



República Federativa do Brasil
Ministério da Indústria, Comércio Exterior
e Serviços
Instituto Nacional da Propriedade Industrial

(11) PI 0215963-5 B1

(22) Data do Depósito: 24/12/2002

(45) Data de Concessão: 13/12/2016



(54) Título: MÉTODO PARA FABRICAR UMA FIBRA ÓPTICA DE DISPERSÃO NÃO NULA

(51) Int.Cl.: C03B 37/027; C03B 37/025; G02B 6/02; G02B 6/036; G02B 6/255

(73) Titular(es): PRYSMIAN CAVI E SISTEMI ENERGIA S.R.L.

(72) Inventor(es): ANTONIO COLLARO; GIUSEPPE FERRI; ALFONSO PANNULLO

“MÉTODO PARA FABRICAR UMA FIBRA ÓPTICA DE DISPERSÃO NÃO NULA”

ARTE RELACIONADA

[01] Os atuais enlaces de comunicação de longa distância usam geralmente multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM) e fibras de zero dispersão ou baixa dispersão para aumentar capacidade e alongar distâncias entre regeneradores de sinal. Entretanto o uso de fibras de transmissão de zero dispersão ou de baixa dispersão em sistemas WDM pode resultar em severa degradação de desempenho, em vista de fenômenos não lineares como mistura de quatro ondas (four-wave mixing (FWM)). A fim de minimizar a FWM, o comprimento de onda de zero-dispersão deveria ser localizado fora das bandas de transmissão, normalmente a banda C (1530-1565 nm) e/ou a banda L (1565-1620 nm). As fibras resultantes, com um montante controlado de dispersão e baixa atenuação na banda de transmissão são chamadas fibras de dispersão deslocada e não nula (non-zero dispersion-shifted (NZD) fibres), especificadas na Recomendação ITU-T G.655. Exemplos de fibras NZD comerciais são TrueWave® (marca registrada de Lucent), LEAF® e MetroCor® (marcas registradas de Corning), e FreeLight® (marca registrada de Pirelli).

[02] Fibras NZD com grande área efetiva, i.e., com área efetiva maior que cerca de $50 \mu\text{m}^2$, como fibras LEAF® e Freelight®, têm o potencial de transmitir sinais com alta potência óptica, reduzindo ao mesmo tempo os efeitos ópticos não lineares. Fibras de grande área efetiva são portanto boas candidatas para redes WDM de alta capacidade, com distâncias longas.

[03] Uma fibra óptica tendo um núcleo segmentado pode prover uma grande área efetiva e ao mesmo tempo limitar os efeitos ópticos não lineares. O pedido de patente U.S. No. 2002/0044755 divulga uma fibra óptica mono-modo tendo uma área efetiva relativamente grande, superior a 45

μm^2 e rampa de dispersão substancialmente nivelada na faixa de operação. A fibra divulgada inclui um perfil de índice de refração com núcleo segmentado.

[04] Patente U.S. No. 6 212 322 divulga uma fibra óptica tendo um perfil de índice de refração com núcleo segmentado, dispersão positiva total em 1530 nm e área efetiva superior a $60 \mu\text{m}^2$.

[05] Em sistemas ópticos, como enlaces de comunicação de longa distância, fibras ópticas normalmente precisam ser emendadas para formar um caminho óptico contínuo para transmissão de luz de um comprimento de fibra para o outro. Muitas vezes as fibras ópticas emendadas são de tipo diferente, como no caso de um caminho óptico em que uma fibra de transmissão é acoplada a uma fibra de compensação de dispersão. Também a extremidade da fibra precisa ser conectada a terminações, como repetidores, transmissores de dados ou medidores de potência. A união de duas fibras ou dois grupos de fibras é geralmente designada como emenda. Quando duas fibras ópticas são unidas, pode ocorrer uma perda de potência óptica através do ponto de união, i.e., uma perda de emenda. Emendar dois tipos diferentes de fibras, i.e., fazer uma emenda híbrida, pode conduzir a uma alta perda de emenda, devida a imperfeição na combinação de diâmetro de campo modal (mode field diameter (MFD)) e geometria de fibra. Mesmo na emenda de dois comprimentos diferentes da mesma fibra, i.e., em uma emenda homogênea, potência óptica pode ser perdida na emenda por falta de alinhamento dos núcleos da fibra e de parâmetros intrínsecos das fibras, como concentricidade núcleo/casca ou ondulação da fibra.

[06] Ondulação da fibra é a curvatura inerente ao longo de um comprimento específico de fibra não revestida e é medida pela rotação da extremidade da fibra não suportada, em torno do eixo da fibra e medição da deflexão a partir da horizontal. A deflexão da fibra, tipicamente medida em microns, é convertida em raio de curvatura, usualmente expresso em metros. Ondulação da fibra é considerada um parâmetro importante para o

desempenho da emenda, juntamente com a concentricidade núcleo/casca, que define quão bem o núcleo está centrado na região de casca do vidro e o diâmetro da casca.

[07] Várias técnicas foram desenvolvidas ao longo dos anos para limitar os efeitos danosos da perda de emenda. Duas técnicas, comumente usadas, são a emenda com fusão envolvendo a fusão em conjunto das extremidades das fibras e a emenda mecânica que usa um dispositivo de acoplamento mecânico para manter juntas as extremidades das fibras. Emenda permanente de fibras ópticas monomodo é tipicamente feita por emenda com fusão.

[08] Fibras NZD são tipicamente fabricadas com perfis de índice de refração (RIPs) mais complexos que os de fibras monomodo padronizadas. O RIP descreve a variação do índice de refração do vidro ao longo do raio da fibra óptica. Devido a seu projeto físico mais complexo, fibras NZD são consideradas como sendo mais afetadas por parâmetros críticos como condições e procedimentos de emenda. M. Adcox em "*Splicing and fiber assembly compatibility for non-zero dispersão-shifted and standard single-mode fiber*" (Compatibilidade de emenda e junção para fibras de dispersão deslocada e não nula e monomodo padrão), apresentado em NOC/EC 2000, descreve estudos de emenda para fibras monomodo e fibras NZD usando um dispositivo de emenda de alinhamento ativo. A perda em emenda é considerada mais sensível ao ângulo de clivagem da extremidade na emenda de uma fibra NZD do que no caso de fibra monomodo padrão. M. E. White e S. A. Cooper em "*Splice loss in non-zero dispersão-shifted fibres*" (Perda em emenda para fibras de dispersão deslocada e não nula), publicado em IWCS proceedings, p. 891 (1998), relatam estudos de perda em emenda para fibras LEAF® manufaturadas por Corning com MFD entre 9,48 e 9,92 μm . É dito que fibras LEAF® apresentam menores perdas em emenda com sistemas de alinhamento ativo que outros projetos de fibras NZD. Uma fibra NZD

projetada com grande área efetiva e baixa perda em emenda é apresentada em "*A new design for non-zero dispersão-shifted fiber (NZ-DSF) with a large area over $100\mu\text{m}^2$ and low bending and splice loss*" (Novo projeto para fibra de dispersão deslocada e não nula (NZ-DSF) com grande área efetiva e baixa perda de curvatura e em emenda) por S. Yin et al, Optics Communications 177 (2000), p. 225. Cálculos de perda em emenda são relatados para uma emenda com fibra monomodo convencional.

[09] Minimização de atenuação de sinal na banda transmissão durante a passagem da luz ao longo da fibra óptica é uma das questões cruciais no projeto e manufatura de fibra ópticas. Absorção e espalhamento Rayleigh são as duas causas importantes de perda de sinal. A perda na transmissão é muito influenciada pela tensão aplicada à fibra óptica em sua fabricação no estágio de estiramento da preforma de fibra óptica com aquecimento. Durante o estiramento a preforma é aquecida até a temperatura ótima para obtenção da desejada tensão de estiramento.

[010] Tajima K. em "*Low loss óptica fibers realized by reduction of Rayleigh scattering loss*" (Fibras ópticas de baixa perda obtida por redução de espalhamento Rayleigh), OFC '98 Technical Digest, p. 305, relata um aumento do coeficiente de espalhamento Rayleigh com o aumento da temperatura de estiramento em fibras monomodo de núcleo $\text{GeO}_2\text{-SiO}_2$. O coeficiente de espalhamento Rayleigh em temperatura relativamente baixa, i.e., 1800°C , e sem aumento da tensão foi medido como $0,78 \text{ dB/km} \cdot \mu\text{m}^4$.

[011] Patente U.S. 6 427 044 divulga uma fibra óptica compreendendo um núcleo dopado com Ge cujo valor máximo do índice de refração relativo, Δ_{max} , não é inferior a 0,8 %. No caso de uma fibra óptica em que o núcleo é dopado com alta concentração de GeO_2 , o aumento de perda por espalhamento Rayleigh devido a dopagem com GeO_2 pode ficar problemático. Um decréscimo em perda na transmissão é relatado quando a tensão de estiramento aumenta de 13 a $28,5 \text{ kg/mm}^2$ para fibras ópticas de

núcleo segmentado tendo $\Delta_{\max}$ de 1,5% e de 2,5%. A fim de reduzir a perda devida a dopagem com GeO_2 é sugerido que a tensão de estiramento deveria ser aumentada.

[012] O pedido de patente U.S. No. 2001/0046358 divulga uma fibra óptica de núcleo segmentado com um segmento de núcleo dopado com F uma região de casca dopada com F, que contém primeira e segunda porções tendo dispersões cromáticas positiva e negativa, respectivamente, dispostas alternativamente na direção longitudinal, para gerenciamento da dispersão. Porções de dispersão positiva e negativa são obtidas por mudança da tensão de estiramento na direção longitudinal de 90 g para 40 g.

SUMÁRIO DA INVENÇÃO

[013] A diferença em índice de refração entre núcleo e casca da fibra óptica, que é produzida por dopagem com GeO_2 ou outros dopantes aumentadores do índice, pode provocar tensão interna devida à variação radial do coeficiente de dilatação térmica, causada pela variação da composição da fibra. Tensão interna é, também, construída em fibras ópticas durante o processo de estiramento por causa da desigualdade de viscosidade entre o núcleo e a casca. A tensão interna é congelada na fibra óptica após o resfriamento e pode induzir mudança permanente no índice de refração final. A tensão interna devida à desigualdade de viscosidade é proporcional à tensão de estiramento aplicada.

[014] Pequenas variações em condições de processo durante a fabricação de fibras ópticas dentro das especificações de produto resultam em fibras produzidas tendo parâmetros físicos e geométricos que podem variar dentro de uma certa faixa. Assim a emenda de duas fibras dentro da especificação de produto pode ser afetada por desigualdade em geometria ou MFD. Este tipo de emenda será designada como emenda híbrida, como no caso de emendas de tipos diferentes de fibras.

[015] Métodos de emenda para emendas permanentes, como emenda

com fusão, geralmente envolvem aquecimento das pontas de fibra, que serão unidas, até temperaturas que são suficientemente altas para amolecer o vidro e permitir que ele flua. Inventores observaram que o aquecimento pode induzir uma modificação do RIP da fibra na região próxima ao ponto de emenda, i.e., na região afetada pelo aquecimento. Eles verificaram que modificações drásticas do RIP após emenda estavam presentes em fibras ópticas que tinham sido estiradas com tensões relativamente altas. Ao contrário, fibras estiradas com tensões relativamente baixas apresentavam pequena mudança em RIP após emenda.

[016] Os inventores presumem que a tensão congelada da fibra óptica na região próxima ao ponto de emenda é pelo menos parcialmente aliviada durante o aquecimento, ocasionando assim uma mudança de RIP após a emenda com fusão. Como a mudança de RIP é local, i.e., no comprimento de fibra próximo ao ponto de emenda, a fibra emendada será opticamente não homogênea devido à diferença de RIP ao longo da fibra, causando assim perdas ópticas devidas a reflexão ou difusão interna da luz. Os inventores supõem que uma tensão de estiramento relativamente baixa reduz a tensão congelada da fibra e assim limita a variação de RIP após a emenda.

[017] Para reduzir as perdas de emenda em uma fibra óptica, os inventores descobriram que a tensão de estiramento não deve ser maior que 150 g, preferivelmente não maior que 100 g. No modo de realização de máxima preferência, a tensão de estiramento fica entre 60 e 100 g.

[018] A fibra óptica da presente invenção tem uma região de núcleo e uma região externa de casca, tendo a região de núcleo um RIP do tipo de núcleo segmentado, cada segmento tendo em perfil de índice de refração particular. O RIP do núcleo compreende três segmentos de núcleo e um segmento de casca interna. Em particular, o núcleo da fibra contém um segmento central, um primeiro segmento anular adjacente ao segmento

central, um segundo segmento anular adjacente ao primeiro segmento anular, e um segmento interno de casca envolvendo o segundo segmento anular. A diferença percentual de índice de refração entre o segmento i e a região da casca externa, i.e., o delta de índice $\Delta_i \%$, é aqui definido pela equação

$$\Delta_i \% = 100 \times (n_i - n_c) / n_c \quad (1)$$

em que n_i é o índice de refração máximo do segmento i e n_c é o índice de refração da região de referência, que é tomada como sendo a região uniforme da casca externa, feita tipicamente de vidro de sílica substancialmente não dopado. Um segmento de forma conhecida, e.g., um segmento do tipo Gaussiano ou um segmento de índice em degrau, pode ser caracterizado por seu delta de índice e, se necessário, por um ou mais outros parâmetros, como o raio central ou a largura de curva. Geralmente, cada ponto de um segmento tem um índice de refração relativo associado.

[019] Cada um dos segmentos do núcleo tem um índice de refração relativo não negativo, o delta de índice do segmento central, $\Delta_0 \%$, sendo maior que o índice relativo dos outros segmentos. Portanto o delta de índice $\Delta_0 \%$ corresponde ao índice relativo máximo $\Delta_{\max} \%$ da fibra. O delta de índice do segundo segmento anular, $\Delta_2 \%$, é maior que o delta de índice do primeiro segmento anular, $\Delta_1 \%$. As relações entre os deltas de índices dos segmentos do núcleo são:

$$\Delta_0 \% > \Delta_2 \% > \Delta_1 \% \geq 0$$

$$\Delta_2 \% > \Delta_3 \% \geq 0$$

em que $\Delta_3 \%$ é o delta de índice do segmento interno da casca.

[020] Além da descoberta dos inventores de ser a perda de emenda fortemente relacionada com a tensão de estiramento, outras importantes propriedades ópticas, como a atenuação de sinal ao longo da fibra, também dependem da tensão. Os inventores ficaram cientes que para obter baixa atenuação de sinal a máxima diferença positiva no índice de refração entre o núcleo e a casca, i.e., o índice relativo máximo, $\Delta_{\max} \%$, deveria ser menor que

um certo valor que depende da tensão de estiramento. Eles verificaram que $\Delta_{\max}\%$ não deveria ser maior que cerca de 0,84% para fibras ópticas estiradas em tensões não maiores que 200 g e não maior que cerca de 0,80% for tensões não superiores a 150 g. Para tensões de estiramento não maiores que 100 g, $\Delta_{\max}\%$ deveria ser preferivelmente não maior que cerca de 0,73%. Em particular, para tensões de estiramento na faixa de cerca de 150-200 g, $\Delta_{\max}\%$ deveria ser preferivelmente de cerca de 0,80% a 0,84%; para tensões de estiramento na faixa de cerca de 100-150 g, $\Delta_{\max}\%$ deveria ser preferivelmente de cerca de 0,73% a 0,80%, e para tensões de estiramentos na faixa de cerca de 60 g a 100 g, $\Delta_{\max}\%$ deveria ser preferivelmente de cerca de 0,64% a 0,73%.

[021] Parâmetros de núcleo da fibra óptica da presente invenção são preferivelmente selecionados para obter uma fibra NZD tendo comprimento de onda de dispersão zero, λ_0 compreendido entre cerca de 1430 e 1510 nm. Os inventores reconheceram que a fim de obter uma fibra óptica de núcleo segmentado NZD estirada com tensões não maiores que 200 g, o segmento central deveria ter índice relativo $\Delta_0\%$ na faixa de cerca de 0,64% a 0,84% e o raio central e a largura do segundo segmento anular deveriam estar na faixa de cerca de 5,5-7,5 μm e de 1,7-3,0 μm , respectivamente. Preferivelmente, para fibras ópticas estiradas com tensões não maiores que 150 g, o raio central do anel externo deveria estar na faixa de cerca de 6.7 to 7.5 μm .

[022] Para tensões de estiramentos não maiores que 100 g, $\Delta_0\%$ deveria estar preferivelmente na faixa de cerca de 0,64% a 0,73%. Mais preferivelmente, para fibras estiradas com tensões não maiores que 100 g, o raio central do anel externo deveria estar na faixa de cerca de 7,1 a 7,5 μm .

[023] Uma redução da tensão de estiramento normalmente implica em aumento da temperatura do forno a temperaturas de tipicamente mais de 1900°C. Os inventores reconheceram que uma temperatura de estiramento relativamente alta pode ocasionar um aumento de defeitos estruturais no

material de fibra óptica, como defeitos de centros de oxigênio não ligados em ponte e radical peróxido. Hidrogênio penetrando a fibra óptica pode reagir com estes defeitos e criar grupos hidroxila que são prejudiciais para o desempenho da fibra óptica.

[024] Os inventores notaram que é vantajoso dopar a casca interna da fibra óptica com uma concentração relativamente baixa de germânio, com delta de índice $\Delta_3\%$ compreendido entre 0,02% e 0,04%, de modo a reduzir a permeabilidade de hidrogênio da fibra óptica. Mais preferivelmente, o índice relativo da casca interna fica na faixa de cerca de 0,021 % to 0,027%.

[025] Preformas de fibra óptica são estiradas preferivelmente em velocidade compreendida entre cerca de 9 e cerca de 16 m/s.

[026] Em um modo de realização preferido a fibra óptica compreende

um segmento central com índice relativo, $\Delta_0\%$, na faixa de 0,64% a 0,80%, raio central entre 5,5 μm e 7,5 μm e largura a meia altura w_2 de 3,5 μm a 4,3 μm ,

um primeiro segmento anular de delta de índice $\Delta_1\%$ não maior que cerca de 0,1 %, preferivelmente não maior que 0,07%

um segundo segmento anular tendo índice relativo, $\Delta_2\%$ na faixa de 0,11 % a 0,17%, um raio central r_2 de 5,5 to 7,5 μm , e uma largura a meia altura, w_2 , entre cerca de 1,7e cerca de 3,0 μm ,

um segmento de casca interior de delta de índice $\Delta_3\% \geq 0$.

[027] Em um subconjunto deste modo de realização, o anel externo tem um perfil alfa. O perfil alfa preferido é aquele em que α fica na faixa de cerca de 4 a cerca de 7.

[028] Em outro subconjunto deste modo de realização, o núcleo da fibra compreende um segmento de casca interior adjacente ao segundo segmento anular tendo um delta de índice positivo, $\Delta_3\%$, compreendido entre 0,02% e 0,04%, preferivelmente entre 0,021% e 0,027%.

[029] Esta estrutura de núcleo provê uma fibra óptica tendo dispersão cromática positiva D a 1550 nm dentro da faixa de 2,0 a 8,5 ps/nm/km, e rampa de dispersão S a 1550 nm na faixa de 0,075 a menos de 0,1 ps/nm²/km. Preferivelmente, RIPs são selecionados para prover uma área efetiva, A_{eff} , de cerca de 60 a 90 μm^2 . Dispersão zero fica preferivelmente na faixa de cerca de 1430 a 1510 nm.

BREVE DESCRIÇÃO DOS DESENHOS

[030] FIG. 1 é um diagrama esquemático ilustrando um sistema de estiramento de fibra de acordo com um modo de realização da presente invenção.

[031] FIG. 2 é um diagrama do perfil de índice de refração (RIP) de uma fibra óptica de núcleo segmentado de acordo com um modo de realização preferido da presente invenção.

[032] FIG. 3 é um diagrama do RIP de uma fibra óptica de núcleo segmentado conhecida.

[033] FIG. 4 é um gráfico mostrando a perda em emenda a 1550 nm como função da tensão de estiramento para emenda homogênea de fibras ópticas da Fig. 2 e de fibras ópticas da Fig. 3.

[034] FIG. 5 é um gráfico mostrando a perda em emenda a 1550 nm, como função da tensão de estiramento para emenda híbrida de diferentes fibras ópticas da Fig. 2 e de fibras ópticas da Fig. 3.

DESCRIÇÃO DETALHADA

[035] A fibra óptica foi estirada a partir de um blank de preforma. A preforma de fibra óptica foi produzida preferivelmente por deposição externa de vapor (OVD). Em um primeiro estágio, partículas de vidro foram depositadas em um mandril cilíndrico rotativo, preferivelmente feito de material cerâmico, como alumina. Partículas de vidro eram principalmente compostas de óxido de silício (SiO_2) dopadas com outros compostos, como óxido de germânio (GeO_2), que modificam o índice de refração de SiO_2 . O

fluxo de reagentes foi variado durante a deposição, por exemplo, por alteração da concentração ou tipo de dopante, de modo a obter o desejado RIP. O mandril foi, então removido, deixando um furo central na preforma porosa (soot preform). A preforma porosa foi desidratada e então sinterizada para obter um blank de núcleo consolidado que irá finalmente formar o núcleo e a porção interna da casca, a partir daqui referida como casca interna da fibra óptica. Desidratação foi realizada em uma atmosfera de gás inerte compreendendo Cl_2 para eliminar íons hidróxido ou moléculas de água da preforma porosa. O blank de núcleo consolidado tendo um furo central de diâmetro inferior ao do furo existente após a remoção do mandril foi colocado em um forno para fundir uma de suas extremidades inferiores [sic]. Durante o aquecimento do blank de núcleo consolidado o furo central foi evacuado o que provocou o colapso de suas paredes em processo similar ao descrito em US 4 810 276. O material de vidro fundido resfriou formando um componente cilíndrico alongado que foi esticado para baixo por um dispositivo de tração, preferivelmente do tipo descrito em WO 01/49616. O componente alongado produzido pelo estiramento foi cortado em vários bastões, que serão designados como bastões de núcleo. Cada bastão de núcleo serviu como um substrato para a deposição química de partículas de vidro que finalmente formaram a casca externa da fibra. Este processo de deposição consistia em depositar sobre o bastão do núcleo partículas de vidro compostas principalmente de partículas de sílica, de modo a obter uma preforma porosa. A preforma porosa foi desidratada e consolidada com um processo similar ao que foi efetuado para a vitrificação da preforma porosa de núcleo. A preforma foi subsequenteiramente estirada de modo a formar a fibra óptica.

[036] Se bem que, em um modo de realização preferido, a produção de preforma foi efetuada por processo OVD, é entendido que a invenção não se limita a preformas fabricadas pelo processo OVD. A preforma pode também ser feita por deposição a vapor axial (VAD), deposição a vapor

químico modificado (MCVD), método de bastão em tubo ou outros métodos.

[037] A Figura 1 ilustra um exemplo de torre de estiramento de fibra óptica (10) para fabricar fibra óptica de acordo com a presente invenção. Um blank de preforma 11 foi carregado em um forno 12, por exemplo, um forno de grafita, mantido em determinada temperatura. Um resfriador 13 foi colocado sob o forno para resfriar a fibra óptica. O resfriador pode, por exemplo, ser um resfriador cilíndrico, em que um gás de resfriamento, como hélio, flui sobre a fibra. Um sensor de diâmetro 20 pode ser provido abaixo do forno para monitoração contínua do diâmetro externo da fibra. O diâmetro típico de fibra era de cerca de 125µm. A fibra foi então revestida com uma primeira camada de revestimento por meio de uma unidade de revestimento 14 que continha um reservatório 14a contendo a tinta de revestimento, por exemplo, um material uretano – acrilato e uma unidade de cura 14b, por exemplo, um forno de raio UV para reticulação do revestimento. Uma segunda unidade de revestimento opcional 15 incluindo um reservatório 15a e uma unidade de cura 15b proporcionava uma camada de revestimento secundário sobre a fibra. Um mecanismo de tração 19 foi localizado abaixo das unidades de revestimento. O mecanismo de tração puxava a fibra do blank de preforma aquecido e a fibra era enrolada em um carretel (não mostrado). Um medidor de tensão 16 era preferivelmente colocado abaixo do forno de estiramento para medir a tensão da fibra nua. Um dispositivo de fiação 17 para fiar a fibra óptica pode ser opcionalmente colocado após as unidades de revestimento.

[038] As condições de estiramento são determinadas, em larga medida pela temperatura do forno, a tensão de estiramento e a velocidade de estiramento da fibra. A fim de controlar as condições de estiramento, malhas de re-alimentação entre a temperatura do forno e a tensão ou velocidade de estiramento podem ser implementadas, por exemplo, usando um medidor de tensão, um medidor de diâmetro e um pirômetro no interior do forno.

[039] A fibra óptica da invenção é do tipo NZD com λ_0 preferivelmente contido entre cerca de 1430 e 1510 nm. A fibra óptica é projetada para ter atenuação suficientemente baixa para permitir comunicação de longa distância pelo estiramento da fibra com tensões inferiores a 150g. Preferivelmente a fibra óptica deveria apresentar baixa atenuação e bom desempenho óptico com tensões de estiramento não superiores a 100g. O RIP é do tipo de núcleo segmentado e compreende 3 segmentos de núcleo e um segmento de casca interna. Todos os segmentos têm índice relativo não negativo e o segmento central tem um índice relativo $\Delta_0\%$ que é maior que o índice relativo dos outros segmentos e assim corresponde ao índice relativo máximo $\Delta_{\max}\%$.

[040] O diagrama da figura 2 ilustra o RIP de um grupo de perfis de acordo com a presente invenção. O RIP compreende 3 segmentos 21, 22, 23 e uma casca interna 24. O RIP pode ser expresso pela equação,

$$\Delta n(r)\% = \Delta_0\% \cdot \exp[-\frac{1}{2} (r/\sigma_0)^2] + \Delta_2\% \cdot \exp(-\frac{1}{2} |r-r_2/\sigma_2|^\alpha) + \Delta_3\% \cdot U(r-r_3), \quad (2)$$

em que $\Delta_0\%$, $\Delta_2\%$ e $\Delta_3\%$ são os índices relativos do segmento central, centrado próximo da linha de centro do núcleo, do segundo segmento anular, isto é, o anel externo, e do anel interno respectivamente. $U(r-r_3)$ é uma função unitária que é igual a unidade para $r \geq r_3$, com r estendendo praticamente até a borda externa do núcleo (no exemplo da figura 2 a borda externa é de 10,5 μm) e a zero para $r < r_3$, sendo r_3 o raio interno da casca interna que corresponde aproximadamente ao raio externo do anel externo $r_2 + \sigma_2$. O segmento central foi modelado com uma Gaussiana enquanto que o segundo segmento anular foi modelado com uma super – Gaussiana de ordem maior que 2. Raio r_2 é o raio central ou o raio médio do anel externo; σ_0 e σ_2 são os spreads das curvas em relação ao segmento central e ao anel externo, respectivamente. Para este tipo de RIPs $\Delta_1\%$ é conservado menor que 0,1%, preferivelmente inferior 0,07%. Da modelagem de perfil, apareceu que $\Delta_1\%$, se conservado dentro das faixas estabelecidas, não influencia significativamente o perfil. Portanto,

espera-se que pequenos valores negativos de $\Delta_1\%$ não devem influenciar as propriedades da fibra.

[041] O segmento central 21 tem um índice relativo $\Delta_0\%$ dentro da faixa de cerca de 0,64 % a cerca de 0,80 % e uma largura de pico $w_0 = 2\sigma_0(2\ln 2)^{1/2}$ calculado em meia altura que é compreendida entre cerca de 3,5 μm e cerca de 4,3 μm . Embora o segmento central tenha sido modelado por uma Gaussiana, deve ser entendido que pequenas variações na forma de perfil do segmento não influenciariam significativamente as propriedades da fibra resultante. Por exemplo, um segmento central em forma de triângulo tendo largura e delta de índice adequados poderia ser usado em vez dele.

[042] O primeiro segmento anular 22, adjacente ao segmento central 20 tem índice relativo $\Delta_1\%$ não maior que 0,1 %, preferivelmente não maior que 0,07 %. O segundo segmento anular 23 adjacente ao primeiro segmento anular, também aqui referido como anel externo, tem um índice relativo $\Delta_2\%$ na faixa de cerca de 0,11 % a cerca de 0,17 % e seu raio r_2 fica na faixa de cerca de 5,5 μm a 7,5 μm . O anel externo foi modelado com uma super – Gaussiana tendo um α na faixa de cerca de 4 a 7. A largura do anel externo, $w_2 = 2\sigma_2(2\ln 2)^{1/\alpha}$ calculado em meia altura é de cerca de 1,7 μm a cerca de 3,9 μm para α na faixa de 4 – 7. O spread da curva do anel externo é de cerca de 0,8 a cerca de 1,4 μm .

[043] Deve ser entendido que pequenas variações na forma de perfil do anel externo não afetarão de maneira notável as propriedades da fibra. Por exemplo, o anel externo poderia ser modelado com um perfil em degrau.

[044] O segmento de casca interna 24 tem um delta de índice $\Delta_3\%$ tal que $\Delta_2\% \geq \Delta_3\% \geq 0$. Preferivelmente, o segmento de casca interna 24 tem um índice relativo $\Delta_3\%$ na faixa de cerca de 0,02 % a 0,04 %, mais preferivelmente de 0,021 a 0,027 %. A região saliente da casca interna pode ser incluída no projeto do núcleo para reduzir a permeabilidade da fibra a hidrogênio. Preferivelmente a largura da casca interna, tomada como a

diferença entre o raio externo da casca interna e o raio externo do anel externo $r_2 + \rho_2$ fica na faixa de cerca de 2 a 4 μm . Deve ser entendido que pequenos desvios d a forma em degrau da casca interna não modificarão as propriedades ópticas da fibra resultante. Por exemplo, um perfil em degrau ligeiramente curvo pode ser considerado para o segmento de casca interna.

[045] Uma depressão no perfil de índice pode estar presente na linha de centro do núcleo da fibra, a depressão sendo pelo menos parcialmente devida a difusão de dopantes, que ocorre principalmente durante os processos de desidratação e consolidação.

[046] O RIP da Fig.2 foi obtido por dopagem de vidro SiO_2 com diferentes montantes de germânio para elevar o índice de refração do núcleo e da casca interna.

[047] A Tabela 1 mostra as propriedades ópticas, calculadas usando um modelo computadorizado, de uma fibra óptica tendo os parâmetros de perfil de acordo com a Fig. 2

Tabela 1

Dispersão a 1550 nm (ps/nm km)	2,0- 8,5
Inclinação da dispersão a 1550 nm (ps/nm ² km)	< 0,1
Comprimento de onda de dispersão zero (nm)	1430 - 1510
Diâmetro do campo modal a 1550 nm (μm)	9,0 – 10,5
Área efetiva a 1550 nm (μm^2)	60 - 90
Comprimento de onda de corte do cabo	<1450
Atenuação a 1550 nm (dB/km)	<0,225

[048] Fibras ópticas fabricadas com uma forma RIP apresentaram em média boa resistência a hidrogênio como demonstrado por teste de perda de envelhecimento com hidrogênio.

[049] Desempenho em flexão (bending) de fibras ópticas foi estimado calculando microflexão de acordo com o padrão IEC 62221 TR3 Ed. 1, Método A. Microflexão das fibras ópticas de acordo com a invenção não foi maior que 10 (dB km)/(g/mm).

Exemplo 1

[050] Uma fibra óptica foi modelada usando o formato de perfil de

índice ilustrado na fig. 2. Os parâmetros dos perfis de índice de refração foram os seguintes: $\Delta_0\% = 0,71\%$, $w_0 = 3,90\ \mu\text{m}$, $\Delta_2\% = 0,12\%$, $r_2 = 7,21\ \mu\text{m}$, $w_2 = 2,21\ \mu\text{m}$, $\alpha = 6$, e $\Delta_3\% = 0,021\%$. O RIP é compatível com uma tensão de estiramento de cerca de 90 g. As propriedades ópticas de uma fibra tendo este perfil são dadas na Tabela 2.

Tabela 2

Dispersão a 1550 nm (ps/nm.km)	5,5
Inclinação da dispersão a 1550 nm (ps/nm ² .km)	0,073
Comprimento de onda de dispersão zero (nm)	1476
Diâmetro do campo modal a 1550 nm (μm)	9,5
Área efetiva (μm^2)	71
Comprimento de onda de corte do cabo	1230
Microcurvatura a 1550 nm (dB/km)/(g/mm)	5

Exemplo 2

[051] Uma fibra óptica foi modelada usando o formato de perfil ilustrado na fig. 2. Os parâmetros dos perfis de índice de refração foram os seguintes: $\Delta_0\% = 0,64\%$, $w_0 = 4,05\ \mu\text{m}$, $\Delta_2\% = 0,12\%$, $r_2 = 7,21\ \mu\text{m}$, $w_2 = 2,21\ \mu\text{m}$, $\alpha = 6$, e $\Delta_3\% = 0,021\%$. O RIP é compatível com uma tensão de estiramento de cerca de 90 g. As propriedades ópticas de uma fibra tendo este perfil são dadas na Tabela 3.

Tabela 3

Dispersão a 1550 nm (ps/nm.km)	7,2
Inclinação da dispersão a 1550 nm (ps/nm ² .km)	0,075
Comprimento de onda de dispersão 0 (nm)	1457
Diâmetro do campo modal a 1550 nm (μm)	10,1
Área efetiva (μm^2)	81
Comprimento de onda de corte do cabo	1230
Microcurvatura a 1550 nm (dB/km)/(g/mm)	10

Exemplo 3

[052] Uma fibra óptica foi modelada usando o formato de perfil ilustrado na fig. 2. Os parâmetros dos perfis de índice de refração foram os seguintes: $\Delta_0\% = 0,71\%$, $w_0 = 3,90\ \mu\text{m}$, $\Delta_2\% = 0,12\%$, $r_2 = 7,21\ \mu\text{m}$, $w_2 = 2,27\ \mu\text{m}$, $\alpha = 4$, e $\Delta_3\% = 0,021\%$. Este perfil é compatível com uma tensão de estiramento de cerca de 90 g. As propriedades ópticas de uma fibra tendo este perfil são dadas na Tabela 4.

Tabela 4

Dispersão a 1550 nm (ps/nm.km)	7,2
Inclinação da dispersão a 1550 nm (ps/nm ² .km)	0,073
Comprimento de onda de dispersão 0 (nm)	1477
Diâmetro do campo modal a 1550 nm (μm)	9,5
Área efetiva (μm ²)	71
Comprimento de onda de corte do cabo	1240
Microcurvatura a 1550 nm (dB/km)/(g/mm)	6

Exemplo 4

[053] Uma fibra óptica foi modelada usando o formato de perfil ilustrado na fig. 2. Os parâmetros dos perfis de índice de refração foram os seguintes: $\Delta_0\% = 0,77\%$, $w_0 = 3,67\ \mu\text{m}$, $\Delta_2\% = 0,13\%$, $r_2 = 6,71\ \mu\text{m}$, $w_2 = 2,21\ \mu\text{m}$, $\alpha = 6$, e $\Delta_3\% = 0,021\%$. Este perfil é adequado para uma tensão de estiramento de cerca de 150 g. As propriedades ópticas de uma fibra óptica tendo este perfil são dadas na Tabela 5.

Tabela 5

Dispersão a 1550 nm (ps/nm.km)	4,0
Inclinação da dispersão a 1550 nm (ps/nm ² .km)	0,076
Comprimento de onda de dispersão 0 (nm)	1498
Diâmetro do campo modal a 1550 nm (μm)	9,25
Área efetiva (μm ²)	68
Comprimento de onda de corte do cabo	1235
Microcurvatura a 1550 nm (dB/km)/(g/mm)	4

Exemplo 5

[054] Uma fibra óptica foi modelada usando o formato de perfil ilustrado na fig. 2. Os parâmetros dos perfis de índice de refração foram os seguintes: $\Delta_0\% = 0,73\%$, $w_0 = 3,67\ \mu\text{m}$, $\Delta_2\% = 0,13\%$, $r_2 = 6,71\ \mu\text{m}$, $w_2 = 2,21\ \mu\text{m}$, $\alpha = 6$, e $\Delta_3\% = 0,021\%$. O perfil deste exemplo é adequado para uma tensão de estiramento de cerca de 90 g. As propriedades ópticas de uma fibra óptica tendo este perfil são dadas na Tabela 6.

Tabela 6

Dispersão a 1550 nm (ps/nm.km)	4,1
Inclinação da dispersão a 1550 nm (ps/nm ² .km)	0,076
Comprimento de onda de dispersão 0 (nm)	1496
Diâmetro do campo modal a 1550 nm (μm)	9,5
Área efetiva (μm ²)	71
Comprimento de onda de corte do cabo	1200
Microcurvatura a 1550 nm (dB/km)/(g/mm)	5

Exemplo 6

[055] Uma fibra óptica foi modelada usando o formato de perfil ilustrado na fig. 2. Os parâmetros dos perfis de índice de refração foram os seguintes: $\Delta_0\%$ = 0,73 %, w_0 = 3,63 μm, $\Delta_2\%$ = 0,14 %, r_2 = 5,92 μm, w_2 = 2,63 μm, α = 6, e $\Delta_3\%$ = 0,021 %. Este perfil deste exemplo é adequado para uma tensão de estiramento de cerca de 200 g. As propriedades ópticas de uma fibra óptica tendo este perfil são dadas na Tabela 7.

Tabela 7

Dispersão a 1550 nm (ps/nm.km)	4,9
Inclinação da dispersão a 1550 nm (ps/nm ² .km)	0,08
Comprimento de onda de dispersão 0 (nm)	1489
Diâmetro do campo modal a 1550 nm (μm)	9,2
Área efetiva (μm ²)	6,7
Comprimento de onda de corte do cabo	1280
Microcurvatura a 1550 nm (dB/km)/(g/mm)	4

Exemplo comparativo

[056] O diagrama da Fig. 3 ilustra o RIP de uma fibra óptica tendo um perfil de índice de refração do tipo núcleo segmentado. O perfil de índice de refração tipo núcleo inclui três segmentos, um segmento central 30, um primeiro segmento anular 31 e um segundo segmento anular 32, e uma região interna de casca 33. O segmento central 30 possui um índice de refração relativo $\Delta_0\%$ de 0,76 % e uma largura total w_0 , estimada na meia altura, de cerca de 3,96 μm. O segundo segmento anular 32 possui um índice relativo $\Delta_2\%$ de cerca de 0,32 % centrado em r_2 de cerca de 6,5 μm. A largura w_2 do anel externo, calculada na meia altura, é de cerca de 1,5 μm. A região de casca interna 33 possui um índice de refração que é aproximadamente igual ao de SiO₂ não dopada, isto é, da casca externa.

[057] Fibras ópticas com parâmetros centrados ao redor dos valores dados acima são consideradas como exemplo comparativo. As propriedades ópticas destas fibras ópticas são dadas na tabela 8.

Tabela 8

Dispersão a 1550 nm (nm/ps/km)	3,2-7,7
Diâmetro de campo modal a 1550 nm (μm)	9,1 – 10,0
Comprimento de onda de corte de cabo (nm)	< 1400
Concentricidade média núcleo / casca (μm)	0,23
Ondulação média (m)	23
Atenuação a 1550 nm (dB/km)	< 0,225

[058] A Figura 4 é um gráfico que mostra a dependência da perda em emenda, que foi medida a 1550 nm, da tensão de estiramentos para dois tipos de fibras NZD. Valores foram obtidos tirando-se a média de pelo menos 10 medições de fibras ligadas com elas mesmas, isto é ligação homogênea. Temperatura do forno e tensão de estiramento foram mantidas essencialmente constantes durante o estiramento. A velocidade de estiramento foi de 14 m/s. Um equipamento de emenda e alinhamento do perfil do tipo FS 30 produzido por Fujikura foi empregado para juntar as fibras por alinhamento óptico dos núcleos das fibras. Antes da emenda, as fibras foram descascadas (stripped) e então limpas, mergulhando suas pontas em um banho de álcool com ultrassom. Após limpeza, as extremidades das fibras foram inseridas no splicer e clivadas com um ângulo de clivagem de não mais do que 1 grau, ajustando o limite do alarme de clivagem para 1 grau. Perdas na emenda foram medidas a 1550 nm por refletometria de domínio do tempo óptico bi-direcional, medida em cada extremidade das duas fibras unidas.

[059] Na Fig. 4, círculos abertos indicam os valores para uma fibra tendo um RIP de acordo com a fig. 2. Círculos fechados indicam os valores para uma fibra NZD tendo um RIP como no exemplo comparativo (Fig. 3). Há uma redução notável da perda em emenda com decréscimo da tensão de estiramento. A forte dependência da perda em emenda com a tensão de estiramento é visível para ambos os tipos de fibras, a despeito de sua diferença em RIP. No entanto, fibras tendo um RIP da figura 3 que foram

estiradas em tensões não maiores que 250 g tipicamente apresentaram uma atenuação relativamente alta, isto é, em média não menos que 0,205 dB/km em 1550 nm. Por exemplo, uma fibra com um RIP como no exemplo comparativo e estirada a 150 g apresentou uma atenuação de 0,215 dB/km em 1550 nm. Inversamente, fibras ópticas de acordo com a invenção apresentaram baixa atenuação quando estiradas em tensões não superiores a 150 g. Por exemplo, uma fibra óptica tendo um RIP do tipo mostrado na Fig. 2 com $\Delta_0\%$ de 0,65 % e estirada em uma tensão de 90 g apresentou uma atenuação de 0,195 dB/km em 1550 nm.

[060] Como mostrado na Fig. 4, tensões de 200 g ou menos fornecem perdas em emenda, para emenda homogênea, de não mais que 0,03 dB. Perdas em emenda de menos que 0,02 dB são obtidas para tensão não excedendo o valor de cerca de 150 g.

[061] A Tabela 9 reporta medições experimentais de perda em emenda média medida a 1550 nm para emenda de diferentes tipos de fibras NZD. Para comparação, são fornecidas medições da perda em emenda média de fibras LEAF®. Fibras LEAF® foram selecionadas aleatoriamente em uma população de fibras em que o MFD variava entre 9,5 e 9,9 μm , concentricidade núcleo / casca ficou em média em 0,19 μm , tendo um valor máximo de 0,32 μm , e a ondulação era de 40 m em média, tendo um valor mínimo de 11 m.

Tabela 9

Tipo de fibra	Número de emendas	Tensão (g)	Perda em emenda média (dB)	Desvio padrão	Mínimo (dB)	Máximo (dB)
NZD-A	43	90	0,019	0,011	0,002	0,051
NZD-B	60	150	0,030	0,014	0,004	0,058
NZD-C	142	250	0,038	0,016	0,005	0,106
LEAF®	214	-	0,040	0,022	0,002	0,128

[062] Fibras NZD-A e NZD-B tinham um formato de perfil de índice de refração ilustrado na Fig. 2, estirado em tensões de 90 g e 150 g, respectivamente. 43 junções foram feitas entre fibras NZD-A selecionadas tendo um RIP de acordo com a Fig. 2 e os parâmetros ópticos no interior das

faixas reportados na Tabela 1. 60 junções foram feitas entre fibras NZD-B aleatoriamente selecionadas tendo um RIP de acordo com a Fig. 2 e parâmetros ópticos nas faixas reportados nas tabela 1. O valor médio de ondulação da fibra NZD-A foi de 28 m e sua concentricidade núcleo / casca foi de 0,24 μm . O valor médio de ondulação da fibra NZD-B foi de 24 m e sua concentricidade núcleo / casca foi de 0,29 μm .

[063] As fibras NZD-C tinham uma RIP em conformidade com o mostrado na Fig. 3. Emendas foram realizadas entre fibras NZD-C, que tinham sido selecionadas aleatoriamente de uma população de fibras tendo os parâmetros ópticos nas faixas dadas na Tabela 8. As fibras NZD-C foram estiradas em uma tensão de 250 g. Resultados da Tabela 3 mostram claramente que a perda média em emenda diminui com o decréscimo da tensão de estiramento.

[064] A Fig. 5 é um gráfico mostrando a perda em emenda a 1550 nm versus tensão de estiramento para emenda híbrida de fibras NZD do grupo de perfis de acordo com a Fig. 2 (círculos abertos) e fibras NZD tendo um RIP de acordo com a Fig. 3 (círculos fechados). Perdas em emenda não superiores a 0,03 dB são obtidas para fibras estiradas em tensões não superiores a 150 g.

REIVINDICAÇÕES

1. Método para fabricar uma fibra óptica de dispersão não nula, em que o dito método compreende as etapas de:

formar uma preforma de vidro a partir da qual é estirada uma fibra óptica, tendo a preforma um núcleo e uma casca externa envolvendo o núcleo, a preforma sendo tal que a fibra óptica estirada compreende um núcleo e uma casca externa, e o núcleo compreende um segmento central (21) tendo uma diferença percentual de índice de refração máximo $\Delta_0\%$, um primeiro segmento anular (22) tendo uma diferença percentual de índice de refração máximo $\Delta_1\%$, um segundo segmento anular (23) tendo uma diferença percentual de índice de refração máximo $\Delta_2\%$ e um segmento de casca interna (24) tendo uma diferença percentual de índice de refração máximo $\Delta_3\%$, cada respectiva diferença percentual de índice de refração máximo sendo definida com relação à casca externa da fibra óptica estirada, os segmentos do núcleo sendo selecionados de modo que $\Delta_0\% > \Delta_2\% > \Delta_1\%$ e $\Delta_2\% > \Delta_3\%$, em que o segmento central tem um $\Delta_0\%$ compreendido entre 0,64 % e 0,80 % e o segundo segmento anular tem um raio central r_2 na faixa de 5,5 μm a 7,5 μm ;

aquecer uma região da preforma para permitir estirar uma fibra óptica a partir de lá e estirar a preforma em uma fibra óptica por aplicação de uma tensão de estiramento à região aquecida da preforma, a tensão não sendo superior a 150 g,

caracterizado pelo fato de que a casca exterior é feita de vidro de sílica substancialmente não dopado, $\Delta_1\% \geq 0$, $\Delta_3\% \geq 0$, e o segundo segmento anular possui uma largura a meia altura w_2 na faixa de 1,7 μm a 3,0 μm .

2. Método de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato que r_2 está na faixa de 6,7 μm a 7,5 μm .

3. Método de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato que o segundo segmento anular (23) tem um $\Delta_2\%$ na faixa de 0,11 % a

0,17 %.

4. Método de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato que a tensão de estiramento não é superior a 100 g.

5. Método de acordo com a reivindicação 4, caracterizado pelo fato que a tensão de estiramento está compreendida entre 60 e 100 g.

6. Método de acordo com a reivindicação 4 ou 5, caracterizado pelo fato que $\Delta_0\%$ está compreendido entre 0,64 % e 0,73 %.

7. Método de acordo com qualquer uma das reivindicações 4 a 6, caracterizado pelo fato que r_2 está na faixa de 7,1 μm a 7,5 μm .

8. Método de uma das reivindicações precedentes, caracterizado pelo fato que a fibra óptica é estirada em velocidade na faixa de 9 a 16 m/s.

9. Método de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato que o perfil de índice do segundo segmento anular (23) tem forma de uma super-Gaussiana com α na faixa de 4 a 7.

10. Método de acordo com qualquer uma das reivindicações precedentes, caracterizado pelo fato que a largura a meia altura do segmento central (21) está na faixa de 3,5 a 4,3 μm .

11. Método de acordo com qualquer uma das reivindicações precedentes, caracterizado pelo fato que o índice relativo máximo da casca interna (24) $\Delta_3\%$ é de 0,02 % a 0,04 %.

12. Método de acordo com a reivindicação 11, caracterizado pelo fato que $\Delta_3\%$ é de 0,021 % a 0,027 %.

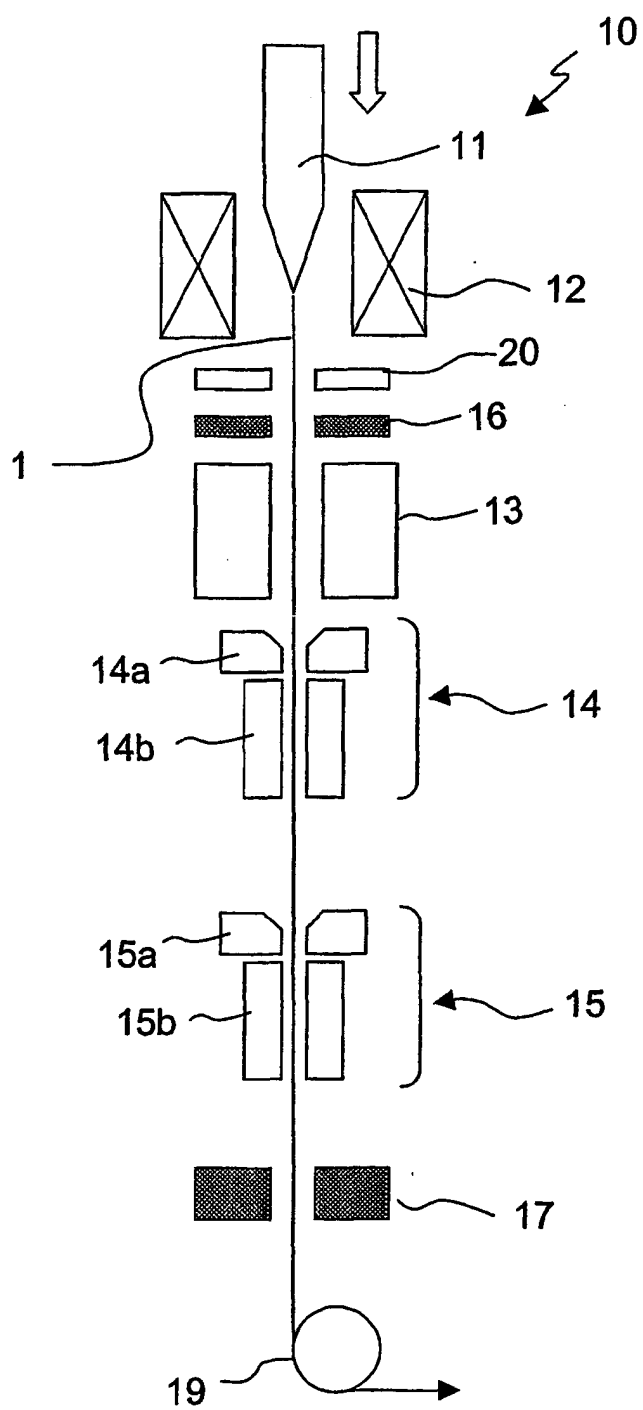


FIG. 1

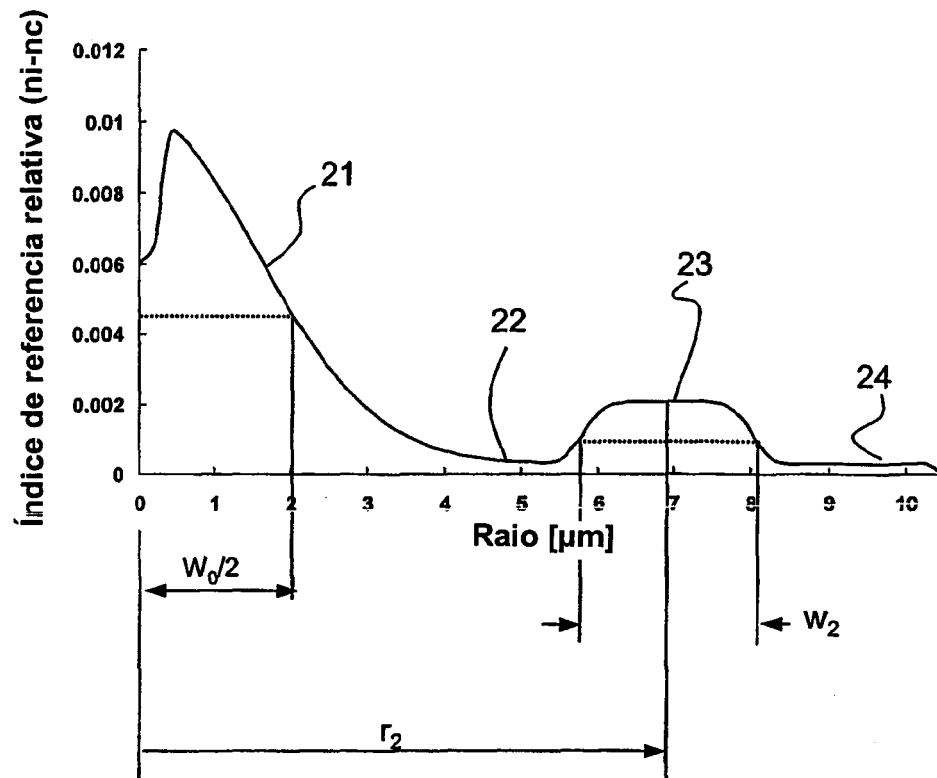


FIG. 2

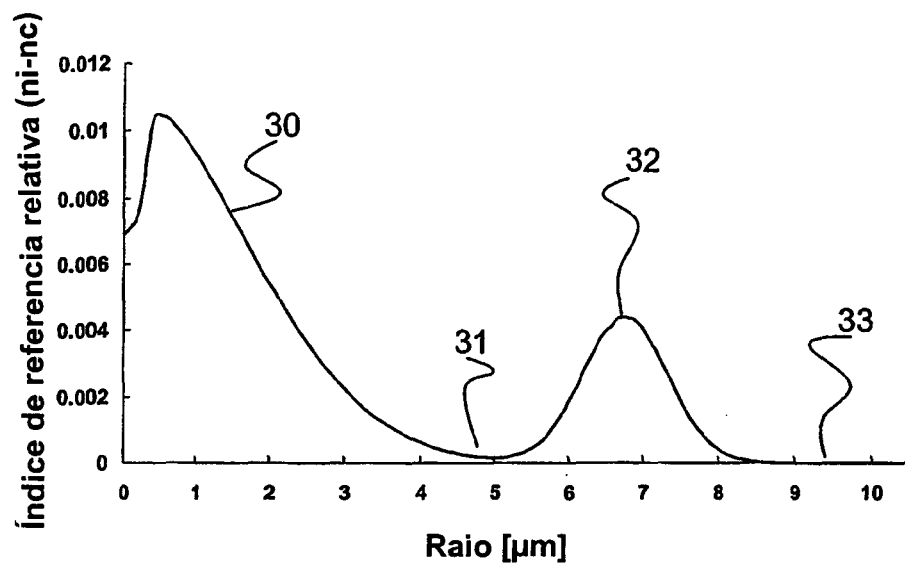


FIG. 3

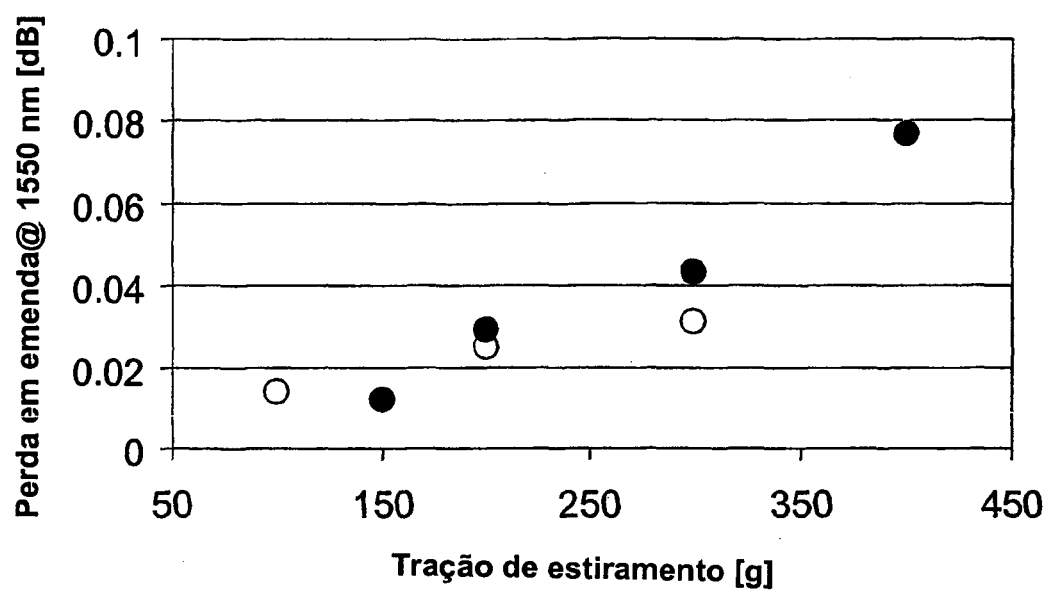


FIG. 4

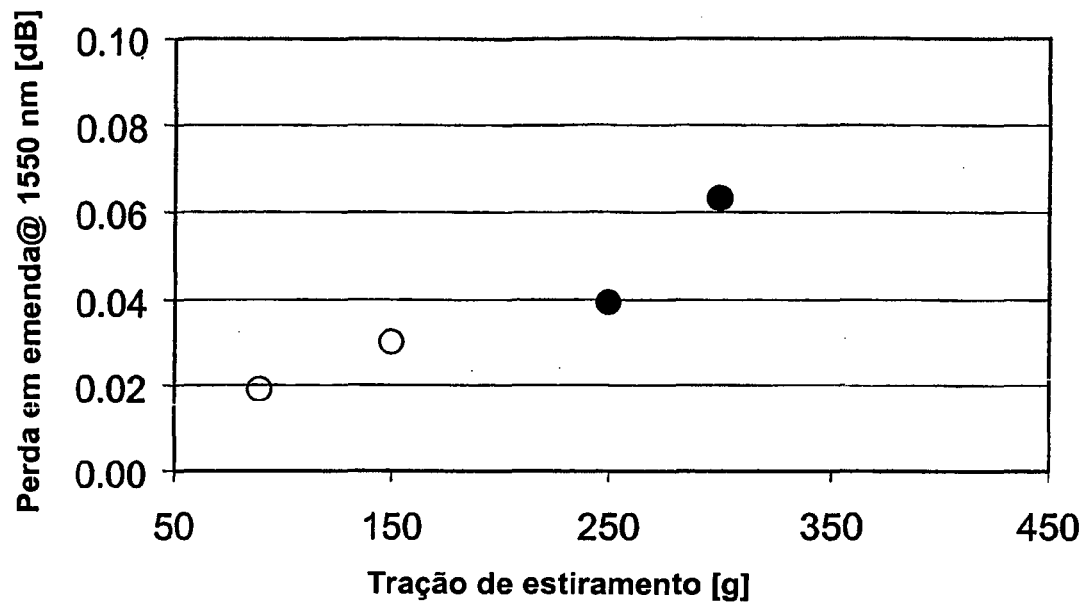


FIG. 5