルスのエネルギーは、異なる経路に分かれる。エネルギーが多モード光ファイバに沿って進む際には、DMDは、受信機に到達する前にパルスを広げさせることになる。パルスが過度に広がる場合、パルスは、共に走り得る。これが生じるとき、受信機は、デジタルの1と0を見分けることができず、このリンクは、絶える可能性がある。これは、1Gb/秒のシステムについての問題であり、従来の多モードファイバを用いての既存の10Gb/秒のシステムおよび期待される40Gb/秒のシステムおよび100Gb/秒のシステムをほぼどの距離だけに制限する。多モード光ファイバのDMDは、OFS-Fitel社が開発した高分解能処理を用いてピコ秒毎メートル(ps/m)で測定される。この処理は、光ファイバのコアにわたって、非常に小さいステップによって分離された、多くの位置での非常に短い高パワーの850nmのパルスを送信する。受信したパルスはプロットされ、特別に開発したOFS社のソフトウェアを用いてこのデータを使用してDMDを表す。

10

【0020】

OFS-Fitel社は、既製の多モード・ファイバのレーザ帯域幅を確実にするために、1998年に品質管理手段として高分解能DMDの使用を開拓した。高分解能DMDは、10Gb/秒、および新たな40Gb/秒および100Gb/秒の多モード光ファイバ・システムについてのレーザ帯域幅の最も信頼できる指標として国際規格委員会(international standards committees)によって採用された。OFS-Fitel社は、TIA/EIA-455-220として知られているDMD試験法と一緒に生み出した。この方法は、業界標準になっており、1Gb/秒のシステムおよび10Gb/秒のシステムについての信頼できるシステム性能を保証するために既製の光ファイバに幅広く用いられている。この方法は、将来の40Gb/秒のシステムおよび100Gb/秒のシステムについての規格にやはり取り込まれている。

20

【0021】

図2に、TIA/EIA-455-220試験法を概略的に表す。試験される多モードファイバのコア23は、パルス21を発光する850nmのレーザを用いて単一モードファイバ22によって半径方向に走査される。ファイバ・コアの他端での対応する出力パルスは、単一モードファイバの半径方向位置に関連するそれらの位置に基づいて高速光受信機によって全体的に記録される。これにより様々な半径方向のオフセットで選択的に励起されるモード群の間のモード遅延差に基づいて正確な情報を与える。次いで、DMD走査は、多重走査に基づいて評価される。

30

【0022】

DMD走査データを図3a、図3b、図4aおよび図4bに示す。

【0023】

図3aおよび図3bは、曲がっていない状態と比較してきつく曲げられたときに、他の多モードファイバの設計におけるモード構造がどのように変化するかを示す。

40

【0024】

図3aは、TIA/EIA-455-220規格によって定められるように、曲がっていない状態の多モード光ファイバ(MMF)のモード構造を示すDMDパルスの記録を示す。(31で示す)半径方向位置21ミクロンと(32で示す)半径方向位置24ミクロンの間の外側モード・ストラクチャに注目されたい。これらの位置で多重パルスが現れ始めることが理解できよう。

【0025】

図3bは、(本明細書できつく曲げられた状態として定められる)直径12.8mmの

50

マンドレルの周りに曲げられることを除いて図3 aに示すのと同じMMFのモード構造を示すDMDパルスの記録である。ここで、(3 1'で示す)半径方向位置2 1ミクロンと(3 2'で示す)半径方向位置2 4ミクロンの間の外側モード・ストラクチャは、図3 aの曲がっていない状態と曲げられた状態の間でかなりの変化を受けている。とりわけ、図3 b中の2 1ミクロンと2 4ミクロンの間に示すパルスは、有意に減らされており、したがって信号パワーの実質的な損失を示している。

【0026】

図3 aと図3 bの比較では、0 ~ 2 3の半径について計算された外側モード・ストラクチャおよびDMDの値が劇的に変化していることは明らかである。加えて、(1 9ミクロン以上における)外側モードにおいて進むパワーは、有意に低下しており、モード・エネルギーが再配分されたこと、およびより多くのパワーがクラッド・モードの中に漏れていることを示唆している。モード・エネルギーのこの再配分は、2つの効果を有する。1つは、よく知られているように、かなり曲げられたときにファイバ損失が増大することである。しかし、本発明の前には、曲げられた状態に関連するモード構造への影響は、観察されていない。

10

【0027】

ビット誤り率(BER)システム検査では、他のMMF設計および規格ファイバにおけるモード帯域幅および追加の損失は、きつく曲げの下で測定されるとき、リンクを絶えさせる($> 10^{-12}$ BER)かなりの不利益をもたらすことが示されている。本発明によって作製されたファイバであれば、BERシステム検査における不利益は、他のMMFおよび規格ファイバを用いてなされる試験に比較して大いに最小にされ、リンクは、 10^{-12} BERより良い状態で動作することが示されている。

20

【0028】

図4 aおよび図4 bは、本発明による多モードファイバの設計についてのモード構造が、曲がっていない状態に比較してきつく曲げられたときに変化しないことを示す。

【0029】

図4 aは、本発明の実施形態によって作製されたMMFのモード構造を示すDMDパルスの記録を示す。曲がっていない状態におけるMMFのパルスの記録を図4 aに示す。(4 1で示す)半径方向位置2 1ミクロンと(4 2で示す)半径方向位置2 4ミクロンの間の外側モード・ストラクチャに注目されたい。図3 aに示すDMDパルスの記録と同様に、パルスは、外側モード・ストラクチャに現れ始める。

30

【0030】

図4 bは、直径1 2 . 8 mmのマンドレルの周りに曲げられること(きつく曲げられた状態)を除いて図4 aに示したのと同じMMFのモード構造を示す対応するDMDパルスの記録を示す。(4 1'で示す)半径方向位置2 1ミクロンと(4 2'で示す)半径方向位置2 4ミクロンの間の外側モード・ストラクチャは、曲がっていない状態と曲げられた状態の間で変わらないままであることに注目されたい。したがって、曲げられた状態で最小のMMFのパワー損失が図4 aおよび図4 bに示されるだけでなく、元のモード構造は、本質的に変わらず、元のままに留まる。

【0031】

モード構造を保持したときの、MMFファイバ(上方の曲線)対規格ファイバ(下方の曲線)についての測定された追加のパワー損失の比較を図5に示す。この測定は、直径1 0 mmのマンドレルの周りに2回転させた各ファイバの曲げ損失に関するものである。

40

【0032】

低曲げ損失に加えて高帯域幅の保持により、本発明の改善された多モード光ファイバは、短いジャンパに限定される必要がないことが明らかである。この光ファイバは、例えば、1 Gb / 秒で2 kmまで、1 0 Gb / 秒で5 5 0 mまで、および4 0 Gb / 秒または1 0 0 Gb / 秒で推定1 0 0 mまでの高伝達リンクにおける適用を可能にする。

【0033】

表1は、図1に示す屈折率プロファイルに関連する推奨されるパラメータを与える。こ

50

これらのパラメータについて与えられる範囲内で、高帯域幅および超低曲げ損失を有する多モード光ファイバが同時に達成され得る。

【0034】

【表1】

表1

名称	パラメータ	最小	最大	最適
a1	コア半径 μm	7	50	25 +/- 4
(a2-a1)/a1	比	0.1	0.7	0.2 +/- 0.1
(a3-a2)/a1	比	0.3	0.6	0.4 +/- 0.1
a4	クラッド半径 μm	30	250	62.5 +/- 20
d1-d4	屈折率 Δ	-0.019	0.032	0.0137 +/- 0.01
d2-d4	屈折率 Δ	-0.01	0.01	0 +/- 0.005
d3-d4	屈折率 Δ	-0.05	-0.0025	-0.011 +/- 0.008
d4	屈折率	1.397	1.511	1.46 +/- 0.03
プロファイル形状	アルファ	1.6	2.2	2.08 +/- 0.12

10

20

30

【0035】

前述の通り、これらのパラメータのうちの1つ、(式 $(a_3 - a_2) / a_1$ によってコア半径に正規化された際の表1で表現される) トレンチ幅は、光ファイバの曲げモードの保持を決定する際に特に重要であると分かった。例えば、表1中の範囲のうちコア半径(28.5ミクロン)についての範囲の中点を選択すると、パラメータ $(a_3 - a_2) / a_1$ についての最小値が0.3であるとき、対応するトレンチ幅は、8.55ミクロンである。光ファイバの断面におけるトレンチの面積として表すと、この面積は $1913 \mu\text{m}^2$ である。

【0036】

以下の具体例は、優れたBMPを示した光ファイバについてのパラメータを与える。寸法は、マイクロメートルの単位であり、面積は、平方マイクロメートルの単位である。

【0037】

【表 2】

例I

名称	パラメータ	値
a1	コア半径	26.12
a2	トレンチ始め	28.85
a3	トレンチ終り	38.9
a4	クラッド半径	62.5
d1	屈折率	1.472
d2	屈折率	1.457
d3	屈折率	1.449
d4	屈折率	1.449
プロファイル形状	アルファ	2.08
T _w	トレンチ幅	10.05
T _A	トレンチ面積	2139

10

20

30

【 0 0 3 8 】

【表 3】

例II

名称	パラメータ	値
a1	コア半径	28.4
a2	トレンチ始め	28.81
a3	トレンチ終り	40.71
a4	クラッド半径	62.5
d1	屈折率	1.472
d2	屈折率	1.457
d3	屈折率	1.449
d4	屈折率	1.457
プロファイル形状	アルファ	2.08
T _w	トレンチ幅	11.9
T _A	トレンチ面積	2608

10

20

【 0 0 3 9 】

30

【表 4】

例Ⅲ

名称	パラメータ	値
a1	コア半径	24.4
a2	トレンチ始め	28
a3	トレンチ終り	40.72
a4	クラッド半径	62.5
d1	屈折率	1.470
d2	屈折率	1.457
d3	屈折率	1.449
d4	屈折率	1.457
プロファイル形状	アルファ	2.08
T _w	トレンチ幅	12.72
T _A	トレンチ面積	2746

10

20

【 0 0 4 0 】

30

【表 5】

例IV

名称	パラメータ	値
a1	コア半径	25
a2	トレンチ始め	25.5
a3	トレンチ終り	36.9
a4	クラッド半径	62.5
d1	屈折率	1.472
d2	屈折率	1.457
d3	屈折率	1.449
d4	屈折率	1.457
プロファイル形状	アルファ	2.08
T_w	トレンチ幅	11.4
T_A	トレンチ面積	2235

10

20

【 0 0 4 1 】

30

【表 6】

例V

名称	パラメータ	値
a1	コア半径	25
a2	トレンチ始め	29.4
a3	トレンチ終り	40.75
a4	クラッド半径	62.5
d1	屈折率	1.472
d2	屈折率	1.457
d3	屈折率	1.449
d4	屈折率	1.457
プロファイル形状	アルファ	2.08
T _w	トレンチ幅	11.35
T _A	トレンチ面積	2501

10

20

【 0 0 4 2 】

30

【表 7】

例VI

名称	パラメータ	値
a1	コア半径	25
a2	トレンチ始め	27.7
a3	トレンチ終り	39.1
a4	クラッド半径	62.5
d1	屈折率	1.472
d2	屈折率	1.457
d3	屈折率	1.449
d4	屈折率	1.457
プロファイル形状	アルファ	2.08
T_w	トレンチ幅	11.4
T_A	トレンチ面積	2391

10

20

30

【 0 0 4 3 】

【表 8】

例VII

名称	パラメータ	値
a1	コア半径	25
a2	トレンチ始め	30
a3	トレンチ終り	40
a4	クラッド半径	62.5
d1	屈折率	1.472
d2	屈折率	1.457
d3	屈折率	1.446
d4	屈折率	1.457
プロファイル形状	アルファ	2.08
T _w	トレンチ幅	10
T _A	トレンチ面積	2200

10

20

30

【 0 0 4 4 】

【表 9】

例VIII

名称	パラメータ	値
a1	コア半径	23.5
a2	トレンチ始め	28
a3	トレンチ終り	38.23
a4	クラッド半径	62.5
d1	屈折率	1.470
d2	屈折率	1.457
d3	屈折率	1.449
d4	屈折率	1.457
プロファイル形状	アルファ	2.08
T _w	トレンチ幅	10.23
T _A	トレンチ面積	2129

10

20

30

【0045】

これらの表で与えられる値は、正確な値である。しかし、小さな偏差、例えば+/-2%は、以下に示すものに匹敵する性能結果をやはり与えることになることが当業者によって理解されよう。

【0046】

これらの光ファイバの設計の有効性を示すために、BMPが、上記の例ごとに測定され、以下の表、表IIに与えられる。単位は、ピコ秒毎メートルである。

【0047】

【表 10】

表II

例	状態	MW23	BMP
1	曲がっていない	0.168	0.009
1	曲げられた	0.159	
2	曲がっていない	0.159	-0.002
2	曲げられた	0.161	
3	曲がっていない	0.298	0.069
3	曲げられた	0.229	
4	曲がっていない	0.884	0.054
4	曲げられた	0.83	
5	曲がっていない	0.193	0.026
5	曲げられた	0.167	
6	曲がっていない	0.582	0.188
6	曲げられた	0.394	
7	曲がっていない	0.123	0.004
7	曲げられた	0.119	
8	曲がっていない	0.291	0.06
8	曲げられた	0.231	

10

20

【0048】

これらの設計パラメータのうち2つのパラメータが際立っている。1つは、コア半径である。最適モード保持性能を示す光ファイバは、22～28ミクロンの範囲内のコア半径を有したが、コア半径が7～50ミクロンの範囲内である適切に設計されたMMFも、モード構造の完全性を示すことになることが分かった。トレンチの特性も、BMPの設計において重要なパラメータと考えられる。トレンチ幅 T_w は、少なくとも2.5ミクロンとすべきであり、好ましくは10～13ミクロンとすべきである。

【0049】

トレンチ面積 T_A に関して表現すると、1500～3500ミクロン²の範囲が推奨され、好ましくはこの範囲は、2000～2900ミクロン²である。

30

【0050】

優れたBMPを示す光ファイバを設計できるこの狭い範囲の発見は、極めて予期せぬものである。この普通でない振舞いを示す光ファイバを生産するという設計目標はそれ自体、光ファイバ技術において新規であると考えられる。上記の8つの例のBMPを示す前には、このBMPを有する光ファイバがあり得ることを当技術分野で示すものは存在しなかった。表IIの中で与えられるデータは、BMPについての目標性能指数を示唆する。これらの例の大部分は、曲げられた状態と曲がっていない状態の間で0～23 μm のDMDの値の絶対変化量が0～0.069ピコ秒毎メートルの範囲内である。この測定した性能データに基づいて、目標性能指数は、絶対値0.07ピコ秒毎メートル未満であり、好ましくは0.02ピコ秒毎メートル未満である。

40

【0051】

トレンチ面積 T_A に関して表現すると、500～3500 μm^2 の範囲が推奨され、好ましくはこの範囲は、2000～2900 μm^2 である。

【0052】

本研究におけるコアのデルタ n は、0.0125～0.016である。トレンチ深さ(屈折率深さ)は、幅ほど極めて重要なパラメータではないと思われ、すなわち、より大きい変化量が有用であると思われる。0.0025～0.012の値による内側クラッド(d_2)より低いトレンチ深さ(屈折率差)が推奨され、好ましいトレンチ深さは、内側クラッド(d_2)より低い0.003～0.008である。この差は、次に隣接する内側クラッドから測定される。本明細書で表現される屈折率差は、シリカの屈折率(1.46)

50

に基づく屈折率差に言及している。

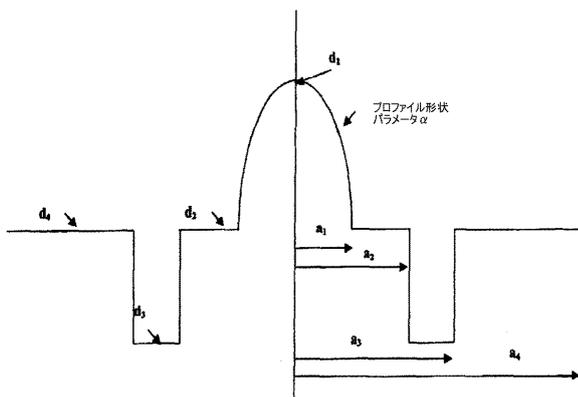
【0053】

上記の光ファイバは、様々な知られた光ファイバ製造技術、例えば、外付け蒸着（OVD）、化学蒸着（CVD）、改良化学蒸着（MCVD）、気相軸蒸着（VAD）、プラズマ強化CVD（PCVD）などのいずれかを用いて製造できる。

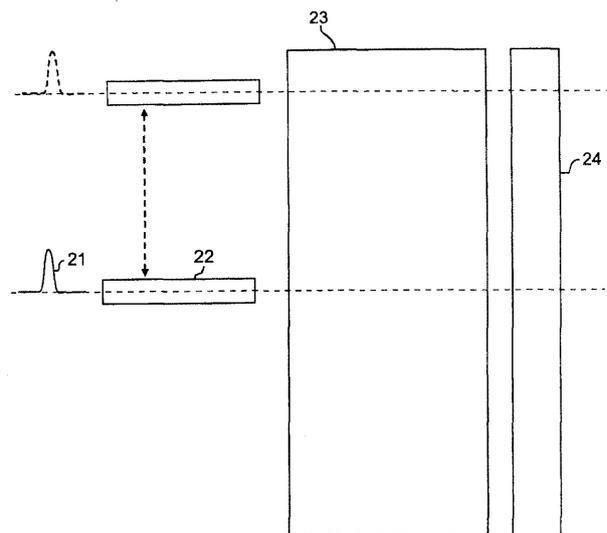
【0054】

当業者は、本発明の様々な追加の変形形態を想到するであろう。技術を進歩させてきた原理およびそれらの均等物に基本的に依拠する本明細書の具体的な教示から逸脱したもの全ては、当然のことながら記載および主張した本発明の範囲内と考えられる。

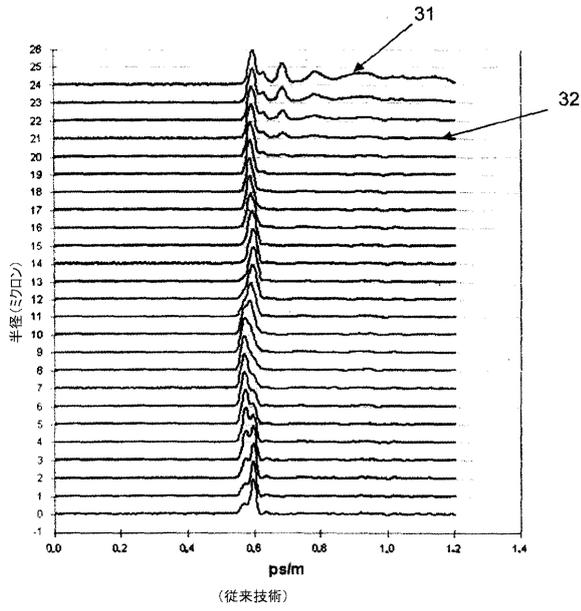
【図1】



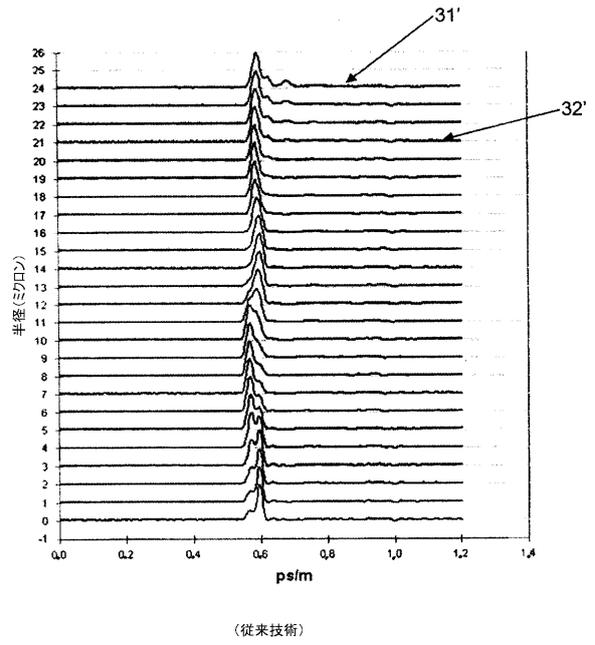
【図2】



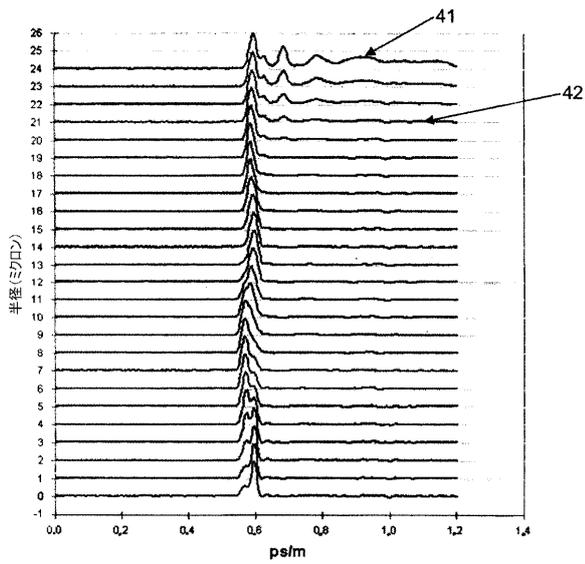
【図 3 a】



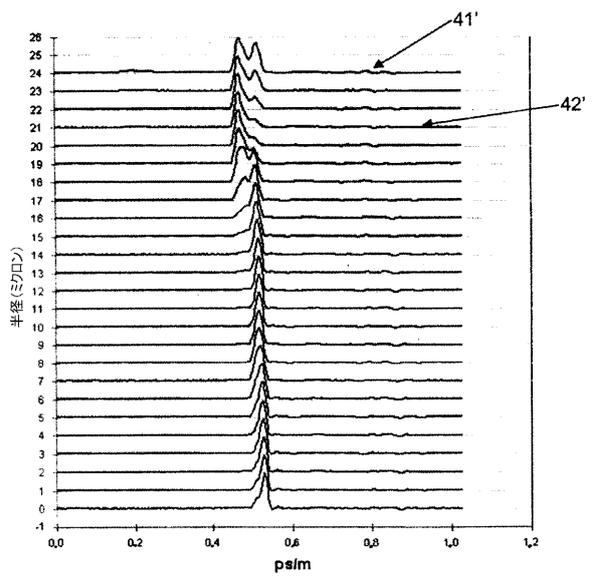
【図 3 b】



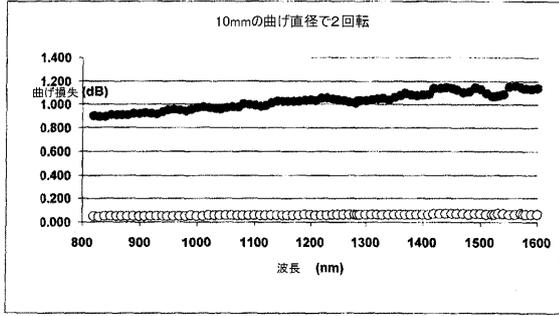
【図 4 a】



【図 4 b】



【 図 5 】



フロントページの続き

(74)代理人 100160967

弁理士 濱 口 岳久

(72)発明者 ジンキー キム

アメリカ合衆国 30092 ジョージア, ノアクロス, アンバーフィールド サークル 409
0

(72)発明者 ジョージ イー. オウランドセン

アメリカ合衆国 01007 マサチューセッツ, ベルチャータウン, チェリル サークル 62

(72)発明者 ダージェッシ シヴラム ヴァイデア

アメリカ合衆国 01550 マサチューセッツ, サウスブリッジ, コロニアル ドライヴ 10

(72)発明者 マン エフ. ヤン

アメリカ合衆国 07922 ニュージャージー, バークレイ ハイ츠, ハイランド サークル
75

(72)発明者 シンリ ジアン

アメリカ合衆国 01545 マサチューセッツ, シュルスバリー, ハイ ストリート 29

Fターム(参考) 2H150 AB03 AD04 AD12 AD16 AD20 AD22 AD23 AD25 AD26 AD37

AH11 AH50

【外国語明細書】

Title of the Invention:

BANDWIDTH-MAINTAINING MULTIMODE OPTICAL FIBERS

Related Application

This application claims the benefit of Provisional Application Serial Number 61/097639, filed September 17, 2008, which application is incorporated herein by reference.

Field of the Invention

This invention relates to a family of designs for optical fibers having robust optical transmission characteristics. More specifically it relates to optical fibers designed to control bend loss while maintaining the modal structure and bandwidth of the fibers.

Background of the Invention

The tendency of optical fibers to leak optical energy when bent has been known since the infancy of the technology. It is well known that light follows a straight path but can be guided to some extent by providing a path, even a curved path, of high refractive index material surrounded by material of lower refractive index. However, in practice that principle is limited, and optical fibers often have bends with a curvature that exceeds the ability of the light guide to contain the light.

Controlling transmission characteristics when bent is an issue in nearly

every practical optical fiber design. The initial approach, and still a common approach, is to prevent or minimize physical bends in the optical fiber. While this can be largely achieved in long hauls by designing a robust cable, or in shorter hauls by installing the optical fibers in microducts, in all cases the optical fiber must be terminated at each end. Thus even under the most favorable conditions, bending, often severe bending, is encountered at the optical fiber *terminals*.

Controlling bend loss can also be addressed by the physical design of the optical fiber itself. Some optical fibers are inherently more immune to bend loss than others. This was recognized early, and most optical fibers are now specifically designed for low loss. The design features that are typically effective for microbend loss control involve the properties of the optical fiber cladding, usually the outer cladding. Thus ring features or trench features, or combinations thereof, are commonly found at the outside of the optical fiber refractive index profiles to control bend losses. See for example, United States Patents 4,691,990 and 4,852,968, both incorporated herein by reference.

Performance issues for optical fibers under bend conditions have generally been considered to involve generalized optical power loss, due to leakage of light from the optical fiber at the location of the bend. In most cases, the influence of modal structure changes on bend loss is overlooked.

In single mode optical fibers general power loss is the primary consideration, because all leakage involves light in the fundamental mode of the optical fiber. However, in multimode optical fiber the modal structure affects the

loss, with higher order modes suffering more loss than lower order modes. In addition, bends in the optical fiber cause modes to transform and mix.

Accordingly, while a signal in a lower order mode may survive some bending, if it is converted to a higher order mode it will be more susceptible to bending loss.

The combination of higher order and lower order modes in a multimode optical fiber determines the bandwidth, and thus the signal carrying capacity, of the optical fiber. Bending multimode optical fiber may reduce the signal carrying capacity of the optical system.

The property of differential mode loss in multimode optical fibers can be more serious than generalized optical loss in single mode optical fibers. The latter can be addressed using low cost power amplifiers. However, differential mode loss in multimode optical fibers can lead to complete loss of signals propagating in higher order modes.

Statement of the Invention

We have designed multimode optical fibers that largely preserve the modal structure, and thus the bandwidth, of the optical fiber even in the presence of severe bending.

Brief Description of the Drawing

Fig. 1 is a diagram of an optical fiber refractive index profile showing designations for design parameters used in accordance with an embodiment(s) described below. The figure does not represent any dimensional scale;

Fig. 2 is a schematic diagram of an apparatus for measuring Differential Mode Delay (DMD), a property used for evaluating the performance of the optical fibers of the invention;

Figs. 3a and 3b are DMD pulse traces showing the effect of bending on a conventional multimode optical fiber;

Figs. 4a and 4b, are DMD traces, to be compared with Figs. 3a and 3b, showing the effect of bending on a multimode optical fiber of the invention;

Fig. 5 is a plot of loss vs. wavelength comparing two multimode optical fibers, one a conventional optical fiber and the other designed according to the invention.

Detailed Description

With reference to Fig. 1, dimensional design parameters relevant to the practice of the invention are shown. The vertical reference line, line d1, represents the center of the multimode optical fiber. The same proportionate profile, with different absolute values, will characterize the preforms used to manufacture the optical fibers.

It was discovered that for specific controlled design ratios and dimensions multimode optical fibers can be produced that are essentially immune to moderately severe bends. The modal structure is also largely unaffected by bending, thus leaving the optical fiber bandwidth essentially unimpaired. Ordinary optical fibers demonstrate significant modal structure change when bent because the high order modes escape into the cladding and mid-order

modes mix with into high-order modes causing significant changes in the optical fiber bandwidth. These changes are typically measured as differential mode delay (DMD). DMD techniques and DMD measurements, as related to the invention, will be described in more detail below.

Typical optical fibers, and those to which this invention pertains, have a multimode graded index core with a maximum refractive index in the center of the core and with a decreasing refractive index toward the core/cladding boundary. The decreasing refractive index generally follows a parabolic curve defined by the following equations:

$$(1) d_c(r) = d_1 [1 - 2\Delta(r/a_1)^\alpha]^{1/2}$$

$$(2) \Delta = (d_1^2 - d_2^2)/2d_1^2$$

Parameters in the following description relate to those indicated in Fig. 1. The quantities d_1 and d_2 are the refractive indices of the core at $r = 0$, and $r = a_1$, respectively. The quantity a_1 is the maximum core radius and represents the core to clad boundary. The value α is the core shape profile parameter and defines the shape of the graded refractive index profile. The core is surrounded with cladding of radius denoted by a_2 . For conventional multimode fibers, the refractive index is maintained at a value of d_2 in the radial range between a_1 and a_2 .

A specific design feature of this invention is that a portion within the cladding region near the core-cladding boundary (denoted between radial position a_2 and a_3 in Figure 1), referred to herein as a "trench", has a refractive

index value of d_3 that is different from d_2 , with a closely controlled width (a_3-a_2) within the cladding region. Additionally, the outer cladding refractive index d_4 may be different from the inner value as denoted by d_2 . This negative refractive index region (trench) having depths of index (d_3-d_2 , d_3-d_4), width (a_3-a_2), together with its location relative to the graded index core (a_2-a_1) contributes to preserving the modal structure of the inventive fiber when the fiber is tightly bent (as defined later in this description). Thus a new parameter for optical fiber performance is realized and is designated "bend mode performance" ("BMP"), where BMP is the absolute difference between the 0-23 micron DMD in a bent state and in an unbent state. As defined by the DMD test procedure known as the TIA-FOTP-220 Standard, both the BMP and DMD parameters are expressed in picoseconds per meter, or ps/m.

In formulating designs meeting the inventive criteria, the properties of the trench, in particular the trench width $a_3 - a_2$ and the shoulder width a_2-a_1 were found to have a large effect on the BMP of optical fibers. In fact, within specific ranges of trench widths and shoulder widths, the mode structure of the optical fiber can remain essentially unchanged even when subjected to extreme bending.

As mentioned previously, relevant changes are typically measured as differential mode delay (DMD). DMD is the difference in propagation time between light energies traveling along different modes in the core of a multimode optical fiber. Multimode optical fiber supports multiple light paths, or modes, that carry light from the transmitter to the receiver. When the energy for a laser pulse is transmitted into the optical fiber, it divides into the different paths. As the

energy travels along the multimode optical fiber, DMD will cause the pulse to spread before reaching the receiver. If pulses spread excessively, they may run together. When that occurs, the receiver is not able to discern digital ones from zeros, and the link may fail. This is a problem for 1 Gb/s systems, and limits existing 10 Gb/s systems, and anticipated 40 and 100 Gb/s systems, to only modest distances using conventional multimode fiber. Multimode optical fiber DMD is measured in pico-seconds per meter (ps/m) using an OFS-Fitel developed high-resolution process. This process transmits very short, high-powered 850 nm pulses at many positions, separated by very small steps, across the core of the optical fiber. The received pulses are plotted and the data is used with specially developed OFS software to represent the DMD.

OFS-Fitel pioneered the use of high-resolution DMD as a quality control measure in 1998 to ensure laser bandwidth of production multimode fibers. High-resolution DMD was adopted by international standards committees as the most reliable predictor of laser bandwidth for 10 Gb/s, and emerging 40 and 100 Gb/s, multimode optical fiber systems. OFS-Fitel co-authored the DMD test procedure known as TIA/EIA-455-220. That procedure has become an industry standard and is widely used on production optical fiber to assure reliable system performance for 1 and 10 Gb/s systems. The procedure is also being incorporated in the standards for 40 and 100 Gb/s systems of the future.

The TIA/EIA-455-220 test procedure is schematically represented in Fig. 2. The core 23 of the multimode fiber to be tested is scanned radially with a single-mode fiber 22 using 850nm laser emitting pulses 21. The

corresponding output pulses at the other end of the fiber core are recorded integrally by the high speed optical receiver on the basis of their locations in relation to the radial position of the single mode fiber. This provides precise information on the modal delay differences between the selectively-excited mode groups at the various radial offsets. The DMD scans are then evaluated on the basis of the multiple scans.

DMD scan data is shown in Figs. 3a, 3b, 4a, and 4b.

Figs. 3a and 3b demonstrate how the modal structure in other multimode fiber designs changes when bent tightly compared to the unbent condition.

Fig. 3a shows a DMD pulse trace demonstrating the modal structure of a multimode optical fiber (MMF) in an unbent condition as defined by the TIA/EIA-455-220 Standard. Notice the outer mode structure between radial positions 21 micron (shown at 31) and 24 micron (shown at 32). One can see that at these positions, multiple pulses begin to appear.

Fig. 3b is a DMD pulse trace demonstrating the modal structure of the same MMF shown in Fig. 3a except bent around a 12.8 mm diameter mandrel (defined here as the tightly bent condition). Here the outer mode structure between radial positions 21 micron (shown at 31') and 24 micron (shown at 32') has undergone a significant change between the unbent condition of Fig.3a and the bent condition. Specifically, the pulses shown between 21 and 24 microns in Fig. 3b have diminished significantly, thus showing a substantial loss in signal power.

In the comparison of Figs. 3a and 3b, it is evident that the outer mode structure and the DMD value computed for the 0-23 radial have changed dramatically. In addition, the power traveling in the outer modes (at 19 microns and beyond) has dropped significantly, suggesting that the modal energy has been redistributed and more power is escaping into cladding modes. This redistribution of modal energy has two effects. One is that the fiber loss, when bent substantially, increases, as is well known. However, not observed prior to this invention are the effects on modal structure relative to the bent state.

In bit error rate (BER) systems testing, it has been shown that the modal bandwidth and additional loss in other MMF designs and in standard fibers, results in significant penalties that cause the link to fail ($>10^{-12}$ BER) when measured under tight bends. With fibers made by the present invention, it has been shown that the penalty in BER systems testing is greatly minimized compared to tests done with other MMF and standard fibers, and the link operates with better than 10^{-12} BER.

Figs. 4a and 4b demonstrate that the modal structure for multimode fiber designs according to this invention does not change when bent tightly compared to the unbent condition.

Fig. 4a shows a DMD pulse trace demonstrating the modal structure of MMF made in accordance with an embodiment of the invention. The pulse trace of the MMF is shown in Fig. 4a in the unbent condition. Notice the outer mode structure between radial positions 21 micron (shown at 41) and 24 micron

(shown at 42). Similar to the DMD pulse trace shown in Fig. 3a, pulses begin to appear in the outer mode structure.

Fig. 4b shows a corresponding DMD pulse trace demonstrating the modal structure of the same MMF as shown in Fig. 4a, except bent around a 12.8 mm diameter mandrel (the tightly bent condition). Notice the outer mode structure between radial positions 21 micron (shown at 41') and 24 micron (shown at 42') remains unchanged between the unbent and bent conditions. Thus not only is the power loss of the MMF shown in Figs. 4a and 4b minimal in the bent state, but the original modal structure remains essentially unchanged and intact.

Having preserved the modal structure, a comparison of the measured added power loss for the MMF fiber (upper curve) vs. standard fiber (lower curve) is illustrated in Fig. 5. The measurement is of the bend loss of each fiber with 2 turns around a 10 mm diameter mandrel.

It should be evident that, due to the preservation of high bandwidth in addition to low bend loss, the improved multimode optical fibers of the invention need not be restricted to short jumpers. This optical fiber enables applications in, for example, high transmission links; up to 2km at 1Gb/s, up to 550m at 10Gb/s, and estimated up to 100m at 40 Gb/s or 100 Gb/s.

Table 1 provides recommended parameters associated with the refractive-index profile shown in Fig. 1. Within the ranges provided for these parameters, multimode optical fibers with high bandwidth and ultra-low bend loss may be simultaneously achieved.

TABLE 1

Designation	Parameter	Minimum	Maximum	Optimum
a1	Core radius μm	7	50	25 +/- 4
(a2-a1)/a1	Ratio	0.1	0.7	0.2 +/- 0.1
(a3-a2)/a1	Ratio	0.3	0.6	0.4 +/- 0.1
a4	Clad. radius μm	30	250	62.5 +/- 20
d1-d4	Index Δ	-0.019	0.032	0.0137 +/- 0.01
d2-d4	Index Δ	-0.01	0.01	0 +/-0.005
d3-d4	Index Δ	-0.05	-0.0025	-0.011 +/- 0.008
d4	Index	1.397	1.511	1.46 +/- 0.03
Profile shape	Alpha	1.6	2.2	2.08 +/- 0.12

As mentioned earlier, one of these parameters, the trench width (expressed in Table I as normalized to the core radius by the equation $(a_3 - a_2)/a_1$) was found to be especially important in determining the bend mode preservation of optical fibers. For example, selecting the midpoint of the range for core radius (28.5 microns) of the ranges in Table I, when the minimum value for the parameter $(a_3 - a_2)/a_1$ is 0.3 the corresponding trench width is 8.55 microns. Expressed as the area of the trench in a cross section of the optical fiber the area is 1913 microns².

The following specific examples give parameters for optical fibers with demonstrated excellent BMP. Dimensions are in micrometers; area in micrometers squared.

EXAMPLE I

Designation	Parameter	Value
a1	Core radius	26.12
a2	Trench start	28.85
a3	Trench end	38.9
a4	Clad radius	62.5
d1	Index	1.472
d2	Index	1.457
d3	Index	1.449
d4	Index	1.449
Profile shape	Alpha	2.08
T _w	Trench width	10.05
T _A	Trench area	2139

EXAMPLE II

Designation	Parameter	Value
a1	Core radius	28.4
a2	Trench start	28.81
a3	Trench end	40.71
a4	Clad radius	62.5
d1	Index	1.472
d2	Index	1.457
d3	Index	1.449
d4	Index	1.457
Profile shape	Alpha	2.08
T _w	Trench width	11.9
T _A	Trench area	2608

EXAMPLE III

Designation	Parameter	Value
a1	Core radius	24.4
a2	Trench start	28
a3	Trench end	40.72
a4	Clad radius	62.5
d1	Index	1.470
d2	Index	1.457
d3	Index	1.449
d4	Index	1.457
Profile shape	Alpha	2.08
T _w	Trench width	12.72
T _A	Trench area	2746

EXAMPLE IV

Designation	Parameter	Value
a1	Core radius	25
a2	Trench start	25.5
a3	Trench end	36.9
a4	Clad radius	62.5
d1	Index	1.472
d2	Index	1.457
d3	Index	1.449
d4	Index	1.457
Profile shape	Alpha	2.08
T_w	Trench width	11.4
T_A	Trench area	2235

EXAMPLE V

Designation	Parameter	Value
a1	Core radius	25
a2	Trench start	29.4
a3	Trench end	40.75
a4	Clad radius	62.5
d1	Index	1.472
d2	Index	1.457
d3	Index	1.449
d4	Index	1.457
Profile shape	Alpha	2.08
T _w	Trench width	11.35
T _A	Trench area	2501

EXAMPLE VI

Designation	Parameter	Value
a1	Core radius	25
a2	Trench start	27.7
a3	Trench end	39.1
a4	Clad radius	62.5
d1	Index	1.472
d2	Index	1.457
d3	Index	1.449
d4	Index	1.457
Profile shape	Alpha	2.08
T _w	Trench width	11.4
T _A	Trench area	2391

EXAMPLE VII

Designation	Parameter	Value
a1	Core radius	25
a2	Trench start	30
a3	Trench end	40
a4	Clad radius	62.5
d1	Index	1.472
d2	Index	1.457
d3	Index	1.446
d4	Index	1.457
Profile shape	Alpha	2.08
T _w	Trench width	10
T _A	Trench area	2200

EXAMPLE VIII

Designation	Parameter	Value
a1	Core radius	23.5
a2	Trench start	28
a3	Trench end	38.23
a4	Clad radius	62.5
d1	Index	1.470
d2	Index	1.457
d3	Index	1.449
d4	Index	1.457
Profile shape	Alpha	2.08
T _w	Trench width	10.23
T _A	Trench area	2129

The values given in these tables are precise values. However, it will be understood by those skilled in the art that minor departures, e.g. +/- 2%, will still provide performance results comparable to those indicated below.

To demonstrate the effectiveness of these optical fiber designs, the BMP was measured for each Example above and is given in the following table, Table II. The units are picoseconds per meter.

Table II

Example	Condition	MW23	BMP
1	Unbent	0.168	0.009
1	Bent	0.159	
2	Unbent	0.159	-0.002
2	Bent	0.161	
3	Unbent	0.298	0.069
3	Bent	0.229	
4	Unbent	0.884	0.054
4	Bent	0.83	
5	Unbent	0.193	0.026
5	Bent	0.167	
6	Unbent	0.582	0.188
6	Bent	0.394	
7	Unbent	0.123	0.004
7	Bent	0.119	
8	Unbent	0.291	0.06
8	Bent	0.231	

Two of these design parameters stand out. One is the core radius. It was found that optical fibers exhibiting the best mode preservation performance had a core radius in the range of 22 to 28 microns, but that a properly designed MMF with a core radius in the range 7-50 microns will also exhibit modal structure integrity. The properties of the trench are also considered important parameters in designing a BMP. The trench width T_W should be at least 2.5 microns, and preferably between 10 and 13 microns.

Expressed in terms of trench area, T_A , a range of 1500 to 3500 microns² is recommended, and preferably the range is 2000 to 2900 microns².

The discovery of this narrow range, in which optical fibers may be designed that show excellent BMP, is highly unexpected. The design goal of producing optical fibers that exhibit this unusual behavior is itself considered to be novel in optical fiber technology. Prior to demonstrating the BMP of the eight examples described above there existed no indication in the art that optical fibers with this BMP were possible. The data provided in Table II suggests a target figure of merit for BMP. For most of the examples, the absolute variation in the 0-23 um DMD values between bent and unbent conditions is within the range of 0 to 0.069 picoseconds per meter. Based on this measured performance data, a target figure of merit is an absolute value less than 0.07 picoseconds per meter, and preferably less than 0.02 picoseconds per meter.

Expressed in terms of trench area, T_A , a range of 500 to 3500 microns² is recommended, and preferably the range is 2000 to 2900 microns².

The core delta n in this work is between 0.0125 and 0.016. The trench

depth (index depth) appears to be a less vital parameter than the width, i.e., larger variations appear to be useful. A trench depth (index difference) that is lower than the inner cladding (d_2) by a value of 0.0025 to 0.012 is recommended, with a preferred trench depth being between 0.003 to 0.008 lower than the inner cladding (d_2). The difference is measured from the next adjacent inner cladding. Refractive index differences expressed in this specification refer to index differences based on the index of silica (1.46).

The optical fibers described above may be fabricated using any of a variety of known optical fiber manufacturing techniques, for example, Outside Vapor Deposition (OVD), Chemical Vapor Deposition (CVD), Modified Chemical Vapor Deposition (MCVD), Vapor Axial Deposition (VAD), Plasma enhanced CVD (PCVD), etc.

Various additional modifications of this invention will occur to those skilled in the art. All deviations from the specific teachings of this specification that basically rely on the principles and their equivalents through which the art has been advanced are properly considered within the scope of the invention as described and claimed.

1. A multimode optical fiber comprising a core region with a first radius a_1 and a profile alpha, an inner cladding extending radially from a_1 to second radius a_2 , a trench extending radially from second radius a_2 to a third radius a_3 , and an outer cladding extending to a fourth radius a_4 , wherein a maximum refractive index of the core region is d_1 , a refractive index of the inner cladding is d_2 , a refractive index of the trench is d_3 , and a refractive index of the outer cladding is d_4 , wherein:

a_1 is 7-50 microns;

alpha is 1.6 to 2.2;

$(a_2 - a_1) / a_1$ is 0.1 to 0.7;

$(a_3 - a_2) / a_1$ is 0.3 to 0.6;

a_4 is 30 - 250 microns;

$d_1 - d_4$ is -0.019 to 0.032;

$d_2 - d_4$ is -0.01 to 0.01;

$d_3 - d_4$ is -0.05 to -0.0025; and

d_4 is 1.4 to 1.511.

2. The optical fiber of claim 1 wherein:

a_1 is 21-29 microns;

alpha is 1.96 to 2.2;

$(a_2 - a_1) / a_1$ is 0.1 to 0.3;

$(a_3 - a_2) / a_1$ is 0.3 to 0.5;

a_4 is 62.5 +/- 20 microns;
 $d_1 - d_4$ is 0.0037 to 0.0237;
 $d_2 - d_4$ is -0.005 to 0.005;
 $d_3 - d_4$ is -0.019 to -0.003; and
 d_4 is 1.43 to 1.49.

3. A multimode optical fiber that exhibits a change in differential mode delay measured as bend mode performance of less than 0.07 picoseconds per meter from an unbent state to bent state, given a reference state of 2 turns around a 10 mm diameter.

4. The optical fiber of claim 3 with a core having a first radius a_1 , a trench extending radially from a second radius a_2 to a third radius a_3 , and an outer cladding, and wherein:

a_1 : 22 - 29 micrometers; and
 $a_3 - a_2$: at least 2.5 microns.

5. The optical fiber of claim 4 wherein $a_3 - a_2$ is in the range 10-13 microns.

6. The optical fiber of claim 5 additionally having an inner cladding extending radially from first radius a_1 to second radius a_2 , and wherein $(a_3 - a_2) / a_1$ is in the range 0.1 to 0.7.

7. The optical fiber of claim 3 wherein the optical fiber has a core region and a trench, and the trench has an area in the range 500-3500 micrometers².
8. The optical fiber of claim 3 wherein the optical fiber has a core region and a trench, and the trench has an area in the range 2000 - 2900 micrometers².
9. The optical fiber of claim 7 wherein the trench has a refractive index that is at least 0.0025 below an inner cladding of the optical fiber.
10. The optical fiber of claim 7 wherein the trench has a refractive index of 1.452 or less.
11. The optical fiber of claim 1 wherein:
 - a₁ is 26.12 microns +/- 2%;
 - a₂ is 28.85 +/- 2%;
 - a₃ is 38.9 +/- 2%;
 - a₄ is 62.5 +/- 2%;
 - d₁ is 1.472 +/- 2%;
 - d₂ is 1.457 +/- 2%;
 - d₃ is 1.449 +/- 2%;
 - d₄ is 1.457 +/- 2%; and
 - alpha is 2.08 +/- 2%.

12. The optical fiber of claim 3 comprising a core region with a first radius a_1 and a profile alpha, an inner cladding extending radially from a_1 to second radius a_2 , a trench extending radially from second radius a_2 to a third radius a_3 , and an outer cladding extending to a fourth radius a_4 , wherein a maximum refractive index of the core region is d_1 , a refractive index of the inner cladding is d_2 , a refractive index of the trench is d_3 , and a refractive index of the outer cladding is d_4 , wherein:

a_1 is 28.4 microns +/- 2%;

a_2 is 28.81 +/- 2%;

a_3 is 40.71 +/- 2%;

a_4 is 62.5 +/- 2%;

d_1 is 1.472 +/- 2%;

d_2 is 1.457 +/- 2%;

d_3 is 1.449 +/- 2%;

d_4 is 1.457 +/- 2%; and

alpha is 2.08 +/- 2%.

13. The optical fiber of claim 1 wherein:

a_1 is 24.4 microns +/- 2%;

a_2 is 28 +/- 2%;

a_3 is 40.72 +/- 2%;

a_4 is 62.5 +/- 2%;

d_1 is 1.470 +/- 2%;

d_2 is 1.457 +/- 2%;

d_3 is 1.449 +/- 2%;

d_4 is 1.457 +/- 2%; and

alpha is 2.08 +/- 2%.

14. The optical fiber of claim 3 comprising a core region with a first radius a_1 and a profile alpha, an inner cladding extending radially from a_1 to second radius a_2 , a trench extending radially from second radius a_2 to a third radius a_3 , and an outer cladding extending to a fourth radius a_4 , wherein a maximum refractive index of the core region is d_1 , a refractive index of the inner cladding is d_2 , a refractive index of the trench is d_3 , and a refractive index of the outer cladding is d_4 , wherein:

a_1 is 25 microns +/- 2%;

a_2 is 25.5 +/- 2%;

a_3 is 36.9 +/- 2%;

a_4 is 62.5 +/- 2%;

d_1 is 1.472 +/- 2%;

d_2 is 1.457 +/- 2%;

d_3 is 1.449 +/- 2%;

d_4 is 1.457 +/- 2%; and

alpha is 2.08 +/- 2%.

15. The optical fiber of claim 1 wherein:

a_1 is 25 microns \pm 2%;

a_2 is 29.4 \pm 2%;

a_3 is 40.75 \pm 2%;

a_4 is 62.5 \pm 2%;

d_1 is 1.472 \pm 2%;

d_2 is 1.457 \pm 2%;

d_3 is 1.449 \pm 2%;

d_4 is 1.457 \pm 2%; and

alpha is 2.08 \pm 2%.

16. The optical fiber of claim 1 wherein:

a_1 is 25 microns \pm 2%;

a_2 is 27.7 \pm 2%;

a_3 is 39.1 \pm 2%;

a_4 is 62.5 \pm 2%;

d_1 is 1.472 \pm 2%;

d_2 is 1.457 \pm 2%;

d_3 is 1.449 \pm 2%;

d_4 is 1.457 \pm 2%; and

alpha is 2.08 \pm 2%.

17. The optical fiber of claim 1 wherein:

a_1 is 25 microns \pm 2%;

a_2 is 30 +/- 2%;
 a_3 is 40 +/- 2%;
 a_4 is 62.5 +/- 2%;
 d_1 is 1.472 +/- 2%;
 d_2 is 1.457 +/- 2%;
 d_3 is 1.446 +/- 2%;
 d_4 is 1.457 +/- 2%; and
alpha is 2.08 +/- 2%.

18. The optical fiber of claim 1 wherein:

a_1 is 23.5 microns +/- 2%;
 a_2 is 28 +/- 2%;
 a_3 is 38.23 +/- 2%;
 a_4 is 62.5 +/- 2%;
 d_1 is 1.470 +/- 2%;
 d_2 is 1.457 +/- 2%;
 d_3 is 1.449 +/- 2%;
 d_4 is 1.457 +/- 2%; and
alpha is 2.08 +/- 2%.

19. The optical fiber of claim 3 comprising a core region with a first radius a_1 and a profile alpha, an inner cladding extending radially from a_1 to second radius a_2 , a trench extending radially from second radius a_2 to a third radius a_3 ,

and an outer cladding extending to a fourth radius a_4 , wherein a maximum refractive index of the core region is d_1 , a refractive index of the inner cladding is d_2 , a refractive index of the trench is d_3 , and a refractive index of the outer cladding is d_4 , wherein:

a_1 is 25 microns +/- 2%;

a_2 is 34 +/- 2%;

a_3 is 37.6 +/- 2%;

a_4 is 62.5 +/- 2%;

d_1 is 1.472 +/- 2%;

d_2 is 1.457 +/- 2%;

d_3 is 1.451 +/- 2%;

20. The optical fiber of claim 1 wherein the fiber exhibits a change in differential mode delay measured as bend mode performance of less than 0.07 picoseconds per meter from an unbent state to bent state, for a reference bent state of 2 turns around a 10 mm diameter.

21. The optical fiber of claim 1 wherein the fiber is made using a method selected from the group consisting of CVD, OVD, MCVD, PCVD, VAD, and any combinations thereof.

22. The optical fiber of claim 3 wherein the fiber is made using a method selected from the group consisting of CVD, OVD, MCVD, PCVD, VAD and any combinations thereof.

ABSTRACT

The specification describes multimode optical fibers with specific design parameters, i.e., controlled refractive index design ratios and dimensions, which render the optical fibers largely immune to moderately severe bends. The modal structure in the optical fibers is also largely unaffected by bending, thus leaving the optical fiber bandwidth essentially unimpaired. Bend performance results were established by DMD measurements of fibers wound on mandrels vs. measurements of fibers with no severe bends.

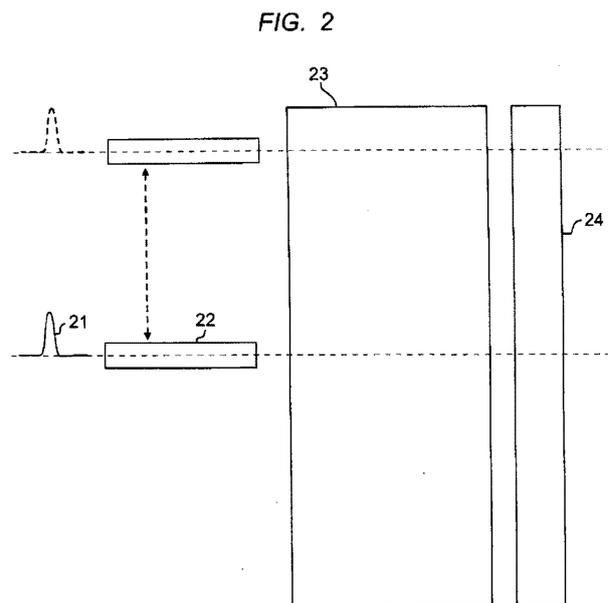
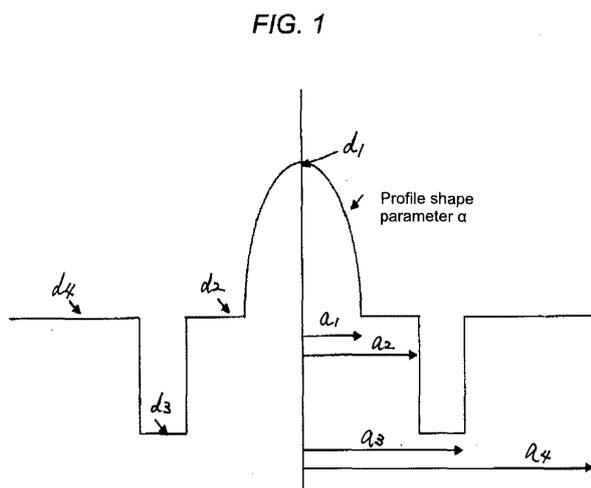
Representative Drawing: Fig. 1

FIG. 3a (prior art)

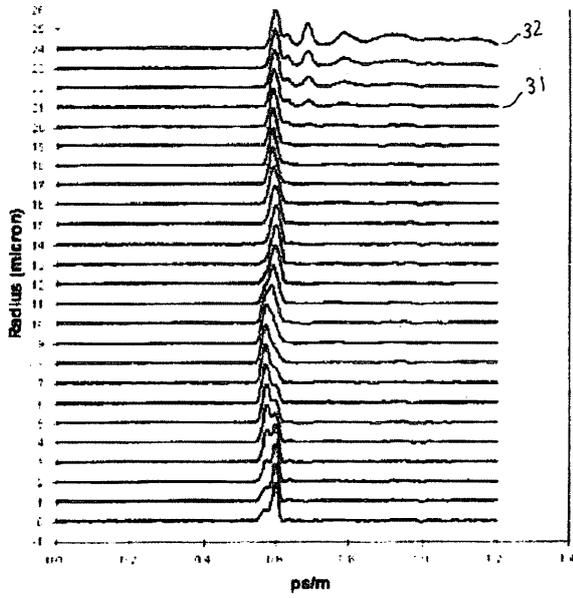


FIG. 3b (prior art)

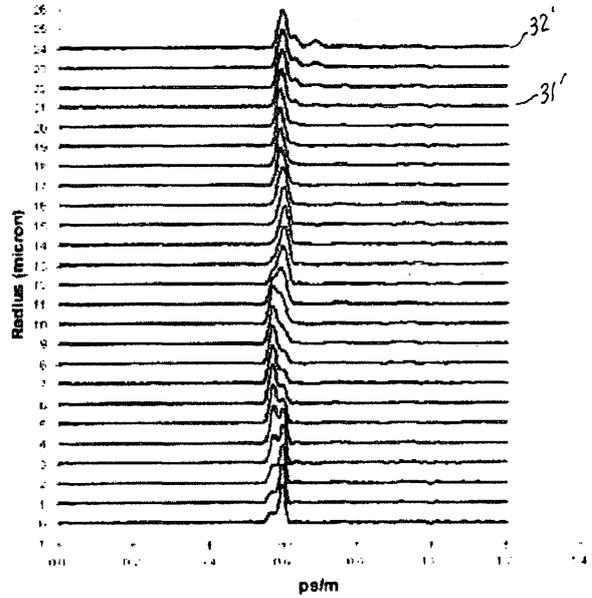


FIG. 4a

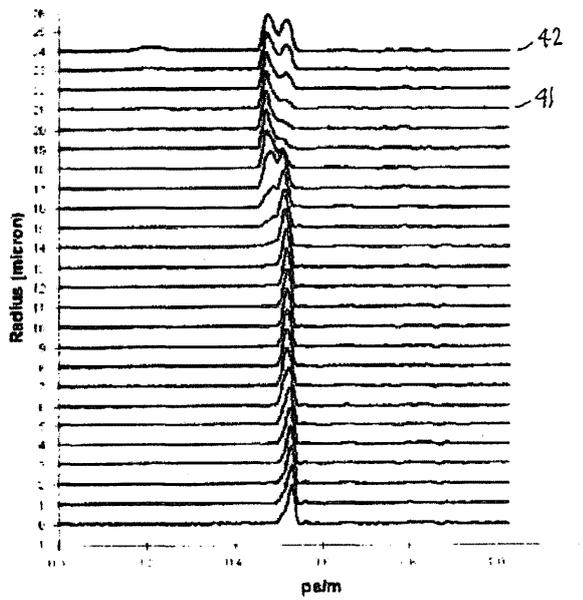


FIG. 4b

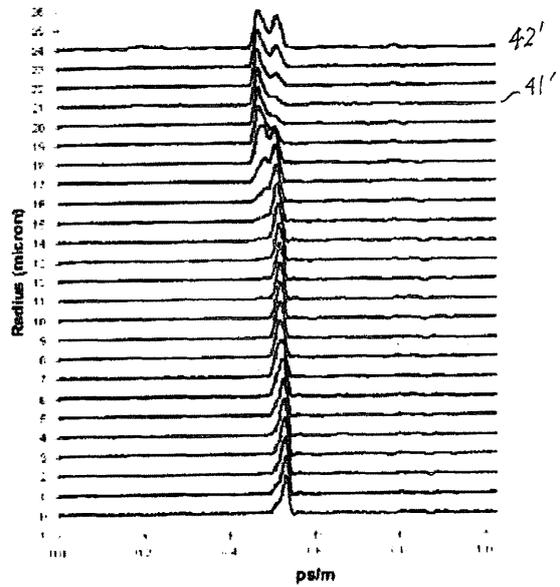


FIG. 5

