



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

**(11) PI 1007091-5 B1**



**(22) Data do Depósito: 01/02/2010**

**(45) Data de Concessão: 07/04/2020**

---

**(54) Título:** SENSOR DE FIBRA ÓPTICA DE ILUMINAÇÃO LATERAL, MULTI PARAMÉTRICO E COM MÚLTIPLOS PONTOS SENSORES.

**(51) Int.Cl.:** G01D 5/353; G01D 5/26; G01F 23/292; G01N 21/00; G02B 6/00.

**(30) Prioridade Unionista:** 30/01/2009 US 61/148,564.

**(73) Titular(es):** CLAUDIO OLIVEIRA EGALON.

**(72) Inventor(es):** CLAUDIO OLIVEIRA EGALON.

**(86) Pedido PCT:** PCT US2010022715 de 01/02/2010

**(87) Publicação PCT:** WO 2010/088591 de 05/08/2010

**(85) Data do Início da Fase Nacional:** 12/07/2011

**(57) Resumo:** Um sensor de fibra óptica multi paramétrico, com múltiplos pontos sensores, de iluminação lateral e sem qualquer revestimento sensível é descrito. Esse sensor consiste de uma fibra óptica com pelo menos uma região sem qualquer revestimento que se comporta como uma região sensível da fibra, pelo menos uma fonte de luz de sondagem que ilumina a fibra lateralmente, uma fonte de alimentação, um detector, um processador de sinais, e um display. A fibra óptica sensível é ópticamente afetada pela presença de um meio de medição que fluoresce, fosforesce, absorve e/ou espalha a luz de sondagem. Essa luz de sondagem é guiada pelo núcleo da fibra até um detector que mede a intensidade da luz e essa intensidade é correlacionada em um parâmetro de medição.

**TÍTULO: SENSOR DE FIBRA ÓPTICA DE ILUMINAÇÃO LATERAL, MULTI  
PARAMÉTRICO E COM MÚLTIPLOS PONTOS SENSORES**

**DOCUMENTO DE PRIORIDADE**

- 5 **[01]** Esta solicitação reivindica prioridade da Aplicação de Patente Provisória No. 61/148,564, depositada nos Estados Unidos no dia 30 de Janeiro de 2009.

**REFERÊNCIA EM RELAÇÃO AO PATROCÍNIO DE ALGUM GOVERNO**

**[02]** Não se aplica.

10

**REFERÊNCIA AO APENDIX DE MICROFICHAS**

**[03]** Não se aplica.

**ANTECEDENTES: CAMPO DA INVENÇÃO**

- 15 **[04]** A presente invenção refere-se, em geral, a sensores espectroscópicos de fibra óptica. Especificamente, esta invenção se relaciona a sensores baseados em espalhamento, absorção, colorimetria, fluorescência e fosforescência.

20 **ANTECEDENTES: ESTADO DA TÉCNICA ANTERIOR**

- [05]** Sensores espectroscópicos de fibra óptica são utilizados em várias aplicações para a detecção de strain, pressão, temperatura, espécies químicas, turbidez, cor de uma substância e outros parâmetros de medição. Estes sensores foram desenvolvidos utilizando duas configurações distintas: a do optrodo (ou optodo) e a do sensor distribuído.

25

- [06]** O optrodo é o sensor de fibra óptica mais simples de todos. Um optrodo corresponde a uma fibra óptica contendo um indicador químico, localizado na face distal da fibra, e uma fonte de excitação e um detector localizados na face proximal. A luz de excitação viaja pela fibra até a face distal e interage com o
- 30 indicador produzindo um sinal de luz espectroscópico (de fluorescência, fosforescência, colorimétrico e/ou de absorção). O sinal viaja de volta à face

proximal da fibra no qual ele é coletado por um detector e correlacionado com o parâmetro de medição. Neste caso, a fibra possui apenas uma única região sensitiva em sua face distal e é utilizada apenas como um canal para a luz que se propaga, sem qualquer perturbação, desde a face proximal até o indicador químico e de volta à face proximal em direção ao detector.

**[07]** No caso do sensor distribuído, a fibra inteira, ou várias regiões discretas da mesma, é utilizada como um conduto para a luz e como um, ou vários, sensor(es). A fibra pode ser fabricada ou com um único revestimento monolítico, sensível ao parâmetro que está sendo medido, ou com várias seções de revestimento sensíveis separadas entre si. Não obstante a forma na qual o sensor de fibra é preparado, essas regiões sensíveis, ou reatantes, podem ser sondadas com uma luz de excitação, resultando em um dispositivo quase distribuído contendo múltiplos pontos sensores. Desta forma, a fim de realizar múltiplas medições espaciais, um sensor distribuído requer apenas um único filamento de fibra óptica enquanto que o optrodo requer vários. Portanto, a vantagem de um sensor distribuído, reside no fato de que o mesmo pode fazer múltiplas medidas espaciais com um único dispositivo.

**[08]** As regiões sensíveis de um sensor distribuído de fibra óptica, podem ser sondadas de duas formas: utilizando iluminação axial ou transversal, sendo que esta invenção, considera a iluminação transversal uma técnica superior.

**[09]** A iluminação axial é a maneira mais utilizada de sondar uma fibra sensora. Na iluminação axial, a luz é injetada a partir de um extremo da fibra, ao longo de seu eixo, e interage com o revestimento sensor através de sua cauda evanescente. O revestimento então absorve a luz de iluminação na região evanescente produzindo ou um sinal de absorção, de espalhamento ou luminescente que pode ser detectado em qualquer extremidade da fibra.

**[10]** Porém, a técnica axial de excitação possui várias desvantagens. Por exemplo, a interação entre a cauda evanescente da luz de iluminação e o revestimento sensor da fibra é muito fraca requerendo instrumentação cara para detecção do sinal resultante, dentre elas uma fonte de luz de alta potência, um esquema caro de detecção e/ou uma fibra óptica de comprimento

muito longo. Além disso, dependendo do arranjo, o alinhamento da fonte de luz (tal como um laser) com o eixo da fibra óptica pode ser muito dificultoso, requerendo um manejo cuidadoso.

5 **[11]** Schwabacher, número internacional de publicação WO 01/71316 ('316),  
entitulado "One-dimensional Arrays on Optical Fibers," (emitido nos Estados  
Unidos como No. de patente 7,244,572 no dia 17 July 2007) demonstra um  
arranjo linear de quemosensores, ao longo de uma fibra óptica, com cada  
região reativa sensível a uma espécie química e separadas por uma porção  
substancialmente inerte, tal como o revestimento original. Esta região  
10 substancialmente inerte deve ter um comprimento mínimo, preferivelmente de  
250 centímetros. Publicação '316 documenta ambos os métodos axiais e  
transversais de excitação, mas considera o método axial o modo preferido.

**[12]** Na incorporação preferida, Publicação '316 utiliza um laser pulsado ao  
longo do eixo da fibra óptica, cada região reativa estando separadas por uma  
15 distância mínima contendo regiões substancialmente inertes. Estas regiões  
inertes, relativamente longas, em '316 são necessárias a fim de prevenir o  
superposição dos sinais fluorescentes provenientes de regiões vizinhas do  
reagente. A luz de excitação de uma fonte (tal como um laser, um laser de  
diodo, um laser de gas, um laser de corante, laser de estado sólido, LED  
20 (Diodo Emissor de Luz), etc.) é introduzida axialmente na fibra óptica, e se  
propaga em direção às regiões reativas.

**[13]** A fim de determinar a específica região reativa, entre várias ou centenas,  
que está produzindo o sinal, o atraso do sinal fluorescente, em relação ao pulso  
de excitação, deve ser conhecido com precisão e usado para determinar a  
25 distância de cada região específica até a fonte. Esta determinação, envolve  
medidas de tempo, distância e comprimento de onda através do uso de  
instrumentos de precisão como um osciloscópio, e um tubo fotomultiplicador.  
Este arranjo requer um comprimento extremamente longo de fibra a fim de se  
medir centenas de espécies, aumentando o tamanho e complexidade do  
30 dispositivo final de análise. Além disso, os instrumentos de precisão aumentam  
consideravelmente o custo total do sistema sensor.

**[14]** A luz de excitação pode também ser transmitida em direção às regiões reativas por uma única ou várias fibras de excitação. Esse método também requer a introdução axial de luz em cada fibra de excitação. Essa incorporação sugere o uso de uma fibra de excitação para cada região reativa com a luz de excitação iluminando transversalmente a região reativa da fibra sensora.

**[15]** Uma outra incorporação requer o uso de divisores de feixe de luz para refletir a luz de iluminação transversalmente em direção às regiões reativas. O uso de divisores de feixe de luz requer a utilização de lasers caros de alta potência: usando os mesmos, a intensidade de iluminação nas regiões reativas diminui à medida que divisores adicionais são introduzidos para iluminar diferentes regiões sensoras.

**[16]** Em um outro esquema, a fibra de excitação (ou iluminação) é preparada removendo-se o revestimento em várias regiões ao longo da fibra, posicionadas ao lado das regiões reativas da fibra sensora, enquanto que o campo evanescente da fibra de iluminação excita transversalmente a fibra sensora. Uma desvantagem desta incorporação é que o campo evanescente da fibra de iluminação é muito fraco entregando muito pouca luz à fibra sensora. Além disso, outros métodos de iluminação axial e transversal são discutidos sendo porém, em geral muito caros.

**[17]** Embora se reconheça que os esquemas apresentados por '316 são operacionais, os mesmos são limitados pela complexidade, o custo de fabricação, e robustez. Para fabricar seções alternadas de regiões reativas e inertes, se deve remover o revestimento apenas em regiões aonde se deposita o reagente, deixando-se intacto o revestimento nas regiões inertes. Este procedimento aumenta o custo e a complexidade de produção do sensor, limitando as opções de automatização e fabricação dos mesmos.

**[18]** Outras técnicas utilizadas na indústria requer o uso de instrumentação cara tal como reflectômetros óptico de domínio temporal (Optical Time Domain Reflectometer, OTDR). A um custo de US\$ 3,000 ou mais, o OTDR adiciona um custo considerável a qualquer sistema que utiliza a técnica axial de iluminação. Além disso, a disponibilidade de OTDRs com distintos

comprimentos de onda é limitada, restringindo os reagentes que podem ser utilizados com o sensor. Outras desvantagens se referem a dobras e irregularidades físicas na guia de onda as quais afetam o índice de refração do dispositivo, resultando em interferência dos sinais produzidos. Além disso, essas técnicas possuem uma baixa resolução espacial, em torno de aproximadamente 10 centímetros. Uma resolução espacial mais refinada se faz necessária.

**[19]** Apesar do fato de que a iluminação transversal de uma região sensora aparenta ser uma técnica superior, capaz de produzir um sinal substancial, a arte anterior foi incapaz de identificar esta e outras vantagens. A iluminação lateral, quando feita de forma apropriada, pode sondar porções bem curtas de uma fibra sensora resultando em um dispositivo de alta resolução espacial e um sensor de fibra óptica com múltiplos pontos sensores. Por exemplo, uma resolução espacial de 5 milímetros, pode produzir dez pontos sensores para cada 5 cm de fibra resultando em um arranjo linear com uma alta densidade de sensores em uma única fibra óptica. Alta resolução espacial é um requisito em aplicações onde existe uma forte variação de temperatura e/ou de concentração de uma espécie química ao longo do comprimento da fibra óptica. O monitoramento de íons de cloro em estruturas de concreto é um exemplo no qual o sensoriamento desse íon pode ser feito em regiões curtas e discretas ao longo de uma fibra óptica. Esforços anteriores foram incapazes de proporcionar uma técnica simples de iluminação capaz de conduzir a um sensor distribuído robusto e de baixo custo. Ainda mais importante, a arte anterior foi também incapaz de reconhecer que um sensor de fibra óptica de iluminação lateral, sem qualquer indicador químico, pode ser utilizado para detectar certos parâmetros.

**[20]** Dessa forma deseja-se, e se faz necessário, superar essas, e outras, deficiências e/ou problemas da arte anterior exemplificados, mas não necessariamente limitados, pelas seguintes necessidades:

- a. Se faz necessário utilizar uma fonte de luz de sondagem barata que possa proporcionar uma alta resolução espacial, em torno de 5mm ou menos, permitindo a localização precisa do ponto de detecção.
- 5 b. É necessário também um sistema de fibra óptica de baixo custo que utilize elementos baratos, disponíveis comercialmente no mercado e que possam ser fabricados por meios automatizados.
- c. O que também se faz necessário é um dispositivo que possa ser utilizado com fontes de luz no infravermelho, visível, e ultravioleta.
- 10 d. Além disso, é necessário um dispositivo de detecção robusto que possa ser alinhado facilmente e que não seja afetado por interferência externa tal como dobras na fibra e luz ambiente externa.
- e. É também necessário um modelo genérico de sensor de fibra óptica que se possa ser adaptado a diversos parâmetros de medição.
- 15 f. O que também se necessita é uma fonte de luz intensa de sondagem, e de baixo custo, que possa ser utilizada com um sensor de fibra baseado em fluorescência e absorção, capaz de produzir um sinal intenso que possa ser detectado facilmente.
- g. Também se faz necessário, um modelo genérico de detecção modular que pode facilmente ser atualizado com a tecnologia disponível e
- 20 h. Finalmente se faz necessário um sistema de detecção que não requer qualquer indicador químico immobilizado sobre a superfície da fibra a fim de detectar um dado parâmetro de medição.

## RESUMO DA INVENÇÃO

25 **[21]** Esses, e outros, problemas e necessidades foram superados e endereçados de forma bem sucedida pela presente invenção. De acordo com a presente invenção, descreve-se um sensor de fibra óptica reversível, robusto, barato, distribuído e com alta resolução espacial. Esta invenção pode ser utilizada nas regiões infravermelhas, visíveis, e ultravioletas do espectro

30 electromagnético. A fonte de luz utilizada proporciona uma iluminação intensa e de baixo custo da região sensora produzindo um sinal de fácil detecção. Esta

invenção pode ser utilizada com diferentes fontes de luz de distintos comprimentos de onda, cada largo de onda sensível a um parâmetro de medição. Ademais esta invenção pode ser atualizada continuamente com novas fontes de luz de sondagem, novos sensores e novos códigos computacionais.

5 [22] O modelo preferido desta invenção geralmente consiste de uma fibra óptica com múltiplas regiões com o núcleo descoberto, uma fonte de luz de sondagem ou de iluminação, uma fonte de alimentação, um detector, um processador de sinais, e um display. A fonte de luz de sondagem, ou de  
10 iluminação, está em comunicação óptica direta com o ponto sensor da fibra óptica e pode estar posicionada ao lado do ponto sensor ou mais distante, como no caso de um raio de luz colimado a vários metros de distância, desde que o mesmo possa iluminar o ponto sensor. A fibra óptica pode ser utilizada como um sensor para a determinar diversos parâmetros de medição dentre  
15 eles, a cor do ambiente ao redor da fibra, turbidez, fluorescência, absorção espectral, a concentração de uma espécie química, índice de refração e qualquer outra propriedade opticamente afetada, de uma maneira monotônica, por estes parâmetros.

[23] O sensor de fibra óptica é iluminado, de fora, a um determinado ângulo,  
20 por uma luz de sondagem proveniente de uma fonte de luz. Essa luz de sondagem interage com uma região sensora da fibra óptica e, essa interação, modifica a luz de sondagem gerando um sinal de luz que é afetado pelo parâmetro de medição. O sinal de luz é acoplado ao núcleo da fibra óptica como um sinal de luz e transmitido em direção a um detector em comunicação  
25 óptica com um dos terminos da fibra. O detector correlaciona a intensidade do sinal de luz com um sinal elétrico. O sinal elétrico é transmitido ao processador de sinais e correlacionado com a quantidade que está sendo medida (cor, turbidez, índice de refração, concentração de uma espécie química, etc.). A quantidade correlacionada é transmitida e exibida em um display.

30 [24] Uma seção, ou a área inteira, ao redor do núcleo da fibra óptica é sensível à espécie química que está sendo medida. Porém, nesse caso,



contrário ao que foi proposto por Egalon (Patente americana No. 7,473,906), um dopante sensível ao parâmetro de medição não é um requisito necessário. O sensor de fibra resultante é reversível, retornando sempre à intensidade do sinal de referência.

5 **[25]** Em uma das configurações propostas, utiliza-se um Diodo Emisor de Luz no ultravioleta, LED UV, como uma fonte de luz de sondagem da fibra a qual é posicionada adjacente à fibra óptica, iluminando a região sensível. O LED UV foi escolhido por vários motivos, porém se compreende que outras fontes de luz podem ser empregadas. Em primeiro lugar, o LED UV é uma fonte de luz  
10 barata que se pode utilizar facilmente, diminuindo o custo de fabricação do sensor. Em segundo lugar, desenvolvimentos recentes na tecnologia de LEDs produziu uma fonte de grande intensidade e pequeno tamanho resultando em um feixe de luz de interrogação estreito e intenso. Além disso, a proximidade do LED UV ao sensor de fibra óptica gera um sinal de luz intenso, permitindo o  
15 uso de meios baratos de detecção, tais como um foto detector de silício. Finalmente, o pequeno tamanho do LED permite a iluminação de regiões curtas do revestimento, em várias posições ao longo do comprimento da fibra, produzindo múltiplos pontos de detecção independentes, de alta resolução espacial. Essa técnica também permite a localização precisa do ponto de  
20 detecção em uma substância, produzindo um mapa da variação espacial do parâmetro de medição ao longo da fibra, com uma alta resolução espacial.

**[26]** Uma incorporação adicional inclui um espelho na face oposta da fibra óptica, 118, em relação ao detector sendo que esse espelho reflete o sinal de luz que se propaga na direção oposta, em direção ao meio de detecção.

25 **[27]** Uma outra incorporação inclui o uso de uma fibra óptica sensora com um núcleo afilado, em forma de uma seção cônica, geralmente divergindo em direção ao detector a medida que o sinal de luz se propaga da região sensora da fibra ao detector. Esta configuração, comparada à configuração cilíndrica regular, possui a vantagem de acoplar uma quantidade maior de luz no núcleo  
30 da fibra. Com um núcleo afilado, os raios de luz que seriam irradiados para fora da fibra como modos de radiação, são, ao invés, acoplados em termos de

modos guiados de baixa perda os quais se propagam por distâncias maiores. Esta fibra especial pode ser manufacturada usando uma torre de puxamento e uma preforma afilada. Alternativamente, esse tipo de fibra pode também ser fabricada, de forma manual, por pessoas habilidosas na arte de dar forma a vidros.

**[28]** Em uma outra incorporação, se posiciona um arranjo linear de fontes de luz ao longo do comprimento da fibra sem revestimento. Nesse caso, cada fonte de luz emite uma luz de sondagem, de forma consecutiva, simultânea, e/ou independente, a um ângulo, em direção à região sem revestimento do núcleo da fibra. O comprimento desse arranjo linear de fontes de luz corresponde substancialmente ao comprimento da região sensora da fibra óptica. Se pode utilizar esse arranjo também para aumentar a intensidade de luz total do sinal acoplado ao sensor.

**[29]** Uma incorporação alternativa, utiliza uma fibra óptica de iluminação, ao invés de LEDs, para sondar regiões da fibra sensora. Neste caso, a fibra de iluminação é fabricada com vários reflectores dieléctricos posicionados dentro, e ao longo, da mesma. Cada refletor, orientados a um ângulo de 45 graus, é projetado a fim de refletir a luz de um modo guiado, a um determinado comprimento de onda,  $\lambda_i$ , em direção à fibra sensora. Cada um desses comprimentos de onda,  $\lambda_i$ , estão dentro do espectro de absorção do meio associado com o sensor de fibra óptica. À medida que o comprimento de onda da luz de sondagem é variado, é possível sondar diferentes pontos do sensor de fibra óptica criando, desta forma, um sensor distribuído aperfeiçoado.

**[30]** Neste caso, uma luz branca, proveniente de uma fonte de banda larga, passa por um monocromador que varre os distintos comprimentos de onda do espectro de absorção do meio associado com o sensor de fibra óptica. Quando o monocromador é sintonizado ao comprimento de onda  $\lambda_i$ , somente o refletor dieléctrico, associado a este comprimento de onda, reflete a luz de iluminação em direção ao sensor de fibra óptica. Desta forma, a seção iluminada do sensor de fibra óptica corresponde à posição deste específico

refletor dielétrico. Este procedimento pode ser repetido para outros comprimentos de onda.

**[31]** Uma incorporação adicional utiliza um núcleo de fibra óptica ativo dopado com uma substância que amplifica o sinal da região sensora. Esta  
5 incorporação é semelhante a um amplificador de fibra óptica. Neste caso, o sinal do revestimento sensor é acoplado ao núcleo da fibra. O núcleo ativo é então excitado pela luz modificada do revestimento sensor amplificando o sinal original. Este sinal amplificado se dirige em direção ao detector. Se prefere esta incorporação quando a fibra utilizada é muito longa.

**[32]** Se pode utilizar essa invenção, e suas incorporações alternas, em um  
10 ambiente que contém substâncias que fluorescem, absorvem e espalham luz. Por exemplo, a concentração de clorofila em água pode ser determinada através da produção de sua fluorescência utilizando luz ultravioleta. A concentração de uma substância em um meio líquido pode ser determinada  
15 quando da medida da cor deste meio após uma reação colorimétrica. Uma espécie química pode também ser determinada utilizando várias fontes de luz, de diferentes comprimentos de onda, coincidentes com o espectro de absorção do parâmetro de medição. A turbidez de um meio pode ser determinada através da iluminação lateral de uma fibra usando qualquer comprimento de  
20 onda e medindo a intensidade da luz acoplada.

**[33]** Esta invenção foi criada a fim de expandir substancialmente a capacidade sensora da arte revelada por Egalon (Egalon, patente americana No 7,473,906) e, no processo, aperfeiçoar sensivelmente os sistemas de sensores de fibra óptica, em especial, através do posicionamento transversal  
25 da fonte de luz, tal como um LED de UV ou de luz branca, diretamente adjacente, ou a uma dada distância, da região sensora da fibra óptica. Este arranjo aumenta a intensidade do sinal de luz acoplado ao núcleo, diminui a complexidade e custos de fabricação e, quando utilizado com LEDs de pequenas dimensões, permite a localização precisa de um ponto de detecção  
30 em uma substância com uma alta resolução espacial.

**BREVE DESCRIÇÃO DAS FIGURAS.**

**[34]** FIG. 1a é um diagrama de blocos ilustrando a operação da presente invenção e sua capacidade de realizar medidas distribuídas com um analito fluorescente ou fosforescente. Nesta figura, a fonte de luz de sondagem (100),  
5 do lado direito da figura, sonda o analito (93) no meio associado com o parâmetro de medição da fibra sensora (98). Na ilustração, uma, ou várias, região/regiões do revestimento original da fibra foi/foram removida(s): essas seções coincidem com o ponto sensor da fibra (92).

**[35]** FIG. 1b é um diagrama de blocos ilustrando a operação da presente invenção e sua capacidade de realizar medidas distribuídas com um analito fluorescente ou fosforescente. Nesta figura, a fonte de luz de sondagem (100'),  
10 localizada do lado esquerdo da figura, sonda o analito (93') no meio associado com o parâmetro de medição estando esse meio localizado no ponto sensor (92') correspondente à luz de sondagem.

**[36]** FIG. 1c é um diagrama de blocos ilustrando a operação da presente invenção estando o núcleo da fibra óptica (106) localizado entre o analito (93) e a fonte de luz de sondagem (100).  
15

**[37]** FIG. 2a é um diagrama de blocos ilustrando a operação da presente invenção na qual o analito absorve ou espalha a radiação proveniente da fonte de luz. Nesta ilustração, o analito (93) está localizado entre a fonte de luz de sondagem (100) e o núcleo da fibra óptica (106).  
20

**[38]** FIG. 2b é um diagrama de blocos ilustrando a operação da presente invenção no qual o analito absorve ou espalha a radiação proveniente da fonte de luz. Nesta ilustração, o núcleo da fibra óptica (106) está localizado entre a fonte de luz de sondagem (100) e o analito (93).  
25

**[39]** FIG. 3a é um gráfico da resposta do sensor contra a concentração de nitrato de sódio.

**[40]** FIG. 3b é um gráfico da resposta do sensor contra a concentração de íons de potássio. Esta curva representa também a medida da turbidez de uma  
30 solução.

- [41] FIG. 4a é uma ilustração de como o sensor das FIGS. 2a e 2b pode ser utilizado como um dispositivo para medir o nível de um líquido, ou a posição da interface, de dois fluidos diferentes, sejam eles gases e/ou líquidos. No caso ilustrado, o nível do líquido na interface do fluido (176) está acima de um (92a) dos pontos sensores (92).
- [42] FIG. 4b é uma ilustração de como o sensor das FIGS. 2a e 2b pode ser utilizado como um dispositivo para medir o nível de um líquido. Neste caso, o nível do líquido na interface do fluido (176) está abaixo de um dos pontos sensores (92).
- [43] FIG. 5a é uma incorporação alternativa do sensor de fibra óptica (98') com o revestimento original (116).
- [44] FIG. 5b é uma incorporação alternativa do sensor de fibra óptica (98') com uma camada sensitiva (99) aplicada sobre o revestimento original
- [45] FIG. 6a é uma vista perfilada da fibra óptica original (96).
- [46] FIG. 6b é uma vista perfilada do sensor de fibra óptica, com regiões do revestimento 116 e o revestimento protetor exterior da fibra 101 removidos.
- [47] FIG. 6c é uma vista lateral ilustrando uma incorporação alterna desta invenção contendo um espelho (122) que reflete a luz incidente na segunda face do sensor de fibra (98).
- [48] FIG. 7 é uma vista lateral da incorporação alterna da fibra sensora desta invenção, ilustrando um núcleo afilado (107).
- [49] FIG. 8 é uma vista lateral de uma incorporação alterna da fibra sensora desta invenção, ilustrando um arranjo linear (138) de LEDs (100a).
- [50] FIG. 9 é uma vista lateral de uma incorporação alterna da fibra sensora (98) desta invenção, ilustrando dois LEDs (100a e 100a') iluminando simultaneamente distintos pontos sensores (92).
- [51] FIG. 10a é um diagrama ilustrando a operação de uma fibra óptica de iluminação com um extremo distal de 45 graus. A luz da fonte de sondagem (100) é injetada axialmente.
- [52] FIG. 10b é uma uma ilustração demonstrando a operação de uma fibra óptica de iluminação com um extremo distal de 45 graus. A luz das fontes de

sondagem (100, 100', 100") é injetada lateralmente na fibra óptica produzindo um acoplador Nx1 com uma única fibra.

5 **[53]** FIG. 11a é um diagrama ilustrando a operação de uma fibra óptica de iluminação fabricada com várias redes de Bragg de longo período. A luz de sondagem é injetada axialmente.

**[54]** FIG. 11b é um diagrama ilustrando a operação de uma fibra óptica de iluminação fabricada com várias redes de Bragg de longo período. A luz de sondagem é injetada lateralmente na fibra óptica produzindo um acoplador Nx1 com uma única fibra.

10 **[55]** FIG. 12a é um diagrama ilustrando a operação de uma fibra óptica de iluminação fabricada com vários refletores diéletricos 180 ao longo da fibra. A luz de sondagem é injetada axialmente.

**[56]** FIG. 12b é um diagrama ilustrando a operação de uma fibra óptica de iluminação fabricada com vários refletores diéletricos 180 ao longo da fibra. A luz de sondagem é injetada lateralmente na fibra óptica produzindo um acoplador Nx1 com uma única fibra.

**[57]** FIG. 13 é um diagrama de blocos do sistema de detecção desta invenção.

## 20 DESCRIÇÃO DETALHADA DA INVENÇÃO

**[58]** A seguinte descrição detalhada é, neste momento, a melhor maneira contemplada de se realizar esta invenção. Não se deve interpretar esta descrição de uma forma restrigente, mas simplesmente com a finalidade de ilustrar princípios gerais das possíveis incorporações desta invenção. A descrição detalhada abaixo, em conexão com as figuras anexas, reflete, neste momento, as melhores incorporações desta invenção e não se intenciona representar as únicas formas nas quais esta invenção pode ser construída e/ou utilizada. Esta descrição apresenta sim as funções e a sequência dos passos para se construir e operar a invenção com respeito às incorporações

25

30 ilustradas. Porém, se deve compreender que as mesmas funções e sequências, ou equivalentes, podem ser obtidas através de distintas

incorporações ainda contidas dentro do espírito e alcance abarcados pela invenção.

5 **[59]** A FIG. 1a ilustra um diagrama de blocos do sensor 98. De acordo com a mesma, uma fonte de sondagem 100 ilumina externamente, o ponto sensor 92 da fibra 98, a um determinado ângulo. A fonte de luz de sondagem 100 possui um comprimento de onda capaz de gerar fluorescência/fosforescência a partir de um analito 93 o qual se localiza na região do ponto sensor 92. Uma vez iluminado pela luz de sondagem 100 (luz de iluminação representada por flechas), analito 93, localizado próximo ao núcleo da fibra 106, gera um sinal  
10 fluorescente que é acoplado ao núcleo da fibra óptica 106 como um sinal óptico 104 na forma de modos de vazamento e modos guiados. A fonte de luz de sondagem 100 está conectada à fonte de alimentação 114 que proporciona uma corrente para a mesma estando esta em comunicação óptica com o núcleo da fibra 106.

15 **[60]** O sinal fluorescente 104a é acoplado ao núcleo 106 da fibra e guiado ao detector 108, por exemplo, um fotodetector de silício, que converte a intensidade da luz de fluorescência 104a em um sinal elétrico. Este sinal elétrico é transmitido em direção a um processador de sinais 110, tal como um medidor de luz, via um cabo de fotodetector 112. No processador de sinais  
20 110, o sinal é amplificado e sua intensidade óptica é exibida. A intensidade lida pelo processador de sinais 110 é então correlacionada com a concentração do analito 93 ao redor do núcleo da fibra óptica 106.

**[61]** A fim de sondar um ponto diferente 92' da fibra 98 e obter um sensor distribuído aperfeiçoado, (veja FIG. 1b), a luz de sondagem 100' pode ser  
25 ativada separadamente, pela fonte de alimentação 114, que sonda o outro ponto sensor 92', próximo à luz de sondagem 100'.

**[62]** Essa configuração pode ser utilizada ou com o analito 93 entre a fonte de luz de sondagem 100 e o núcleo da fibra óptica 106 (FIGS. 1a e 1b), com o analito do outro lado do núcleo da fibra (FIG. 1c), ou com o analito  
30 completamente ou parcialmente ao redor da fibra.

**[63]** Um sensor para clorofila (analito 93) dissolvido em água (meio associado com o parâmetro de medição no ponto sensor 92) é um exemplo prático da configuração descrita acima. Nesse caso, clorofila fluoresce quando iluminada por uma fonte de luz de sondagem 100 de comprimento de onda apropriado.

5 Essa fluorescência se acopla ao núcleo da fibra como um sinal óptico 104 e sua intensidade é uma medida da concentração de clorofila ao redor do núcleo da fibra.

**[64]** Da mesma forma, se pode utilizar essa fibra para fazer medições baseadas em absorção, colorimetria e espalhamento, como indicado nas FIGs.

10 2a e 2b. Desta forma, uma fonte de luz de sondagem 100 ilumina externamente, a um determinado ângulo, o ponto sensor 92 da fibra 98. A fonte de luz de sondagem 100 possui um comprimento de onda capaz de ser absorvido ou espalhado pelo analito 93 o qual está próximo ao ponto sensor 92 da fibra. A fonte de luz de sondagem 100, conectada à fonte de  
15 alimentação 114 que proporciona uma corrente elétrica para a mesma, está em comunicação óptica com o ponto sensor 92.

**[65]** Uma vez iluminado pela luz de sondagem 100 (luz de iluminação representada por flechas), analito 93, dissolvido no meio associado com o parâmetro de medição, e localizado próximo ao núcleo da fibra 106, absorve a  
20 luz da fonte de sondagem 100. A luz restante é acoplada ao núcleo da fibra óptica 106 como um sinal óptico 104, na forma de modos de modos guiados e de vazamento, e transmitido a um detector 108 que lê a intensidade de luz e correlaciona a mesma com a concentração do analito.

**[66]** Referindo-se às FIGs. 2a e 2b, meio associado com o parâmetro de  
25 medição, localizado ao lado do ponto sensor 92 da fibra, pode também ser o resultado de uma reação colorimétrica entre o analito 93 e um reagente químico. Uma vez que o meio associado com o parâmetro de medição, ao lado do ponto sensor 92, e em contacto com o núcleo do sensor de fibra óptica 106, é iluminado pela fonte de luz de sondagem 100 (luz de iluminação  
30 representada por flechas), esse meio absorve essa luz. A luz restante é acoplada ao núcleo da fibra óptica 106 como um sinal luminoso 104, na forma



de modos guiados e de vazamento, e transmitida a um detector que mede a intensidade luminosa a qual é usada para determinar a concentração do analito.

5 **[67]** Novamente referindo-se às FIGs. 2a e 2b, o meio associado com o parâmetro de medição, localizado ao lado do ponto sensor 92, pode também conter partículas que espalham a luz da fonte de iluminação 100 (luz de iluminação representada por flechas). Essa luz espalhada é acoplada ao núcleo da fibra óptica 106 como um sinal luminoso 104, na forma de modos guiados e de vazamento, transmitida a um detector que determina a  
10 intensidade luminosa e relaciona a mesma com o parâmetro de medição, por exemplo, a turbidez do meio.

**[68]** De uma maneira ou de outra, a luz da fonte de sondagem 100 é modificada pelo ambiente ao redor do ponto sensor da fibra, acoplada ao núcleo 106 como um sinal óptico 104 na forma de modos guiados e modos de  
15 vazamento, e guiada a um detector 108, e.g., um foto-detector de sílica, que correlaciona a intensidade luminosa da luz absorvida com um sinal elétrico. Esse sinal elétrico é transmitido a um processador de sinais 110, tal como um medidor de luz, via um cabo elétrico do fotodetector 112. No processador de sinais 110, o sinal é amplificado e sua intensidade óptica é exibida. A  
20 intensidade lida pelo processador de sinais 110 é então correlacionada com a concentração da espécie química que está ao redor do sensor de fibra 98 ou inicialmente presente em seu meio associado antes de sofrer qualquer reação química com um reagente. Da mesma forma como foi descrito anteriormente, se pode sondar um ponto sensor diferente 92' da fibra com uma outra fonte de sondagem 100'. De forma semelhante, esta configuração pode ser utilizada  
25 com o analito 93, ou o meio associado com o parâmetro de medição, localizado no ponto sensor 92 entre a fonte de luz de sondagem 100 e o núcleo de fibra óptica 106, como ilustrado na FIG. 2a. O analito, ou meio de medição, pode também estar localizado do outro lado do núcleo da fibra, como ilustrado na  
30 FIG. 2b.

**[69]** As configurações ilustradas nas FIGs. 2a e 2b podem ser utilizadas como um colorímetro para a detecção de diferentes espécies químicas, como um turbidímetro (ou nefelômetro) para a detecção de turbidez e como um refractômetro para detectar o nível de um dado líquido.

5 **[70]** Existem várias reações colorimétricas que podem ser utilizadas para detectar distintos parâmetros tais como pH e as concentrações de ferro, nitrato, fosfato e amônia. Um exemplo específico utiliza um kit para a detecção de fosfato, 3466, comercializado pela Companhia LaMotte, na cidade de Chesterton, MD, EUA. Com este kit, uma mostra de água é coletada e um  
10 reagente, na forma de um pastilha, é dissolvido na amostra. Após uma reação química, a amostra de água muda de cor e as diferentes gradações dessa cor são utilizadas para determinar a concentração de uma dada espécie química. Na presente invenção, essa solução colorida, localizada no ponto sensor 92 e contendo o analito 93 que reagiu com a pastilha reagente, é posta em contacto  
15 com o núcleo da fibra óptica 106. Essa solução, no ponto sensor 92, pode então ser iluminada lateralmente por uma fonte de luz branca 100b, ou qualquer outra fonte de luz de comprimento de onda apropriado. A luz é absorvida pela solução, acoplada ao núcleo da fibra e a intensidade de luz guiada ao detector 108 é determinada.

20 **[71]** Um outro exemplo específico, é um kit de detecção de nitrato, kit número 3473, comercializado pela Companhia LaMotte. Com esse kit, uma amostra de água é coletada e um reagente de nitrato, na forma de uma pastilha, é dissolvido na mesma. Como antes, uma reação química modifica a cor da amostra de água e a intensidade da luz branca acoplada ao núcleo da fibra é  
25 transmitida ao detector e determinada. A intensidade desse sinal versus a concentração original de nitrato de sódio está ilustrada na FIG. 3a. Uma equação linear foi ajustada a esses dados com  $N=50$  (número de pontos experimentais) e  $R=0.9868$  (o coeficiente de correlação). Utilizando os valores críticos do Coeficiente de Correlação de Pearson, obtém-se um nível de  
30 confiança de mais de 99% para esse valor de R.

[72] Um turbidímetro foi demonstrado com a configuração do sensor mostrado na FIG. 2b. FIG. 3b é um gráfico dos dados obtidos com essa configuração. Nesse caso, a turbidez da solução foi utilizada para determinar a concentração de íons de potássio em uma amostra utilizando o método sódio borato de Tetrafenil (TPB) sendo o TPB utilizado como um reagente. Neste método, várias soluções, de diferentes concentrações de cloreto de potássio (KCl), foram diluídas a uma razão de 1:5. Oito mL desta solução diluta são misturados com duas gotas de hidróxido de sódio contendo um inibidor de metais e 0.05 g de TPB. Após uma reação química entre os íons de potássio e o TPB, a solução no ponto sensor 92 se torna túrva e, em contacto com o núcleo da fibra óptica 106, ela é iluminada por uma fonte de luz branca de LED 103 100b. A quantidade de luz acoplada ao núcleo da fibra óptica 106, devido ao espalhamento provocado pelas partículas da amostra final no ponto sensor 92, foi medida com um foto detector 108a. A intensidade deste sinal versus as diferentes concentrações do íon de potássio está documentada na FIG. 3b. Uma vez que o reagente TPB é adicionado à amostra original, o meio associado com o parâmetro de medição se torna turvo sendo que a turbidez aumenta com a concentração de íons de potássio no meio original. Isso resulta em um maior espalhamento da luz de sondagem aumentando o sinal que atinge o detector. Este gráfico foi ajustado com uma curva logarítmica linear contendo 17 6 pontos experimentais, resultando em um alto coeficiente de correlação  $R=0.9475$  0.96. As concentrações de íons de potássio utilizadas foram 30, 40, 50, 125, 250, 500 e 1000 ppm 50, 100, 200, 300 e 400 ppm. Utilizando os valores críticos do coeficiente de correlação de Pearson, esses valores correspondem a um nível de confiança de mais de 99% (Tabela A-6 de Triola, 2007) (consulte M. F. Triola, "Elementary Statistics", 10ª Edição, Pearson/Addison Wesley, 2007). Esse experimento foi repetido várias vezes resultando em valores semelhantes ao nível de confiança. Este sensor foi também testado utilizando um padrão de turbidez, Formazin, adquirido da Companhia Hach, em Loveland, CO, EUA, na forma de um kit de calibração, "Formazin Calibration Kit" (Edição do catálogo dos anos 2008-2009).

**[73]** As configurações das FIGs. 2a e 2b podem também ser utilizadas como um refratômetro de baixo custo para a detecção do nível de um líquido dentro de um recipiente. Por exemplo, referindo-se à FIG. 2b, o meio associado com o parâmetro de medição no ponto sensor 92 pode ser gasolina, água ou ar.

5 Quando o ponto sensor 92 está rodeado por ar, a intensidade de luz obtida pelo detector 108 é, por exemplo, 989 unidades. Quando o ponto sensor está circundado por água, a intensidade obtida é de 500 unidades. FIGs. 4a e 4b são ilustrações de como esse sensor pode ser utilizado como um sensor de nível de líquido. FIGs. 4a e 4b mostram a fibra óptica sensora 98 dentro do

10 recipiente 172, submersa em um líquido 174 com o nível do líquido e a interface do fluido 176. Acima do nível do líquido está o ar 178. O sensor de fibra 98 está conectado a um arranjo linear de LEDs 138. Quando o ponto sensor, associado com a fonte de luz de iluminação sondagem 103 100, é submerso no líquido 174 o sinal detectado pelo detector 108, e lido pela leitora

15 110 111, é menor na FIG. 4a do que aquele obtido na FIG. 4b. Esse resultado demonstra que um sinal de alta intensidade indica que o ponto sensor está acima do nível do líquido enquanto que um sinal de baixa intensidade indica que o ponto sensor está submerso. Esse procedimento pode ser repetido para os outros pontos sensores a fim de determinar o nível do líquido.

20 **[74]** Uma outra alternativa para as configurações acima está ilustrado na FIG. 5a. Nesse caso, o revestimento original da fibra óptica sensora 98' é preservado (isto é, não é removido) e iluminado por fora por uma fonte de luz de sondagem 100 enquanto a fibra está cercada pelo meio associado com o parâmetro de medição no ponto sensor 92. Já que esta configuração não

25 requer a remoção do revestimento da fibra, a manufatura da mesma é mais simples. Essa mesma fibra revestida pode ser utilizada com um filme sensível 99 depositado sobre o revestimento original (veja FIG. 5b). Esse filme sensível possui um indicador sensível ao analito visado.

**[75]** Deve-se notar que, de todas as configurações descritas, apenas a FIG.

30 5b requer um indicador químico imobilizado sobre a superfície da fibra desta

forma, as configurações restantes são bem mais simples do que as configurações propostas por Egalon (Patente americana No. 7,473,906).

5 [76] As fontes de luz de sondagem das configurações das FIGs. 1, 2, 5 e 8 podem ser substituídas por um LED contendo múltiplas pastilhas que são endereçadas individualmente. Esses LEDs contém mais de uma pastilha que emitem diferentes comprimentos de onda as quais podem ser utilizados para sondar um único ponto sensor a três comprimentos de onda diferentes e detectar mais de um parâmetro nesse único ponto.

10 [77] Há diversas maneiras de fabricar a sensor fibra sensora 98. Um dos métodos mais fáceis é obter uma fibra óptica 96a, disponível no mercado, com um núcleo 106, um revestimento 116 e um revestimento protetor externo 101 (FIG. 6a). Para fabricar o sensor 98, o revestimento protetor 116 e o revestimento 106 da fibra são removidos em posições específicas, escolhidas de antemão, nas quais se deseja sondar o analito (por exemplo, nitrato).  
15 Existem diversas fibras ópticas, comercialmente disponíveis, que podem ser utilizadas para esta tarefa incluindo fibras feitas de vidro e de plástico. Preferivelmente tal fibra teria um núcleo 106 de grande diâmetro, da ordem de 1 a 1,5 mm, capaz de produzir uma sensor fibra sensora 98 com um sinal elevado, embora outros diâmetros possam produzir resultados aceitáveis; porém diâmetros maiores e menores podem ser empregados.

20 [78] Usando uma fibra contendo um núcleo de vidro 106a (veja FIG. 6a), um revestimento plástico 116a, e um revestimento protetor externo de plástico 101a, a sensor fibra sensora 98 pode ser manufaturada a partir da fibra original 96. Isso é feito a partir da remoção de regiões específicas do revestimento externo e do revestimento plástico (veja Fig. 6a) em posições nas quais se deseja obter um ponto sensor. Esta remoção pode ser feita por meios químicos, por meios mecânicos (usando uma lâmina), ou usando uma fonte de calor capaz de queimar os revestimentos externo 101 e interno 116a. Utilizando um destes métodos, o núcleo de vidro 106a é exposto ao ambiente  
25 externo. O resultado daquela é uma fibra com parte de seu revestimento original removido ao redor do ponto sensor 92, como ilustrado na Figura 6b.  
30

Embora esta ilustração mostre apenas uma região exposta 92, se pode remover seções múltiplas ao longo do sensor ou até mesmo todo o revestimento inteiro ao redor do núcleo 106.

[79] Fibras ópticas de plástico, por exemplo fibra óptica Raytela® PBFU-FB1000 da Toray Industries (Raytela® é uma marca registrada da Toray Kabushiki Kaishi (Toray Industries, Inc.) Corporation) Tokyo, Japan, é um tipo de fibra que também pode ser utilizada para criar o sensor acima. Esta fibra possui um núcleo e revestimento de plástico porém sem qualquer revestimento externo. O revestimento pode ser removido usando acetona de acordo com o procedimento descrito por D.F. Merchant, P. J. Scully e N.F. Schmitt no paper "Chemical tapering of polymer optical fibre", Sensors and Actuators, vol. 76, pp. 365-371, 1999.

[80] Consultando a Fig. 6c, pode-se ver uma incorporação adicional que inclui um espelho refletor 122 no segundo término 118 do sensor da fibra sensora 98, localizado na face oposta do detetor 108. Esse espelho refletor pode ser instalado a fim de aumentar a quantidade do sinal de luz que atinge o detetor 108 uma vez que o sinal de luz que se propaga na direção revés, 124, é redirecionado. Esse método pode ser utilizado para aumentar o sinal baseado em fluorescência, absorção ou espalhamento.

[81] Um outro arranjo, ilustrado na Fig. 7, inclui o uso de uma sensor de fibra óptica fibra sensora 98a com um núcleo afilado 107, divergindo geralmente em direção ao detetor, à medida que a fluorescência 104a, onde indicada, se propaga da região do ponto sensor 92 em direção ao detetor 108. A interface entre o núcleo afilado e o revestimento está referida como numeral 128. Comparado às outras configurações, essa configuração com o núcleo afilado 107 possui a vantagem de acoplar uma quantidade maior de luz no núcleo da fibra óptica 107 106 resultando no aumento do sinal do sensor da fibra sensível 98. Com um núcleo de fibra óptica afilado 107, os raios de luz que se irradiariam do núcleo da fibra óptica 107 106, são acoplados a modos guiados de baixa perda, e se propagam por distâncias bem maiores. Esta fibra pode ser manufacturada com uma torre de puxamento de fibra utilizando uma

preforma de vidro afilada enquanto a mesma é puxada a uma velocidade constante. Um outro método consiste em puxar uma preforma cilíndrica regular com uma velocidade variável. Alternativamente, esta fibra pode também ser manufaturada manualmente por pessoas habilidosas na arte de dar forma a vidros. Uma quarta alternativa é utilizar uma fibra óptica de plástico e o procedimento descrito por Merchant et al. citado acima.

**[82]** Em uma outra incorporação, ilustrada na Fig. 8, uma pluralidade de fontes de luz, e.g., LEDs UV 100a, são instaladas dentro de um suporte de fibra óptica 134 formando um arranjo linear de fontes de luz ao longo da fibra sensora sensor 98. Nesse caso, cada fonte de luz de sondagem 100 emite uma luz de excitação simultaneamente, em direção transversa ao núcleo da fibra óptica 106 (veja Figs. 1a, 1b, 1c, 2a, 2b, 5a e 5b). O comprimento desse arranjo linear de fontes de luz corresponde substancialmente ao comprimento da região sensível do ponto sensor 92 da fibra sensora do sensor de fibra óptica 98 (ilustrados nas Figs. 1a, 1b, 1c, 2a, 2b, 5a e 5b). Esse arranjo pode ser utilizado para aumentar o sinal total do sensor da fibra sensora 98. Um conector de fibra óptica 132 é utilizado para proteger o término do sensor da fibra sensora 98, prevenindo a sua ruptura, e permitindo um posicionamento reproduzível do término da fibra sensora sensor de fibra 98 ao lado do detector 126 108 (e.g., veja também Figs. 1a, 1b, 1c, 2a, 2b, 5a e 5b). Ligando e desligando cada um dos LEDs 100a, de maneira alternada, é possível sondar uma região sensora um ponto sensor específico 92, resultando em uma fibra sensora distribuída sensor 98 e aperfeiçoada.

**[83]** A fonte de alimentação 114 (veja Figs. 1a, 1b, 1c, 2a, 2b, 5a e 5b) deve, de preferência, ser projetada para que não exceda a corrente máxima dos LEDs 100a. Fontes de alimentação para LEDs estão disponíveis comercialmente, as mesmas podendo ser utilizadas para alimentar cada fonte de luz dentre elas o LED-PS do Sandhouse Design (Sandhouse Design LLC, Dunedin, FL, EUA).

**[84]** Fig. 9a é uma ilustração de um espectrômetro simples que utiliza os vários pontos sensores (92, 92', 92'', ...) do sensor de fibra óptica de iluminação

lateral (98), e um único detector (108), para determinar a concentração de um único analito (93) localizado em vários pontos sensores (92). Cada ponto sensor (92) é iluminado por sua fonte de luz correspondente (100, 100', 100'', ...) tendo, as mesmas, diferentes comprimentos de ondas,  $\lambda_i$ . Uma vez que cada um desses pontos sensores são sondados, um de cada vez, o detector determina a intensidade do sinal da fonte luz que está acesa (100). Uma vez que a absorção do analito (93) é determinada para cada comprimento de onda, é possível obter uma resposta espectral do mesmo, desta forma temos um dispositivo que funciona como um espectrômetro simples e barato. A resolução deste tipo de espectrômetro depende da largura da faixa espectral,  $\Delta\lambda_i$ , de cada fonte de sondagem (100).

**[85]** Fig. 9b é uma ilustração de uma outra incorporação alternativa do sensor de fibra (98) com pelo menos dois pontos sensores (92) iluminados simultaneamente por seus LEDs (100a) correspondentes. Esses LEDs possuem distintos comprimentos de onda os quais permitem a determinação simultânea dos parâmetros de medição, determinados em seus pontos sensores correspondentes, por um espectrômetro (108c), localizado no primeiro término da fibra óptica (120).

**[86]** Outro arranjo alternativo deste esquema de iluminação é possível. Isso envolve a substituição dos diodos emissores de luz 100a por uma tira de OLEDs (Diodos Orgânicos de Emissão de Luz ou "Organic Light Emitting Diodes"). Esses OLEDs podem, em princípio, serem incorporados a uma tira sobre a qual o sensor de fibra óptica é montado.

**[87]** Fig. 10a mostra um arranjo alternativo que utiliza uma fibra óptica de iluminação 144 capaz de sondar transversalmente a região sensora o ponto sensor 92 (veja Figs. 2a e 2b) da fibra sensora de fibra óptica 98. Neste caso, a fibra óptica de iluminação 144 opera como um guia de luz para a luz de iluminação 150 e a fibra óptica de iluminação 144 é disposta paralela à fibra sensora do sensor de fibra óptica 98. A fibra de iluminação 144 é manufaturada com uma face distal 148, a um ângulo de aproximadamente 45 graus, embora se possa utilizar outros ângulos também, a fim de redirecionar a



luz de iluminação 150 em direção à região sensora da fibra sensora de fibra óptica 98. Porém, ângulos diferentes de  $45^\circ$  45 graus possam ser empregados desde que a luz seja direcionada em direção à região sensora. Neste arranjo, a luz de iluminação é gerada pela fonte de luz de sondagem 100 localizada primeiro término da fibra 152, e introduzida axialmente. A posição da face refletora distal 148 da fibra de iluminação pode ser transladada para sondar diferentes seções da fibra sensora 98, ou se pode também utilizar múltiplas fibras de iluminação, cada uma sondando uma área específica da fibra sensível fibra óptica sensora 98.

5  
10 **[88]** FIG. 10b ilustra uma incorporação alterna da FIG. 10a na qual múltiplas fontes de iluminação luz de sondagem, 100, 100', 100'', etc., ilumina lateralmente a fibra óptica de iluminação 145 144. Essa é uma configuração preferida já que a mesma possibilita uma iluminação múltipla e simultânea da fibra óptica de iluminação 145 144 a partir de diferentes fontes de luz. Essa  
15 configuração também simplifica a fibra de iluminação já que a mesma não requer um alinhamento preciso das fontes nem sequer o uso de lentes para focalizar a luz no primeiro término da fibra face terminal 152. Com esta configuração específica, a fibra óptica de iluminação 145 144 deve ser preferivelmente iluminada em uma região na qual não há qualquer  
20 revestimento. Desta forma, a iluminação da fibra óptica de iluminação 145 144 é efetivada de uma maneira semelhante à da fibra sensora 98. Neste caso também, a fibra óptica de iluminação 145 144 também se comporta como um simples acoplador N X 1 o qual requer uma única fibra.

**[89]** Um outro arranjo alternativo, ilustrado na Fig. 11a, usa uma fibra óptica  
25 de iluminação 154 com várias redes de Bragg de longo período 156. Esta fibra de iluminação 154 é posicionada ao longo da fibra sensível fibra óptica sensora 98 e ilumina várias de suas regiões sensíveis com as redes de longo período 156. Cada uma das redes de longo período 156 é projetada para acoplar os modos guiados de propagação 158 da fibra de iluminação 154 aos modos de  
30 radiação não-guiados 160 162 ao redor de um comprimento de onda específico,  $\lambda_i$ , dentro do espectro de absorção da região sensora. Neste caso, a

luz de banda larga de uma fonte de iluminação de luz de sondagem 100 passa por um monocromador 160 que faz a varredura dos distintos comprimentos de onda dentro do espectro de absorção da região sensível da fibra sensora 98. Quando o monocromador 160 é ajustado ao comprimento de onda  $\lambda_i$ , somente as redes de longo período sintonizadas a este comprimento de onda acoplam a luz da fibra óptica de iluminação em direção à fibra sensível da fibra óptica sensora 98 iluminando a região correspondente da fibra sensível localizada ao lado desta específica rede de Bragg longo período 156. Esse procedimento pode ser repetido para outros comprimentos de onda. Esse mesmo procedimento, descrito na Fig. 11b, pode ser utilizado para a configuração ilustrada na Fig. 11a na qual as fontes de iluminação de luz de sondagem 100, 100' e 100" são posicionadas ao lado da fibra de iluminação (veja Fig. 11b). Neste caso cada fonte de iluminação de luz de sondagem pode ser selecionada com diferentes comprimentos de onda sintonizados às redes da fibra de iluminação 154.

**[90]** Mais duas incorporações da fibra óptica de iluminação estão ilustradas na Figs. 12a e 12b para iluminação axial e iluminação lateral, respectivamente. Neste caso, a fibra de iluminação 157 é manufaturada com vários refletores dielétricos 180, cada qual posicionado a um ângulo de  $45^\circ 45$  graus. Cada refletor dielétrico é projetado para refletir a luz a um comprimento de onda específico,  $\lambda_i$ , (e.g.,  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  e  $\lambda_3$ ), de um modo guiado a um modo de radiação da fibra de iluminação, em direção a região sensora ao ponto sensor 92 da fibra óptica sensível 98. Esta fibra se comporta de uma maneira similar à fibra de iluminação feita com redes de Bragg com a vantagem adicional de seu baixo custo. Os comprimentos de onda,  $\lambda_i$ , estão dentro do espectro de absorção do meio associado com o parâmetro de medição no ponto sensor 92 (veja FIGS. 1a, 1b e 1c) ao redor da fibra sensora 98. Variando o comprimento de onda da luz de entrada, é possível sondar múltiplos pontos, a posições pré-determinadas, ao longo do sensor de fibra criando, desta forma, um sensor distribuído aperfeiçoado.

[91] Em ambos os casos ilustrados pelas FIGS. 11a e 12a, o monocromador pode ser substituído por múltiplas fontes de luz monocromáticas, e.g., lasers e LEDs.

5 [92] Um arranjo do sistema de detecção, ilustrado na FIG. 13, consiste de um fotodetector de silício 108b dentro de um compartimento a prova de luz 109, um cabo 112 para o fotodetector, um conector macho 164 e uma unidade de leitora 166 111. O conector macho 164 é conectado ao conector fêmea 168 da unidade de leitora 166 111. O fotodetector 108a é montado dentro de um invólucro, hermético à luz 109, o qual pode ser conectado ao conector de fibra

10 óptica ilustrado na Fig. 8. Esse detector é conectado a um cabo que transmite o sinal fotoelétrico a um circuito de amplificação. O circuito amplifica o sinal e a sua intensidade é indicada no display 170 da unidade de leitora 166 111. Vários sistemas de detecção, disponíveis comercialmente, podem ser utilizados com essa invenção por exemplo, o medidor de luz da AEMC Instruments,

15 modelo CA811, (Chauvin Arnoux®, Inc., nome fantasia, AEMC® Instruments, Foxborough, MA, EUA), o módulo de fotodiodo C10439 da Corporação Hamamatsu (Hamamatsu Photonics, K.K., sediada na cidade de Hamamatsu, no Japão e com subsidiária em Bridgewater, NJ, EUA), e o detector de ponto único, modelo No. SPD-UV/VIS da Sandhouse Design (Sandhouse Design,

20 Bridgewater, NJ, EUA).

[93] Esta invenção, e suas formas variadas, pode ser utilizada em várias aplicações, incluindo, porém não limitada a, o monitoramento da turbidez e cor de uma solução, a concentração de clorofila, o nível de um líquido e outros.

25 [94] Embora esta invenção tenha sido descrita em termos de arranjos particulares, se reconhece que variações adicionais da mesma possam ser concebidas sem abandonar esse conceito inventivo. Muitas melhorias, modificações e adições serão aparentes ao artesão hábil sem que o espírito e o alcance da presente invenção, como descrita e definida nas reivindicações abaixo, sejam abandonados.

## Números de Referência

92	Ponto sensor, Região exposta do núcleo da fibra	111	Leitora
92a	Ponto sensor específico	112	Cabo do fotodetector
93	Analito, meio associado com o parâmetro de medição	114	Fonte de alimentação
96	Fibra óptica original	116	Revestimento da fibra óptica
96a	Fibra óptica disponível comercialmente	116a	Revestimento de plástico da fibra óptica
98	Fibra sensora, Fibra óptica sensora	118	Segundo término da fibra óptica
98a	Fibra óptica com núcleo afilado	120	Primeiro término da fibra óptica
99	Película reactiva, Película sensível	122	Espelho refletor
100	Fonte de luz de sondagem	124	Modo de propagação ao revés
100a	LED	128	Interface entre o núcleo afilado e o revestimento.
100b	Fonte de luz branca	132	Conector de fibra óptica
101	Revestimento externo protetor	134	Suporte da fibra óptica
101a	Revestimento externo de plástico	138	Arranjo linear de LEDs
104	Sinal óptico	144	Fibra óptica de iluminação
104a	Fluorescência	148	Término refletor
106	Núcleo da fibra óptica, núcleo	150	Luz de iluminação
106a	Núcleo de vidro	152	Primeiro término da Fibra óptica
107	Núcleo afilado	154	Fibra óptica de iluminação com várias redes de longo período
108	Detector	156	Redes de longo período
108a	Fotodetector	157	Fibra óptica de iluminação com refletores dielétricos
108b	Fotodetector de silício	158	Modos guiados de uma fibra óptica de iluminação

108c	Espectrômetro	160	Monocromador
109	Invólucro hermético à luz	162	Modos de radiação
110	Processador de sinais	164	Conector macho do Fotodetector
168	Conector fêmea da unidade de leitura	176	Interface do fluido
170	Display	178	Ar
172	Recipiente	180	Refletores dielétricos na fibra
174	Líquido		

### REIVINDICAÇÕES

1. Sensor de fibra óptica multi paramétrico e de múltiplos pontos sensores compreendendo:

uma fibra óptica sensitiva (98),

possuindo um primeiro término (120) e um segundo término (106),

possuindo um núcleo (106),

estando configurada a se localizar em um ambiente que contém substâncias que quimiluminesce, fosforesce, fluoresce, espalha ou absorve luz, e possuindo pelo menos uma região do núcleo (92) exposta a, e em contato direto com, o ambiente, dita região exposta se comporta como uma região sensitiva da fibra, sendo que dita região sensitiva é opticamente afetada pelo ambiente;

pelo menos uma fonte de luz de sondagem (100), produzindo uma luz de sondagem que interage com o meio mensurando no ambiente da dita região sensitiva gerando, desta maneira, uma luz de sondagem modificada, dita luz de sondagem modificada é substancialmente afetada pelo meio de medição o qual interage com o ambiente e;

caracterizado pelo fato de que a luz de sondagem modificada é substancialmente acoplada ao dito núcleo da fibra como um sinal óptico (104).

2. Sensor de fibra óptica multi paramétrico e de múltiplos pontos sensores, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado por

um detector (108), acoplado opticamente ao primeiro término (120) do dito sensor de fibra óptica, a fim de receber o dito sinal de luz quando o mesmo cruza o primeiro término (120), dito detector mede a intensidade

do sinal de luz em um intervalo de comprimentos de onda e correlaciona a intensidade de luz com um sinal elétrico.

3. Sensor de fibra óptica multi paramétrico e de múltiplos pontos sensores, de acordo com a reivindicação 2, **caracterizado** por:

um processador de sinais (110), dito processador de sinais estando em comunicação de dados com o dito detector (108); sendo que, o dito sinal elétrico é correlacionado com uma quantidade do parâmetro de medição que está sendo medido.

4. Sensor de fibra óptica multi paramétrico e de múltiplos pontos sensores, de acordo com a reivindicação 3, **caracterizado** por um display em comunicação de dados com o dito processador de sinais e uma fonte de alimentação (114) capaz de prover a energia necessária à dita fonte de luz de sondagem, o dito processador de sinais e um display.

5. Sensor de fibra óptica multi paramétrico e de múltiplos pontos sensores, de acordo com a reivindicação 3, **caracterizado** por um display em comunicação de dados com o dito processador de sinais e uma fonte de alimentação (114) capaz de prover a energia necessária à dita fonte de luz de sondagem, dito detector, o dito processador de sinais e um display.

6. Sensor de fibra óptica multi paramétrico e de múltiplos pontos sensores, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado** por:

dita fibra óptica sensitiva tendo pelo menos duas seções de seu revestimento removidas (92) com pelo menos uma região do núcleo da fibra (92) em contato direto com o

ambiente provendo pelo menos duas regiões sensíveis;

dita fonte de luz de sondagem iluminando cada região sensitiva individualmente, uma de cada vez; e

dita luz de sondagem interage opticamente e de forma individual com o ambiente em cada região sensitiva de maneira tal que uma luz de sondagem modificada é gerada a partir daí, cada tal modificação sendo substancialmente afetada pelo meio do dito parâmetro de medição (93) no ambiente.

7. Sensor de fibra óptica multi paramétrico e de múltiplos pontos sensores, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado** por:

dita fibra óptica sensitiva tendo pelo menos duas seções de seu revestimento removidas (92) com pelo menos uma região do núcleo da fibra (92) em contato direto com o ambiente provendo pelo menos duas regiões sensíveis;

dita fontes de luz de sondagem iluminando duas ou mais regiões sensitivas simultaneamente; e

dita luz de sondagem interage opticamente com o ambiente em cada dita região sensitiva de maneira tal que uma luz de sondagem modificada é gerada a partir daí, cada tal modificação sendo substancialmente afetada pelo meio do parâmetro de medição (93) no ambiente.

8. Sensor de fibra óptica multi paramétrico e de múltiplos pontos sensores, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado** pela dita fonte de luz de sondagem que ilumina cada região sensitiva individualmente, uma de cada vez.

9. Sensor de fibra óptica multi paramétrico e de múltiplos pontos sensores, de acordo com a reivindicação



1, caracterizado por uma fonte de luz de sondagem que pode ser posicionada a qualquer distância da dita região sensitiva possibilitando a iluminação da dita região sensitiva.

10. Sensor de fibra óptica multi paramétrico e de múltiplos pontos sensores, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado por uma região sensitiva sem qualquer indicador químico.

11. Sensor de fibra óptica multi paramétrico e de múltiplos pontos sensores, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado por um sensor de fibra óptica (98) com o seu revestimento original (116).

12. Sensor de fibra óptica multi paramétrico e de múltiplos pontos sensores, de acordo com a reivindicação 11, caracterizado por uma fibra sensitiva (98) incluindo uma película sensitiva (99) depositada sobre o dito revestimento original.

13. Sensor de fibra óptica multi paramétrico e de múltiplos pontos sensores, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado por um meio associado com o parâmetro de medição dita medição sendo uma da seguinte lista: medição de cor, turbidez, analito e índice de refração.

14. Sensor de fibra óptica multi paramétrico e de múltiplos pontos sensores, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado por um ambiente localizado ou entre o dito núcleo da fibra e a fonte de luz ou atrás do núcleo.

15. Sensor de fibra óptica multi paramétrico e de múltiplos pontos sensores, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado por um núcleo de fibra rodeado pelo ambiente.

16. Sensor de fibra óptica multi paramétrico e de múltiplos pontos sensores, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado** por uma interação óptica da luz de sondagem com o meio do parâmetro de medição que resulta em uma das seguintes: em absorção de luz, espalhamento, e fluorescência, fosforescência e quimiluminescência.

17. Sensor de fibra óptica multi paramétrico e de múltiplos pontos sensores, de acordo com a reivindicação 13, **caracterizado** por um analito que interage quimicamente com o ambiente, produzindo, desta forma, uma mudança na cor do ambiente.

18. Sensor de fibra óptica multi paramétrico e de múltiplos pontos sensores, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado** pela dita fibra sensitiva que se comporta como um refratômetro capaz de discriminar ambientes de diferentes índices de refração.

19. Sensor de fibra óptica multi paramétrico e de múltiplos pontos sensores, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado** pela dita fibra sensitiva operável de uma maneira capaz de determinar o nível do líquido em contato com o sensor.

20. Sensor de fibra óptica multi paramétrico e de múltiplos pontos sensores, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado** por um sistema sensor de múltiplos pontos ao longo da fibra no qual cada ponto sensor é capaz de detectar diferentes parâmetros de medição.

21. Sensor de fibra óptica multi paramétrico e de múltiplos pontos sensores, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado** pelo dito sistema sensor de múltiplos pontos ao longo da fibra no qual cada ponto sensor é

iluminado por uma multitude de fontes de luz de distintos comprimentos de onda com o intuito de detectar uma pluralidade de parâmetros de medição.

22. Sensor de fibra óptica multi paramétrico e de múltiplos pontos sensores, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado** por

dita luz de sondagem a qual é transmitida por uma fibra óptica de iluminação,

dita fibra óptica de iluminação com uma multitude de espelhos refletores dielétricos (180),

dita fibra de iluminação estando posicionada paralela à dita fibra óptica sensitiva,

dito refletores dielétricos iluminando dita região sensitiva da fibra óptica sensível a posições discretas e a um ângulo pré-determinado,

na qual uma fonte de luz de sondagem introduz uma luz de iluminação em um monocromador,

dito monocromador filtra a luz de sondagem a um comprimento de onda específico,

dita luz de sondagem a um comprimento de onda específico é introduzida axialmente na dita fibra óptica de iluminação,

dita luz de sondagem a um comprimento de onda específico se propaga até o seu refletor dielétrico específico o qual possui características similares no que se refere ao comprimento de onda, e

dito refletor dielétrico específico redirecionando a luz de sondagem a um ângulo em direção a dita região sensitiva de fibra sensora,

no qual cada refletor dielétrico é projetado de uma

maneira tal capaz de acoplar a luz do dito modo guiado da dita fibra de iluminação em modos de radiação de comprimentos de onda específicos, os ditos modos de radiação iluminando a região sensível da fibra.

23. Fibra óptica de iluminação, conforme definida na reivindicação 22, **caracterizada** pela:

remoção de pelo menos uma seção do revestimento da dita fibra óptica de iluminação,

dita seção com o revestimento removido é iluminada lateralmente por uma pluralidade de fontes de luz de sondagem que acoplam luz ao núcleo da fibra de iluminação em forma de modos guiados e modos de vazamento a fim de iluminar dita fibra sensível.

24. Sensor de fibra óptica multi paramétrico e de múltiplos pontos sensores, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado** pela iluminação de cada dita região sensível por uma pluralidade de fontes de luz de comprimentos de onda diferentes para a detecção de um único mensurando.

25. Fibra óptica de iluminação (144) compreendendo:

um primeiro término (120) e um segundo término (118),

possuindo um núcleo (106) com pelo menos uma região exposta do núcleo (92),

pelo menos uma fonte de luz de sondagem (100), produzindo uma luz de sondagem,

**caracterizada** pelo fato de que a luz de sondagem ilumina lateralmente dita região exposta do núcleo, e é substancialmente acoplada ao dito núcleo da fibra de iluminação como uma luz de iluminação (150).

26. Fibra óptica de iluminação (144), de acordo com a reivindicação 25, caracterizada por um núcleo chanfrado (107), divergindo em uma das direções de propagação da luz de iluminação, a fim de aumentar a intensidade de dita luz de iluminação que se propaga em ambas direções.

27. Fibra óptica de iluminação, de acordo com a reivindicação 25, caracterizada por um núcleo chanfrado (107), divergindo em ambas direções de propagação da luz de iluminação, a fim de aumentar a intensidade de dita luz de iluminação que se propaga em ambas direções.

28. Fibra óptica de iluminação, de acordo com a reivindicação 25, caracterizada por conter pelo menos ou um espelho dielétrico (180), ou uma rede de longo período, ao longo do comprimento da fibra, cada dito espelho dielétrico, ou dita rede de longo período, capaz de redirecionar a luz de dita fonte de luz de sondagem, para o exterior de dita fibra de iluminação dentro de uma determinada faixa de comprimentos de onda.

29. Fibra óptica de iluminação, de acordo com a reivindicação 26, caracterizada por conter pelo menos ou um espelho dielétrico (180), ou uma rede de longo período, ao longo do comprimento da fibra, cada dito espelho dielétrico, ou dita rede de longo período, capaz de redirecionar a luz de dita fonte de luz de sondagem, para o exterior de dita fibra de iluminação dentro de uma determinada faixa de comprimentos de onda.

30. Fibra óptica de iluminação, de acordo com a reivindicação 27, caracterizada por conter pelo menos ou um espelho dielétrico (180), ou uma rede de longo período, ao longo do comprimento da fibra, cada dito espelho

dielétrico, ou dita rede de longo período, capaz de redirecionar a luz de dita fonte de luz de sondagem, para o exterior de dita fibra de iluminação dentro de uma determinada faixa de comprimentos de onda.

31. Sensor de fibra óptica multi paramétrico e de múltiplos pontos sensores, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado** por um núcleo chanfrado (107), divergindo na direção de propagação da luz, para aumentar o montante de sinal óptico que é guiado ao final da fibra.

32. Sensor de fibra óptica multi paramétrico e de múltiplos pontos sensores, de acordo com a reivindicação 2, **caracterizado** por

um segundo detector (108), opticamente acoplado ao dito segundo término (118) de dita fibra óptica,

para receber o dito sinal luminoso quando o mesmo cruza o dito segundo término (118),

para medir a intensidade do sinal luminoso dentro de uma determinada faixa de comprimentos de onda e

para correlacionar a intensidade deste sinal de luz com um sinal elétrico.

33. Fibra óptica de iluminação, conforme definida na reivindicação 22, **caracterizada** pela ausência de um monocromador, na qual,

pelo menos, uma secção da dita fibra de iluminação tem seu revestimento removido,

dita secção com o revestimento removido é iluminada por uma pluralidade de fontes de luz de sondagem que acoplam a luz ao núcleo da fibra de iluminação como modos guiados e de radiação, a fim de iluminar a dita fibra sensitiva.

34. Sensor de fibra óptica multi paramétrico e de múltiplos pontos sensores, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado por cada dito ponto sensor que é iluminado simultaneamente por uma pluralidade de fontes de luz de diferentes comprimentos de onda a fim de detectar uma pluralidade de mensurandos.

35. Método de medição de uma propriedade de uma substância com o sensor de fibra óptica multi paramétrico e de múltiplos pontos sensores, conforme definido na reivindicação 1, caracterizado pelo fato de compreender as seguintes etapas:

a aplicação de, pelo menos, uma substância a ser testada em, pelo menos, uma região exposta do núcleo;

a aplicação de energia a, pelo menos, uma fonte de luz de sondagem para iluminar, pelo menos, uma região exposta do núcleo;

a detecção e medição da intensidade da luz emitida por um término do dito sensor de fibra óptica;

a comparação da intensidade de luz medida com medidas obtidas previamente com substâncias de propriedades conhecidas.

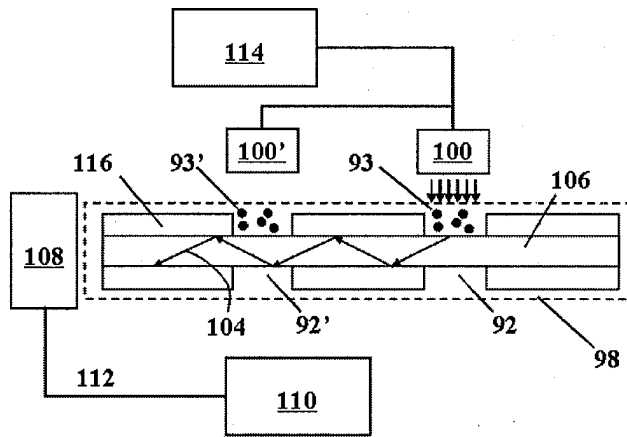


FIG. 1a.

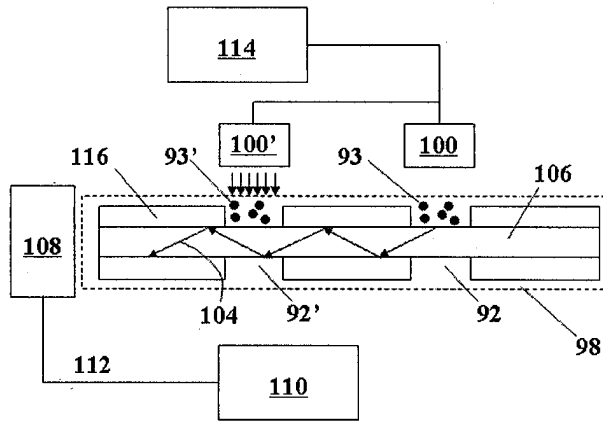


FIG. 1b.

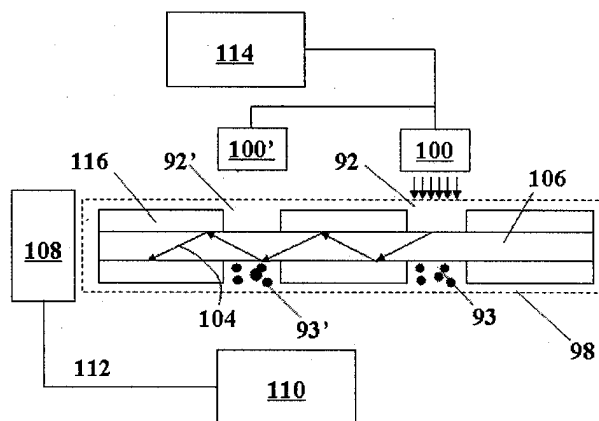


FIG. 1c.



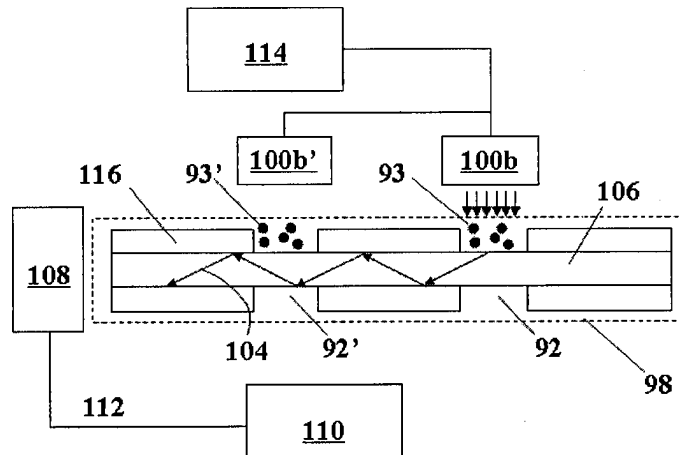


FIG. 2a.

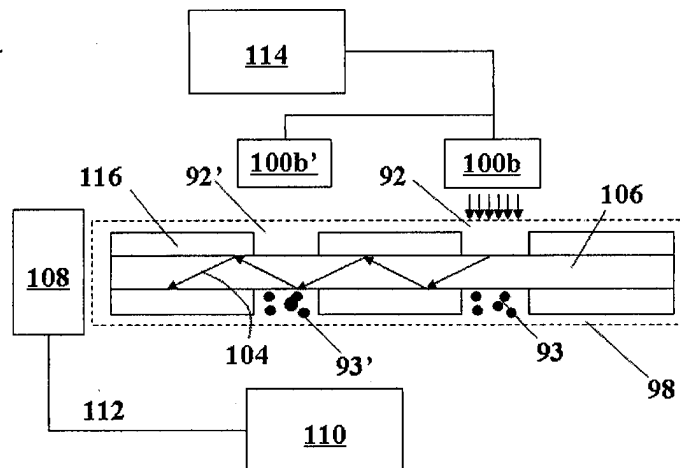


FIG. 2b.

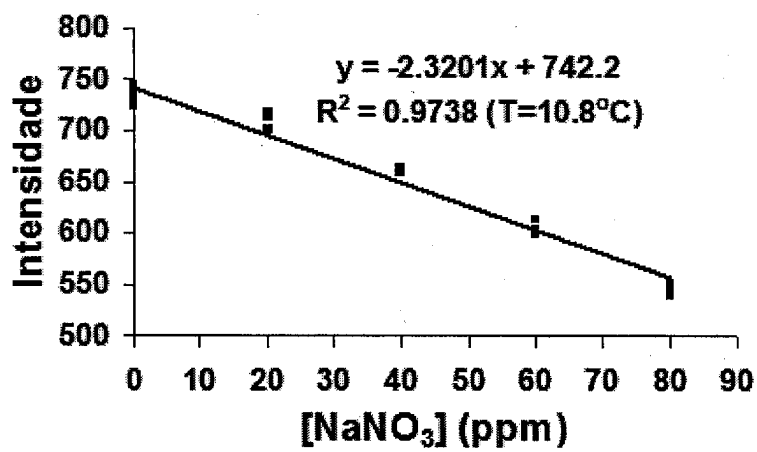


FIG. 3a.

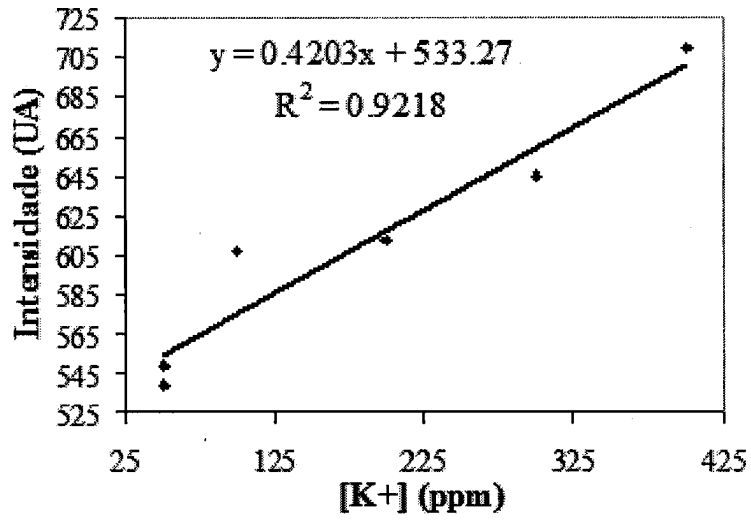


FIG. 3b.

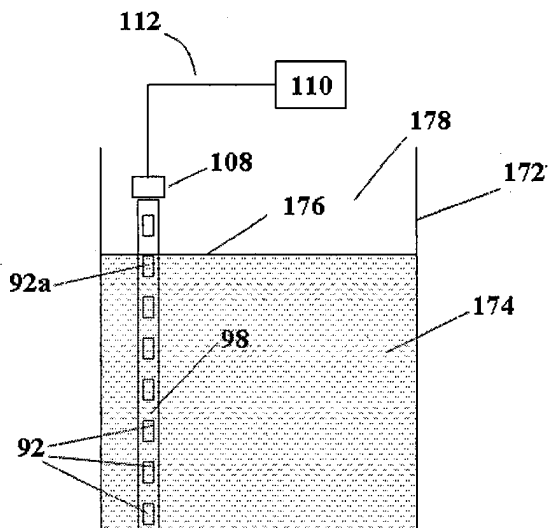


FIG. 4a.

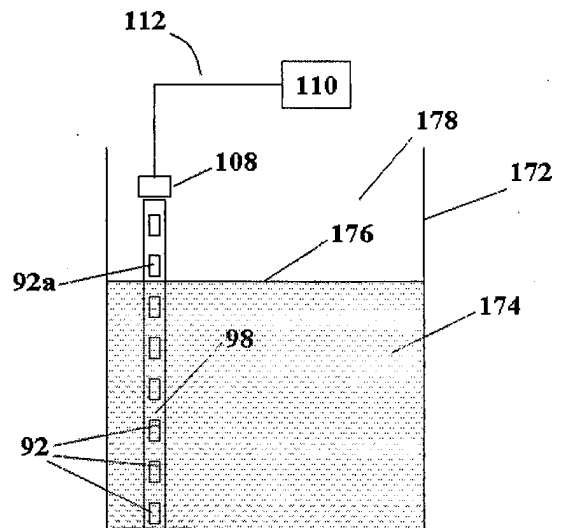


FIG. 4b.

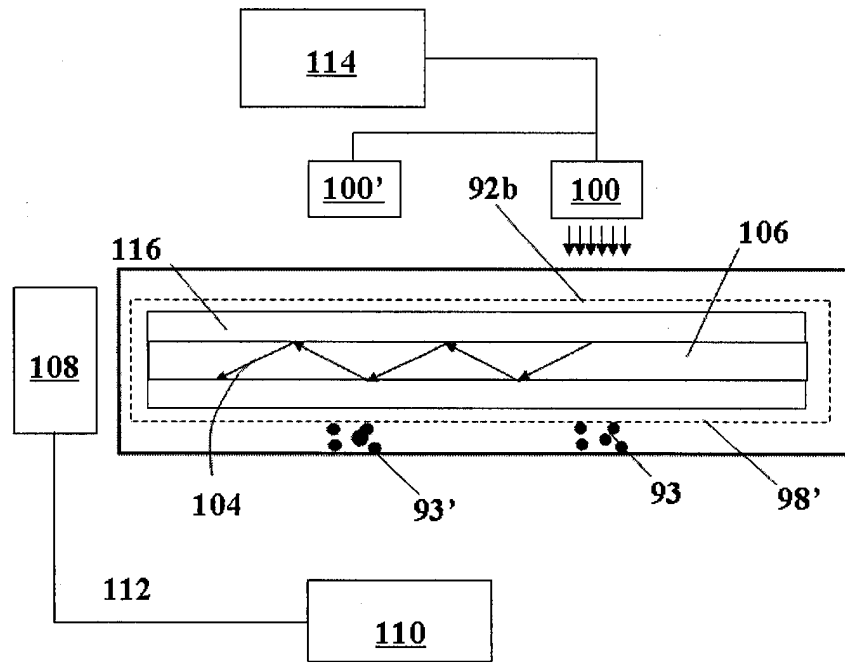


FIG. 5a.

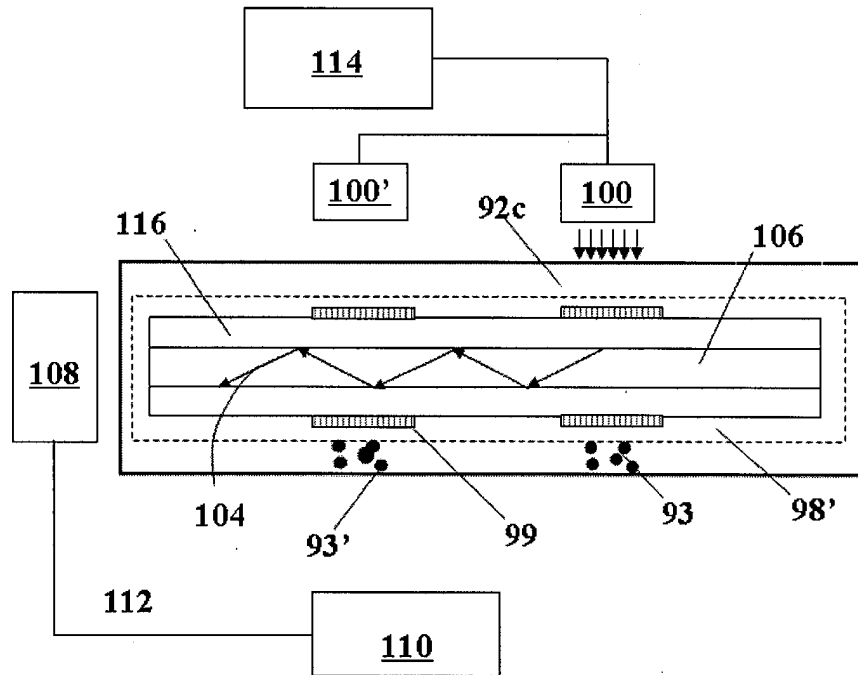


FIG. 5b.

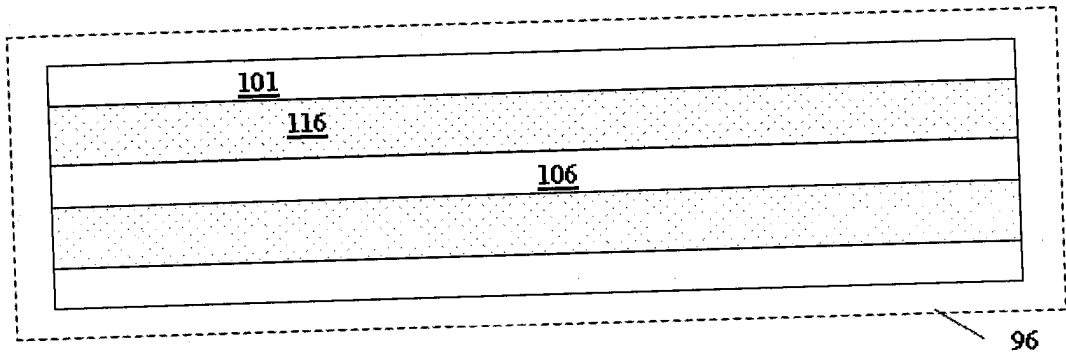


FIG. 6a.

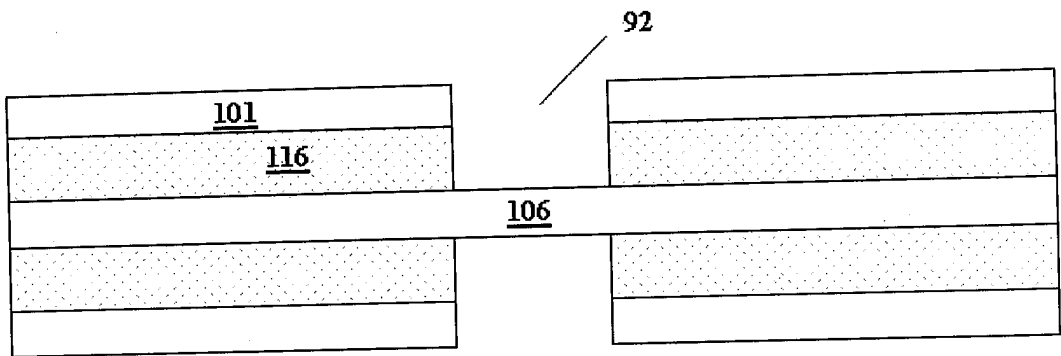


FIG. 6b.

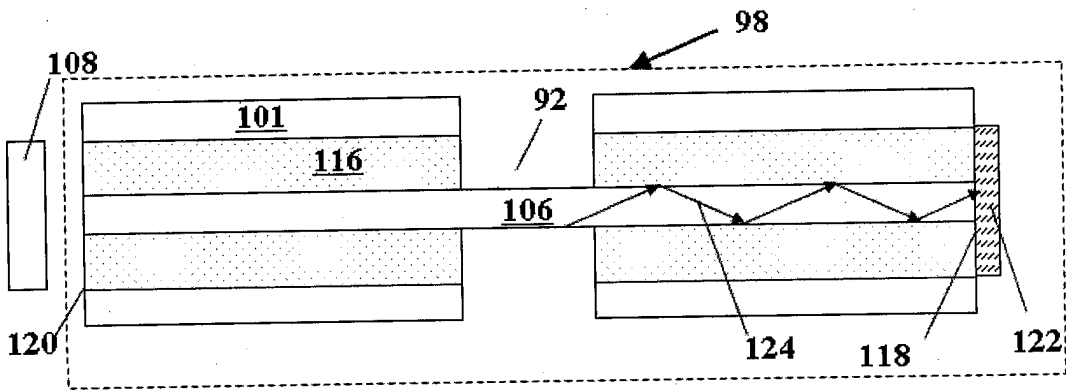


FIG. 6c.

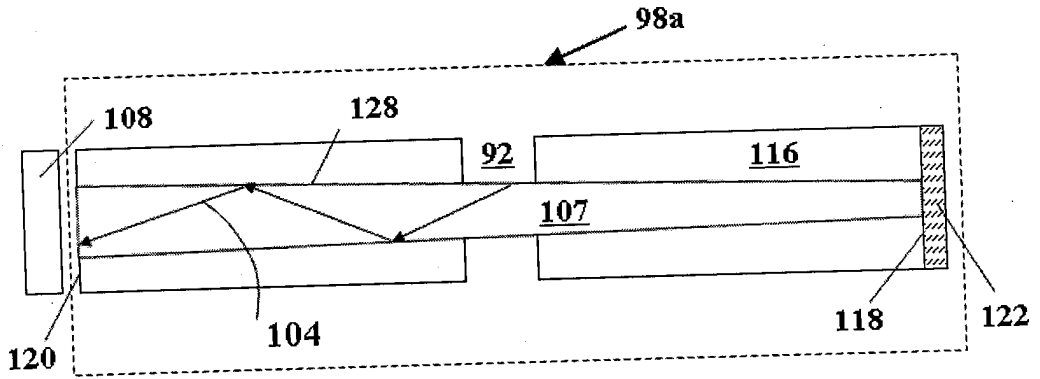


FIG. 7.

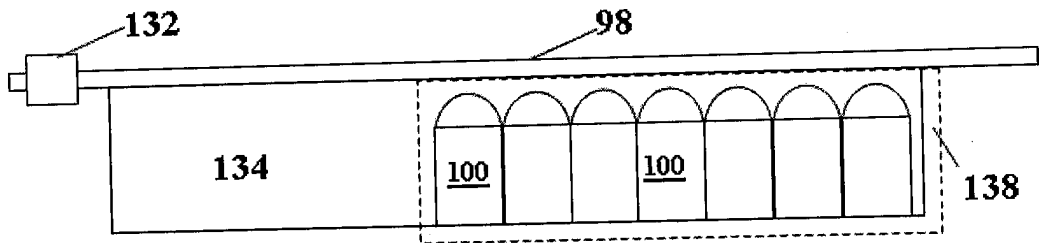


FIG. 8

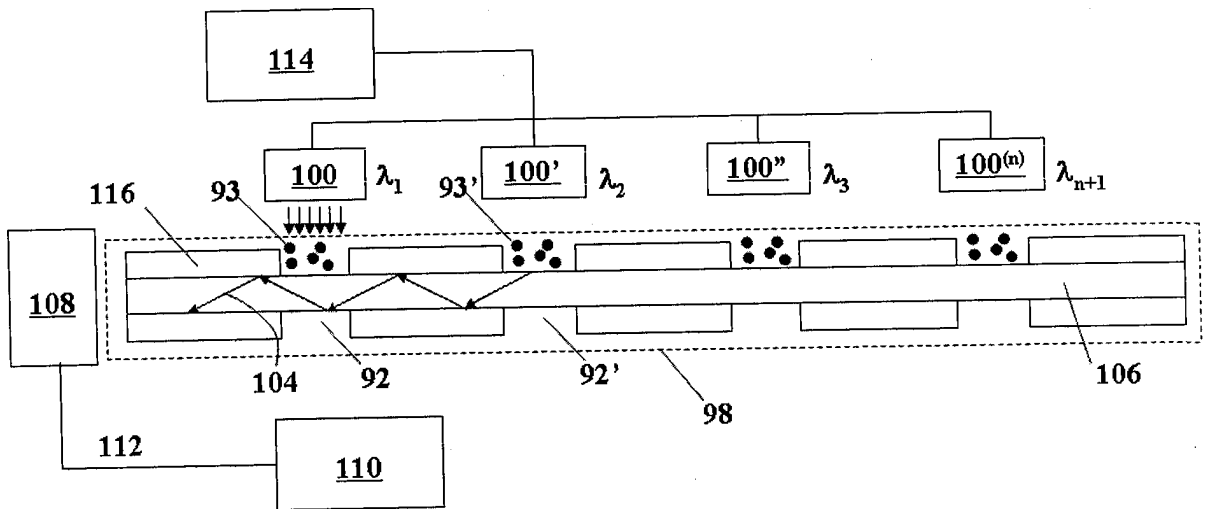


FIG. 9a.

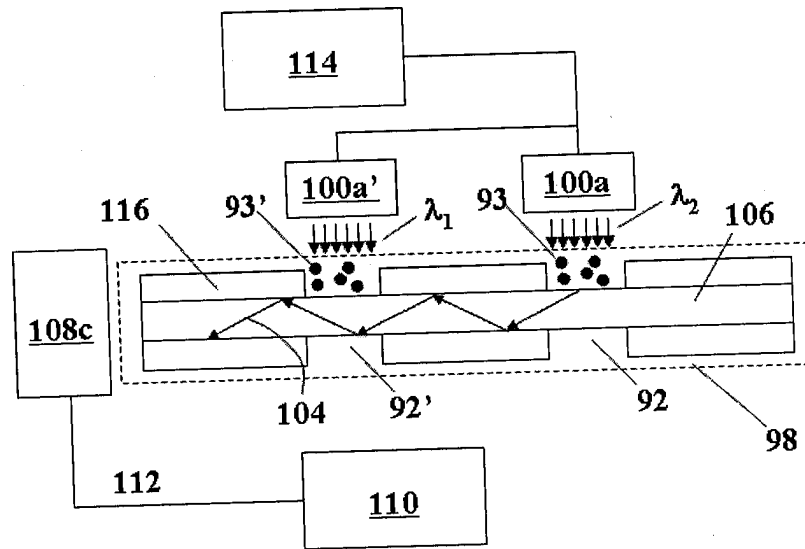


FIG. 9b.

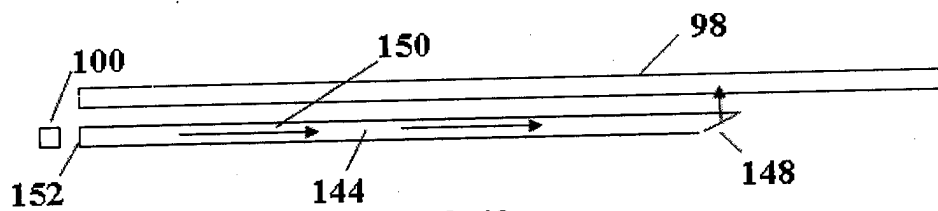


FIG. 10a.

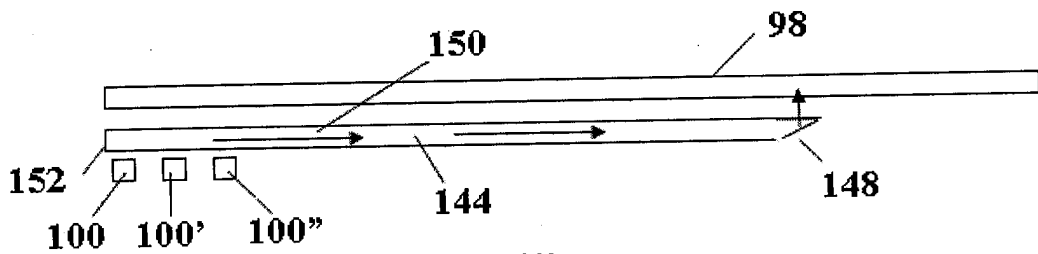


FIG. 10b.

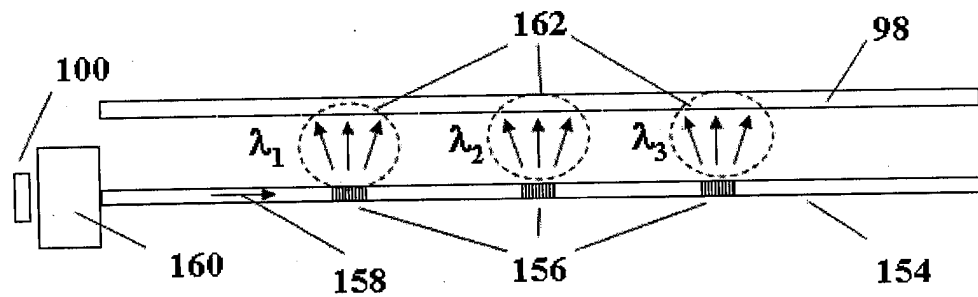


FIG. 11a.

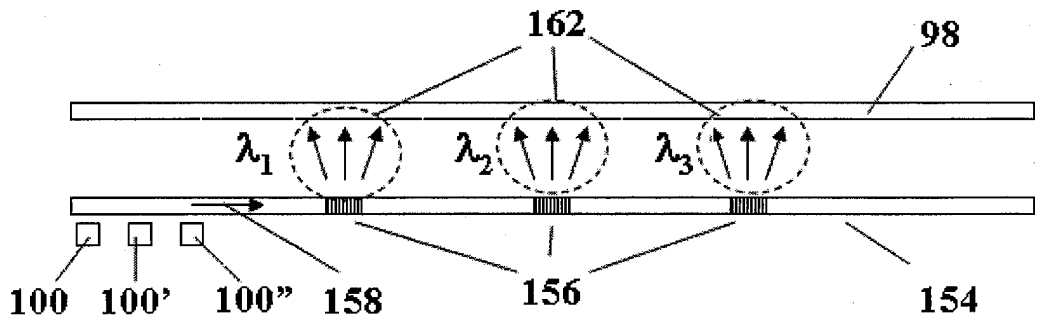


FIG. 11b.

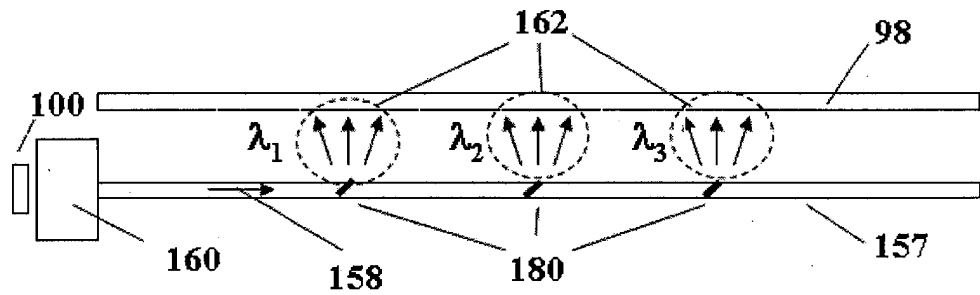


FIG. 12a.

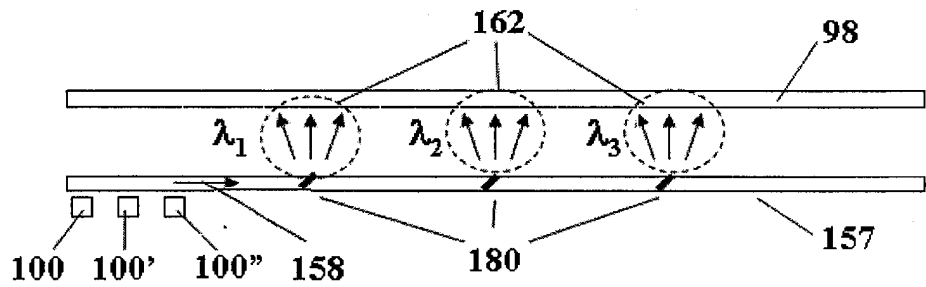


FIG. 12b.

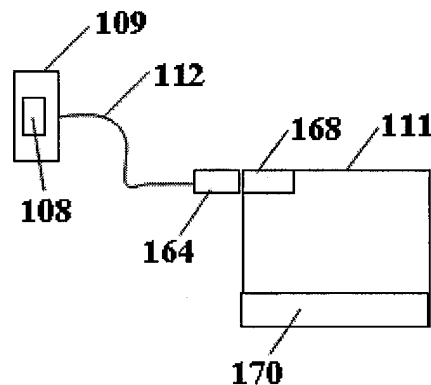


FIG. 13.