



República Federativa do Brasil
Ministério da Economia
Instituto Nacional da Propriedade Industrial

(11) PI 1104345-8 B1



(22) Data do Depósito: 13/10/2011

(45) Data de Concessão: 01/12/2020

(54) Título: SISTEMA ÓPTICO BASEADO EM FIBRAS ÓPTICAS AFINADAS E MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE TRAÇÃO COM ALTA SENSIBILIDADE

(51) Int.Cl.: G01L 1/24; G01L 5/04.

(73) Titular(es): UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS - UNICAMP.

(72) Inventor(es): CRISTIANO MONTEIRO DE BARROS CORDEIRO; CLAUDECIR RICARDO BIAZOLI.

(57) Resumo: SISTEMA ÓPTICO BASEADO EM FIBRAS ÓPTICAS AFINADAS E MÉTODO DE MEDIÇÃO DE TRAÇÃO COM ALTA SENSIBILIDADE O presente pedido de patente de invenção refere-se a um Sistema óptico de medição de tração em tempo real, bem como O método de medição de tração. O dispositivo sensor do sistema consiste em uma fibra óptica contendo uma região afiada na qual São gravadas redes periódicas, como Redes de Bragg (FBG) ou Redes de Período Longo (LPG). A medição de tração em tempo real é útil em diversas indústrias e campos de pesquisa, como por exemplo nas áreas petrolíferas, elétrica, aviação, Siderúrgicas e construção civil. Em particular, na área de construção civil existe uma grande necessidade de medir trações mecânicas em, por exemplo, vigas de sustentação, para a determinação da distribuição de massa, ou em pontes de forma a monitorar o tráfego de veículos.

SISTEMA ÓPTICO BASEADO EM FIBRAS ÓPTICAS AFINADAS E MÉTODO DE MEDIÇÃO DE TRAÇÃO COM ALTA SENSIBILIDADE

Campo da invenção

5 O presente pedido de patente de invenção refere-se a um sistema óptico de medição de tração em tempo real, bem como o método de medição de tração. O dispositivo sensor do sistema consiste em uma fibra óptica contendo uma região afinada na qual são gravadas redes periódicas como uma Rede de Bragg (FBG, *Fiber Bragg Grating*) ou uma Rede de Período Longo
10 (LPG, *Long Period Grating*), um dispositivo baseado em interferência multimodal, entre outros.

A medição de tração em tempo real é útil em diversas indústrias e campos de pesquisa, como por exemplo, nas áreas petrolíferas, siderúrgicas, elétrica, aviação e construção civil. Em particular, na área de construção civil
15 existe uma grande necessidade em se medir trações mecânicas em, por exemplo, vigas de sustentação, para a determinação da distribuição de massa, ou em pontes de forma a monitorar o tráfego de veículos.

Fundamentos da invenção

Há cada vez mais a necessidade em se monitorar determinadas
20 grandezas físicas, principalmente trações mecânicas, temperatura e pressão. Atendendo a essa necessidade, existem no mercado sensores que medem tração que utilizam da fibra óptica como sensor e também como canal comunicante, ou seja, ao mesmo tempo que a fibra é o sensor é também a via por onde o sinal é coletado, o que possibilita um sensor compacto e integrado.

25 As fibras ópticas revolucionaram o campo da comunicação óptica e têm sido cada vez mais utilizadas na área de sensoriamento óptico, assunto da presente invenção.

Para utilização da fibra como sensor de alguma grandeza, a luz guiada deve ser modificada pela grandeza a ser mensurada, como por
30 exemplo, pressão, temperatura, tração mecânica e umidade. A figura 1 mostra que, ao se gravar uma estrutura periódica (como FBG ou LPG)

longitudinalmente (3) ao eixo de uma fibra óptica (2), o sinal transmitido por esta fibra terá uma certa resposta espectral (4) caracterizada por um vale relacionado a reflexão (FBG) ou absorção (LPG) de parte do espectro original lançado na fibra que pode então ser comparado com o espectro da luz
5 incidente na fibra (1). Se a fibra estiver sujeita a perturbações do meio externo esta resposta (posição espectral do vale, exemplo na figura 2) será modificada, já que as perturbações afetam a periodicidade e índice de refração da estrutura gravada. Sendo assim, é possível quantificar a perturbação do meio externo ao se observar a mudança da resposta espectral da luz guiada pela fibra. Efeitos
10 baseados em interferência multimodal podem também gerar esta diferença na resposta espectral.

Os sensores baseados em fibras ópticas mais comuns no mercado se baseiam nesta mudança da resposta espectral. Assim envia-se um sinal com espectro largo na extremidade de entrada da fibra e, em seguida,
15 faz-se a leitura deste sinal na extremidade de saída através de um analisador de espectro óptico, filtro espectral ou outros métodos de interrogação.

O artigo ("Strain sensitivity control of fiber Bragg grating structures with fused tapers"; Orlando Frazão, Susana F. O. Silva, Ariel Guerreiro, José L. Santos, Luis A. Ferreira e Francisco M. Araújo; Applied optics; V. 46 (2007))
20 propõe um dispositivo baseado em fibra óptica convencional com região afinada, na qual uma FBG foi gravada na região de maior diâmetro. Esta configuração permite reduzir a sensibilidade do dispositivo à tração aplicada, já que a distribuição de trações se dá em razão dos diâmetros, e a região de maior diâmetro terá menor tração.

25 O artigo ("Temperature-independent strain sensor using a chirped Bragg grating in a tapered optical fibre"; M. G. Xu, L. Dong, L. Reekie, J. A. Tucknott e J. L. Cruz; Electronics Letters, V. 31 (1995)) propõe um sistema de medição de tração baseado em fibra óptica afinada com uma rede FBG gravada na região afinada. Aqui, a medida é feita por reflexão e utiliza da
30 visibilidade do pico para mesurar a sensibilidade a tração, não havendo relação

com a distribuição de tração mecânica nos diversos trechos longitudinais da fibra ou medida espectral.

O artigo ("Fast response vibration sensor based on Bragg grating written in tapered core fibres"; A. González-Segura, J. L. Cruz, M. V. Andrés, P. Barrios e A. Rodríguez; Meas. Sci. Technol.; V. 18 (2007)) propõe um dispositivo sensor de vibração baseado em uma rede gravada na transição do diâmetro maior para o diâmetro menor, a medida é mensurada através da alteração da área do pico.

Diante do exposto, seria útil se a técnica dispusesse de um sistema e método que pudesse medir tração com alta sensibilidade, em tempo real e via a resposta espectral do sinal transmitido.

A proposta do método e do sistema óptico de medição de tração a que se refere este pedido de patente é aumentar a sensibilidade nas medições de trações mecânicas. Para isso, propõe-se a gravação de redes periódicas, ou inclusão de outro método que apresente resposta espectral, na região afinada de uma fibra óptica, como mostra a Figura 3. Os dispositivos encontrados no mercado possuem sensibilidade típica de 1 nm/mε, enquanto o dispositivo proposto chega a possuir, quando $d_T = 5\mu\text{m}$, $L_0 = 500\text{mm}$ e $L_T = 10\text{mm}$, uma sensibilidade aproximadamente 46 vezes maior. Além disso, a sensibilidade pode ser aumentada de acordo com as variáveis citadas (d_T , L_0 , L_T).

Na figura 2 temos um gráfico que seria a subtração do sinal de entrada (1) pelo o de saída (4), ou seja, o comprimento de onda ressonante criado pela LPG em fibra com diâmetro de 125 μm (3). Assim podemos medir a posição deste vale em comprimento de onda em função da tração aplicada.

A Figura 4 apresenta um gráfico do deslocamento espectral do pico de absorção ($\Delta\lambda$) versus a tração aplicada (*strain*) na fibra. Três possibilidades de gravação são explicitadas: fibra convencional com gravação de redes (8), fibra afinada com gravação de redes na região de maior diâmetro (7), e fibra afinada com gravação de redes na região de menor diâmetro (9). A partir desta figura é possível perceber que o sistema que utiliza o dispositivo

sensor proposto é o que possui maior sensibilidade, que seria a gravação da rede na região de menor diâmetro.

Breve descrição da invenção

A presente invenção foi desenvolvida com o objetivo de se medir
5 opticamente tração mecânica em tempo real e com alta sensibilidade. Para isso propõe-se um sistema óptico e um método de medição de tração, cujo dispositivo sensor consiste em uma fibra óptica com região afinada onde há gravação de redes periódicas, como as redes FBG ou LPG. A invenção proposta tem a vantagem em medir tração com alta sensibilidade (valores de
10 25nm/mε foram obtidos experimentalmente e valores maiores podem ser atingidos de acordo com a necessidade da aplicação) e pode ser utilizada em grandes escalas, como, por exemplo, em pontes e prédios, para monitoramento de deformações mecânicas.

O sistema proposto é constituído por uma fonte de luz com
15 espectro largo (a faixa espectral dependerá do intervalo de tração em que se deseja medir), uma fibra óptica com região afinada na qual há gravação de redes periódicas, como FBG ou LPG, e um filtro espectral, analisador de espectro óptico ou outro método de interrogação óptica.

O método de medição de tração proposto consiste em incidir luz
20 de espectro largo em uma fibra óptica com região afinada na qual há gravação de redes periódicas, como FBG ou LPG e, em seguida, inserir a luz refletida ou transmitida (caso a rede for FBG) ou transmitida (caso a rede for LPG) em um sistema óptico que permita analisar a mudança da resposta espectral de acordo com a tração aplicada na fibra.

25 Um dos exemplos de aplicação deste sistema seria inserir o dispositivo sensor em uma viga de concreto com a finalidade de monitorar com alta sensibilidade as deformações mecânicas na estrutura.

Breve descrição das figuras

O invento passará a ser descrito a seguir com referência aos
30 desenhos apensos, nos quais:

A Figura 1 apresenta um gráfico de intensidade *versus* comprimento de onda da fonte de luz utilizada antes (1) de ser inserida em uma fibra óptica convencional (2) com gravação de rede periódica (3), e a resposta espectral desta fibra (4) após a fonte de luz ser inserida na mesma.

5 A figura 2 apresenta um gráfico de intensidade [dB] *versus* comprimento de onda [nm], resultante da subtração do sinal de entrada (1) pelo o de saída (2) de uma LPG (3) gravada em uma fibra com diâmetro de 125 μm . Ou seja, é o comprimento de onda ressonante da rede.

10 A Figura 3 representa a seção transversal de uma fibra óptica (2) com distância entre os pontos fixos de L_0 (6), e diâmetro externo d_F , possuindo região afinada (5) com diâmetro d_T e comprimento L_T , na qual são gravadas redes periódicas (3).

A Figura 4 apresenta um gráfico de variação do comprimento de onda *versus* tração aplicada em três tipos de sistemas com diferenciação dos dispositivos sensores. No dispositivo (7) a rede LPG é gravada na região não afinada, e apresenta sensibilidade de 0,23nm/m ϵ . No dispositivo (8), a rede LPG é gravada em uma fibra com diâmetro constante, e apresenta uma sensibilidade de 0,90nm/m ϵ . O dispositivo sensor (9) é o dispositivo integrante do sistema proposto nesta invenção, no qual a LPG é gravada na região

15 20 afinada, e apresentou uma sensibilidade de 14,36nm/m ϵ . Estes dados foram obtidos com redes LPG de periodicidade de 0,6mm, região afinada com 20 μm de diâmetro (D_T), tamanho de 15mm (L_T) do dispositivo sensor, e diâmetro externo da região não afinada da fibra de 125 μm (D_0).

A Figura 5 representa o sistema utilizado para as medidas ópticas de tração por transmissão. O sistema é composto por uma fonte de espectro largo (10), um dispositivo sensor óptico (11) e um sistema óptico para medir deslocamentos espectrais, como um filtro espectral e detetor óptico, um analisador de espectro óptico entre outros (12). A fibra é fixa em dois pontos de apoio (6), que ditam o tamanho do dispositivo sensor (L_0 , figura 3).

25 30

A Figura 6 representa o sistema utilizado para as medidas ópticas de tração por reflexão. O sistema é composto por uma fonte de espectro largo

(10), um dispositivo sensor óptico (11), um acoplador utilizado para dividir o sinal (13), e um sistema óptico para medir deslocamentos espectrais (12). A fibra é fixa em dois pontos de apoio (6) que ditam o tamanho do dispositivo sensor (L_0).

5 A Figura 7 apresenta um gráfico de variação de comprimento de onda versus tração aplicada, utilizando o sistema proposto. O dispositivo sensor utilizado consistiu de uma fibra convencional de diâmetro externo de $125\mu\text{m}$, com região afinada de diâmetro externo de $20\mu\text{m}$, e distância entre os pontos de fixação da fibra de L_0 que, aqui, foi variado entre 290 e 560 mm. É
10 possível observar pelo gráfico que a variação no comprimento do dispositivo sensor (L_0) causa uma variação na sensibilidade do mesmo.

A Figura 8 apresenta um gráfico de intensidade *versus* comprimento de onda da resposta espectral de uma rede LPG com período de $0,6\text{mm}$ gravada em uma região afinada de diâmetro externo de $20\mu\text{m}$ (D_T), e
15 tamanho de 15mm (L_T), sendo que o tamanho total do sensor (L_0) é fixo em 200mm . A curva (20) equivale a resposta espectral da fibra sem tração. A curva (19) equivale à resposta espectral da fibra ao receber uma tração de $0,32\text{m}\epsilon$; a curva (18) equivale à resposta espectral da fibra ao receber uma tração de $0,64\text{m}\epsilon$; a curva (17) equivale à resposta espectral da fibra ao receber uma
20 tração de $0,97\text{m}\epsilon$; a curva (16) equivale à resposta espectral da fibra ao receber uma tração de $1,29\text{m}\epsilon$; a curva (15) equivale à resposta espectral da fibra ao receber uma tração de $1,61\text{m}\epsilon$; a curva (14) equivale à resposta espectral da fibra ao receber uma tração de $1,93\text{m}\epsilon$. A fonte de luz utilizada foi um super LED com faixa espectral de 1450nm a 1650nm , para coletar o sinal
25 utilizou-se um analisador de espectro óptico. Para a gravação da rede LPG foi utilizado um laser de CO_2 .

Descrição detalhada da invenção

Refere-se o presente pedido de patente de invenção a um sistema óptico e a um método de medição de tração em tempo real.

30 O sistema óptico (Figura 5) proposto é constituído por:

a) Fonte de luz de espectro largo (10)

b) Dispositivo sensor (11) constituído por uma fibra óptica com região afinada na qual há gravação de redes periódicas, como FBG ou LPG

c) Sistema óptico para medição de deslocamento espectral como filtro espectral e detetor óptico, analisador de espectro óptico entre outros (12)

5 A faixa da região espectral da luz incidente deve ser compatível com o intervalo de tração que se deseja medir.

Deve-se ressaltar que a fibra em si possui comprimento ilimitado, ao contrário do dispositivo sensor que possui comprimento limitado por dois pontos fixos (6) indicados nas Figuras 3, 5 e 6.

10 Além disso, caso a rede gravada seja do tipo FBG, a medida do espectro poderá ser por reflexão do sinal na rede, e, neste caso, deverá ser incluído um acoplador (13) no sistema, de acordo com a Figura 6.

Uma das formas de se afinar uma região da fibra consiste em aquecer esta determinada região através de chama controlada ou por outros
15 métodos, e esticar longitudinalmente as extremidades opostas, de forma a criar um estiramento da fibra o que ocasiona a diminuição do diâmetro da mesma.

A estrutura periódica da fibra é caracterizada pela alteração periódica do índice de refração da fibra, tanto convencional quanto microestruturada. Esta rede gravada pode ser tanto uma rede de Bragg (FBG)
20 quanto uma rede de período longo (LPG). Diversos métodos podem ser utilizados para a gravação de tais estruturas como laser de ultravioleta, laser de femtosegundos, laser de CO₂, gravação mecânica, gravação por arco elétrico, entre outros. Na estrutura aqui demonstrada uma LPG foi gravada ponto a ponto em uma fibra óptica convencional utilizando um laser de CO₂. Ao incidir
25 um feixe de um laser de CO₂ na lateral de uma fibra óptica ocorre um aquecimento localizado mudando a viscosidade do material e depois um re-congelamento do material alterando a geometria e/ou índice de refração do meio. Em seguida a fibra é deslocada longitudinalmente ao equivalente do período da grade desejada (por exemplo, 600 µm) e o processo é repetido de
30 forma periódica. A quantidade de períodos gravados por este processo pode variar dependendo do dispositivo sensor desejado.

Em redes de Bragg alteração periódica do índice de refração permite acoplar, em certos comprimentos de onda, um modo óptico que viaja no núcleo da fibra a modos contra-propagantes. Obtém-se, assim, sinal refletido em certa faixa espectral (ou vale espectral no sinal transmitido).

- 5 No caso de redes de período longo o acoplamento ocorre para diversos modos co-propagantes que viajam na casca da fibra. Como tais modos ópticos de casca experimentam alta atenuação óptica, ao se medir o sinal transmitido pela fibra em função do comprimento de onda, obtém-se um vale de absorção que estará em uma posição espectral relacionada a um modo
- 10 de casca particular.

Ao se aplicar uma tração longitudinal na fibra, a distribuição de forças na região afinada e na região não afinada é determinada pela razão entre os diâmetros das mesmas, de tal forma que:

$$\frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_F} = \left(\frac{d_F}{d_T} \right)^2$$

- 15 onde ε_F = tração na região não afinada,

ε_T = tração na região afinada,

d_F = diâmetro externo da região não afinada,

d_T = diâmetro externo da região afinada.

- 20 Desta forma, quanto menor o diâmetro da região afinada, maior será a tração nesta região e mais sensível será a medida de tração se a rede for gravada na região afinada.

A sensibilidade também depende do tamanho do dispositivo sensor (L_0), ou seja, dos pontos fixos (6), como mostra a equação abaixo:

$$\frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_0} = \frac{L_F + L_T}{\left[L_T + L_F \left(\frac{d_T^2}{d_F^2} \right) \right]}$$

- 25 onde ε_0 = tração total,

L_F = tamanho da região não afinada.

L_T = tamanho da região afinada.

$L_F + L_T = L_0$ tamanho total do dispositivo sensor

A Figura 7 exemplifica esta equação, mostrando dados experimentais dos valores de sensibilidade para diversos tamanhos de comprimento do dispositivo sensor (L_0).

O método de medição de tração proposto consiste em:

5 a) Inserir uma luz de espectro largo em umas das extremidades do dispositivo sensor descrito

b) Coletar a luz transmitida (em se tratando de redes FBG ou LPG) ou refletida (em se tratando de redes FBG) em um sistema óptico que permita a análise do deslocamento espectral, como filtro espectral e detetor,
10 analisador de espectro óptico, entre outros

c) Quantificar o deslocamento espectral do pico de absorção ocasionado pela tração aplicada à fibra.

A sensibilidade α do dispositivo é obtida através da calibração do mesmo. A tração ε aplicada ao dispositivo é calculada em função do
15 deslocamento do pico ($\Delta\lambda$) através da seguinte relação:

$$\Delta\lambda = \alpha \cdot \varepsilon$$

Resultados obtidos

Apresenta-se na Figura 8 a resposta espectral da fibra para diferentes trações aplicadas na mesma. As medidas foram obtidas utilizando-se
20 uma fonte de luz super LED com faixa espectral de 1450nm a 1650nm, um dispositivo sensor com comprimento fixo de 200mm, diâmetro externo de 125 μ m da região não afinada e 20 μ m da região afinada. A rede gravada na região afinada foi uma LPG com período de 0,6mm. A leitura da resposta espectral foi feita em um analisador de espectro óptico. Sensibilidade máxima
25 de 24,8 nm/m ε foi obtida para o caso onde $D_T=20\mu$ m $L_T=10$ mm, $L_0=560$ mm. Salienta-se que tal valor pode ser incrementando aumentando-se L_0 , diminuindo D_T ou diminuindo L_T . Razões de ordem prática devem ser levadas em conta para evitar aumento excessivo de L_0 (o que torna a parte sensora da fibra muito extensa) ou a diminuição excessiva de L_T (o que limita o número de
30 períodos gravados na região afinada da fibra). Por outro lado, o parâmetro

chave para a limitação da escolha do diâmetro da região afinada é a questão de robustez mecânica que dependerá do tipo de encapsulamento utilizado. Com valores de D_T , L_T e L_0 de $5\mu\text{m}$, 10mm e 500 mm , respectivamente, a sensibilidade esperada é de $46,4\text{ nm/m}\epsilon$.

REIVINDICAÇÕES

1. Sistema óptico para medição de tração constituído por fonte de luz de espectro largo e sistema óptico para caracterização da resposta espectral **caracterizado por** compreender um dispositivo sensor constituído por uma
5 fibra óptica com região afinada na qual há gravação de redes periódicas.
2. Sistema óptico de acordo com a reivindicação 1 **caracterizado por** conter um acoplador no caso da medida ser realizada pela reflexão da luz na rede gravada.
3. Método de medição de tração **caracterizado por** compreender as seguintes
10 etapas:
 - a) Inserir luz de espectro largo em umas das extremidades do dispositivo constituído por uma fibra óptica com região afinada na qual há gravação de redes periódicas.
 - b) Inserir a luz transmitida (caso a rede seja FBG ou LPG) ou
15 refletida (caso a rede seja FBG) em um sistema óptico para caracterização da resposta espectral do dispositivo, como um filtro óptico espectral e detector.
 - c) Quantificar a mudança do pico de absorção na resposta espectral do dispositivo sensor ocasionada pela tração aplicada à fibra.
4. Dispositivo sensor de tração **caracterizado por** ser constituído basicamente
20 de uma fibra óptica contendo uma região afinada, na qual são gravadas redes periódicas do tipo FBG ou LPG, ou incluído dispositivos ópticos que apresentem resposta espectral, como os baseados em interferência multimodal, entre outros.
5. Uso dos sistemas descritos nas reivindicações 1 e 2, **caracterizador por**
25 dar-se para medir tração com sensibilidade de até 46,4nm/mε.

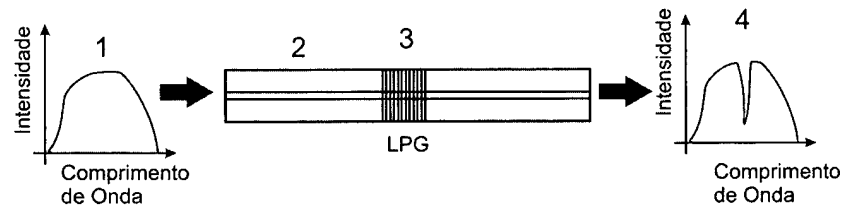


Figura 1

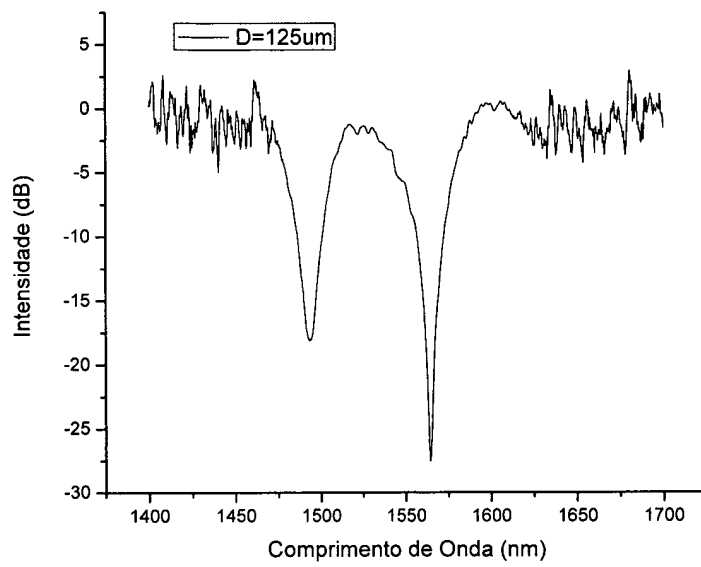


Figura 2

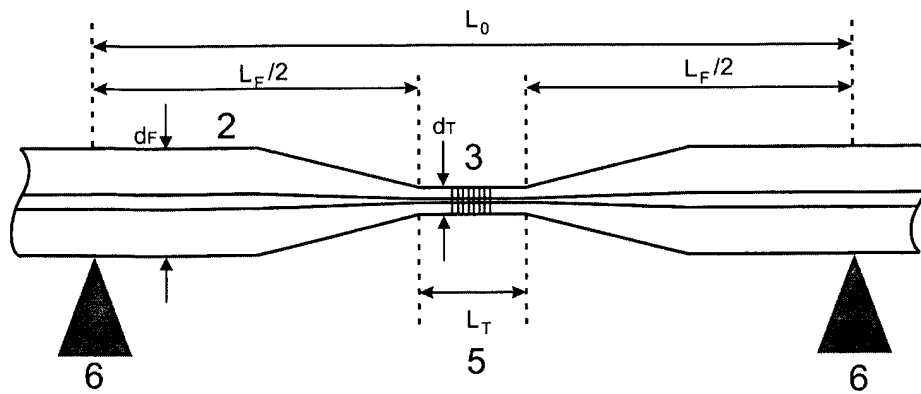


Figura 3

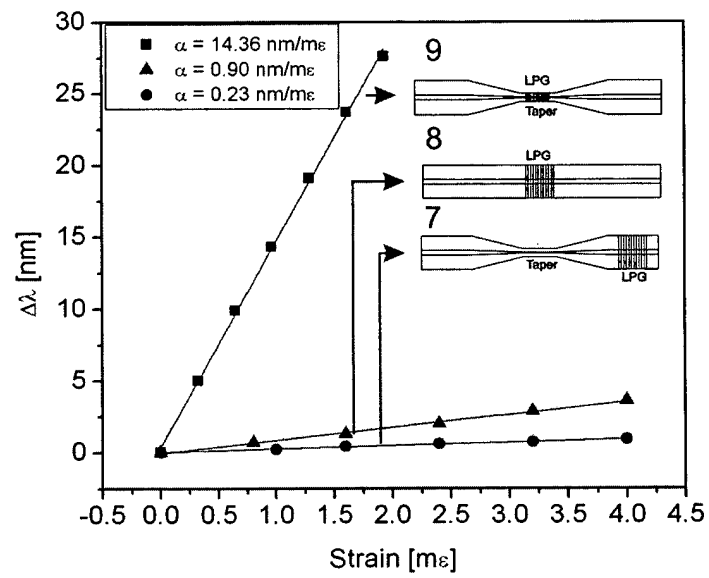


Figura 4

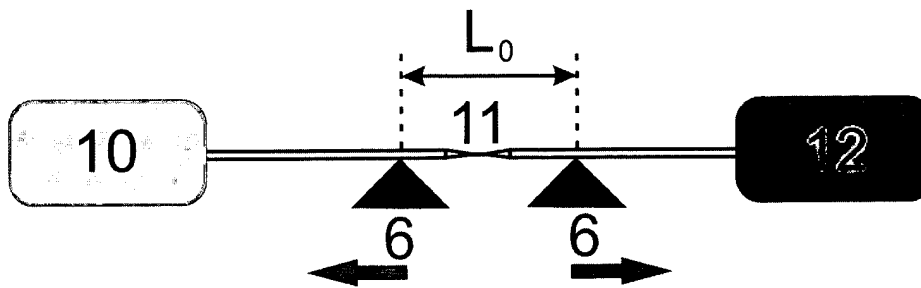


Figura 5

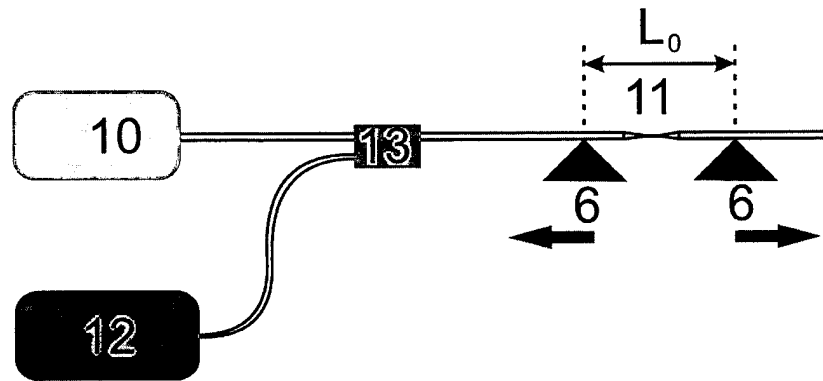


Figura 6

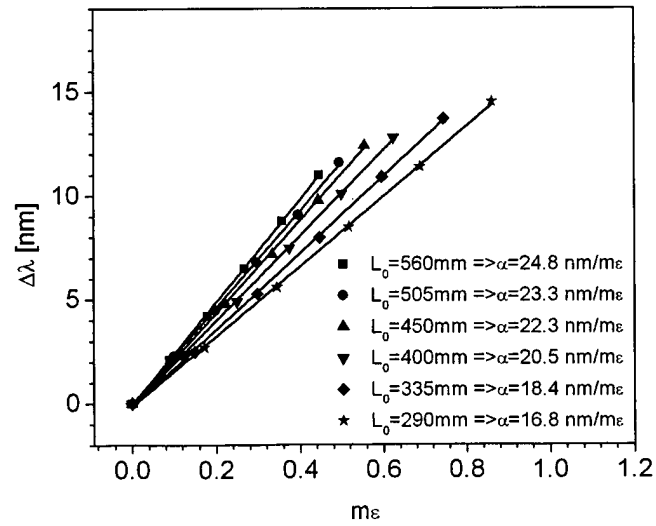


Figura 7

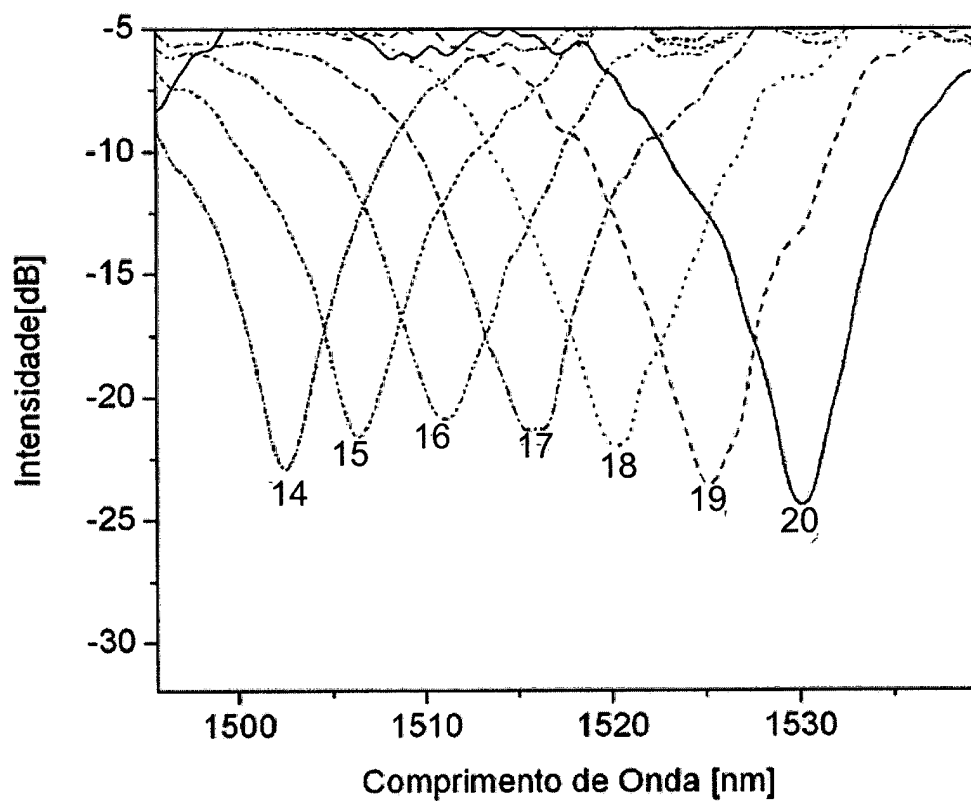


Figura 8